

**Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar**

**A TERMÉSZETES RADIOAKTIVITÁS VIZSGÁLATA A
RUDAS-FÜRDŐ TÖRÖK-FORRÁSÁBAN**

TDK DOLGOZAT

Készítette:

FREILER ÁGNES

II. KÖRNYEZETTUDOMÁNY MSc SZAKOS HALLGATÓ

Témavezetők:

DR. HORVÁTH ÁKOS

Atomfizikai Tanszék
Egyetemi docens

DR. ERŐSS ANITA

Tudományos segédmunkatárs
Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék

**Budapest
2010.**

1. Bevezetés és célkitűzés	3
2. Elméleti háttér	4
2.1. Természetes radioaktivitás a környezetben	4
2.2. Radon a környezetben	4
2.3. Modellek a radontartalom eredetére a Gellért-hegy forrásvizekben	6
3. Geológiai háttér	7
3.1. A Budai Termálkarszt földtani fejlődése	7
3.2. A Gellért-hegy és környékének földtana	8
4. A Vizsgált terület bemutatása: A Rudas-fürdő és a Török-forrás	9
5. Mintavétel és a minták leírása (mintaelőkészítés).....	12
5.1. Mintavétel a helyszínen.....	12
5.1.1. A szilárd minták mintavétele.....	12
5.1.2. A víz mintavétele	16
5.2. Mintaelőkészítés a laborban	16
5.2.1. Mintaelőkészítés rádiummeghatározás (RAK), és levegőbe történő exhaláció (LEX) vizsgálathoz	17
5.2.2. Mintaelőkészítés vízbe történő exhaláció (VEX) vizsgálathoz.....	17
5.2.3. Röntgenpordiffrakció (XRD)	19
5.2.4. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM)	19
5.2.5. Röntgenfluoreszcencia-analízis (RFA)	20
6. Vizsgálati módszerek.....	21
6.1. Radiometriai vizsgálatok	21
6.1.1. Kiválminták rádiumaktivitásának vizsgálata	21
6.1.2. A folyadékszintillációs spektroszkópia	23
6.1.3. Kiválminták levegőbe történő radonexhalációjának vizsgálata RAD7 radondetektorral	24
6.2. Anyagvizsgálati módszerek	25
6.2.1. Kiválminták anyagszerkezetének vizsgálata - Röntgendiffrakció	26
6.2.2. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok	28
6.2.3. Röntgenfluoreszcencia-analízis.....	29
7. Mérési eredmények	31
7.1. Radiometriai vizsgálatok eredményei	31
7.1.1. Minták radioaktivitásának eredményei	31
7.1.2. A forrásvíz radontartalma	32
7.1.3. Vízbe történő exhaláció eredményei	33
7.1.4. Levegőbe történő exhaláció eredményei	35
7.2. Anyagvizsgálati módszerek eredményei.....	37
7.2.1. Röntgen pordiffrakciós vizsgálatok eredményei	37
7.2.2. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok eredményei	39
7.2.3. Röntgenfluoreszcencia-analízis eredményei	40
8. Értelmezés és következtetések.....	43
9. Összefoglalás	49
10. Irodalomjegyzék	50

1. Bevezetés és célkitűzés

A Rudas-fürdő Török-forrásának radioaktivitásának vizsgálata már évtizedek óta foglalkoztatja a tudósokat. A Gellért-hegy területén elhelyezkedő forrás a mai napig fontos helyszín a különböző vizsgálatok elvégzéséhez. Több, előzetes vizsgálattal mára bebizonyították, hogy a Diana-Hygieia-forrás után, a Török-forrás vize a legmagasabb radontartalmú forrásvíz a Budai Termálkarszt területén, ami országos viszonylatban is kimagasló (Palotai 2004, Vojnits, 2008, Eröss, 2010).

Eröss Anita, doktori értekezésében (Eröss, 2010) bebizonyította, hogy a Török-forrás medencéjében jelen levő, bakteriális eredetű vasoxi-hidroxid felhalmozódás számottevő rádium rezervoárként viselkedik. Innen a rádium bomlása során biztosítja a magas radontartalmat a forrásvízben.

Munkánk során azt a célt tűztük ki magunk elé, hogy további bizonyítékokat keressünk a radioaktivitás és a vasoxi-hidroxid jelenlétének összefonódására, megvizsgáljuk, hogy milyen fázisokhoz kapcsolódik radioaktivitás, van-e ezen kívül valamilyen más lokális radonforrás is, ami számottevően hozzájárul a víz radontartalmához.

A dolgozat készítése során különböző módszerekkel vizsgáltuk a Török-forrásból származó víz-, és szilárd mintákat. Ezen módszereket két nagy csoportra oszthatók, radiometriai és anyagfizikai vizsgálatokra.

A radiometriai vizsgálatok közül elsőként a forrásvíz radontartalmát vizsgáltuk TriCarb 1000 típusú folyadékszintillációs spektroszkópiával, majd a kiválásminták radonexhalációját határoztuk meg vízbe szintén folyadékszintillációs spektroszkópiával, illetve levegőbe RAD7 radondetektorral. A szilárd minták radonkibocsátó képességének meghatározásával a Török-forrás vizének mért radontartalmának mennyiségi magyarázatát kíséreltük meg. A minták rádiumaktivitását, γ -spektroszkópiával, HPGe detektorral határoztam meg.

Az anyagvizsgálati módszerek közé tartozik a szilárd minták röntgenpordiffrakciós és a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata. Előbbivel a minták fázisösszetételét tudhatjuk meg, utóbbival a kisebb kristályos szemcséket vizsgálhatjuk. A minták radioaktivitása és vastartalma közötti korreláció meghatározása érdekében röntgenfluoreszcencia-analízist végeztünk.

2. Elméleti háttér

2.1. Természetes radioaktivitás a környezetben

Életünk során állandó radioaktív sugárzásnak vagyunk kitéve, amely sugárzás származhat természetes és mesterséges forrásból. A lakosság sugárterhelésének mindössze 15,6%-a származik mesterséges forrásból, ebből 15,3%-ért az orvosi diagnosztika a felelős, a maradék 0,30% a légköri atomfegyver kísérletekből, a csernobili atomkatasztrófából, továbbá a nukleáris energiatermelésből származik (Köteles, 1994).

A lakossági sugárterhelés nagyobb hányada természetes eredetű, ennek egyik fő csoportja a világűrbeli érkező kozmikus sugárzásból adódik. Másik csoportja a földkéregben található természetes eredetű radioaktív anyagok, például az urán és a tórium különböző vegyületeinek sugárzása. Ezek egy 4,5 milliárd évvel ezelőtt történt szupernova robbanásból származnak. Bizonyos elemek elég hosszú felezési idővel rendelkeznek ahhoz, hogy túl tudják élni a Föld fejlődésének különböző szakaszait, így környezetünk már természetes módon tartalmaz radioaktív sugárzást. Még egy összetevőt kell megemlíteni, amely nem más, mint a kozmikus sugárzás hatására kialakuló izotópok, a trícium (^3H) és a radiokarbon (^{14}C) radioaktivitása (<http://ludens.elte.hu/%7Eakos/kt/kfmeresek.html>).

A ránk ható sugárzás állandó és elkerülhetetlen. A lakosságot érintő természetes eredetű háttérsugárzásból eredő effektív dózis egész Földre vonatkoztatott átlagos értéke 2,4 mSv/év.

Mivel évmilliárdok óta éri a Földet és már születésünk óta hat ránk a sugárzás, nem tekintjük veszélyesnek, azonban bizonyos felhalmozódási folyamatok és intenzitásnövekedések okait érdemes vizsgálni és elkerülni. Az emberi egészség védelme érdekében a radioaktivitás vizsgálata nagyon fontos feladat, hiszen a nagymértékű sugárzás káros, főleg rákos és légúti megbetegedésekhez vezethet.

2.2. Radon a környezetben

Több uránizotóp is jelen van a kőzetekben, ilyenek a 235 és 238-as tömegszámú urán. Számunkra a ^{238}U a legjelentősebb, annak is egyik leányeleme, a radon. A radon színtelen szagtalan nemesgáz, a periódusos rendszer VIII. főcsoportjában található, 86-os rendszámmal. Nemesgáz szerkezettel rendelkezik, azaz zárt elektronhéja van, emiatt igen kis mértékben létesít kémiai kötéseket más atomokkal, tehát kémiailag inaktív. A (^{222}Rn) közvetlenül a

rádiumból (^{226}Ra) keletkezik alfa-bomlással. Három izotópja ismert, a radon (^{222}Rn), a toron (^{220}Rn), és az aktínion (^{219}Rn). Az utóbbi két izotóp felezési ideje annyira rövid, hogy környezetvédelmi és közegészségügyi szempontból általában elhanyagolható. A radon (^{222}Rn) felezési ideje 3,82 nap, ez elég hosszú idő ahhoz, hogy a talaj mélyebb rétegeiből, illetve a talajszemcsékből a levegőbe és a vizekbe jusson.

A természetes vizek, a kőzetek, talajok kivétel nélkül radioaktívak kisebb-nagyobb mértékben. Szinte minden esetben tartalmaznak valamilyen mennyiségű (néhány ppb-től sok száz ppm-ig) uránt, tóriumot, rádiumot (az urán földkéregre vonatkozó értéke 2,8 ppm (Taylor és McLean, 1995)).

A levegővel közvetlenül érintkező vizek radioaktivitását elsősorban a vízmolekula egyik hidrogénje helyére épülő trícium izotóp hozza létre, ha a mesterséges szennyeződés lehetőségét kizárjuk. Általában minden 10^{18} -odik hidrogén helyett trícium atom ül a molekulában.

A felszín alatti vizek nem érintkeznek közvetlenül a levegővel, ezért azok aktivitása nem a légkör, hanem a talaj és kőzetek urán-, vagy tórium tartalmának következménye. A radon ezen elemek bomlásterméke, könnyen polarizálható, ezért jól oldódik vízben, ott pedig a radioaktivitás forrásává válik. A vizek radontartalma jól mérhető, ez szinte minden esetben a 1-500 Bq/l tartományba esik. Összehasonlításképpen az EU ajánlása az ivóvíz maximális radontartalmára 100 Bq/l. Sok országban szigorú előírások vannak az ivóvízben levő radon maximális mennyiségére vonatkozóan. Az USA-ban 11 Bq/l az ivóvízbeli radon mennyiségének megengedett felső értéke. Ugyanez a korlát Nagy-Britanniában 100 Bq/l, míg az ivóvizek átlagos radontartalma itt 1 Bq/l (<http://ludens.elte.hu/%7Eakos/kt/kfmeresek.html>).

A radon nemesgáz szerkezete miatt könnyen tud mozogni az egyes talajokban, diffúzióra, migrációra képes és konvektív áramlással is mozog. Ha nagyon mély rétegben keletkezik, kevés az esélye annak, hogy kijut a levegőbe. Mégis mivel migrálni képes a kőzetek repedésein belül eljuthat felsőbb talajrétegekbe is. Innen természetesen a levegőbe is kijuthat és ott további diffúzióra képes. A radon útját a felszín alatt több tényező befolyásolja. Ilyenek a talaj porozitása, meteorológiai tényezők, a geológiai jellemzők. Szerepe van még a talaj szerkezetének, nedvességtartalomnak, nyomás különbségeknek és a hőmérsékletnek is.

2.3. Modellek a radontartalom eredetére a Gellért-hegy forrásvizekben

A Gellért-hegy forrásairól, azok radioaktivitásáról már a régmúltból is találhatunk feljegyzéseket. 1912-ben Weszelszky mutatott rá elsőként a Gellért-hegy forrásainak kiemelkedő rádiumemanációjára. Azóta több szakember is foglalkozott a témával (Weszelszky 1928, 1933, 1937; Baradács et al. 1999, 2002; Kasztovszky et al. 1996; Várhalmi 2004). Ezeket az eredményeket Palotai 2004-ben összegyűjtötte (Palotai, 2004; Palotai et al. 2005), összegezte és értékelte, valamint a radon geológiai forrására modellt dolgozott ki.

Palotai (2004) munkájában a Gellért-hegy összes forrásának radioaktivitására kereste az okokat. „A radon lokálisan, kiemelkedően nagy koncentrációban történő megjelenése feltételezi a kiáramlási zónában egy hatásos, koncentrált radonutánpótlást biztosító radioaktív anyagforrás meglétét. A radonanómália Rudas-fürdői csúcsa miatt ezt az anyagforrást a fürdő környezetében, tehát az áramló víz forrásokba, ill. kutakba érése előtti kiáramlási szakasz zónájában feltételezhetjük. Az anomális terület maximuma a források radontartalma alapján a Török-, Rákóczi-, Gül Baba-források zónájában van (Palotai 2004)”.

Később Fekete József, Vojnits Anna és Eröss Anita (Fekete, 2006; Vojnits, 2008; Eröss, 2010) az ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékén több lehetséges hipotézist állítottak fel. A korábbi adatok időben és térben nem voltak összeegyeztethetőek, valamint az alkalmazott mérési módszerek sem voltak egységesek, azonban 2010-ben Eröss Anita doktori dolgozatában született az első átfogó vizsgálatokon alapuló magyarázat (Eröss, 2010).

Svájcban Gainon és társai (2007) a St. Placidus forrás magas radontartalmára keresték a választ. A radont, a rádiumot és az uránt, mint a felszín alatti vizek természetes nyomjelzőit használták fel és vizsgálták a meteorikus és a mélységi vizek keveredését. Konceptiós modelljük szerint a különböző eredetű és oldott anyag tartalmú vizek keveredési zónájában kiváló vas-mangán-oxi-hidroxidok, rádiumrezervoárként működnek, a forráskilépési hely mögött biztosítják a radon állandó magas koncentrációját a forrásokban.

Már Weszelszky (1933) is a Gellért-hegy körül fakadó források rádiumemanációját arra vezette vissza, hogy „a források vize a maguk szállította és a forrásjáratokban évezredek alatt felhalmozódott rádiumnak köszönhetik rádiumemanációjukat. Palotai és munkatársai (Palotai et al., 2005) is ezt a hipotézist tartották legvalószínűbbnek.

Fekete (2006) pedig a forráskilépéseknél észlelhető mészs-iszap és vas-oxi-hidroxid kiválás rádiumtartalmát vizsgálva jutott hasonló eredményre.

Erőss (2010) átfogó vizsgálatai során a forrásmedencékben fellelhető vasoxi-hidroxid kiválásokat azonosította rádiumrezervoárként, melynek képződésében a baktériumok szerepét mutatta ki.

3. Geológiai háttér

3.1. A Budai Termálkarszt földtani fejlődése

A kutatási terület a Gellért-hegy szűkebb környezete, amely a Budai Termálkarszt rendszer részét képezi.

A Budai Hegység területén előforduló legidősebb kőzetek a triász korú karbonátok, melyek a terület legnagyobb tömegét képviselik (Wein, 1977) melyekre a fedő eocén kőzetek egy késő krétától késő eocénig tartó szárazulati periódus eredményeképpen üledékhézaggal települnek.

A késő eocéntól a kora miocénig a tengeri üledékképződés folyamatosan zajlott. Az első képződmény egy abráziós báziskonglomerátum, melyet a sekélytengeri Szépvölgyi Mészke (késő-eocén) és a selfperemen lerakódott pelágikus Budai Marga (késő-eocén – kora-oligocén) követnek (Wein, 1977).

A terület földtani fejlődését a középső-eocéntól a kora-miocénig egy fontos paleogeográfiai határ, a Budai-vonal határozta meg (Báldi és Nagymarosi, 1976). A nagyjából északkelet – délnyugat-csapású fácieshatártól nyugatra a kora-oligocénben szárazföldi lepusztulás zajlott („infraoligocén denudáció”), míg tőle keletre a (részben) euxin fáciesű Tardi Agyag képződött. A késő-kiscelli transzgresszió már átcsapott a Budai vonalon (Tari et al., 1993), tőle nyugatra a sekélytengeri Hárshegyi Homokkő, míg keletre a mélyvízi Kiscelli Agyag rakódott le (Nagymarosi és Báldiné, 1988).

Az eocén – oligocén képződmények együttes vastagsága maximum 700 m (Báldi 1983). A kora-miocénben lassú kiemelkedés és lepusztulás zajlott. A triász és paleogén képződményeket helyenként pleisztocén – holocén üledékek (folyóvízi kavics és homok, lösz, édesvízi mészkő) fedik.

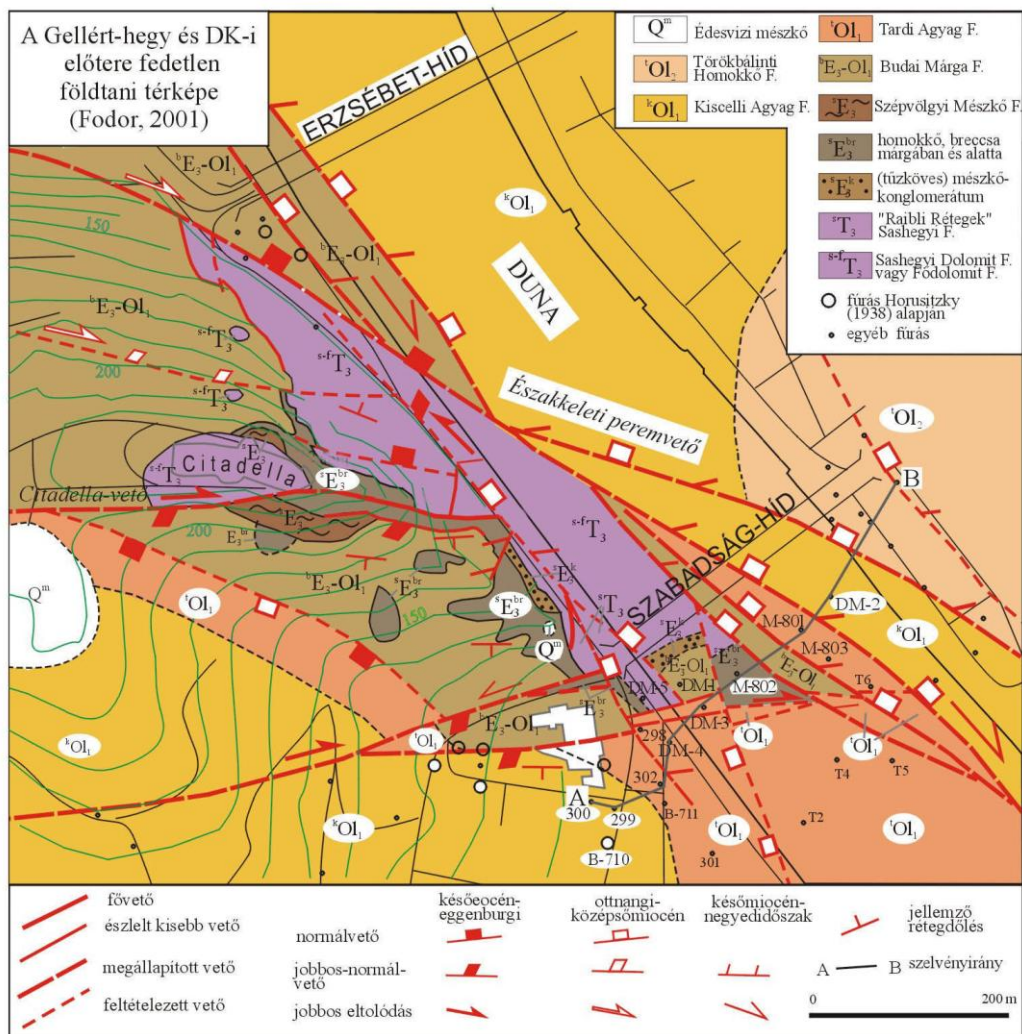
A Budai-hegység szerkezetére a vetős elemek megléte jellemző. Az ÉNy – DK, illetve a K – Ny-i irányok a legjellemzőbbek. A hegység keleti határát egy ilyen jellegű vetőkből összeálló komplex törésvonal alkotja (Wein 1977).

3.2. A Gellért-hegy és környékének földtana

A Gellért-hegy fő tömegét triász dolomit képviseli (Fődolomit Formáció), amelybe helyenként szervesanyag-dús agyagmárga, márga, illetve tűzköves dolomit és mészkő rétegek (Sashegyi tagozat) települnek.

A felső eocén rétegsort konglomerátum, és breccsa, ill. homokkő képviseli (bázisbreccsa). Felfelé ennek márga mátrixa fokozatosan nő, majd típusos Budai Márgába megy át. A tűzkőklasztos homokkő és nummuliteszes mészkő (Szépvölgyi Mészkő Formáció) lencsék is megjelennek. A Budai Márgára mind a felszínen, mind a hegy előterében oligocén Tardi Agyag, majd Kiscelli Agyag rakódott, amit a Törökbálinti Homokkő fed a pesti oldalon. A negyedidőszakot édesvízi mészkő, lösz, lejtőtörmelék és folyóvízi kavics, homok képviseli (1. ábra) (Korpás et al., 2002).

A Gellért-hegyen 3 fő terciér feszültségtér hatása mutatható ki, és valószínűsíthető egy késő triász korú deformáció is. A Gellért-hegy két legfontosabb tektonikai eleme a terciér feszültségterek hatására jött létre. Egy késő eocén – kora oligocén korú ÉÉK-DDNy-i húzás hatására alakult ki a K-Ny-i csapású, jobbos normál elvetésű Citadella-vető, ami a hegy központi részének legnagyobb törése. Az ottngi- középső miocén fázis alatt ÉK-DNy-i húzás hatására mozdult el a Gellért-hegy (és a Budai-hegység) keleti határát adó peremtörés. A normálvető ÉNy-on több ágra szakadva áthalad a Rudas-fürdő területén, majd a Duna alatt haladva a Szabadság-hídtól délre a folyó bal partjára ér (1. ábra) (Korpás et al., 2002). A tulajdonképpeni fővető a Duna medre alatt halad, míg a Gellért-hegy sziklafalát alkotó vető kisebb vetési magasságú (Korpás et al., 2002). A Gellért-hegyi hévforrások feltehetőleg ehhez a vetőzónához kapcsolódnak.



1. ábra. A Gellért-hegy és délkeleti előterének fedetlen földtani térképe (Korpás et al. 2002.)

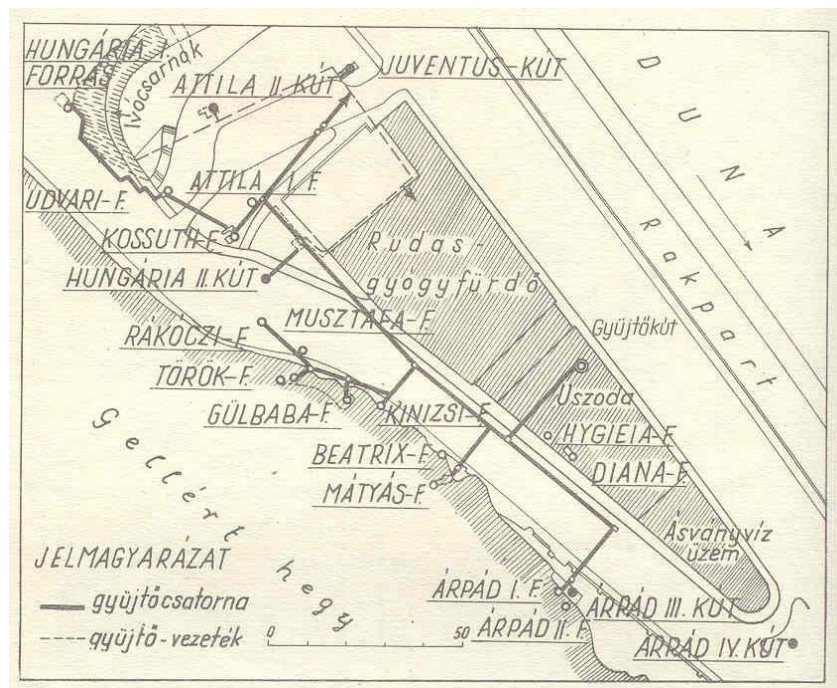
4. A Vizsgált terület bemutatása: A Rudas-fürdő és a Török-forrás

A Gellért-hegy északkeleti oldalán fakadnak a Gellért-hegyi források csoportjának hévforrásai (Papp, 1942). Valamennyi forrás triász dolomitból fakad, a fűrt kutak is általában erre vannak szűrőzve. A források csoportjára három gyógyfürdő települt.

Legészakabbra a Rác-fürdő található, melynek két forrása van, a Nagy-forrás és a Kis-forrás. A legrégebbi a Gellért-fürdő, a harmadik pedig a dolgozat szempontjából is fontos Rudas-fürdő.

A Rudas-fürdő Árpád I.-, Kinizsi-, **Török-**, és Udvari-forrása már régóta ismert. Ide tartozik azonban az Árpád II., a Diana-Hygieia-, a Beatrix-, a Gülbaba-, a Kara Musztafa-, a Rákóczi-, a Kossuth-, a Hídfürdő-, az Attila I. és a Hungária I. – források. 1932-ben fűrták az

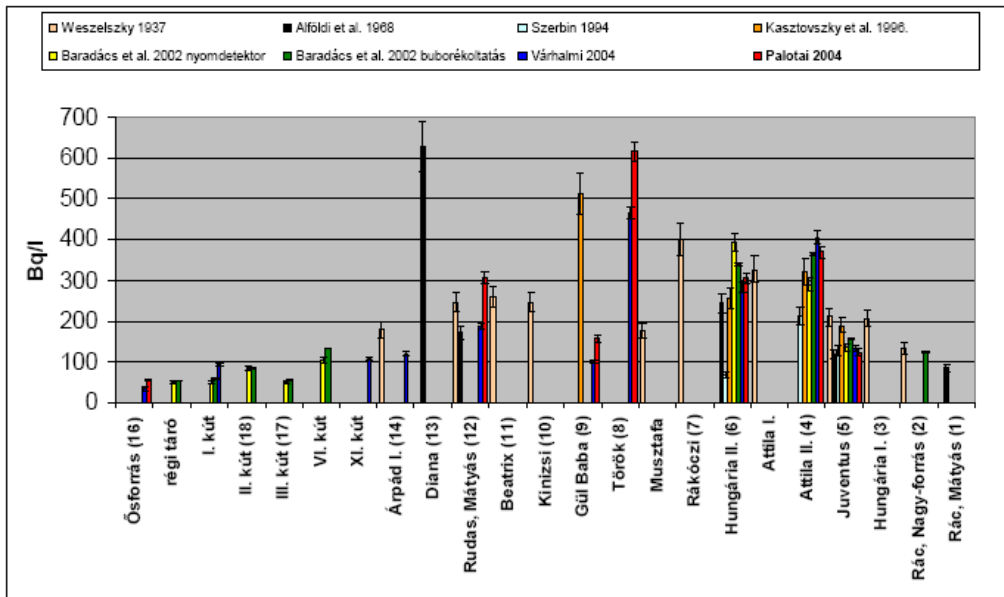
Attila II., Juventus-, a Döbrentei-téri kutakat, 1935-ben a Hungária II., 1940-ben az Árpád III., 1943-ban pedig az Árpád IV. kutakat (Alföldi et al., 1968).



3. ábra. A Rudas-fürdő forrásai (Alföldi et al.1968)

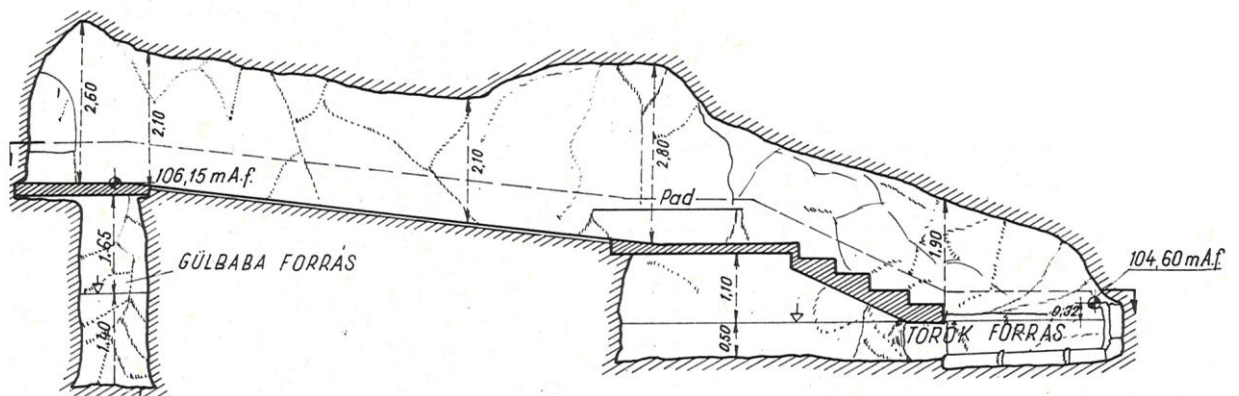
A fürdő forrásai ma már kivétel nélkül foglalva vannak, vizüket csőrendszeren keresztül a Dunába vezetik. A források hőmérséklete között nincs jelentős különbség, 33-48 °C között változik, a vízhozamuk 0-150 l/perc (Alföldi et al, 1968).

Palotai (2004) és munkatársai (Palotai et al., 2005) a Gellért-hegy forrásainak átfogó vizsgálata során megállapították, hogy a Rudas-fürdő környezetében kiemelkedő radonkoncentráció maximumot figyelhetünk meg (ld. 4. ábra). A Gellért-hegy déli részén, a Gellért-fürdő forásaiban 30-100 Bq/l közötti koncentrációk jellemzőek, a legkisebb értéket a déli Ősforrásban mérték. A Rudas-fürdő felé haladva a koncentrációk nőnek, 120 Bq/l-ről akár 600Bq/l-ig is nőhet a radontartalom. Az anomália tehát a Gellért-hegy északi részén található, központja a Rudas-fürdő. Az északnyugati (Rác-fürdő) és a délkeleti (Gellért-fürdő) irányban a mért értékek csökkennek.



4. ábra. A Gellért-hegy forrásainak publikált, mért radontartalma (Palotai 2004).

A Török-forrás a Gellért-hegy Duna felőli oldalán helyezkedik el az Erzsébet-híd és a Szabadság-híd között (3. ábra), a Rudas-fürdővel szemben a Gellért-hegy egy kis barlangjában. A forrást egy vasrácsos ajtón keresztül közelíthetjük meg. Az ajtón belül balra elsőként a Gülbaba-forrás található, majd jobbra egy újabb vasajtón keresztül lépünk be a forrásbarlang területére. Itt, egy nagy légtérű teremben helyezkedik el a forrásmedence. Három lépcsőfokkal lejjebb a medence pereméhez érünk, velünk szemben pedig a régi forrásfoglalást láthatjuk (1. kép). Ez a medence kb. 2 m x 3 m-es és kb. fél méter mélységű, alján egy vascső vezet végig a Török-Rákóczi aknába és onnan tovább egy gyűjtőrendszeren keresztül a Dunába. A Török-Rákóczi akna a Gellért-hegy lába mellett vezető járdán levő aknafedő alatt található (2. kép). Innen lehet eljutni a Török-forrás lépcső mögötti részéhez. A vascső a forrásmedence és az akna között kb. 30°-kal elkanyarodik.



5. ábra. Török-forrás keresztmetszeti képe (Alföldi et al., 1968)



1. kép. Török-forrás forrásmedencéje



2. kép. Török-Rákóczi akna

5. Mintavétel és a minták leírása (mintaelőkészítés)

A mintavételt két ütemben hajtottuk végre, elsőként 2009 nyarán, majd 2010 őszén, témavezetőim segítségével.

A különböző vizsgálati módszerekhez víz- és szilárd mintákat gyűjtöttünk, ezeket mérésenként különbözőképpen készítettük elő és ezeknek külön nevet adtunk.

Az alábbiakban ezeket részletezem.

5.1. Mintavétel a helyszínen

5.1.1. A szilárd minták mintavétele

Elsőként 2009 nyarán öt darab mintát (TAR1, TAR2, TACS3, TAT1, TAB5), majd 2010 őszén szintén öt darab szilárd mintát (TAT2, TAA1, TAA2, TAA3, TAA4) gyűjtöttünk.

Ebből öt (TAR2, TACS3, TAA1, TAA3) a vízszinthez kapcsolódóan a barlang falán, ill. a cső peremén keletkezett szilárd kiválásokat mintázta meg. Ezek vízkőhöz hasonló fehér-sötét lemezeket alkotó, kemény, nagyobb tömegű minták voltak. TAA2 pedig aprószemcsés anyag, mészszip, mely szintén a víz felszíne alól a forrásmedencéből származik.

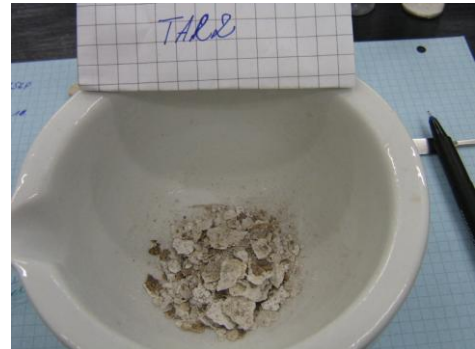
Két minta (TAR1, TAA4) a forrás medencéjének aljzatáról származó puha, szivacsos szerkezetű, vöröses anyag, amely feltételezhetően az Eröss Anita által (Eröss, 2010) leírt és vizsgált biofilm. A minták szárítás után összeestek, darabosak lettek és összeálltak.

Három minta vízfelszíni kiválás két különböző helyről. Kettő (TAT1, TAT2) a forrásmedence, azaz a nagy légterű terem vízeről, másik az akna felé vezető szűk járatban, lassan folyó víz tetejéről származik (TAB5). Ezek vékony, puha rétegben úsztak a víz felszínén.

A minták leírása:

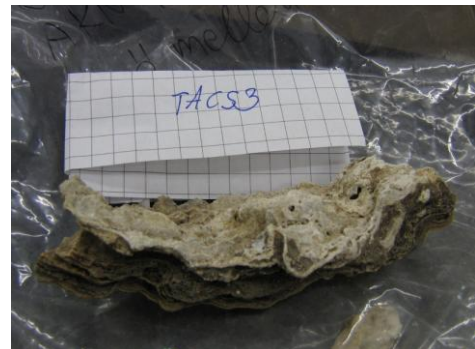
1. TAR1 minta – a Török-Rákóczi aknából származó vöröses, szivacsos szerkezetű anyag, amely szárítás után összeesett, darabossá vált.

2. TAR2 minta – a Török aknából a vascső mellől származó szilárd lemezes kiválás, melyek egy részének cső felőli oldala vöröses, másik oldala fehér, másik részének mind a két oldala fehér (3. kép).



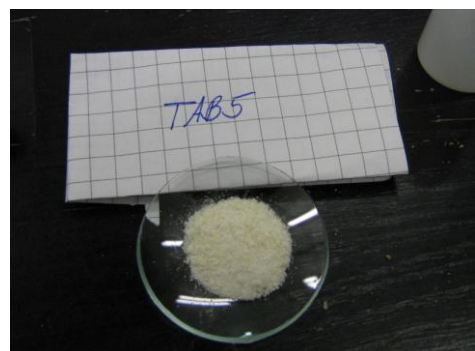
3. kép. TAR2 minta

3. TACS3 minta – a Török aknából a kanyarodó csőről letört minta, több nagy darab, lemezes kiválás, melyben a világos és a sötétebb sávok váltakoznak (4. kép).



4. kép. TACS3 minta

4. TAB5 minta – a Török-Rákóczi aknából leászva, a víz tetejéről származó kiválás, fehér, vékony aprószemcsés minta (5. kép).



5. kép. TAB5 minta

5. TAT1 – a forrásmedence vizének felszínéről származó kiválás, fehér, vékony lemezes

6. TAA1 minta – Török-Rákóczi aknából a cső kanyarodásánál vételezett minta. Az itt 10 cm mély víz aljáról a meder felső néhány cm-ről vett minta, ami néhol vöröses. A mintában találunk TAA2-re és TAA3-ra jellemző részeket, így a kettő közti átmenetnek tekinthető (6. kép).



6. kép. TAA1 minta

7. TAA2 minta – TAA1 alól származó aprószemcsés anyag (mésziszap), ami szárítás után homokszerű lett (7. kép).



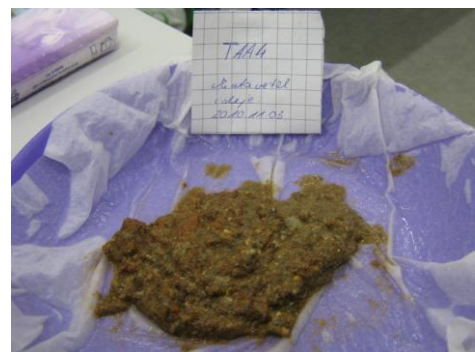
7. kép. TAA2 minta

8. TAA3 minta – a Török-Rákóczi aknában a vascső mellől származó nagyobb darabos, réteges minta, ami TACS3 újramintázása (8. kép).



8. kép. TAA3 minta

9. TAA4 minta – a Török-Rákóczi akna vizének aljzatáról származó vörös, szivacsos szerkezetű anyag, ami TAR1 újramintázása (9. kép).



9. kép. TAA4 minta

10. TAT2 minta – a forrásmedence vizének tetejéről merített, fehér, vékony lemezes kiválás, TAT1 újramintázása (10. kép).



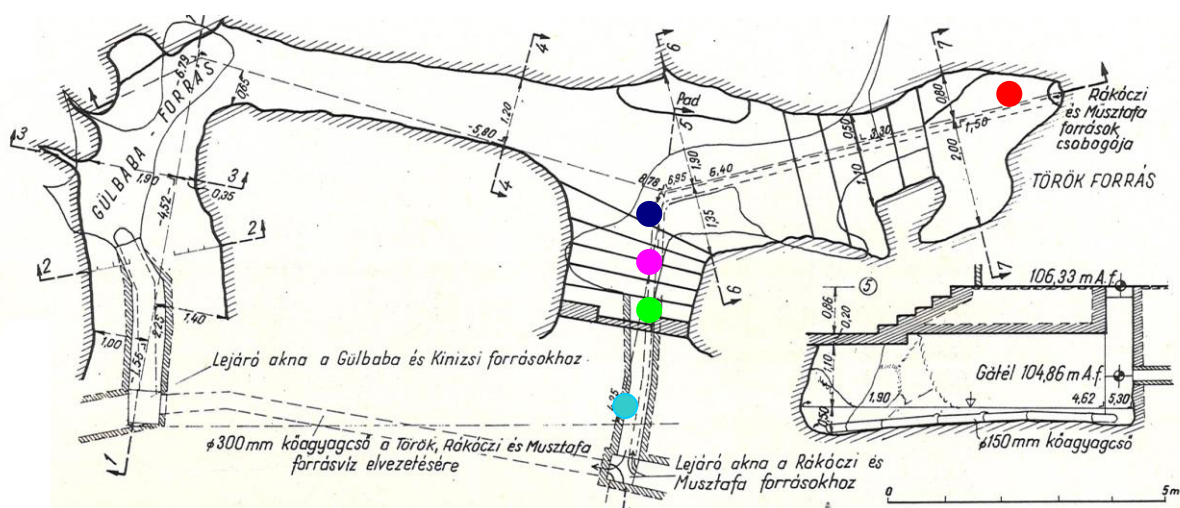
10. kép. TAT2 minta

Összességében elmondható, hogy a szilárd minták négy fő típusba sorolhatók, vízfelszíni kiválás, szivacsos-puha kiválás, lemezes kiválás és a mésziszap kategóriákba.

A 6. ábrán a Török-forrás felülnézeti térképmetszeten színek alapján megjelöltük a mintavételi helyeket, az 1. táblázatban a minták nevét a mintavételi helyhez rendelt színnel jelöltük.

Csoport száma	Csoport neve	Minta neve			
		TAB5	TAT1	TAT2	
1.	Vízfelszíni kiválás	TAB5	TAT1	TAT2	
2.	Szivacsos, puha kiválás	TAR1	TAA4		
3.	Lemezes kiválás	TAR2	TACS3	TAA3	TAA1
4.	Mésziszap	TAA2			

1. táblázat. Szilárd minták osztályozása



6. ábra. Török-forrás felülnézeti metszete (Alföldi. et al., 1968)

A mintavételezést attól függően, hogy milyen típusú és elhelyezkedésű mintáról volt szó, különböző módszerekkel kiviteleztük. A vízfelszíni kiválásokat (1. csoport) merítéssel, a

víz alatti, vagy víz, és valamilyen felszín határán elhelyezkedő mintákat (2., 3., 4. csoport) pedig kézzel merítettük, vagy törtük, majd mintavevő zacskókba helyeztük és feliratoztuk, a laborban szobahőmérsékleten szárítottuk.

5.1.2. A víz mintavétele

A Török-forrásból 2009 nyarán témavezetőim négy alkalommal gyűjtöttek vízmintát, majd 2010 őszén újabb, egy darab vízmintát együtt gyűjtöttünk.

A minták közül négy (TOR1, TOR2, TOR3, TOR4) a Török-forrás forrásmedencéjéből származik, egy (TORA), pedig a Török-Rákóczi aknában elfolyó forrásvízből. Ezeket kb. a víz felszíne alól 20 cm-es mélységből, egy 10 ml-es fecskendő segítségével vételeztük. A vizet egy 20 ml-es küvettába fecskendeztük, ami már tartalmazott 10 ml OptiFluor-O-t, azaz szcintilláló anyagot, amit előzetesen a laborban helyeztünk az edénybe. Ezek után a küvettát gondosan lezártuk, feliratoztuk és parafilmmel körbetekertük, ami a további radonvesztéséget előzi meg.

Minta neve	Mintavétel ideje
TOR1	2009.06.25
TOR2	2009.06.30
TORA	2009.06.30
TOR3	2009.08.19
TOR4	2010.11.03

2. táblázat. A Török-forrásból származó vízminták neve és a mintavétel ideje

5.2. Mintaelőkészítés a laborban

Minta ahogy az a minták leírásából is látható, a minták meglehetősen heterogének voltak, ezért vizsgálatok során végig azt az elvet követtük, hogy a mintáknak lehetőleg ugyan azt, vagy annak kisebb, de azonos fázisokat tartalmazó a részét használjuk fel a különböző mérésekhez.

Folyadékszcintillációval a víz radontartalmát és a szilárd minták vízbe, RAD7 radondetektorral a levegőbe történő radonexhalációt vizsgáltuk. Gamma spektroszkópiával ugyanezen minták rádiumtartalmát határoztuk meg, röntgenpordiffrakcióval a nagy százalékban jelen levő kristályos fázisokat kerestük. Pászátázó elektronmikroszkóppal a

kisebb kristályos szemcsék ásványait vizsgálhattuk, röntgenfluorszecencia-analízissel a mintákban fellelhető további elemekre voltunk kíváncsiak.

5.2.1. Mintaelőkészítés rádiummeghatározás (RAK), és levegőbe történő exhaláció (LEX) vizsgálathoz

A minták közül a TAR1, TAR2, TACS3 és TAB5 minták egyes, ismert tömegű részét bolygatás nélkül, eredeti, de kiszáradt állapotában radonkamrákba helyeztük (3. táblázat). A radonkamra egy henger alakú, alumínium doboz, melynek átmérője 7 cm, magassága 9 cm. Tetején két csap helyezkedik el, mellyen keresztül a kamra levegőjét kivezethetjük, vagy lezárhatjuk. TAA2 mintát szárítás és szitálás után (TAA2SZ), TAA3 mintát pedig kerámia mozsárban történő porítás után (TAA3MT) helyeztük radonkamrába (4. táblázat).

Ezen minták **rádiumtartalmát** és **levegőbe történő exhalációját** határoztuk meg TAA2SZ és TAA3MT kivételével. A két vizsgálatot egzaktnak ugyan azon a mintatömegben végeztük el. TAT1 minta nem került radonkamrába, mert ebből nagyon kis tömeg, kb. 5 g állt rendelkezésünkre.

Minta neve	Minta tömege (g)
TAR1	19,85
TAR2	36,28
TACS3	79,19
TAB5	3,68

3. táblázat. Az alumínium Radon-kamrába, bolygatás nélkül helyezett minta tömege

Minta neve	Minta tömege (g)
TAA2SZ	49,88
TAA3MT	54,55

4. táblázat. A kamrába, előkészítés után helyezett minta tömege

5.2.2. Mintaelőkészítés vízbe történő exhaláció (VEX) vizsgálathoz

A radonkamrából kivett anyagnak (3. táblázat) kisebb, de ismert tömegű részét 20 ml-es küvetába helyeztük majd fecskendő segítségével, csapvízzel csordultig feltöltöttük. A küvetákat lezártuk, parafilmel körbetekertük és feliratoztuk. Ezután a mintákat állni hagytuk három hétig, míg konstans radontartalom alakult ki a vízben.

Vízbe áztatás I.				Vízbe áztatás II.		
Minta neve	Minta tömege (g)	Víz térfogata (V) (ml)	Küvetta térfogata (ml)	Minta neve	Minta tömege (g)	Víz térfogata (V) (cm ³)
TAR1A	9,981	18,3	24	TAR1A/2	9,824	20
TAR2A1	2,189	21,7	24	TAR2A1/2	2,189	21,7
TAR2A2	5,234	21,1	24	TAR2A2/2	5,146	22
TAR2A3	10,03	19	24	TAR2A3/2	9,393	20,5
TACS3A	9,033	19	24	TACS3A/2	11,818	18
TAT1A	0,388	22	24	TAT1A/2	0,3741	24
TAB5A	3,578	21,5	24,5	TAB5A/2	2,567	23,5

5. táblázat. Minták vízbe áztatása I., ill. II.

Az 5. táblázatban látható, hogy TAR2 minta esetén három különböző beáztatott minta készült. Ennek a minta inhomogén felépítése az oka, mert a vékony fehér lemezek közül találhatunk olyat, melynek teteje és alja egyformán fehér, de előfordulnak olyan lemezek is, melyek egyik oldala fehér, másik oldala vöröses. Ez alapján különböztettünk meg három vízbe áztatott mintát, TAR2A1-et, melyben a lemezek mindkét oldala fehér, TAR2A2-t, mely esetén a küvettaiba tettük a teljes mintát reprezentáló összes színes és kevésbé színes lemezkét, valamint TAR2A3-t, ami hasonlít TAR2A2-höz hasonlóan átlagminta, csak a lemezt mozsárban összetörtük porrá, azaz homogenizáltuk.

A maradék négy minta (TAR1, TACS3, TAT1, TAB5) esetén a radonkamrából kivett átlagmintát áztattunk, ami azt jelenti, hogy a legnagyobb daraboktól az apró morzsalékgig mindenféle szemcseméret belekerült a 20 ml-es küvettaiba (5. táblázat. Vízbe áztatás I.).

Három hét áztatás után ezen mintákból 10 ml vizet tús végű fecskendővel levettünk és 10 ml szcintilláló anyag alá fecskendeztük.

Az első mérés után a maradék vizet leöntöttük, a vizsgálatot megismételtük. A vízbe áztatott mintákat leszűrtük, hogy minél kevesebb legyen a veszteség, majd szárítás után újra beáztattuk őket, de már desztillált vízbe. Az 5. táblázat (Vízbe áztatás II.) mutatja a mérendő mintákat, a minták nevének végén szereplő 2-es jelzi, hogy a második ilyenfajta mérésről van szó. A minták ugyan abba a küvettaiba kerültek vissza.



11. kép. Vízbe áztatott minták küvettaiban

Az így előkészített minták **vízbe történő exhalációját** határoztuk meg (5. táblázat).

5.2.3. Röntgenpordiffrakció (XRD)

A röntgen-**pordiffrakciós vizsgálatokat** a korábban vízbe áztatott minták egy részével szárítás és porítás után végeztük. Bizonyos minták esetén (TAR1Ax, TAR2A2x, TAT1Ax) a vízbe áztatott minta teljes tömegét kerámia mozsárban porítottuk, ebből került ki az a pár mg-nyi porminta, melyet alkoholos szuszpenzióval egy üveg hordozólapra kerültek felpreparálásra.

A többi minta esetén (TAR2A1x, TACS3Ax, TAB5Ax) nem a teljes, vízbe áztatás után megmaradt mintát porítottuk, hanem annak csak kisebb részét. Ennek oka, hogy ezekből a mintákból nagyobb tömeg került a küvettába, így bőségesen állt az a rendelkezésünkre.

A minták nevének végén „A” az áztatott minták használatára, „x” a röntgendiffrakciós mérésre utal.

5.2.4. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM)

A **pásztázó elektronmikroszkópos** vizsgálathoz a minták porként (TAR1Ax-S, TAR2A2x-S, TAT1Ax-S), vagy porítás nélkül, kisebb darab szemcsék (TAR2A1-S, TACS3A-S, TAB5A-S) alakjában egyenként, kb. 1,5 cm x 1,5 cm-es alumínium hordozó lapra lettek felragasztva, kb. 0,5 cm széles kétoldali ragasztó segítségével. Az alumínium lapra ragasztott porminta a röntgenmérésből megmaradt anyag kb. µg-nyi része. A porminták átlagmintáknak tekinthetők, hiszen mozsárban való törés és alapos keverés után kerültek az alumínium lapra. A porítás nélkül vizsgált minták a vízbe áztatott anyag részét képezik, ezek kb. fél cm-es darabok.

A vizsgálandó, előzetes porítás nélküli minták kiválasztása során különböző felületi sajátságokat vettünk figyelembe:

- TAR2A1 minta vízbe való áztatásakor csak fehér lemezkéket helyeztünk a küvettákba, azonban egyes lemezek felszínén kb. 1 mm átmérőjű, vörös pöttyök vehetők észre, más lemezek teljesen fehérek. Ez alapján két, egyenként kb. 0,5 cm-es darabból álló mintát készítettünk, TAR2A1p-S és TAR2A1s-S („p” a pöttyös felületre, „s” a sima felületre utal).

- TACS3A mintából is két, egyenként kb. 0,5 cm-es mintát készítettünk elő, TACS3Ab-S, ahol „b” a barna felületre utal, és TACS3f-S, ahol „f” a fehér felületet jelenti.
- TAB5A-S minta kb. 0,5 mm-es, apró darabokból áll.

A porítás nélkül vizsgálendő mintákat vezető tulajdonságú festékekkel körbefestettük.

5.2.5. Röntgenfluoreszcencia-analízis (RFA)

Az áztatást követően porított két mintának 1-1 grammjából pasztillákat készítettünk, (TACS3AP és TAR1AP). Pasztillának egy kb. fél cm magas és fél cm sugarú, henger alakú, polivinilacetát nevű anyaggal összeragasztott és satuban tömörített mintát nevezünk. A gamma-spektroszkópiás és RAD7-es mérés után a radonkamrából kivett TAR2 minta 4-5 grammját kerámia mozsárban porítottuk és 1 grammjából készítettük a TAR2P nevű pasztillát. A TAA3MT mozsárban tört minta és a TAA2SZ szitált minta 1-1 grammjából szintén pasztillát, a TAA3MTP és TAA2SZP nevű mintákat készítettük.



12. kép. RFA-ra előkészített pasztillák

XRD-re előkészített minták		SEM-re előkészített minták			RFA-ra előkészített minták	
teljes VEX-ből maradt mintából	VEX-ből maradt mintának egy részéből	XRD-ből maradt mintából	VEX-hez használt mintából		RAK-hoz használt mintából	VEX-hez használt mintából
TAR1Ax	TAR2A1x	TAT1x-S	TAB5A-S		TAR2P	TACS3AP
TAR2A2x	TACS3Ax	TAR2A2x-S	TACS3Ab-S	TACS3Af-S	TAA3MTP	TARIAP
TAT1Ax	TAB5Ax	TAR1Ax-S	TAR2A1p-S	TAR2A1s-S	TAA2SZP	

6. táblázat. XRD, SEM és RFA vizsgálatokra előkészített minták neve

6. Vizsgálati módszerek

Vizsgálataink során többféle mérési módszert alkalmaztunk. Ezeket két nagy csoportra, a radiometriai és az anyagvizsgálati módszerekre osztjuk.

6.1. Radiometriai vizsgálatok

A Török-forrásból származó mintákon különböző radiometriai vizsgálatokat végeztünk el. Elsőként a minták fajlagos aktivitását vizsgáltuk meg HPGe detektorral, gamma spektroszkópiával, majd meghatároztuk a forrásvíz radontartalmát folyadékszintillációs technikával. A minták fajlagos radonexhalációját levegőbe RAD7 radondetektorral, és vízbe szintén folyadékszintillációs technikával vizsgáltuk.

6.1.1. Kiválásminták rádiumaktivitásának vizsgálata

A HPGe detektor

A gamma spektroszkópiás méréseket GC1520-7500SL típusú HPGe detektorral végeztük. Ez egy nagy tisztaságú germánium félvezető detektort használ. A műszer a gamma fotonok által a detektorban leadott energiát méri, ami leadódhat fotoeffektussal, Compton-szórással és párkeltést követő annihilációs folyamatban keletkezett 511 keV energiájú fotonok megfogásával. A megkötött elektronok mozgási energiája sokszorosa a detektor atomjaiban levő elektronok kötési energiájának, így egy meglökött elektron 10^2 – 10^7 töltéshordozó párt hoz létre leadott energiájával arányosan. A keletkezett töltésmennyiséget határozzuk meg a töltések 10 s alatt történő begyűjtésével. A detektort egy ólom-vas burkolat veszi körül, ami 2-3 ólomrétegből áll, összesen kb. 10-10 cm vastag, valamint a torony belsejében levő vasréteg 1cm körüli. Az ólomréteg kiszűri a környezetből érkező γ -sugárzást, így kiküszöböli a zavaró hatásokat.

A kapott energia spektrumban kb. 100 eV széles, Gauss-görbe alakú csúcsokat detektálunk. A csúcsok alatti terület az adott energiájú gamma-foton anyaelemének aktivitásával arányos.

A mérés menete

A vizsgálathoz a 3. és 4. táblázatban szereplő mintákat használtuk fel, melyeket az 5.2.1. fejezetben leírt módon készítettünk elő.

A minták gamma-spektrózkópiás mérésének célja, hogy megállapítsuk az anyag ^{226}Ra tartalmát. A mérés során a minta gamma-sugárzásának energiaspektrumát általában 16 óra alatt vettük fel. A minta aktivitásának kiszámolásához egy Spill5 nevű program áll rendelkezésünkre, ami a következő képlettel számol:

$$A = \frac{Cs_m / T_m - H / T_h}{\varepsilon\eta} = \frac{I}{\varepsilon\eta} \quad (4)$$

- A - a minta aktivitása
- I - a nettó intenzitás
- ε - a gamma-foton keletkezésének csatornaaránya (valószínűség/bomlás)
- η - az adott energiájú foton fotoeffektussal történő detektálásának hatásfoka
- Cs - a tapasztalt csúcs területe
- H - a háttérben levő csúcsok kiértékeléséből adódó csúcsterület
- T - a mérések idejét jelenti

A háttérrel három napig vettük fel úgy, hogy a minta helye üresen maradt. Ez valójában egy kis szisztematikus hibát okoz, hiszen mikor a mintát mérjük, jelen van a mintatartó alumíniumdoboz és a minta nem rádium atomjai is, ami bizonyos mértékben megváltoztatja a detektoron belüli körülményeket, eltéríti, elnyelheti a fotonokat.

A kiértékeléshez meg kell határozni a hatásfokot, amit Monte Carlo szimulációval számoltuk ki. Ehhez fontos, hogy a geometriai viszonyokat is figyelembe vegyünk, ezek a minta magassága a mintatartóban, a doboz sugara, a minta és a detektor távolsága. Figyelembe kell venni továbbá, hogy milyen energiákon szeretnénk a méréseket elvégezni, a molekulatömegeket, a minta sűrűségét, a molekulák rendszámát és darabszámát.

A módszerrel ^{226}Ra fajlagos aktivitását határoztuk meg Bq/kg egységben a 186 keV-hez tartozó csúcs területéből, ahol 0,0328 relatív intenzitással 3,28 %-os valószínűséggel jelenik meg a rádium, ehhez azonban feltételezzük, hogy a mintákban nincs urán, amiről az 1001 keV-es csúcs vizsgálatával bizonyosodhatunk meg.

6.1.2. A folyadékszintillációs spektroszkópia

Többféle célú mérés esetén alkalmaztuk a vizek radontartalmának meghatározását folyadékszintillációval. A forrásvíz radontartalmát és szilárd anyag vízbe történő radonkibocsátását vizsgáltuk ezzel a módszerrel.

A folyadékszintillációs technika lényege, hogy olyan szcintilláló anyagot használunk, amelynek részecskéi ionizáló sugárzás hatására gerjesztődnek, magasabb energiaszintre lépnek, majd energiájukat egy fényfelvillanás közben, fotonok kibocsátásával veszítik el. Emiatt mindig szükség van egy szcintilláló anyagra, a koktélnak. A koktél egy vízzel nem elegyedő oldat, ezért a küvetében levő folyadék a mintavétel után kétfázisú. A kibocsátott alfa és béta részecskék energiájukat ütközés során a primer szcintilláló anyaggal ütközve átadják. Ettől a többlet energiától aztán a primer szcintillátor felvillanás formájában válik meg.

A mérésekhez TriCarb 1000 típusú folyadékszintillációs spektrométert használtunk. A mintában keletkezett felvillanásokat két koincidenzába kapcsolt, egymással szemben elhelyezett fotoelektron-sokszorozó detektálja. A beérkező impulzusok egy analóg-digital konverter (ADC) bemenetére jutnak, ami megméri az amplitúdókat, szétválasztja magasság szerint, és az ennek megfelelő csatorna számát megnöveli eggyel.

A műszer statisztikát készít a kapott elektromos impulzusok magasság (amplitúdó) adataiból, tehát amplitúdó gyakoriság eloszlást mér. A mérés végén (általában 15 perces méréseket végeztünk) a kapott adatokat kinyomtattuk és mindkét célú mérés esetén exceltáblázat segítségével dolgoztuk fel, értékeltük. Ehhez a

$$c=(CPM-12,1)/1,98 \text{ Bq/l} \quad (1)$$

kalibrációs egyenletet használtuk, amit ismert ^{226}Ra tartalmú vízminták segítségével határoztak meg, ahol CPM a percenként detektált elektromos jel, c a mérés kori koncentráció.

A víz radontartalmának meghatározása esetén az exponenciális bomlástörvény alapján kiszámoltuk a mintavétel kori aktivitáskoncentrációt

$$C_{\text{méréskor}}=C_{\text{mintavételkor}}e^{-\lambda t} \quad (2)$$

összefüggéssel. A vizsgálatot a 2. táblázatban feltüntetett vízmintákon végeztük el.

A vízbe történő radonkibocsátó képesség meghatározását az 5.2.2. fejezetben szereplő 5. táblázatban bemutatott mintákon végeztük el. A vízben kialakult radonkoncentráció meghatározása után az $E = c \cdot V$ összefüggéssel meghatároztuk a vízbe történő exhalációt, majd a tömeggel való osztás után $M = \frac{E}{m}$ összefüggéssel meghatároztuk a fajlagos exhalációt Bq/kg egységben.

6.1.3. Kiválásminták levegőbe történő radonexhalációjának vizsgálata RAD7 radondetektorral

Vizsgálataink során kétféle radonexhaláció mérést végeztünk. A minták levegőbe történő fajlagos radonexhalációját határoztuk meg RAD7 radondetektorral, valamint a 6.1.2. fejezetben leírt módon a vízbe történő fajlagos exhalációkat vizsgáltuk. A két mérés eredményeit összevetve célunk az volt, hogy meghatározzuk, mennyiben lehetnek ezek a kiválásminták a forrásvíz magas radontartalmának számottevő forrásai.

A RAD7 radondetektor

A minták radonkibocsátási képességét laboratóriumi körülmények között radonkamrás vizsgálatokkal végeztük.

A detektor mindkét végéhez cső kapcsolódik, az egyik páralekötőn keresztül, másik közvetlenül a RAD7 detektorhoz csatlakozik. A RAD7 egy hordozható alfa-spektrométer, amivel a radon és a toron aktivitáskoncentrációit mérhetjük. A műszer belső térfogata $0,7 \text{ m}^3$, szilícium szilárdtest félvezető detektort használ, ezzel alakítja át a sugárzás energiáját elektromos jellé. A detektor belseje félgömb alakú, ez be van vonva egy elektromos vezető réteggel, amit magas feszültségre kapcsolva jön létre az elektromos tér a műszer belsejében. Ez az elektromos tér a radon leányelemeit nagy hatékonysággal a detektorra tereli. A detektor az alfa részecskéket detektálja, felerősíti, megszüri a zavaró hatásoktól és rendezi amplitúdó szerint, majd eredményül egy amplitúdó spektrumot ad.

A mérés és kiértékelés menete

A 3. táblázatban szereplő 5.2.1. fejezetben leírt módon előkészített minták zárt körülmények között (radonkamrában) 3 hetet töltöttek, mielőtt a RAD7 detektorral mérni kezdtük volna. Ez a szekuláris egyensúly beállása érdekében fontos, hiszen ennyi idő kell ahhoz, hogy ugyan annyi radon keletkezzen, mint amennyi elbomlik a bezárt légtérben, ez a radon felezési ideje miatt legalább $5 \times 3,8$ nap, ~3 hét.

Minden alkalommal háttérkoncentráció mérést végeztünk, mielőtt a tényleges radonkoncentráció mérést elkezdtük volna az adott radonkamrával. Ez a mérés a RAD7 detektor szippantási üzemmódjában zajlik (sniff), és a ^{218}Po beütéseit számolja. Ezután több órán át mértük a tényleges radonkoncentrációt a kamrában, aminek átlagát excel táblázatban és egyenes illesztéssel is meghatároztuk. Ahhoz, hogy hiteles eredményeket kapjunk, ki kellett számolni az összekötő csövek, a páralekötő, a RAD7 és a kamra térfogatát, ezzel pedig korrigálni a mérési eredményeket, hiszen a RAD7 detektor bekötésekor a radonkamra levegője felhígul. Ezután pedig a:

$$C_{lev} = C_m + (C_m - C_h) * T/V \quad (3)$$

összefüggés felhasználásával megkaptuk a valódi radonkoncentrációt.

- C_{lev} - a kamrában kialakult radontartalom a detektor hozzákapcsolása előtt
- C_m - a műszer által mért eredmény (a radonkoncentráció felhígult)
- C_h - a mért háttérkoncentráció – a detektorban levő levegő radontartalma
- V - a kamra és a minta térfogatának különbsége – a kamrában levő levegő térfogata
- T - a műszer belső,- és a csövek térfogata

Ez után az exhalációt (E) az $E = c_{lev} * V_{det}$ összefüggéssel határoztuk meg. Az exhaláció értékét elosztva a tömeggel, megkaphatjuk a fajlagos exhalációt Bq/kg egységben.

6.2. Anyagvizsgálati módszerek

Munkánk során alkalmazott második nagy méréscsoport az anyagvizsgálati módszerek csoportja. Elsőként röntgendiffrakcióval vizsgáltuk a minták ásványos összetételét.

A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálattal, a sokkal kisebb mennyiségben, kis méretben jelen levő kristályokat tudtuk vizsgálni. Röntgenfluoreszcencia-analízissel a

mintákban levő vas mennyiségét próbáltuk meghatározni, valamint a kisebb mennyiségben megjelenő elemeket kerestük.

6.2.1. Kiválásminták anyagszerkezetének vizsgálata - Röntgendiffrakció

A röntgendiffrakciós vizsgálatokat az ELTE-TTK Anyagfizikai Tanszékén végeztük Gubicza Jenő irányításával.

A röntgenpordiffrakció

Az anyagvizsgálatok során alapvetően két kérdésre keressük a választ, egyrészt, hogy az adott minta milyen elemekből áll, másrészt pedig, arra vagyunk kíváncsiak, hogy ezek milyen kristályrács formájában jelennek meg. Az anyag és a röntgensugárzás kölcsönhatásának vizsgálatával választ kaphatunk a kérdésekre. A fázisanalízis során azt a kölcsönhatást használjuk ki, amely során a röntgensugár a minta fázisainak kristályrácsát felépítő atomok elektronhéján rugalmasan és koherensen szóródik, ezt a kölcsönhatást nevezzük diffrakciónak (Sztrókay et. Al, 1970).

A röntgensugárzás szóródását egy kristályrácsra – leegyszerűsítve - ugyanúgy értelmezhetjük, mint a fényugár szóródását egy optikai rácson.

A kristályrács atomi helyzetei által meghatározott rácssíkok közti távolságot d -vel jelöljük. A párhuzamosan beeső röntgen nyalábok ezeken szóródnak és Θ szög alatt reflektálódnak, így a sugarak interferenciája mérhetővé válik. A párhuzamosan haladó azonos hullámhosszúságú nyalábok interferenciájának feltétele az, hogy közöttük útkülönbség legyen. A mérhető erősítő interferencia létrejöttének feltétele, hogy az útkülönbség a hullámhossz egész számú többszöröse legyen. A beeső és kilépő hullámfrontokon létrejövő teljes útkülönbség nagysága $2d\sin\Theta$, ezért az erősítő interferencia feltétele a

$$2d \cdot \sin \Theta = n \cdot \lambda \quad (6)$$

összefüggéssel írható le, ez a Bragg-egyenlet ami a röntgendiffrakciós fázisanalízis alapösszefüggése. Ahol:

- d – a kristály rácssíkjai közötti távolság
- λ – a röntgensugár hullámhossza
- θ – a szögérték, mely irányban az erősítő interferencia mérhető

A röntgendiffrakciós fázisanalízis lényege az, hogy a mintát alkotó fázisok kristályrácsán megmérjük az interferenciákat irány és nagyság szerint. Az irányokat a Bragg-egyenlet alapján rácscsúcs távolságokra konvertáljuk és az így nyert d -érték - intenzitás adatpárok sorozatát összehasonlítjuk egy adatbázissal, mely ismert standard anyagok hasonló adatait tartalmazza. Amelyik standard adathalmazával a mért adatok a mérési hibahatáron belül megegyeznek, azzal azonosítjuk a vizsgálandó fázist.

Pordiffrakcióról akkor beszélünk, amikor a röntgensugarakkal besugárzott térfogatban nagyszámú, véletlenszerűen orientált kristályszemcse helyezkedik el Gubicza J szóbeli közlése alapján. Ekkor a mintát alkotó fázisok kristályrácsának valamennyi rácscsúcsja interferencia helyzetbe kerül. Ez úgy érjük el, hogy a mintát igen finom porrá ($\sim 1\mu\text{m}$) őröljük. Ekkor a diffrakciós mérés eredményeként kapott diffraktogram intenzitáseloszlása nem változik a minta forgatásakor. A vizsgálat lényege, hogy megmérjük a szórt sugárzás intenzitáseloszlását a mintára történő beesési szög, 2Θ függvényében (Sztrókay et al., 1970)

A kiértékelés menete

A mérést az 5.2.3. fejezetben bemutatott módon előkészített és a 6. táblázatban szereplő mintákon végeztük el, 24 órás mérések során. A mérés eredményeként egy kétoszlopos táblázatot kaptunk, aminek első oszlopában a 2Θ szög helyezkedik el, a második oszlopban az intenzitás értéke a háttérrel együtt. Ebből kirajzoltunk az Origin nevű programmal egy diagramot, aminek eredményeként megkaptuk az adott mintánkhoz tartozó diffraktogramot. Ezután az egér segítségével megállapítottuk az egyes csúcsok elhelyezkedését 2Θ értékben és az intenzitást a háttér levonásával.

A kiértékelést a PCPDFWIN nevű szoftverrel végeztük. A program csak d -érték segítségével tud keresni a hatalmas adatbázisában, ezért a 2Θ szöveget átváltottuk, a $d = \lambda / 2 \sin \Theta$ összefüggés segítségével. A keresést úgy végeztük, hogy a három legmagasabb intenzitású csúcsához tartozó d -értéket beírtuk a programba, minek eredményeképp több lehetséges, úgynevezett kártyát ajánlott az fel. Ezekből kell kikeresni azt az egyet, ami a legjobban illeszkedik a mi mintánkhoz, azaz a kártyán feltüntetett 2Θ értékek egyeznek a diffraktogramunkon szereplő 2Θ értékekkel. Ezt addig kell folytatni, míg a lehető legtöbb csúcsot „lefedtünk”.

5.2.2. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok

A mikroszkópos vizsgálatot az a tény indokolja, hogy a röntgendiffrakciós fázisanalízis csak 0,01 %-nál nagyobb mennyiségben jelen levő fázist mutatja ki, a SEM pedig apró, mikrométeres szemcsék egyedi vizsgálatát teszi lehetővé.

A pásztázó elektronmikroszkóp

A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokat az ELTE-TTK Kőzettani és Geokémiai Tanszékén végeztük Bendő Zsolt irányításával. Ehhez egy EDAX PV 9800 energia diszperzív röntgen-spektrométerrel felszerelt AMRAY 1830 I/T6 típusú pásztázó elektronmikroszkópot használtunk. Az elemzések során 20 kV-os gyorsító feszültséget alkalmaztunk, a primer elektronáram pedig 1-2 nA közötti volt.

Az elektronmikroszkópban 20 keV energiájú elektronnyalábot használunk a tárgyak részleteinek leképzéséhez. A pásztázó elektronmikroszkóp (scanning electron microscope = SEM) az elektronmikroszkópok egyik nagy családja, a transzmissziós elektronmikroszkópok mellett. A nyaláb pontról pontra végigpásztázza a minta felületét, miközben különböző termékek keletkeznek. Ezek a termékek különböző energiájúak és különböző mélységből származnak.

A vizsgálat során töltések jutnak a minta felszínére, amelyek elvezetéséről gondoskodni kell. Ezt szénrel, vagy ritkábban arannyal történő gőzöléssel oldják meg, a mi esetünkben szenes gőzölést használtunk. Ez azért is jobb, mert a szén kevesebb elektront tartalmaz, ezért a röntgenmérésnél kisebb háttérrel eredményez.

A nyaláb által a külső elektronhéjakról kilökött elektronok széles energiaeloszlással, de kis energiával rendelkeznek. Ezek az elektronok tehát csak nagyon kis mélységből származhatnak (~0,1 nm). E miatt a **szekunder elektronok** csak a felület vékony rétegéről hordoznak információt és felületi képalkotásra használhatóak. A kis energia következtében az elektronok összegyűjtése viszonylag egyszerű, a detektor egy pozitív feszültségre kapcsolt rácst használ. Ezzel a képalkotási móddal 3D-s képek készíthetők.

A **visszaszórt elektronok** átlagos energiája általában a nyaláb energiájának fele, emiatt a nagyobb energia miatt összegyűjtésük nehezebb feladat. A visszaszórt elektronok esetén a gerjesztett térfogat nagyobb, mint a nyaláb átmérője, ezért a felbontás kisebb, mint a szekunder elektronok esetén, ugyanakkor a visszaszórt elektronok hozama függ annak az

atomnak a rendszámától, amelyről szóródik. Így a visszaszórt elektron kép Z-kontrasztot mutat (a képen a világos foltok magasabb rendszámra, a sötétebb foltok alacsonyabb rendszámú elemre utal).

A **röntgen-detektorral** az elektronnyaláb becsapódási helyén, az általa kiváltott röntgen-fotonokat detektálhatjuk, amelyek energiája jellemző arra az atomra, amelyből kiváltódott. A kapott spektrum tehát a besugárzott térfogat atomi összetételét tükrözi.

A vizsgálat menete

Az 5.2.4. fejezetben leírt módon előkészített és a 6. táblázatban bemutatott mintákat vizsgáltuk SEM-mel. A mérés kétféle képalkotási módot használtuk, a minták szekunder (SE)-, és visszaszórt (BE) elektron képét vizsgáltuk, valamint a vizsgált terület röntgen spektrumát vettük fel.

Elsőként az elérhető legkisebb nagyítással pásztáztuk a minták felületét, majd növelve a nagyítást a számunkra érdekesnek tűnő fázisok vizsgálatával folytattuk. Mivel általában a vas jelenlétére voltunk kíváncsiak, a mérés során a szekunder elektron képnek azt a tulajdonságát tartottuk szem előtt, hogy a magasabb rendszámú elemek világosabb színnel jelennek meg a képernyőn, tehát ez a terület tartalmazhatja az érdekes fázist.

5.2.3. Röntgenfluoreszcencia-analízis

Röntgenfluoreszcencia-analízissel a mintákban fellelhető vas mennyiségét próbáltuk meghatározni, a kiválás rádiumtartalma és a vas mennyisége közötti korrelációra voltunk kíváncsiak.

A vizsgálandó mintát gamma-fotonokkal besugározva létrejöhet a benne előforduló elemek karakterisztikus röntgensugárzása, ekkor beszélünk RFA-ról. A gerjesztő forrás ²⁴¹Am. A gyűrű alakú forrás gamma-fotonokat kibocsátva fotoeffektussal kilökik a mintát alkotó elemek K, vagy L héjáról az elektronokat, és a legerjesztődés folyamán megjelennek az egyes elemek karakterisztikus röntgen fotonjai, melyek a Si(Li) félvezető detektorban fotoeffektussal az energiával arányos, néhány μ s hosszú impulzusokat hoznak létre. Erősítés után az impulzusokat az amplitúdó analízátor szétválogatja, és gyűjti a beütésszámokat. Az amplitúdó értékhez meghatározható a karakterisztikus röntgen sugárzás energiája, ami az adott elemre jellemző (<http://ludens.elte.hu/%7Eakos/kt/kfmeresek.html>).

A mérés és kiértékelés menete

A vizsgálat során az 5.2.5. fejezetben bemutatott módon előkészített és a 6. táblázatban szereplő pasztillákat az RFA detektorára helyeztük, 3 órás méréseket végeztünk.

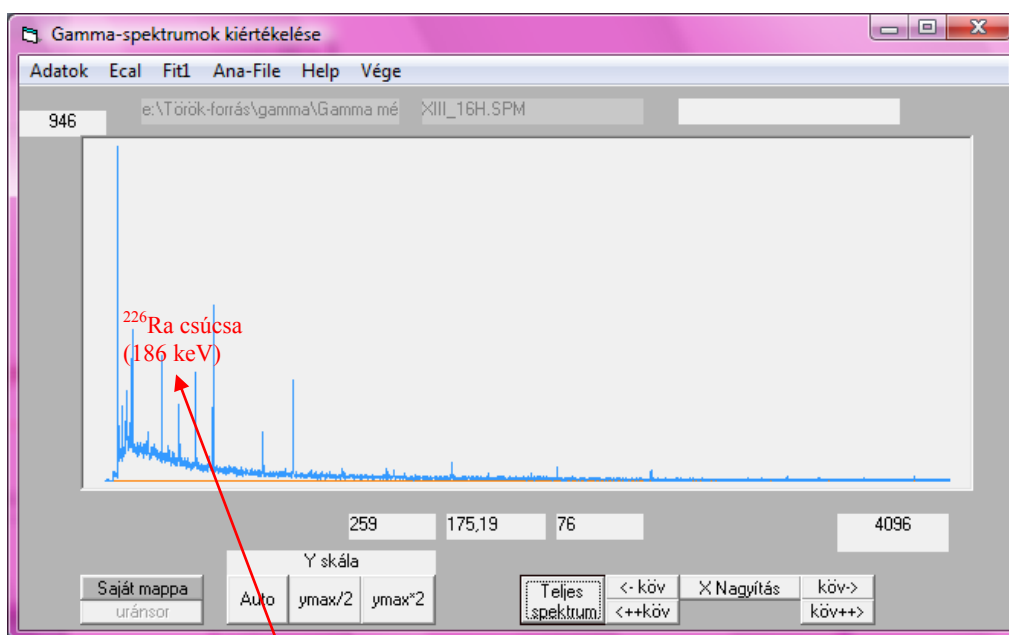
A mérés eredményeként egy röntgen-spektrumot kapunk, melyről leolvasható az egyes csúcsokhoz tartozó energia és terület. A kiértékelést a Spill5 nevű programmal végeztük és a karakterisztikus röntgensugárzások energiatáblázatát használtuk, ami tartalmazza az egyes elemek $K\alpha$ és $K\beta$, valamint $L\alpha$ és $L\beta$ vonalaihoz tartozó energiákat keV-ban.

7. Mérési eredmények

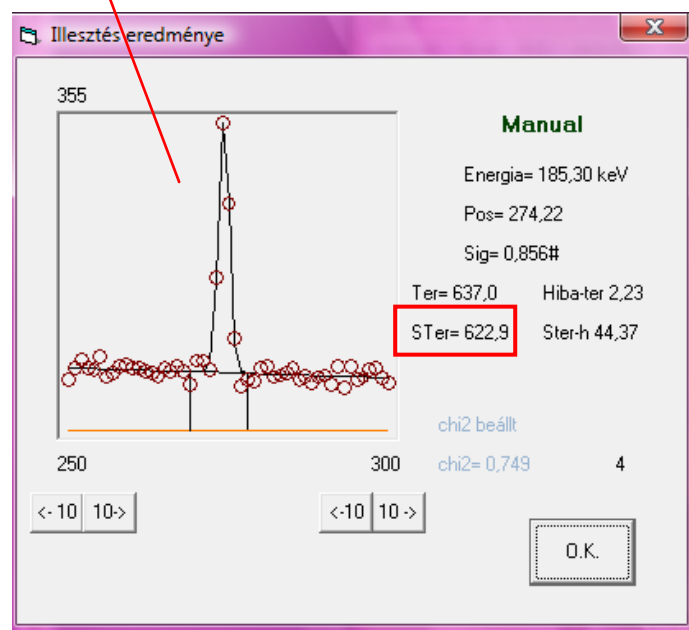
7.1. Radiometriai vizsgálatok eredményei

7.1.1. Minták radioaktivitásának eredményei

Gamma- spektroszkópiás mérésekkel a minta ^{226}Ra -tartalmát határoztuk meg. Példaként a TAB5 minta γ -spektrumát mutatja be a 5. és 6. ábra.



5. ábra. TAB5 minta γ -spektruma



6. ábra. ^{226}Ra csúcsa, és görbe alatti területének meghatározása.

A kiértékelést a 6.1.1. fejezetben leírtak alapján végeztük a Spill5 nevű programmal. E program használatának lépéseit láthatjuk az 5. és 6. ábrákon. Az 5. ábra a TAB5 minta gamma-spektrumát mutatja, a piros nyíl a ^{226}Ra csúcsára mutat. A 6. ábra a rádiumcsúcs alatti terület kiszámolásának lépését mutatja be. Pirossal bekeretezve a szoftver által kiszámolt értéket láthatjuk. A program a spektrumon megjelenő csúcsokra Gauss-görbét illeszt. A görbe alatti terület meghatározásához a legnagyobb beütéshez tartozó csatornától pozitív és negatív irányban 3-3 csatornához tartozó beütéseket összeadja és a háttérrel levonja.

Az így kapott értéket használva számíthatjuk ki a minta aktivitását. A 8. táblázat a minták fajlagos aktivitását mutatja Bq/kg egységben.

Minta neve	STer	Tnettó	Mérési idő (s)	Rel. Gyak.	Hatásfok	Aktivitás (Bq)	Minta tömege (g)	Fajlagos aktivitás (Bq/kg)
TAR2	5156,3	4736,467	57600	0,0328	0,051	48,69	36,28	1342
TAB5	622,9	203,067	57600	0,0328	0,112	0,96	3,68	260,5
TACS3	6961,7	6541,867	57600	0,0328	0,035	99,37	79,19	1254,9
TAR1	3974,5	3554,667	57600	0,0328	0,074	25,47	19,85	1283,4
TAA3MT	3593	3173,17	23713	0,0328	0,0779	52,40	54,55	961
TAA2SZ	1680	1260,17	30070	0,0328	0,0783	16,33	49,88	327

8. táblázat. A minták fajlagos aktivitása

7.1.2. A forrásvíz radontartalma

A 2. táblázatban bemutatott vízminták folyadékszintillációs vizsgálata során a 9. táblázatban feltüntetett eredményeket kaptuk.

Minta neve	Mintavétel ideje	Radonkoncentráció (Bq/l)	Hiba (Bq/l)
TOR1	2009.06.25	621	24
TOR2	2009.06.30	671	22
TORA	2009.06.30	317	22
TOR3	2009.08.19	607	24
TOR4	2010.11.03	570	18

9. táblázat. A Török-forrásból vett vízminták radonkoncentrációja

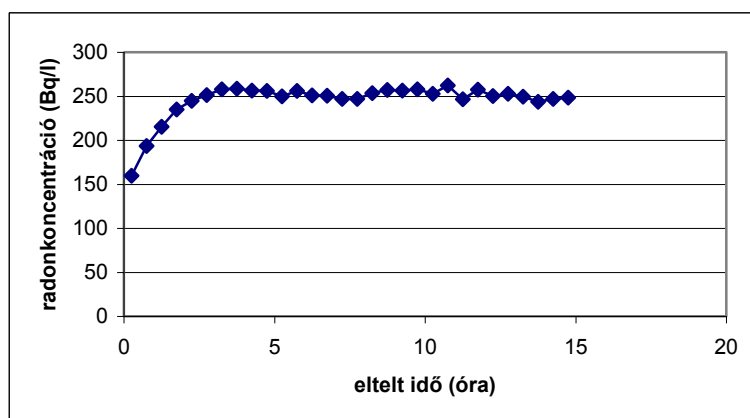
A 9. táblázat 3. és 4. oszlopában feltüntetett értékek átlaga alapján a Török-forrás vizének radontartalma 617 ± 22 Bq/l. Az átlagolás során a TORA minta radonkoncentrációját nem vettük figyelembe, mivel ez nem a forrásmedencéből származik.

7.1.3. Vízbe történő exhaláció eredményei

TAR1A minta körüli vízből előkészített küvetát előkészítése után néhány perccel felrázva a TriCarb műszerbe tettük és 30-szor 30 perces méréseket végeztünk vele.

A radontartalom időfüggését a mintában mutatja a 7. ábra. A felrázás miatt az első fél órában már kb. 150 Bq/l radontartalom volt. Kb. 2 óra múlva eléri a maximális aktivitást. A növekedés oka a 8 MeV-es csúcs intenzitásának lassú emelkedése. Ezután a radon felezési ideje miatt csökken a koncentráció.

Ezzel a vizsgálattal megállapítottuk, hogy a dinamikus egyensúly beálltáig 4 órát kell várunk.



7. ábra. TAR1A minta vízbe történő exhaláció vizsgálata

A többi mintát a dinamikus egyensúly beállta után vizsgáltuk meg, egyenként 15 perces méréseket végeztünk.

Minta neve	Rn- konc – c (Bq/l)	Hiba	Exhaláció $E=c*V$ (Bq)	Fajlagos exhaláció – $M=E/m$ (Bq/kg)	Mérési bizonytalanság (Bq/kg)
TAR1A	268,11	10	4,90	491,55	18
TAR2A1	22,21	5	0,48	220,10	49
TAR2A2	127,32	11	2,7	513,23	44
TAR2A3	184,8	14	3,5	349,97	27
TACS3A	2,15	4	0,0401	4,52	8
TAT1A	10,34	4	0,23	586,14	227
TAB5A	25,28	6	0,54	151,90	36

10. táblázat. A minták vízbe történő fajlagos exhalációja I.

A 10. táblázat első oszlopában a minták nevei láthatók, a második oszlopban a TriCarbbal mért radonkoncentrációk szerepelnek. A harmadik oszlopban ezek mérések hibái, a negyedik oszlopban az $E=cV$ összefüggés alapján számolt exhaláció érték látszik, ahol E – exhaláció, c – a vízben kialakult radonkoncentráció, V – a minta köré töltött víz térfogata. Az ötödik oszlopban a fajlagos exhalációk kapnak helyet, amit az $M=E/m$ összefüggéssel határoztuk meg. A minták vízbe áztatott tömegeit – m – és a víz térfogatát – V - az 5. táblázat tartalmazza.

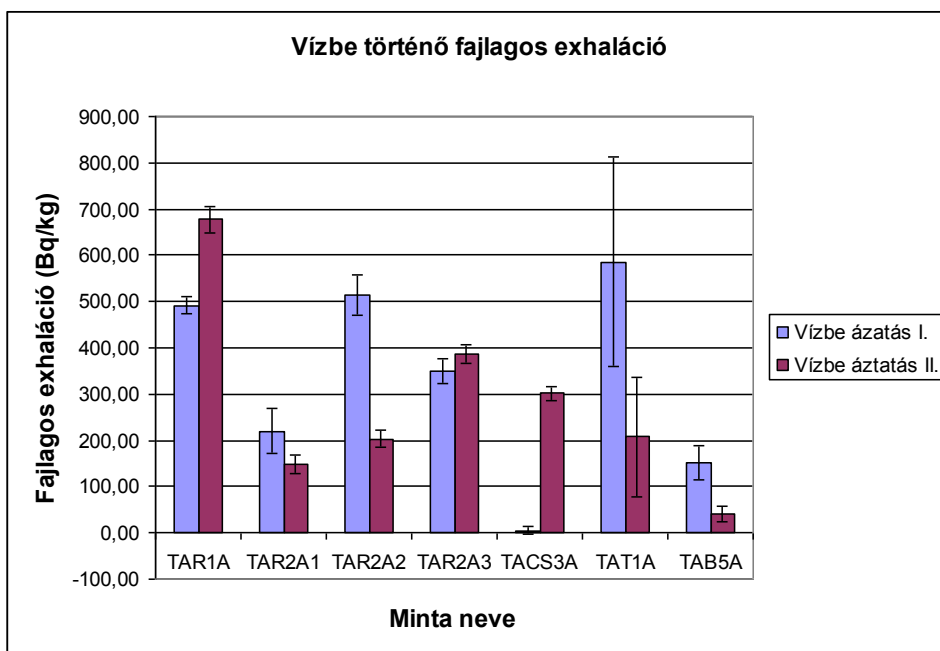
TACS3A esetén az eredmény azért szerepel piros színnel, mert a mérés után észrevettük, hogy a küvetta nyakán egy apró törés van, így valószínűleg a víz radontartalma elpárolgott a három hét alatt, ezért ezt az eredményt nem vettük figyelembe a továbbiakban.

A vízbe történő exhaláció vizsgálatot megismételtük (3. táblázat), is megvizsgáltuk, melynek egyik oka éppen a sérült küvetta volt, hiszen így nem kaptuk valódi eredményt TACS3 minta esetén. Az eredményeket a 11. táblázatban láthatjuk, az áztatott minta tömegét – m – és a minta köré töltött víz térfogatát – V az 5. táblázat tartalmazza.

Minta neve	Rn- konc (Bq/l)	Hiba	Exhaláció $E=c*V$ (Bq)	Fajlagos exhaláció (Bq/kg)	Mérési bizonytalanság (Bq/kg)
TAR1A/2	332,74	14	6,56	677,41	29
TAR2A1/2	15,023	2	0,32	148,88	20
TAR2A2/2	47,605	4	1,047	203,51	17
TAR2A3/2	176,88	9	3,63	386,03	20
TACS3A/2	197,92	10	3,56	301,45	15
TAT1A/2	3,23	2	0,077	207,15	128
TAB5A/2	4,47	2	0,105	40,92	18

11. táblázat. A minták vízbe történő fajlagos exhalációja II.

A 8. ábrán a két exhaláció mérés eredményei láthatók a mérési hibákkal együtt.



8. ábra. Vízbe történő fajlagos exhaláció I. és II.

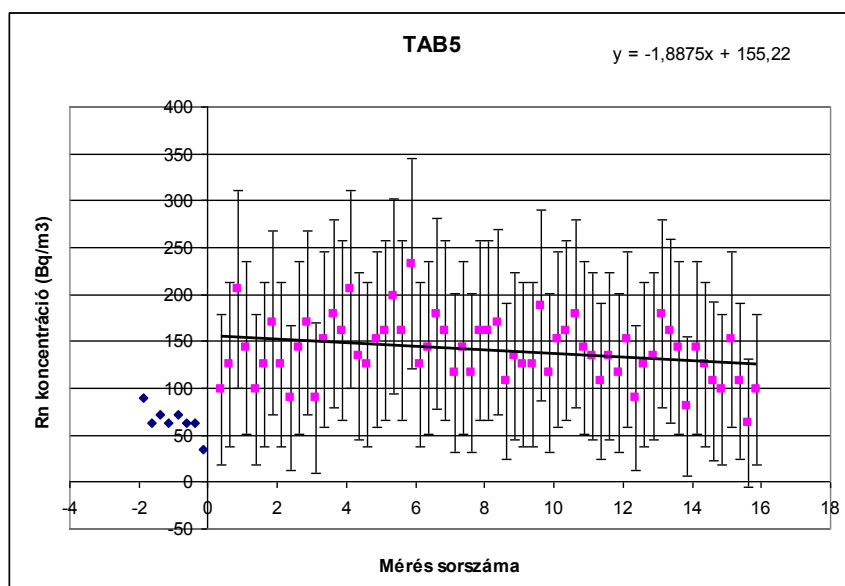
A 12. táblázatban a két mérés eredményeképp kapott fajlagos exhalációértékek átlaga látható mintákra lebontva.

Minta neve	Fajlagos exhaláció átlag (Bq/kg)	Mérési bizonytalanság (Bq/kg)
TAR1A	584,48	23
TAR2A1	184,49	35
TAR2A2	358,37	30
TAR2A3	368	23
TACS3A	301,45	15
TAT1A	396,64	178
TAB5A	96,41	27

12. táblázat. A két vízbe történő fajlagos exhaláció értékek átlaga

7.1.4. Levegőbe történő exhaláció eredményei

Vizsgálataink során négy, a Török-forrás területéről származó minta levegőbe történő exhalációját határoztuk meg radonkamrás méréssel.



9. ábra. TAB5 minta RAD7-es eredménye

Az 9. ábrán példaként a TAB5 minta RAD7-tel mért eredménye látható, a kék pontok a labor légtérben levő radon koncentrációját jelentik (háttér), a rózsaszín pontok pedig a radonkamrában, a minta felett kialakult radonkoncentrációt. Az értékek átlagolása után Excel táblázatban végeztük a kiértékelést a 6.1.3. fejezetben leírtak alapján. Az eredményeket a 13. táblázat mutatja be.

Minta neve	Minta tömege - m (kg)	Fajlagos exhaláció E/m=M (Bq/kg)	Hiba (Bq/kg)
TAR1	0,01985	477,67	20,36
TAR2	0,03628	374,91	16,15
TACS3	0,07919	287,57	12,6
TAB5	0,00368	33,3	7,54

13. táblázat. A levegőbe történő exhaláció eredményei

TAB5 minta exhalációja valószínűleg azért kisebb egy nagyságrenddel a többi mintáénál, mert csak 3 g minta állt rendelkezésünkre, ami igen kis mennyiség, a kamrabeli mintamagasság csak 1 mm volt.

A 14. táblázat az exhalációs együtthatókat mutatja, amit az $M = A \cdot \varepsilon$ összefüggéssel számoltuk (M – fajlagos exhaláció, A – fajlagos aktivitás, ε – exhalációs együttható).

Minta neve	E/m=M (Bq/g)	A (Bq)	ε (%) M=A * ε
TAR1	477,67	1283,35	37,22
TAR2	374,91	1342,03	27,94
TACS3	287,57	1254,88	22,92
TAB5	33,3	260,47	12,78

14. táblázat. Exhalációs együtthatók

7.2. Anyagvizsgálati módszerek eredményei

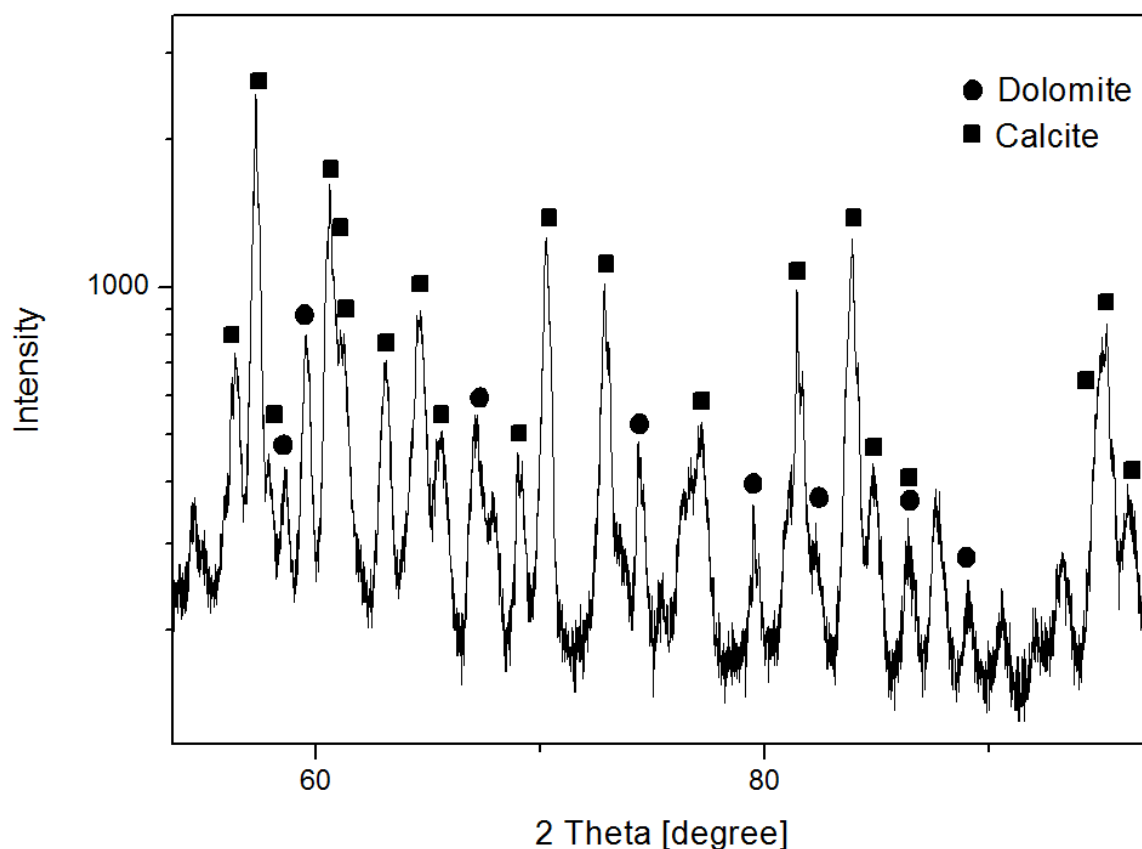
7.2.1. Röntgen pordiffrakciós vizsgálatok eredményei

A röntgen pordiffrakciós mérésekkel a mintákat felépítő különböző fázisokat határoztuk meg.

Minta neve	Mintát felépítő fázis 1.	Felhasadt-e a csúcs	Eltolódott-e a csúcs	Mintát felépítő fázis 2.	Felhasadt-e a csúcs
TAR1Ax	Kalcit	Felhasadt	-	Dolomit	-
TAR2A1x	Kalcit	Felhasadt	-	Aragonit	Felhasadt
TAR2A2x	Kalcit	Felhasadt	-	Aragonit	-
TACS3x	Kalcit	-	Eltolódott	Aragonit	-
TAB5x	Kalcit	Felhasadt	-	-	-

15. táblázat. Röntgen-mérés eredménye

A 15. táblázatban a röntgenpordiffrakciós mérés eredménye látható. Első oszlopban szerepel a minta jele, a második oszlopban az azt felépítő fázisok közül az első. A harmadik és negyedik oszlop a csúcsok felhasadását, vagy eltolódását mutatja. Az ötödik és hatodik oszlopban a második fázis neve szerepel és a fázishoz tartozó csúcsok felhasadása. Felhasadásnak azt a jelenséget nevezzük, amikor a diffraktogramon, az adott szögnél megjelenő csúcs nem egy meghatározott, éles vonallal jelennek meg, hanem több csúcs vehető észre úgymond összeolvadva. Eltolódásról akkor beszélünk, ha az adott fázishoz tartozó összes csúcs megfigyelhető, azonban vagy a pozitív, vagy a negatív irányban eltolva, pár tizedfokkal odébb.



10. ábra. TAR1Ax Rtg-diffraktogramja

Példaként a TAR1Ax minta röntgen diffraktogramját mutatjuk be, ami a 10. ábrán látható. A két fázishoz tartozó csúcsokat megjelölük, a kalcit (Ca) fekete négyzettel, a dolomithoz tartozó csúcsok fekete körrel szerepelnek. A 10. ábrán látható a csúcsok felhasadásának jelensége is, tehát nem egy éles vonal alkotja a csúcsokat, hanem azok felszakadoztak.

A kalcit és az aragonit legnagyobb csúcsainak vizsgálata során megállapítható a két fázis aránya a mintákban. Ehhez a legnagyobb intenzitású csúcsok alatti területet kell meghatározni. Ennek eredménye a 16. táblázatban látható.

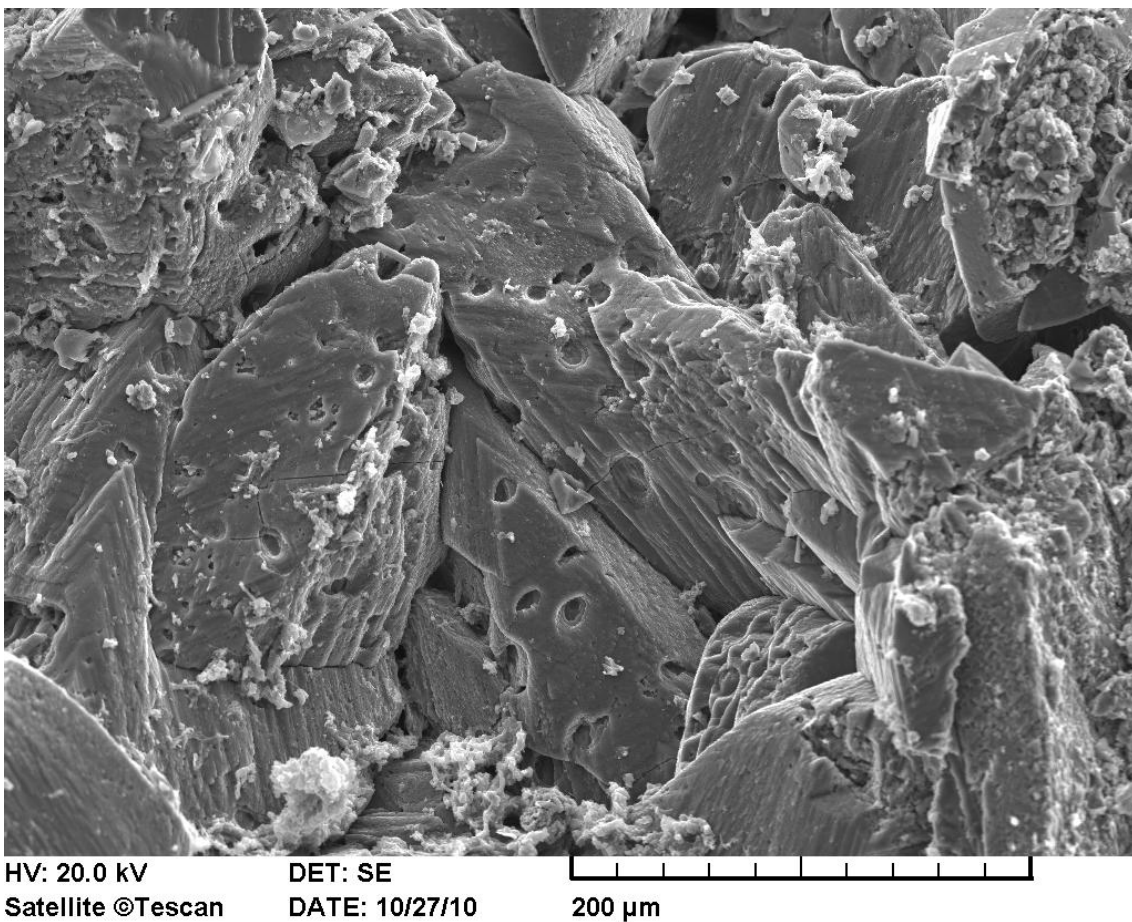
Minta neve	Kalcit 29,43 2 Θ -hoz tartozó csúcs alatti területe	Másik fázis 2 Θ -hoz tartozó csúcs alatti területe	A kettő aránya
TAR1Ax	6800	1730	3,9
TAR2A1x	5570	390	14,3
TAR2A2x	7470	1530	4,9
TACS3x	10200	660	15,5
TAB5x	8860	-	-

16. táblázat. A kalcit és aragonit aránya a mintában

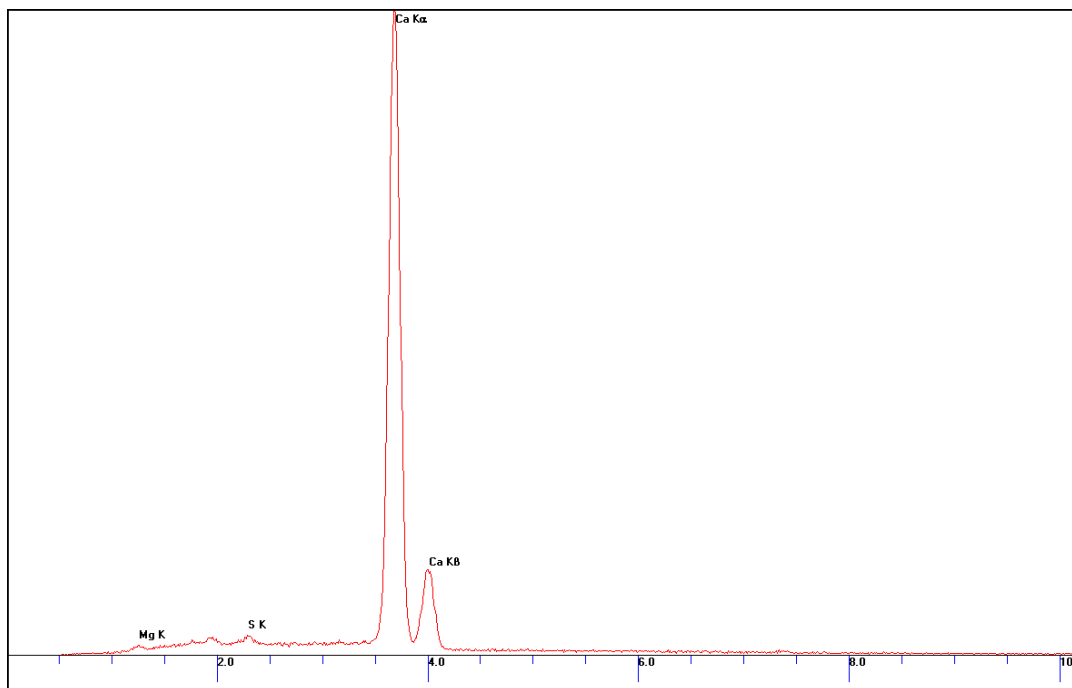
7.2.2. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok eredményei

Összesen 8 mintáról 13 szekunder és 13 visszaszórt elektron képet készítettünk, valamint 27 alkalommal vettük fel a vizsgált területek karakterisztikus röntgen-spektrumát. A nyolc minta vizsgálatában megegyezik, hogy a kalcitra jellemző spektrumot az összes minta esetén megfigyeltük.

Példaként a 11. ábrán látható a TACS3Ab-S szekunder elektron képe, ami az összes mintában, legnagyobb tömegben jelen levő fázist mutatja, a kalcitot. A 12. ábra az erről a területről készített röntgen-spektrumot mutatja.



11. ábra. Kalcit szekunder elektron képe



10. ábra. Kalcit spektruma

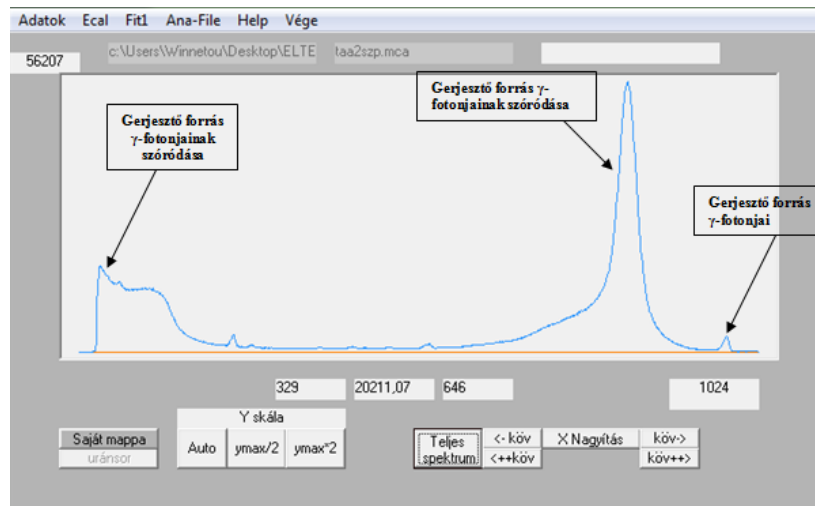
11.

Minta neve	Meghatározott ásványok
TAT1x-S	kalcit, aragonit, pirit, galenit, vasoxid, rutil
TAR2A2x-S	kalcit+Mg, aragonit, vasoxid
TAR1Ax-S	kalcit, aragonit, dolomit, pirit, rutil, barit, vasoxid
TACS3Ab-S	kalcit+Mg+S, aragonit, gipsz, barit, vasoxid, vasoxid+Cr, Mn
TACS3Af-S	kalcit, aragonit, gipsz, barit+Sr, barit, Mg+Ca+Si+Fe+S tartalmú fázis
TAR2A1p-S	kalcit, aragonit, vasoxid+Cu+Si+Mg, kalcit+Zr, vasoxid
TAR2A1s-S	kalcit, aragonit, ilmenit, vasoxid, ilmenit+vasoxid
TAB5A-S	kalcit, aragonit, vasoxid

17. táblázat. SEM során vizsgált fázisok

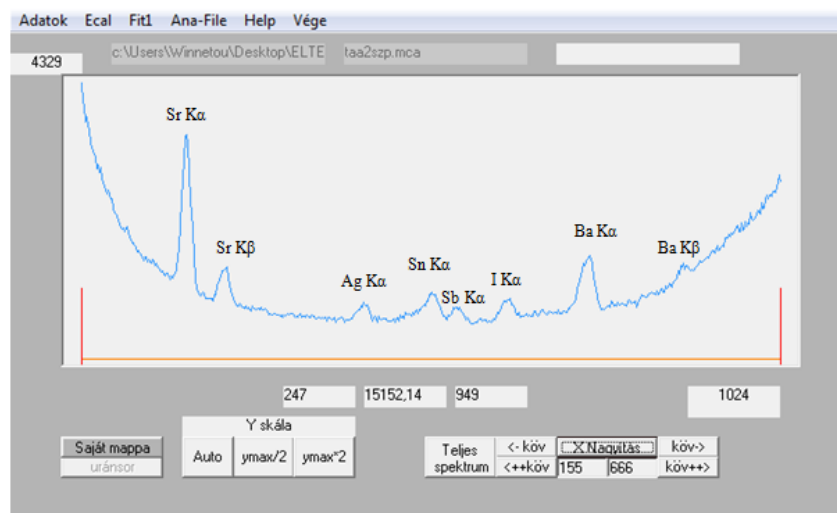
7.2.3. Röntgenfluoreszcencia-analízis eredményei

Az RFA-val végzett mérések során a mintákban legalább százalékos mennyiségben levő elemeket határoztuk meg, az azokra jellemző röntgenvonalak energiája alapján. A mérésre jellemző tipikus RFA-spektrumot a 12. ábra mutatja be. A spektrumon megjelennek a sugárforrásból származó gamma-fotonok, és azok szóródásából származó beütések. Ezeket fekete nyíllal jelöltük. A 400-as csatornától az 500-as csatornáig a sugárforrásból származó elemek vonalai jelennek meg, ezek az Ag, Sn és az Sb.



12. ábra. Tipikus RFA-spektrum

A kiértékelés során készített spektrumra egy példát a 13. ábra mutat be. Az ábrán feltűntettük, hogy az egyes csúcsok melyik elemet jelentik. A spektrum első 150 és utolsó 300 csatornáját „levágtuk”, hogy az érdekes részeket jobban megfigyelhessük.



13. ábra. A mintákra jellemző RFA-spektrum, a csúcsokhoz tartozó elemekkel

A kalcium csúcsa a 3691 eV-es energián jelenik meg a 61-es csatorna körül, így ez nem látható a 13. ábrán.

A mérés során meghatározott elemeket a 18. táblázat tartalmazza.

Minta neve	Meghatározott elemek
TAA2SZP	Ca, Sr, I, Ba
TACS3AP	Ca, Sr, I, Ba
TAR1AP	Ca, Sr, I, Ba, La, Ce
TAR2P	Ca, Sr, I, Ba
TAA3MTP	Ca, Sr, I, Ba

18. táblázat. RFA mérések eredményei

A csúcs alatti területek és ezek arányának megállapítása azért fontos feladat, mert az arányok használatával a különböző mintákban megjelenő elemek mennyisége összehasonlíthatóvá válik. A Ca, Sr és Ba csúcsok alatti területét, és a Sr/Ba, Sr/Ca és Ba/Ca csúcsok alatti területek arányát a 19. táblázat tartalmazza.

Minta neve	Ca	Sr	Ba	Sr/Ba	Sr/Ca	Ba/Ca
TAA2SZP	4541	18842	9699	1,9	4,15	2,1
TAA3MT	4373	34725	12870	2,7	7,9	2,9
TACS3AP	4392	43898	13440	3,2	10	3,1
TAR2P	5936	47401	13937	3,4	7,9	2,35
TAR1AP	4543	17613	93666	0,19	3,9	20,6

19. táblázat. Csúcs alatti terület és a területek arányai

8. Értelmezés és következtetések

A **forrásvíz radontartalom** mérések eredményei alapján megállapítható, hogy a Török-forrás vizének radontartalma **valóban magas**, 610 ± 22 Bq/l, ami országos viszonylatban is kiemelkedő.

Munkánk során a legfontosabb kérdés, amire a választ kerestük, hogy ez az országos viszonylatban is kiemelkedően magas radontartalom honnan származhat. Lehet-e a forrás területén elhelyezkedő, korábbi munkákban már azonosított (Eröss, 2010) lokális radonforrásról beszélni, vagy távolabbi forrásokat is keresnünk kell.

A minták **rádiumaktivitását** gamma-spektroszkópiás vizsgálattal állapítottuk meg, mellyel megtudtuk, hogy a minták rádiumban gazdagok, a rádium különböző folyamatok során elvált az urántól, hiszen az 1001 keV-es energián nem jelent meg az urán csúcsa.

A 8. táblázatban látható bolygatatlan, és a 9. táblázatban látható mozsárban tört és szitált minták vizsgálata alapján TAB5 - az 1. táblázat szerint az 1. csoportba tartozik - fajlagos rádiumaktivitása a legalacsonyabb, 260 Bq/kg. A 2. csoportból csak TAR1-et vizsgáltuk, fajlagos aktivitása 1283 Bq/kg, a 3. csoport átlagos fajlagos aktivitása 1186 Bq/kg, és a 4. csoportba tartozó mézsiszap aktivitása 327 Bq/kg.

Ezek alapján elmondható, hogy a lemezes kiválások (**3. csoport**) és a víz aljzatáról származó vörös, szivacsos szerkezetű anyagok (**2. csoport**) fajlagos rádiumaktivitása kb. egy 5-ös faktorral nagyobb, mint a másik két csoporté, ezért ezek a kiválások nagyobb mértékben járulhatnak hozzá a magas radontartalom kialakításához.

Ezen anyagok szerkezeti felépítését is megvizsgáltuk különböző módszerekkel, mivel kíváncsiak voltunk, hogy a minták milyen kristályos fázisból állnak. Kerestük az Eröss Anita által meghatározott rádiumrezervoárként működő FeOOH jelenlétét, esetleg más olyan kristályos fázis jelenlétét, amihez a rádium kötődhet. Röntgendiffrakcióval a vasoxi-hidroxid nehezen azonosítható, mert a természetben gyakran rosszul kristályosodott formában fordul elő. Azonban, ha más vastartalmú fázisokat azonosítunk pásztázó elektronmikroszkóppal, vagy röntgenfluoreszcencia-analízissel, valamint ezek mennyiségét is meghatározzuk, megbecsülhetjük, hogy milyen mennyiségben szerepel a más vastartalmú fázisok között a vasoxi-hidroxid. Ennek ismeretében megvizsgálhatjuk, hogy a vasoxi-hidroxid és a rádiumtartalom milyen mértékben korrelálnak egymással.

Röntgenpordiffrakciós mérésekkel a legnagyobb mennyiségben megjelenő fázisokat tudtuk azonosítani (15. táblázat).

Elmondható, hogy a legnagyobb mennyiségben előforduló fázisként a CaCO_3 -ot, a kalcitot és az aragonitot azonosítottuk. A CaCO_3 dominanciája nem volt meglepő eredmény, mert a Gellért-hegynél megcsapolódó szabad légtérrel érintkező mélységi vizek CO_2 -ben gazdagok és mikor a felszínre, oxidatív körülmények közé érkezik a CO_2 elillan, a karbonát-egyensúly a karbonátképződés felé billen és kiválik a karbonát.

Három lemezes kiválás, TAR2A1x, TAR2A2x és TACS3x (3. csoport) esetén elmondható, hogy a fő fázis a kalcit, ennél kisebb mennyiségben jelenik meg az aragonit. Ezt a kalcit és aragonit legintenzívebb csúcsainak arányából határoztuk meg. TAB5 vízfelszíni kiválás (1. csoport) esetén csak kalcit van jelen a mintában, valamint a TAR1Ax szivacsos, puha baktériumokkal kevert kiválás (2. csoport) a nagyobb mennyiségben megjelenő kalcitból és kisebb mennyiségben levő dolomitból áll, továbbá a kiértékelés során egy fázist nem sikerült beazonosítani. A dolomit megjelenése azonban szintén nem meglepő, hiszen ez a Gellért-hegy legnagyobb tömegét dolomit képviseli, a barlang is ebben képződött, törmeléke valószínűleg keveredett a mintával. Az azonosított fázisok mintánkénti összevetéséből levonható az a következtetés, hogy a különböző csoportokba sorolt, tehát a különböző mintavételi helyszínekről származó, és morfológiai tulajdonságaikban is különböző minták összetételükben is különböznek.

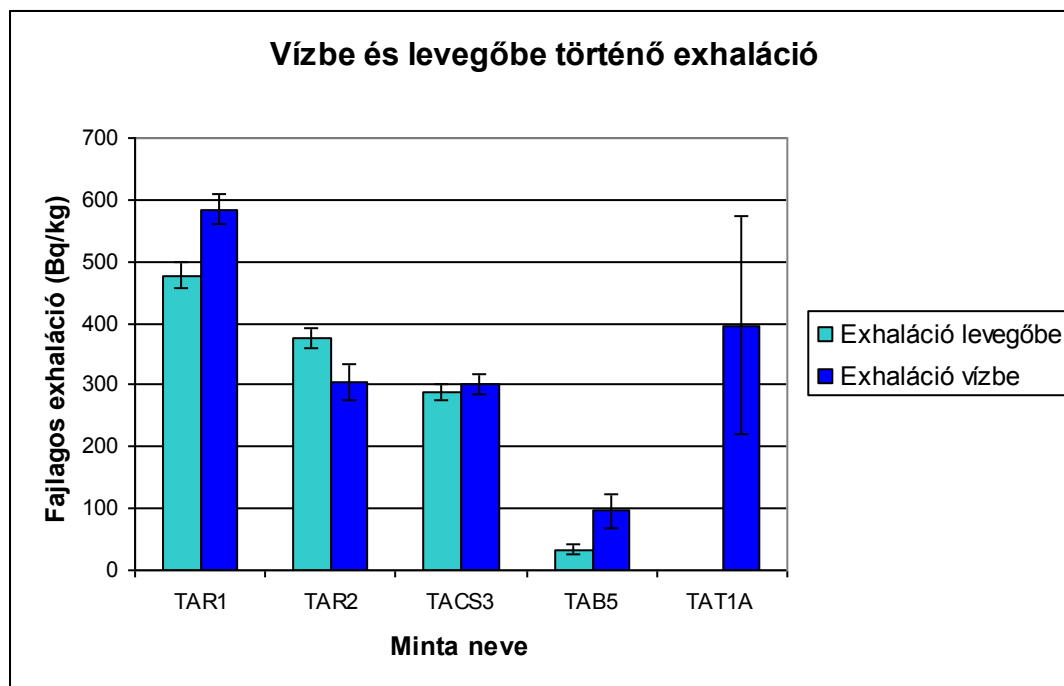
A 15. táblázatban feltüntettük, hogy bizonyos esetekben a kalcit és aragonit csúcsok felhasadnak, vagy eltolódnak, aminek oka valamilyen helyettesítő atom beépülése lehet. A lehetséges beépülő atomok azonosítása érdekében, valamint a vas mennyiségi meghatározásához alkalmaztuk a **röntgenfluoreszcencia-analízist**. A vizsgálat során megállapítottuk, hogy az összes mintában a Ca mellett megjelenik a Sr és a Ba különböző mennyiségben (19. táblázat). TAR1AP esetén azonban Fe-t, Ce-ot és La-t is azonosítottunk. Mivel TAR1AP a vöröses biofilm rétegből származik, az elemek megjelenésének oka lehet, a biofilmben megjelenő vasoxi-hidroxid, ami igen nagymértékben képes a felületén különböző fémeket adszorbeálni az vízből. TAR1AP azért is kitűnik a többi vizsgált minta közül, mert a Ba/Ca arány jóval nagyobb a többihez képest, melynek értelmezése további vizsgálatot igényel.

A további vasvegyületek keresése céljából végeztük el a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatot. Ennek során különböző egyéb ásványokat és vastartalmú ásványokat is találtunk (17. táblázat), mint pl. a pirit.

Megvizsgáltuk az egyes minták radonkibocsátó képességét, vízbe és levegőbe, amivel arra a kérdésre kerestük a választ, hogy ezek a kiválások képesek-e a forrásvízben kialakult

magas radontartalmat biztosítani. A vízbe történő exhalációt két mérés során határoztuk meg, az eredmények átlagát a 12. táblázat tartalmazza. A levegőbe történő exhalációt radonkamrás mérések során vizsgáltuk, az eredmények a 13. táblázatban szerepelnek.

A TAR2A1, TAR2A2 és TAR2A3 vízbe történő exhalációinak eredményeinek átlagát vettük, így hasonlítottuk össze a levegőbe történő fajlagos exhaláció értékkel.



14. ábra. A vízbe és levegőbe történő fajlagos exhalációk összehasonlító diagramja

A 14. ábráról leolvasható, hogy a fajlagos exhaláció értékek TAR2 és TACS3 minták esetén a mérési hibán belül megegyeznek, TAR1 és TAB5 esetén azért lehet eltérés a két érték között, mert TAR1-ből kevesebb, mint 1 g, TAB5-ből pedig kb. 4 g állt rendelkezésünkre, ez okozhatja a mérési bizonytalanságot.

Látható, hogy TAR1 átlagos fajlagos exhalációja ~550 Bq/kg, ami a legmagasabb értéknek számít, azaz elmondható, hogy a forrásmedence aljáról származó vörös, szivacsos szerkezetű anyag szolgáltatja a legtöbb radont a forrásvízbe, amit Eröss Anita (Eröss, 2010) is radonforrásként azonosított.

A radonkoncentráció megbecsléséhez valójában minden esetben a vízbe történő exhalációkat kellene mérni, de ez nehezebben kivitelezhető, mint a levegőbe történő radonkibocsátást vizsgálni. A levegős mérések esetében sokkal nagyobb tömegű mintát tudunk mérni, míg a vízbe történő kibocsátásmérést 20 ml-es küvetával végezzük, ami jelentősen behatárolja a minta mennyiségét. Ez a kevesebb, mint 10 g minta túl kis mennyiség ahhoz, hogy pontos eredményeket kapjunk inhomogén minták esetén.

A fajlagos exhaláció értékek ismeretében, valamint ha feltételezzük, hogy a radon forrása lokális elhelyezkedésű, vagyis az összes radonforrás a forrásmedencében található, az alábbi becsléssel élhetünk:

A fajlagos exhaláció értékekből megbecsülhetjük, hogy a területről származó kiválások milyen mértékben járulnak hozzá a Török-forrás kb. 600 Bq/l-es radonkoncentrációjához, lehetnek-e egyedüli, lokális források, vagy számolnunk kell további forrásokkal is.

Ehhez meg kell becsülnünk a forrásvíz térfogatát és a barlang vízzel érintkező felületét, ahol a kiválások megjelennek. A fajlagos exhaláció értékéből kiszámolhatjuk, hogy ilyen radonkibocsátó képesség mellett mekkora az a maximális aktivitás a vízben, amit a kiválások szolgáltatnak. A víz térfogatát téglalappal közelítjük, és a forrás vizét álló víznek tekintjük, hiszen így az a radont szolgáltató anyagból eredő összes radontartalmat felveheti.

A forrásmedence területén a barlang hosszúsága $a_1=3,5$ m, szélessége $b_1=2$ m, mélysége $c_1=0,5$ m. Az akna hosszúsága $a_2=10$ m, szélessége átlagosan $b_2=1$ m, a víz mélysége $c_2=0,5$ m. Figyelembe kell venni, hogy a medence alján végigfut egy cső, ami szintén kiválások színtere lehet. A cső hossza $m=18$ m, sugara $r=0,075$ m.

A téglatest felületét az $F=(ab+2bc+2ac)$ összefüggéssel határozhatjuk meg. A forrásmedence felülete így $F_1=12,5$ m². Az akna felületét hasonló módon számíthatjuk, $F_2=21$ m². A cső felületét - F_3 - az $F=2\pi r \cdot m$ összefüggéssel határozhatjuk meg, tehát $F_3=8,48$ m².

A barlang falának és a víz érintkezési felületének, valamint a cső felületének összege **$F=41,98$ m²**.

A víz térfogatát hasonló gondolatmenettel, téglatest közelítéssel határozhatjuk meg. V_1 a forrásmedence vizének térfogata, V_2 az aknában folyó víz térfogata, amit a $V_{1,2} = a \cdot b \cdot c$ összefüggéssel számolunk, és V_3 a cső térfogata, a $V_3 = r^2 \cdot \pi \cdot m$ összefüggés alapján. $V_1=3,5$ m³, $V_2=5$ m³, $V_3=0,04$ m³. Ezek alapján a víz térfogata **$V=8,5$ m³**.

A becsléshez a legmagasabb fajlagos exhalációjú mintát vesszük alapul, ami $M=550$ Bq/kg. Mivel tudjuk a víz térfogatát és a radonkoncentrációját, ezért kiszámolhatjuk a teljes aktivitását (A). A kibocsátó anyag fajlagos exhalációjából és megbecsült tömegéből, pedig megkapjuk a forrás teljes radonkibocsátását (E). Ez a kettő egyensúlyban egyenlő $A = cV = E = m \cdot M$ ebből az összefüggésből kiszámolható a forrásanyag teljes tömege (m). Ahol A – a víz teljes aktivitása, V – a víz számolt térfogata, c – a Török-forrás mért

radonkoncentrációja, M – fajlagos exhaláció, m – a forrásanyag tömege. Így a fenti összefüggésből $A=5,1 \cdot 10^6 \text{ Bq}$.

Mivel $A = M \cdot m$, ahol A – aktivitás, M – fajlagos exhaláció, m – a radonforrás anyagának tömege, kiszámolhatjuk, hogy mekkora tömegű anyag alakítja ki a forrásbeli radontartalmat, $m=9270 \text{ kg}$.

Felhasználva, a $\rho = \frac{m}{W}$ összefüggést, ahol ρ – a radonforrás anyagának sűrűsége, m - a radonforrás anyagának tömege, W – a radonforrás anyagának térfogata, kiszámíthatjuk, hogy mekkora térfogatú anyag szolgáltatja a radont a vízbe. A radonforrás anyagának sűrűségét becslésként 3000 kg/m^3 -nek tekintjük (kalcit és aragonit sűrűsége 2800 kg/m^3 körüli), így a $W = \frac{m}{\rho}$ alapján tehát $W=3,09 \text{ m}^3$.

A becslés alapján ez a $W=1,9 \text{ m}^3$ radont szolgáltató anyag a fentiekben kiszámított $F=42\text{m}^2$ -es felületen oszlik el, így ha egyenletes eloszlást feltételezünk, a radont kibocsátó anyagnak $d_1=7,3 \text{ cm}$ -es vastagságban kell jelen lennie a víz és a medence felületének találkozásán.

Ha feltételezzük, hogy a radont kibocsátó anyag nem lokális elhelyezkedésű, hanem a forrás környékén, az alapkőzet repedéshálózatán válik ki, az előző gondolatmenetet követve megbecsülhető, hogy a repedésekben milyen d_2 vastagságú anyagnak kell megjelennie:

$$d = \frac{c}{M \cdot \rho} \cdot \frac{1}{F/V} \quad (7)$$

A (7) összefüggést átrendezve megkapjuk, hogy:

$$d \cdot \frac{F}{V} = \frac{c}{M \cdot \rho} \quad (8)$$

Ahol $\frac{c}{M \cdot \rho}$ a kiválásra jellemző tulajdonság. Feltételezzük, hogy $d_1 \cdot \left(\frac{F}{V}\right)_1 = d_2 \cdot \left(\frac{F}{V}\right)_2$, így

d_2 az alábbi módon határozható meg:

$$d_2 = d_1 \cdot \frac{\left(\frac{F}{V}\right)_1}{\left(\frac{F}{V}\right)_2} = 4,5\text{cm} \cdot \frac{6 \frac{1}{m}}{\frac{2}{h}} = 4,5\text{cm} \cdot \frac{4,5 \frac{1}{m}}{\frac{2}{h}} = 6\text{cm} \cdot \frac{2,25 \frac{1}{m}}{\frac{1}{\text{cm}}} = 4,5 \cdot 0,0255\text{cm} = 0,1\text{cm}$$

A fenti egyenletben d_2 – a radont szolgáltató anyag vastagságát a hasadékban, h – a hasadék szélességét jelenti.

Azaz, az alapközet repedéshálózatában **$h=0,1$ cm**-es vastagságú radont kibocsátó anyagnak kell elhelyezkednie, hogy biztosítsa a magas radonkoncentrációt.

Összességében elmondható, hogy TAR1 minta, a Török-forrás medencéjének aljáról származó szivacsos, puha, vöröses anyag, ami az Eröss Anita által is vizsgált biofilmből származik, melyet doktori dolgozatában (Eröss, 2010) vizsgált, számos tulajdonságával kitűnik a többi minta közül. Rádiumaktivitása és radonexhalációja is egy 5-ös faktorial nagyobb, mint a mésziszapé és a vízfelszíni kiválásé. Röntgendiffrakcióval megállapítható, hogy a legnagyobb mennyiségben megjelenő kristályos fázisa a kalcit, azonban egy nagy intenzitású csúcsot nem sikerült beazonosítani. A röntgenfluoreszcencia-analízis során is kitűnt a többi minta közül, hiszen elemösszetételét tekintve ismeretlen mennyiségben vasat, cériumot és lantánt is tartalmazott. Ennek oka valószínűleg a vasoxi-hidroxid nagy adszorbeáló képessége, mellyel a vízből megköti a benne oldott anyagot.

Tehát alátámasztottuk, hogy a forrásvíz alján található vörös, szivacsos anyag, amit Eröss Anita biofilmként azonosított (Eröss, 2010) doktori disszertációjában, valóban kiemelkedő mértékben szolgáltat radont a forrásvízbe. Azonban egy becsléssel meg is határoztuk, hogy milyen mennyiségben és milyen vastagon kell ennek az anyagnak a medence alján elhelyezkednie.

9. Összefoglalás

Összefoglalva elmondható, hogy munkánk során meghatároztuk a Török-forrás radonkoncentrációját, ami valóban magas és országos viszonylatban is kiemelkedő. Gamma-spektroszkópiás mérésekkel meghatároztuk a Török-forrásból származó szilárd minták rádiumaktivitását, amely a csoportokra osztott mintákon belül különböző értékek adódott, a legmagasabb aktivitású csoport a medence fenekéről származó biofilm.

Anyagvizsgálati módszerekkel megvizsgáltuk a minták felépítését. A röntgenpordiffrakciós fázisanalízissel a legnagyobb mennyiségben jelen levő kalcitot és aragonitot azonosítottuk, valamint egy esetben dolomitot is találtunk, amit valószínűleg az alapkőzet és a minta keveredése okoz. A vizsgálat során észrevettük, hogy a diffrakciós csúcsok felhasadtak, minek oka valamilyen helyettesítő atom beépülése lehet a kristályrácsba. A lehetséges elemeket röntgenfluoreszcencia-analízissel kerestük, minden mintában stronciumot, báriumot, jódot azonosítottunk, valamint TARIAP mintában vasat, cériumot és lantánt is. A vas mennyiségének meghatározását valószínűleg valamilyen alacsonyabb kimutatási határú műszerrel kell elvégezni, amivel a későbbiek folyamán megbecsülhetjük, hogy milyen mennyiségben van jelen a vasoxi-hidroxid a forrás környezetében. A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálattal megbizonyosodtunk róla, hogy a vas más formában is jelen van a kiválásokban, ezért, ha ezek mennyiségét megtudtuk, valóban létjogosultságot kap a további vasmennyiség meghatározás vizsgálat.

Vizsgálataink során meghatároztuk az egyes minták vízbe és levegőbe történő radonexhalációs képességét, amiből egy egyszerű becsléssel kiszámítottuk, hogy ennek a radont szolgáltató anyagnak milyen vastagon kell elhelyezkednie a forrásmedence alján ahhoz, hogy a 600 Bq/l-es radonkoncentrációt biztosítani tudja.

Elmondható, hogy a vöröses biofilm réteg, különböző tulajdonságaival valóban kitűnik a többi szilárd minta közül, valamint, mint radont szolgáltató forrás, valóban kiemelkedő.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőimnek, Horváth Ákosnak és Eröss Anitának a szakmai segítséget, amellyel munkámat végigkísérték, **Horváth Ákosnak** a kitartást és a sokszor éjszakába nyúló konzultációkat. Köszönöm **Eröss Anitának**, hogy az Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék kutatási engedélye jóvoltából hozzájuthattam a mintákhoz.

Köszönöm **Szabó Katának** a gamma-spektroszkópiás mérésekben nyújtott segítségét és a lelki támaszt, a sokszor lelkiekben is kimerítő munka során.

Szeretném kifejezni köszönetemet **Gubicza Jenőnek**, és **Jenei Péternek** a röntgendiffrakciós mérésekben nyújtott óriási segítségükért.

Köszönöm **Bendő Zsoltnak** a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat megvalósítását és a mérés alatt nyújtott hasznos tanácsait.

Köszönettel tartozom **Csorba Ottónak**, hogy bevezetett röntgenfluoreszcencia-analízis alapjaiba.

Nem utolsó sorban köszönet illeti családomat, akik mindvégig támogattak és engedték, hogy legtöbb időmet a dolgozat megírására szánjam, valamint köszönöm **Patriknak** kitartását, türelmét és szeretetét, amely végigkísérte az egész munkát.

10. Irodalomjegyzék

Alföldi L., Bélteky L., Böcker T., Horváth J., Kessler H., Korim K., Oravecz J., Szalontai G. 1968: Budapest hévizei. – Vízgazdálkodási Tudományos Kutatóintézet, Budapest, 365 p.

Báldi T., 1983: Magyarországi oligocén és alsómiocén formációk. – Akadémia Kiadó, Budapest, 292 p.

Báldi, T., Nagymarosy, A., 1976: A hárshégyi homokkő kovásodása és annak hidrotermális eredete. – Földtani Közlöny, 106, pp 257-275.

Eröss A., 2010, Characterization of fluids and evaluation of their effects on karst development at the Rózsadomb and Gellért Hill, Buda Thermal Karst, Hungary. Doktori disszertáció, ELTE, 171p.

Fodor L., Magyar, Á., Fogarasi, A., Palotás, K., 1994: Tercier szerkezetfejlődés és késő paleogén üledékképződés a Budai-hegységben. A Budai-vonal új értelmezése. – Földtani Közlöny, 124/2, pp 19-305.

Gubicza J., Zsoldos L., Röntgendiffrakció. ELTE TTK Anyagfizikai Tanszék. Szilárdtest fizika jegyzet. pp 2-17. (<http://szft.elte.hu/~gubicza/szilfizjegyzet/rontgendiffrakcio.pdf>)

Haas J., 1988: Upper Triassic carbonate platform evolution in the Transdanubian Mid-Mountains. – Acta Geologica Hungarica, vol. 31, no. 3-4, pp 299-312.

Havancsák K., Fizikai mérési módszerek – Mikroszkópia. (<http://szft.elte.hu/oktat/www/fizmermod/tematika.htm>)

Jochané Edelényi E., Tóth Gy., Sasdi L., Rotané Szalkai A. 2002: Karsztvízföldtani vizsgálatok a Magyar Állami Földtani Intézetben. In: Liebe Pal (szerk.): Karsztvízkutatás Magyarországon. I. Felszín alatti vizekért Alapítvány kiadványa, Miskolc, pp. 1-17.

Kázmér M., 1985: Microfacies pattern of the Upper Eocene limestones at Budapest, Hungary – Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis, Sectio Geologica, v. 25, pp. 139-152.

Koch S.; Sztrókay, K. 1994: Ásványtan II. – Nemzeti Tankönyvkiadó. pp. 890-901.

Korpás L., Fodor L., Magyarai Á., Dénes Gy., Oravecz J. 2002: A Gellérthegy földtana, karszt- és szerkezetfejlődése. – Karszt és Barlang, 1998-1999. (2002.) évf. I-II., pp 57-93.

Kovács, J., Müller., P. 1980: A Budai hegyek hévizes barlangjainak fejlődéstörténete. – Karszt és barlang, 1980/II, pp 93-98.

Köteles, Gy., 1994: Radon a környezetünkben, Fizikai szemle, pp 6.

Lovas A.,: Röntgendiffrakciós fázisanalízis gyakorlat mérésleírás – vegyész és környezettudomány szakosoknak

Nagymarosy A., Báldi T., Horváth M. 1986: The Eocene-Oligocene boundary in Hungary. – In: Pomerol, C edit: Thermal Eocene Events, 5 p.

Nagymarosy, A., Báldiné Beke, M. 1988: The position of the Palogene Formations in Hungary. – Ann. Univ. Sci. Eötv. Sect. Geol., 28, 3-25.

Papp, F. 1942: Budapest meleg gyógyforrásai. – A Budapesti Központi Gyógy- és Üdülőhelyi Bizottság kiadványa

Palotai, M. 2004: A Gellért-hegy és a Lukács-fürdő vizeiben mért radon- és rádiumtartalom lehetséges forrásai. – Tudományos Diákköri Dolgozat, ELTE Alkalmazott és Környezetföldtani Tanszék

Resch A., 2009: A gellérthegyi radonanómia vizsgálata. – Diplomamunka, ELTE Atomfizikai Tanszék

Sztrókay K, Grasselly Gy., Nemezc E., Kiss J., 1970: Ásványtani praktikum II. – Tankönyvkiadó , Budapest. pp. 327-367.

Tari, G., Báldi, T., Báldi-Beke, M., 1993: Paleogene flexural basin beneath the Neogene Pannonian Basin: a geodynamic model. – *Tectonophysics*, 226, pp 433-455.

Taylor, S. R., McLean, S. M., 1995: The geochemical evolution of the continental crust. – *Reviews of the geophysics*, pp 33, 241-265.

Tóth, T. 2003: Folyóvízi szeizmikus mérések. – Doktori értekezés, ELTE Geofizikai Tanszék, pp 107-131.

Vojnits A., 2008: A radon eredetének és a felszín alatti vizek keveredésének vizsgálata a Gellért-hegy környezetében. - Diplomamunka, ELTE TTK FFI Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék

Wein, Gy., 1977: A Budai-hegység tektonikája. – A Magyar Állami Földtani Intézet alkalmi kiadványa, Budapest, 76 p.

ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék Környezetfizika Laboratóriumi Gyakorlat, TAU, LEV, NFS mérés leírás, <http://ludens.elte.hu/%7Eakos/kt/kfmeresek.html>