

Miről árulkodnak a természetes radioaktív izotópok a budapesti termáلكarsztrendszerben?

TDK dolgozat



Készítette: Balczó Lili és Bujbácsi Fanni Luca

Témavezetők: Erőss Anita és Horváth Ákos



**Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz - és Földtudományi Intézet
Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék**

Budapest, 2024

Tartalom

1. Bevezetés és célkitűzés	3
2. Elméleti háttér	4
2.1 A radioaktivitás	4
2.2 Urán, rádium és radon a felszínelatti vízáramlási rendszerekben	5
2.3 Egészségügyi vonatkozások	6
3. Kutatási terület bemutatása	7
3.1 Geológiai, hidrogeológiai háttér	7
4. Mintavétel, mérési módszerek	10
4.1 Mintázás menete	10
4.2 Minta előkészítése, mérése	11
4.3 U és Ra-Nucfilm diszkek mérése	12
4.4 A vízminták radontartalmának meghatározása	13
5. Eredmények	14
5.1 Terepi paraméterek jellemzése	14
5.1.1 Hőmérséklet	14
5.1.2 Fajlagos elektromos vezetőképesség	14
5.1.3 Oldott-oxigén tartalom	14
5.1.4 pH	14
5.1.5 Redoxpotenciál	14
5.2 Radionuklidok	15
6. Eredmények értelmezése	15
6.1 Terepi paraméterek	15
7. Méréseink egészségügyi vonatkozásai	20
8. Diskusszió	20
9. Összefoglalás	21
10. Köszönetnyilvánítás	23
11. Felhasznált irodalom	23
12. Melléklet	27
13. Függelék: Saját eredmények bemutatása	30

1. Bevezetés és célkitűzés

A világunkat atomok építik fel, melyek lehetnek eltérő tömegszámúak, ezeket izotópoknak nevezzük. A neutronsám változtatja az atomok tömegszámát, ezáltal az atom fizikai tulajdonságaira is hatással van. Az eltérő tömegszámúak köszönhetően egyes atomok instabil szerkezetűek lesznek, melynek következtében izotópjai egy alacsonyabb energiaszintű, kedvezőbb állapotba alakulnak át bizonyos idő elteltével. Minden ilyen átmenet radioaktív bomlással jár, a változó izotópok pedig radioaktív izotópok.

Ezek a radionuklidok a Földön mindenhol, az atmoszférában, a hidroszférában és a geoszférában is megtalálhatóak, azonban közülük kevés olyan van, amely vízben mobilizálódik. A felszínalatti vizekben leggyakrabban előforduló radioaktív elemeket, a radont, a rádiumot és az uránt a felszínalatti vízáramlási rendszerek vizsgálatára is használják (EISENLORE és SURBECK, 1995; GAINON et al., 2007; HOEHN, 1998; SWARZENSKI, 2007; ERŐSS et al. 2012). Mivel a radon, a rádium és az urán eltérő fizikai és kémiai tulajdonságokkal rendelkeznek, eltérő felszín alatti geokémiai környezetben fordulnak elő az áramlási rendszerekben. Ennek köszönhetően tudjuk használni ezeket az izotópokat a hidrogeológiai kutatásokban, az áramlási rendszerek megértéséhez. Emellett a felszínalatti vizekből származó ivóvizekben előfordulásuk egészségügyi kockázatot is rejt magában (DIHN CHAU et al. 2011). Ennek megértése szintén hidrogeológiai, a felszínalatti vízáramlási rendszerek megértésén alapuló vizsgálatokat igényel (ERŐSS et al. 2018).

A budapesti termálkarsztrendszer természetesen megcsapolódó termálvize hosszú idők óta szolgálja az itt élő embereket. Az ezidáig főleg balneológiai célú hasznosítása mellé a globális változásoknak köszönhetően a hőenergia kinyerése is betársul. A rendszer jobb megismerése és a jövőbeli projektek hatásának értékelése céljából a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága egy átfogó vizsgálatot indított. Kutatásunkkal ebbe a projektbe kapcsolódunk be, melynek során a felszínalatti vizekben leggyakrabban előforduló természetes radioaktív izotópokat, az uránt, a rádiumot és a radont mértük a budapesti termálkarsztrendszer regionális kutatási területéről vett vízmintákból. A Budai termálkarsztrendszerben ezeket a radionuklidokat Erőss és munkatársai (ERŐSS et al., 2012) korábban sikerrel alkalmazták a termálvizek és a keveredési folyamataik jellemzésére. Mintáik azonban elsősorban Budapestről, azon belül is a megcsapolódási zónához, azaz a Dunához közel eső területekről származtak, és nem terjedtek ki a karsztrendszer regionális területére.

A rádium és az urán méréséhez egy hazánkban csak az ELTE-n alkalmazott mérési technikát, szelektíven adszorbeáló diszkeket használó alfa spektroszkópiát alkalmaztunk. A radont folyadékszcintillációs technikával mértük. A kapott eredmények, illetve ezek térbeli eloszlásának megjelenítése információt szolgáltat a budapesti termálkarsztrendszer és az ehhez tartozó utánpótlódási zóna felszínalatti áramlási rendszereinek feltérképezéséhez, összefüggések felismeréséhez.

2. Elméleti háttér

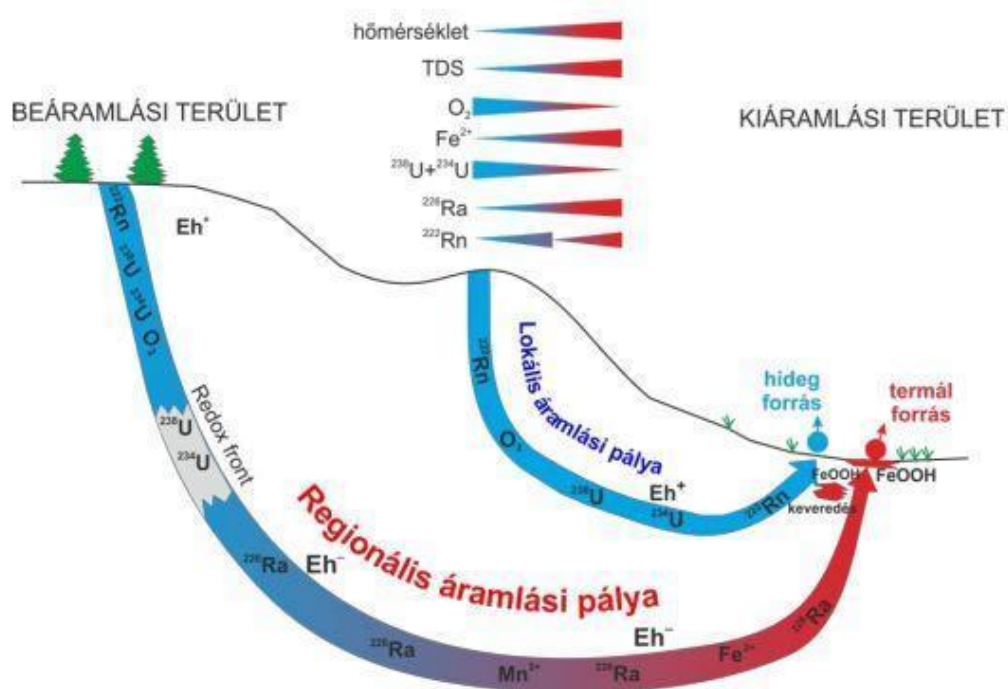
2.1 A radioaktivitás

A természetes radioaktivitás folyamatosan jelen van a környezetünkben, a természetes radioaktív anyagok a Földön mindenhol megtalálhatóak. A radioaktív sugárzásnak két fő komponense van. Az egyik a Föld keletkezése óta jelenlévő, nagyon hosszú felezési idővel rendelkező atomok bomlásából ered, a másik összetevő pedig az űrből érkező kozmikus sugárzás. Ilyen hosszú felezési idejű izotóp a 238-as tömegszámú uránizotóp, melynek felezési ideje 4,5 milliárd év (1. ábra). Ezen instabil izotópok bomlásuk során más radioaktív izotópok keletkeznek, miközben radioaktív sugárzás szabadul fel. Az elbomló elemeket anyaelemnek, a keletkezőket pedig leányelemnek nevezzük. A sugárzásokat többféleképpen csoportosíthatjuk. Az egyik ilyen az ionizáló, illetve a nem-ionizáló sugárzás megkülönböztetése (KÖTELES, 2002). Az ionizálón sugárzó részecskék képesek elektromos töltéssel rendelkező részecskéket leszakítani azokból az anyagokból, amelyekkel kölcsönhatásba lépnek. Ezt a folyamatot nevezzük ionizációnak. Ezen belül az alfa- a béta- és a gamma-sugárzások alkotják a radioaktív sugárzások csoportját. Az alfa-sugárzás erősen ionizáló hatású, azonban rövid hullámhossza miatt hamar elnyelődik, így az emberi szervezetre külső sugárzóként nem veszélyes. A béta-sugárzás energiája, ezáltal ionizációs képessége kisebb, mint az alfa-sugárzásé, azonban hullámhosszából adódóan nagyobb távolságra jut. Ezt használják ki az orvoslásban is bizonyos képalkotó módszerek alkalmazásakor. A gamma-sugárzás áthatolóképesége és terjedési sebessége rendkívül nagy így ez jelenti a legnagyobb veszélyt az élő szervezetekre.

Az instabil, bomló izotópok közül megkülönböztetünk alfa- és bétabomló nuklidokat. Az alfabomlók bomlása során alfa-sugárzás, a bétabomlók bomlása során pedig béta-sugárzás szabadul fel. A méréseink során vizsgált izotópok közül a ^{238}U , a ^{234}U , a ^{226}Ra és a ^{222}Rn is alfabomló izotópok. Az ily módon bomló izotópok koncentrációjának egészségügyi határértékét nemzetközi szabályzatok is leírják a felszíni, illetve a felszínalatti vizek vizsgálata során. Ennek fő célja az egészségügyi hatás nyomon követése és minimalizálása a felszíni ill. felszínalatti vizekből származó ivóvizek esetében (5/2023. (I. 12.) Kormányrendelet).

nagyon jól oldódik (APPLETON, 2013). Szállítódását az uránnal és a rádiummal ellentétben nem a közeg geokémiai tulajdonságai befolyásolják, hanem a kőzetre, talajra jellemző fizikai paraméterek (emanációs ráta, porozitás, permeabilitás, pórusvíz mennyisége, repedések jelenléte) (APPLETON, 2013; HOEHN 1998).

Másik érdekessége, hogy többféle módon is bekerülhet a felszínalatti vizekbe. Egyrészt a talaj mállása során képződő vas- és mangán-oxihidroxidok sokféle elemet képesek megkötni, köztük a rádiumot is. A víz beszivárgása során tovább szállítja az áramlási pályákon a rádium bomlásával a pórustérbe kerülő radont. A radont rövid felezési ideje (3,8 nap) miatt azonban leginkább lokális rendszerekben találjuk, hiszen a legtöbb áramlás lassú, így nincs lehetősége messzebb eljutni (2. ábra). Kivételt képeznek ez alól a karsztterületek, ahol a gyors áramlás miatt a radon nagy távolságokat is képes megtenni (EISENLOHR és SURBECK, 1995). Másrészt az intermedier és regionális áramlási pályák megcsapolódási zónáiban történő geokémiai változások karbonát, vas- és mangán-oxihidroxidok kiválásához vezetnek (2. ábra). Ezek jó adszorpciós tulajdonságuk révén megkötik a rádiumot, amely bomlása során radon felhalmozódását eredményezi. Ilyen jelenség megy végbe a Gellért-hegy környéki termálforrásoknál is (ERŐSS, 2010; ERŐSS et al., 2012; KOVÁCS-BODOR et al., 2018, 2019).



2. ábra: A radionuklidok előfordulása a felszínalatti vízáramlási rendszerekben (forrás: Erőss et al. 2021)

2.3 Egészségügyi vonatkozások

A felszínalatti vizeknek számos felhasználási formáját ismerjük, többek között ivóvízellátásunk, termálfürdőink működésének alapjául szolgálnak. Az emberi fogyasztás és érintkezés miatt nem elhanyagolható az egészségügyi szempont, melyre ezek a bomló radionuklidok nagy hatást gyakorolhatnak.

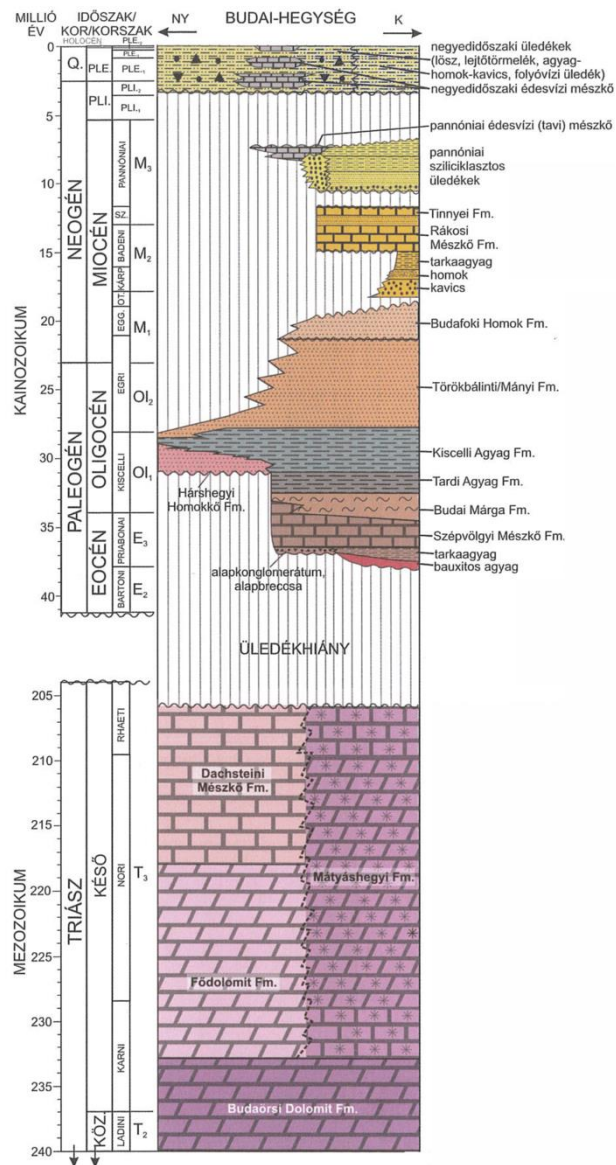
Először uránbányákban dolgozó munkások vizsgálata során kezdték el feltárni a radon egészségügyi hatásait, mivel az ^{238}U bomlási sor egyik leányeleme a radon. Egy kémiai elem bomlása során különbséget kell tennünk a kis számú dózisok, illetve a folyamatos sugárterhelés között, ugyanis ez utóbbi jelentős egészségkárosító hatással jár. Ennek egy részére a szervezetünk képes reagálni, azonban egy jelentős része ellen nem tud védelmet nyújtani. A radon rövid felezési idejét tekintve, a légutakba kerülve alfa-részecskéket kilökve elbomlik, ezek a részecskék pedig a légutak falának ütközve az abban lévő anyagokra ionizáló hatást fejtenek ki. A radon alfa bomlása során polónium keletkezik, amelynek már nem nemesgáz szerkezete van, így ez a légutak falához tud tapadni. Ezen szennyezők felhalmozódása kis mértékben a szervezet számára nem rákkeltő hatásúak, azonban folyamatos szennyezésnek való kitettség során - lásd bányamunkások- a szervezetbe kerülő dózis akkora, ami már erősen károsító hatással van. Az urán ivóvízzel történő fogyasztásának hatásai elsősorban kémiai toxicitásából (nefrotoxicitás) adódnak, mely a vese károsodását idézi elő (WRENN et al., 1987). Ugyanakkor az urán bomlásából eredően leukémiás, gyomordaganatos megbetegedések is előfordulnak (KURTTIO et al., 2006). A rádium ivóvíz általi fogyasztása elsősorban a csonttrák, májtrák és melltrák kialakulásának valószínűségét növeli (BEAN et al., 1982; LYMAN et al., 1985).

3. Kutatási terület bemutatása

A budapesti termálkarsztrendszer természetes forrásait mindig is használták az itt élő emberek. Ezek eredetének és a karsztrendszer működésének a kutatása is évszázadokra nyúlik vissza (pl. STOCKER, 1721; LINZBAUER, 1837). A 19. század második felétől kezdődően a rendszer megismeréséhez a források mellé már fúrt kutak is társultak (ZSIGMONDY, 1878), melyek segítségével egyre több információ állt rendelkezésre. A főváros fejlődése és a globális változások azonban jelentős terhet is rónak a karsztrendszerre, ezért egyre hangsúlyosabb a rendszer működésének és globális hatásokra, valamint a közvetlen emberi beavatkozásokra adott válaszána megértése. Ennek érdekében folynak jelenleg is kutatások, mint például a Szabályozott Tevékenységek Felügyelei Hatósága (SZTFH) egy átfogó kutatási projektje, mely a geotermikus beruházások engedélyeinek megalapozottságát hivatott szolgálni. Az ELTE munkatársai szintén évtizedek óta foglalkoznak a területtel (pl. MÁDLNÉ et al., 2018), melynek eredményeképpen született meg a Budai Termálkarszt hidrogeológiai modellje (MÁDLNÉ, 2020; MÁDL-SZŐNYI ÉS TÓTH, 2015).

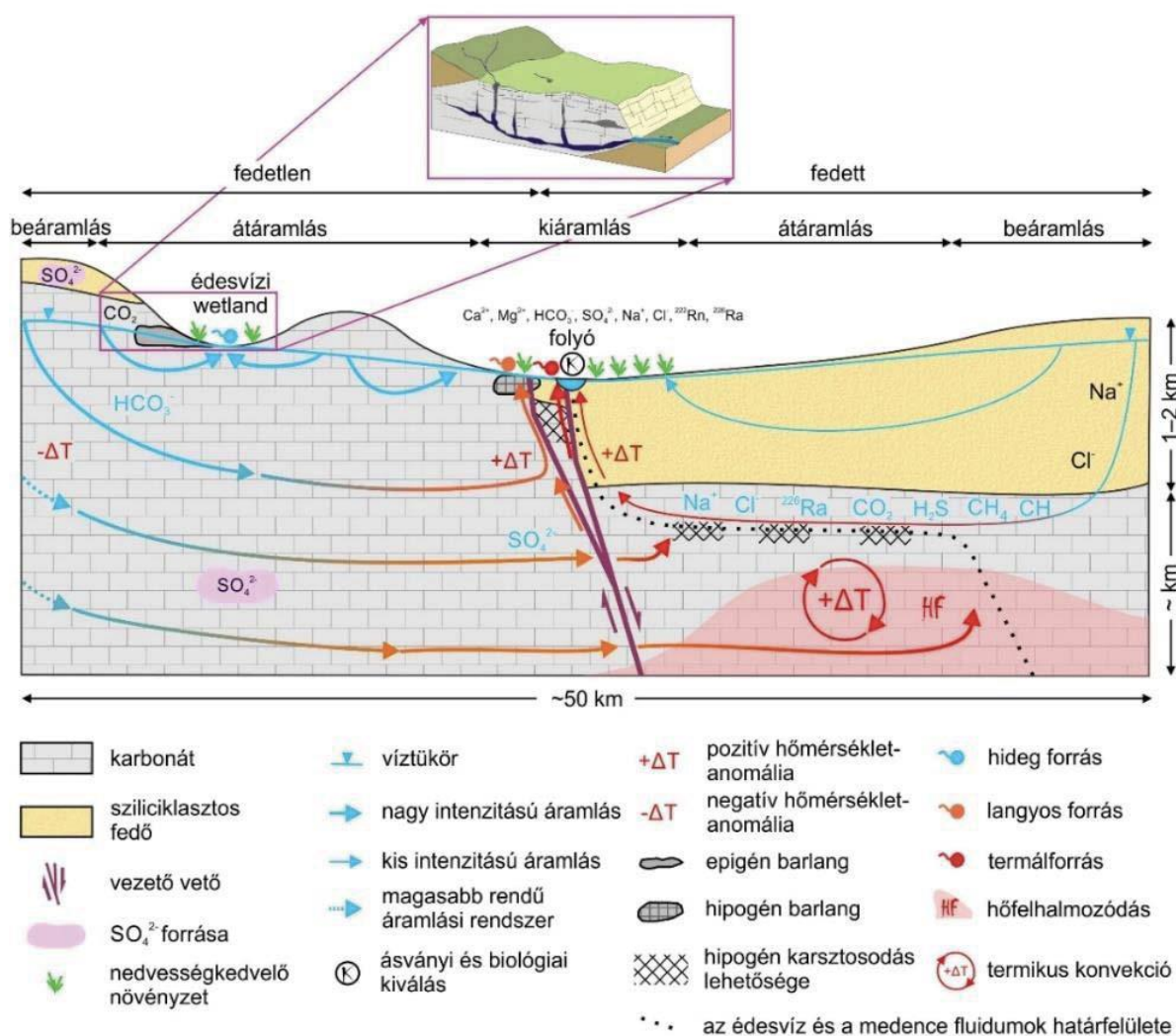
3.1 Geológiai, hidrogeológiai háttér

A mezozoos karbonátok (pl. Budaörsi Dolomit, Földolomit, Dachsteini Mésztrák Formációk) a területen felszínen előforduló legidősebb kőzetek, melyek a karsztos rezervoár fő tömegét alkotják (WEIN, 1977). Ezekhez még a triász kőzetekre üledékhézaggal települő eocén sekélytengeri karbonátok (Szépvölgyi Mésztrák Formáció) társulnak (3. ábra).



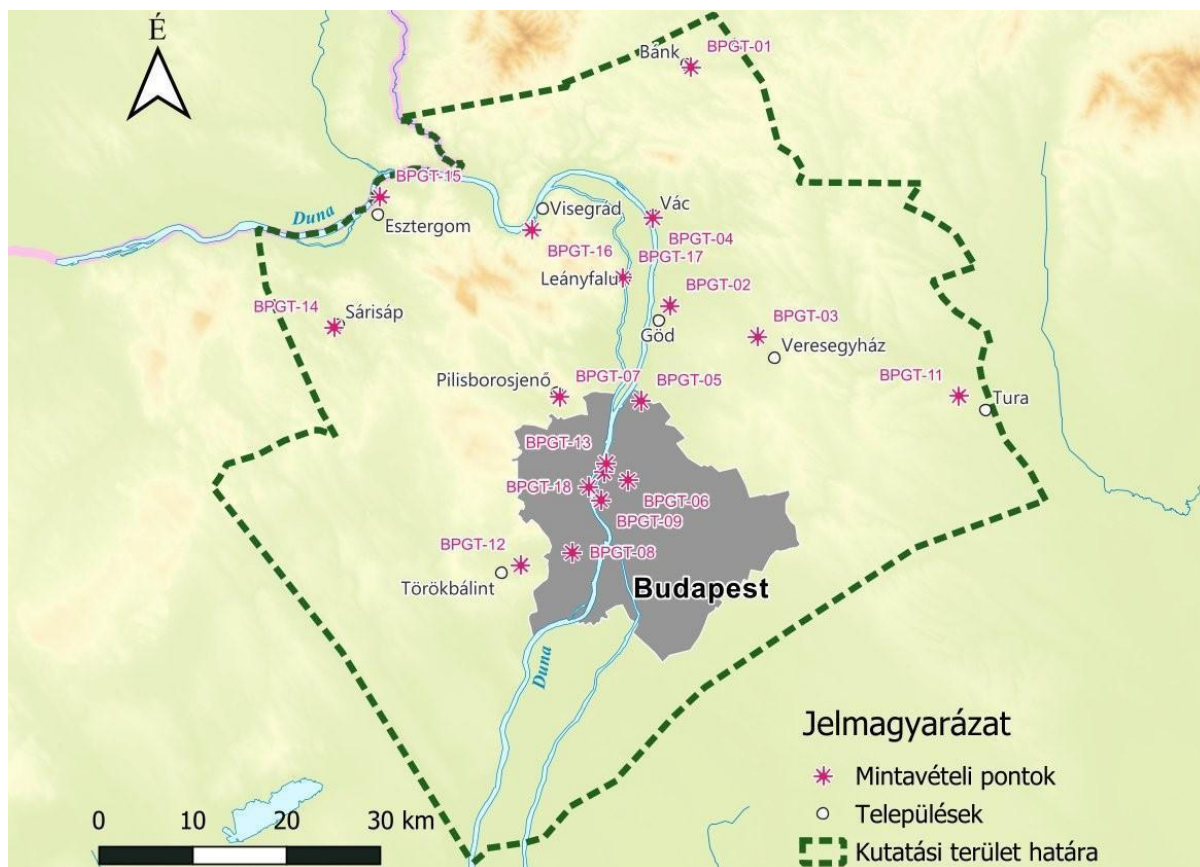
3. ábra: A Budai-hegység földtani képződményei (Mindszenty, 2013)

A Dunától nyugatra fekvő területeken ezek a rezervoárfelépítő kőzetek javarészt a felszínen találhatóak, míg a Dunától keletre vastag, jól szigetelő oligocén és neogén medenceüledékekkel fedettek. E két rezervoárrész, valamint a fedő sziliciklasztos üledékek vízáramlási pályáinak kölcsönhatása határozza meg a termálvizek hőmérsékleti és geokémiai jellemzőit, melyet a Budai-termálkarsztrendszer legújabb modellje is illusztrál (MÁDLNÉ 2020; MÁDL-SZŐNYI ÉS TÓTH, 2015) (4. ábra).



4. ábra: A Budai Termálkarszt hidrogeológiai modellje (forrás: Mádlné 2020, Mádl-Szőnyi és Tóth 2015)

Az SZTFH által kijelölt kutatási területen, a mintavételek a karsztrezervoárba mélyült kutakat célozták, melyek kiválasztását szintén az SZTFH munkatársai végezték (5. ábra).



5. ábra: Mintavételi helyszínek

4. Mintavétel, mérési módszerek

4.1 Mintázás menete

Dolgozatunkban a 2024. október 16. és november 20. közé eső mintavételi alkalmak eredményeit dolgozzuk fel. A mintavételek során 18 helyszínen vettünk vízmintát. Ezeknek legtöbbje szivattyús, kisebb része pedig pozitív, szabad kifolyású kutakból, valamint egy természetes megcsapolódási pontból, a Boltív-forrásból történt. A helyszínek között voltak budapesti, illetve számos Budapesten kívül eső, de a budai termálkarsztrendszer áramlási rendszeréhez tartozó területek is (5. ábra).

A mintázás során először a terepi paramétereket - úgy, mint hőmérséklet, pH, oldott oxigéntartalom g/literes, illetve %-os értékben, redoxpotenciál (ORP), és fajlagos elektromos vezetőképesség – rögzítettük. Ezek közül a hőmérsékletet és a fajlagos vezetőképességet WTW Multi 3620 IDS hordozható mérőműszerrel, a pH-t, az oldott oxigén mennyiségét és a redoxpotenciált pedig WTW 3420 terepi paramétereket rögzítő eszközzel mértük. A radon mintavételéhez 23 üveg ml-es küvetákat használtunk, melyekbe a mérést megelőzően 10 ml Optifluor-O szcintillációs folyadékot töltöttünk (6. ábra).



6. ábra: A radonra vett vízminta a szcintillációs koktéllal (A), valamint az urán és rádium méréséhez vett vízminta a 250 ml-es PP palackban (B)

A helyszínen orvosi fecskendő segítségével vettünk 10 ml vízmintát, amelyet injekciós tűvek a szcintillációs folyadék alá fecskendeztünk be. A befecskendezés pillanatában felírtuk perces pontossággal az időt. Ez azért különösen fontos a radon esetében, mert rendkívül rövid, 3,8 napos felezési idővel rendelkezik, így az aktivitáskoncentráció meghatározásakor fontos figyelembe venni a mintázás óta eltelt időt. A radon jobban oldódik a szcintillációs folyadékban, mint a vízben, ezért körülbelül fél percig ráztuk a küvétát, hogy a vízben lévő radon a szcintillációs folyadékba tudjon oldódni. A mérés elvégzéséig a küvétákat sötét helyen tároltuk. A rádium, illetve urán méréséhez 250 ml-es műanyag (PP) palackokat használtunk, melyeket buborékmentesen megtöltve a mérésig hűtőben tároltuk. A méréseket az ELTE TTK Atomfizikai Tanszék, illetve az Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék Müller-Surbeck laborjában végeztük el.

4.2 Minta előkészítése, mérése

A ^{226}Ra és urán izotópok (^{234}U , ^{238}U) minták mérését az ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék Müller-Surbeck laborjában lévő, szelektíven adszorbeáló, úgynevezett Nucfilm diszkeket használó alfa-spektroszkóppal mértük meg. Ezeket a diszkeket Heinz Surbeck fejlesztette ki ivóvízminták természetes radioaktivitásának méréséhez (SURBECK, 2000). Ezek használta gyorsan, valamint bonyolult radiokémiai eljárást mellőzve nyújt információt a minták rádium és urán aktivitáskoncentrációjáról 20%-os pontossággal.

A Ra-Nucfilm diszk egy 26 mm átmérőjű, poliamid 66 anyagból készült korong, melyet egy MnO_2 bevonat fed. A MnO_2 réteg szelektív kationcserélőként működik nehéz alkáliföldfémekre nézve. A minta mérése során fontos az, hogy a pH nagyobb legyen mint 4, bárium tartalma pedig 0,5 mg/liter alatt legyen. Esetünkben ez minden mintáról elmondható. Az előkészítés során 100 ml vízmintát egy főzőpohárba öntöttünk - ezt megelőzően desztillált vízzel, majd pedig a mintával is elmostuk a mérőhengert és a főzőpoharat - majd hozzáadtunk 2 ml etilén-diamin-tetra-acetátot (Na_2EDTA), amely enyhén megnövelte a pH-t. Ez a karbonátkomplexelek képződését akadályozza meg. A pohárba egy mágneses keverőbabát raktunk és ezt helyeztük rá egy mágneses kevertető alátétre. Ezután egy műanyag csipesszel belelógattuk a Ra-Nucfilm

diszket a pohárba úgy, hogy azt a víz teljesen ellepje. Majd a mágneses kevertetőt bekapcsolva minimum 8 órán keresztül magára hagytuk a mintát.

A 8 óra elteltével kiemeltük a Ra diszkeket a vízből majd egy papírtörőre helyeztük és hagytuk őket megszáradni. Ezután a minták pH-ját hangyasav segítségével 2-3 közé állítottuk és a fentiekhez hasonló módszerrel az U-Nucfilm diszket merítettük a mintába, majd ezt szintén a mágneses keverőre helyeztük és minimum 20 órán keresztül hagytuk állni. Az U-Nucfilm egy 24 mm átmérőjű, polikarbonátból álló diszk, melyen 50 mg epoxy- és 50 mg Diphonix gyanta fed, mely szelektíven köti meg az uránizotópokat, vagyis más elemek nem válnak ki rajta. A 20 óra leteltével a Ra diszkhez hasonlóan az U diszket is papírtörőre helyeztük és hagytuk megszáradni. Méréseink során a Ra diszkeken – Na₂EDTA hozzáadása ellenére is – majdnem minden esetben karbonátkiválások voltak megfigyelhetők (7. ábra). Ez azonban nem befolyásolta a mérés során kapott értékeinket.



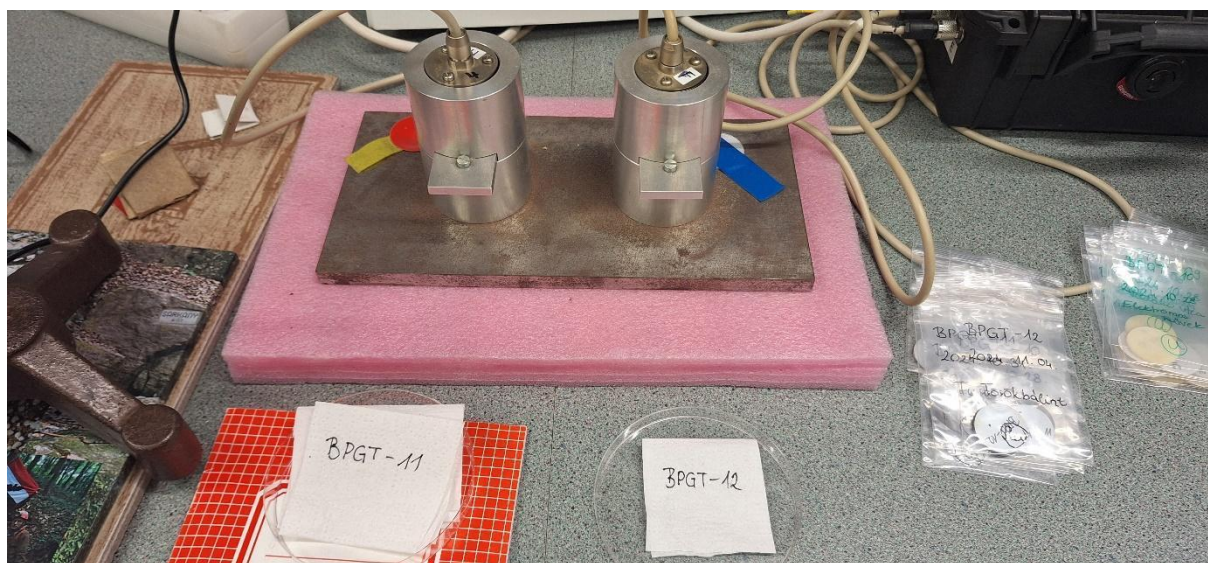
7. ábra: A rádium diszkeken megfigyelt karbonátkiválások

4.3 U és Ra-Nucfilm diszkek mérése

A diszkek megszáradása után behelyezzük őket az alfa-spektrométerbe és minimum 24 órán keresztül mérjük azokat. A minták méréséhez használt, Heinz Surbeck által kifejlesztett szilárd állapotú alfa-spektrométer, egy szilíciumdetektorral rendelkező műszer (8. ábra). Ellentétben egyéb alfa-spektrométerekkel, ebben az eszközben a mérés nem vákuumban történik. Ez egyrészt leegyszerűsíti magát a mérést, másrészt így elkerülhető a detektor bomlástermékek általi szennyeződése is. A folyamat során két mintatartóba tudunk helyezni diszkeket, ebből adódóan egyszerre két diszk mérését tudjuk elvégezni, illetve egyszerre akár egy urán és egy rádium diszk mérését is tudjuk futtatni. A mérés menete egyszerű. Miután behelyeztük a tartóba a diszkeket – a bevont, ragasztó nélküli felületükkel felfele - az Alpha-1 programon keresztül elindítjuk a mérést. A diszkek felületén megkötődött urán- és rádiumizotópok olyan alfa-részecskéket bocsátanak ki bomlásuk során, melyek a szilíciumdetektorba csapódva ionizálják azt. Az ionizálás hatására a detektorban keltett jel egy erősítőn keresztül tovább haladva egy sokcsatornájú analízatorba érkezik. Egy diszk leméréséhez az eszköznek minimum 24 órára van szüksége. A program által elkészített spektrumból, a görbe alatti terület kiszámításával,

megkapjuk az uránra és a rádium izotópokra vonatkozó aktivitáskoncentrációkat mBq/l-ben. Mind az urán izotópok, mind a ^{226}Ra esetén 5 mBq/l a várható kimutatási határ (100 ml vízminta és 24 h mérés esetén). Az urán izotópok esetében nem tárgyaljuk külön az egyes izotópokat, hanem az összes urán aktivitást elemezzük tovább.

A mérés letelte után az adatokat mind Excelbe, mind pedig fájlokba elmentve rögzítjük, az aktivitást megjelenítő diagramról képernyőképet készítünk. Amint ezzel készen vagyunk, a mintatartóból eltávolítjuk a diszkeket, felírjuk rájuk az adott minta azonosítóját, majd pedig egymástól külön, lezárható zacskóba helyezük őket, amelyeken szerepel a minta azonosítója, a mintavétel helye és ideje is.



8. ábra: Az alfa-spektrométer az ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékének Müller-Surbeck laborjában

4.4 A vízminták radontartalmának meghatározása

A vízminták radontartalmának mérése az ELTE TTK Atomfizikai Tanszékén lévő TriCarb 1000 TR folyadékszintillációs spektrométerrel történt. A mérés Dr. Horváth Ákos egyetemi docens és Rádl Attila doktorjelölt közreműködésével zajlott. A már vízzel és szcintillációs folyadékkal megtöltött küvetákkal a mintavétel után nem volt más tennivalónk. A ^{222}Rn 3,8 napos felezési ideje miatt a mintákat rövid időn belül le kellett mérnünk. A minták detektorba helyezése után indítottuk a méréseket. A folyamat közben a szcintillációs folyadékba oldódott radon alfa-bomlása során fényt bocsát ki. A műszer ezeknek a felvillanásoknak az energiáját határozza meg, melyből a víz radon aktivitáskoncentrációja meghatározható. Ezen felül a bomlási energiáról is információt kaphatunk a keletkezett fotonok számából. A kapott eredményeket a radon és urán méréshez hasonlóan Excel táblázat kezelőbe vezettük fel, amelynek segítségével az aktivitáskoncentrációt tudtuk kiszámolni.

5. Eredmények

5.1 Terepi paraméterek jellemzése

5.1.1 Hőmérséklet

A hőmérséklet széles tartományban (14,4–99,1 °C) változik a mintavételi helyszínek között. A mért hőmérsékletek átlaga 43,16 °C. A legalacsonyabb hőmérsékletet, 14,4 °C-ot a BPGT-07 pontnál, Pilisborosjenőn, a legmagasabbat, 99,1 °C fokot Turán, a BPGT-11 mintavételi helyszínen mértük.

5.1.2 Fajlagos elektromos vezetőképesség

A vezetőképesség a hőmérséklethez hasonlóan, széles spektrumon változott (9. ábra). A legalacsonyabb értéket, 791 $\mu\text{S} / \text{cm}$ -t ez esetben is a BPGT-07 pontnál, Pilisborosjenőn kaptuk, a legmagasabbat, 2640 $\mu\text{S} / \text{cm}$ -t pedig Turán (BPGT-11). A vezetőképesség átlaga 1394 $\mu\text{S} / \text{cm}$. A maximum érték mellett még két helyszínen jellemző magasabb érték, a BPGT-08 (Apenta-2) esetén 2320 $\mu\text{S} / \text{cm}$, a BPGT-01 (Bánk) mintánál pedig 1940 $\mu\text{S} / \text{cm}$.

5.1.3 Oldott-oxigén tartalom

Az oldott-oxigén tartalmat mind százalékban, mind mg/l-ben tudtuk mérni a műszerekkel, viszont magas hőmérsékletű vizek esetében (50°C felett) az elektróda nem használható. Így a BPGT-03 (Veresegyház), BPGT-06 (BVSC Uszoda), BPGT-08 (Apenta-2), BPGT-09 (Vadász utca) és BPGT-11 (Tura) helyszíneken az oldott oxigén tartalom mérése nem volt lehetséges a magas hőmérséklet értékek miatt. Az eredmények 0,20–63,6% valamint 0,02–6,46 mg/l között, 9. ábra (9.1). A %-ban megadott értékek átlagától (10 %) jelentősebb pozitív eltérést tapasztaltunk a BPGT-04 (Vác-Strandfürdő: 42%), a BPGT-07 (Pilisborosjenő: 63,6 %) és a BPGT-18 (Molnár János barlang: 21,7 %) helyszíneken. BPGT-03 (Veresegyház); BPGT-06 (BVSC Uszoda); BPGT-08 (Apenta-2); BPGT-09 (Vadász utca) és BPGT-11 (Tura) helyszíneken az oldott oxigén tartalom mérése nem volt lehetséges a magas hőmérsékleti értékek miatt.

5.1.4 pH

A pH kevésbé mutat nagy változatosságot, 5,9 és 7,26 értékek között változott (9. ábra).

5.1.5 Redoxpotenciál

A redoxpotenciál esetében is nagy ingadozást találunk az eredmények között, -298,4 mV-tól 158,1 mV-ig változtak a mért értékeink (9. ábra). A legtöbb vízminta negatív eredményt mutat, vagyis redukív. Pozitív eredményt kaptunk BPGT-04 (Vác: 7,7 mV), BPGT-14 (Sárisáp: 140,9 mV), BPGT-15 (Esztergom: 51,1 mV), illetve BPGT-18 (Molnár János barlang: 138,9 mV) helyszíneken. A legmagasabb redoxpotenciált 158,1 mV-tal a BPGT-07-nél, Pilisborosjenőn mértük. A legalacsonyabbat pedig -298,4 mV-tal BPGT-10-nél, Budapest XIII. kerületében az Elektromos sporttelep kútjánál kaptuk.

<i>T</i> (°C)		<i>EC</i> (μS/cm) ref. 25°C		<i>DO</i> (%)		<i>DO</i> (mg/L)		<i>pH</i>		<i>ORP</i> (mV)	
Várható érték	43,16	Várható érték	1394,00	Várható érték	10,13	Várható érték	0,91	Várható érték	6,46	Várható érték	-140,32
Medián	38,15	Medián	1281,00	Medián	0,30	Medián	0,03	Medián	6,48	Medián	-225,20
Szórás	21,81	Szórás	516,50	Szórás	20,31	Szórás	1,93	Szórás	0,39	Szórás	168,48
Minimum	14,40	Minimum	791,00	Minimum	0,20	Minimum	0,02	Minimum	5,90	Minimum	-298,40
Maximum	99,10	Maximum	2640,00	Maximum	63,60	Maximum	6,46	Maximum	7,26	Maximum	158,10

9. ábra: Terepi paraméterek leíró statisztikája

5.2 Radionuklidok

A radon esetében a mintáink felénél a kimutatási határérték alatt (5 Bq/L) kaptunk eredményeket, a maradék 9 esetben pedig a mért tartomány 8 és 284 Bq/L közé esett, de zömében alacsony értékek jellemzőek (<40 Bq/L). (10. ábra). Azonban a BPGT-12 (Törökbálint) 284-Bq/L-es értéke erősen kiugrónak számít, ha viszonyításképpen az ivóvízre érvényes parametrikus értékkel (beavatkozási értékkel) hasonlítjuk össze, ami 100 Bq/L.

Az urán a radonhoz hasonlóan szintén kevés a mintákban, csak 6 mérés során lépte át az 5 mBq/L-es kimutatási határértéket (10. ábra), melyek 7 és 18 mBq/L értékek közé esnek, mely értékek alacsonynak mondhatók.

A rádium esetében azonban már más volt a helyzet, ugyanis mindegyik mérés elérte a kimutatási határértéket (5 mBq/L) (10. ábra). A kapott értékek igen nagy szélsőségeket mutatnak, az értékek 10 és 1823 mBq/L közé esnek. A BPGT-07 (Pilisborosjenő) és BPGT-14 (Sárisáp) mintavételi pontoknál mértük a legkisebb értékeket (10 és 39 mBq/L). A második legmagasabb mért érték 716 mBq/L volt, így elmondható, hogy a BPGT-08-as Apenta kút esetében az 1823 mBq/L-es érték igen kiugrónak számít.

<i>TRICARB Rn</i> (Bq/L)		<i>U</i> (Sum) (mBq/L)		<i>Ra-226</i> (mBq/L)	
Várható érték	50,38	Várható érték	11,20	Várható érték	365,29
Medián	14,50	Medián	10,00	Medián	245,00
Szórás	94,95	Szórás	4,44	Szórás	425,38
Minimum	8,00	Minimum	7,00	Minimum	10,00
Maximum	284,00	Maximum	18,00	Maximum	1823,00

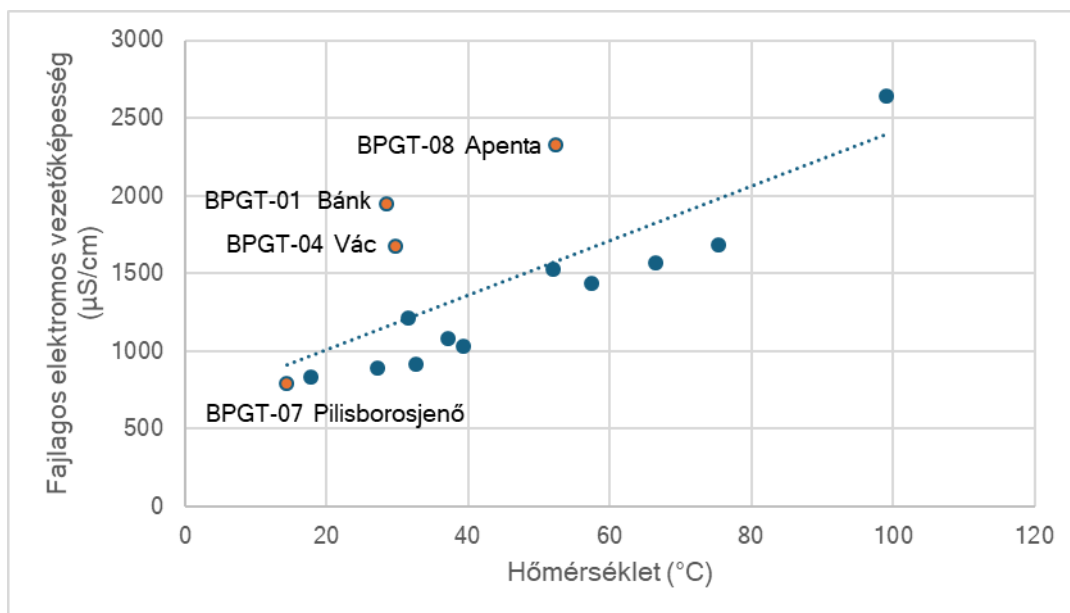
10. ábra: Radionuklidok leíró statisztikája

6. Eredmények értelmezése

6.1 Terepi paraméterek

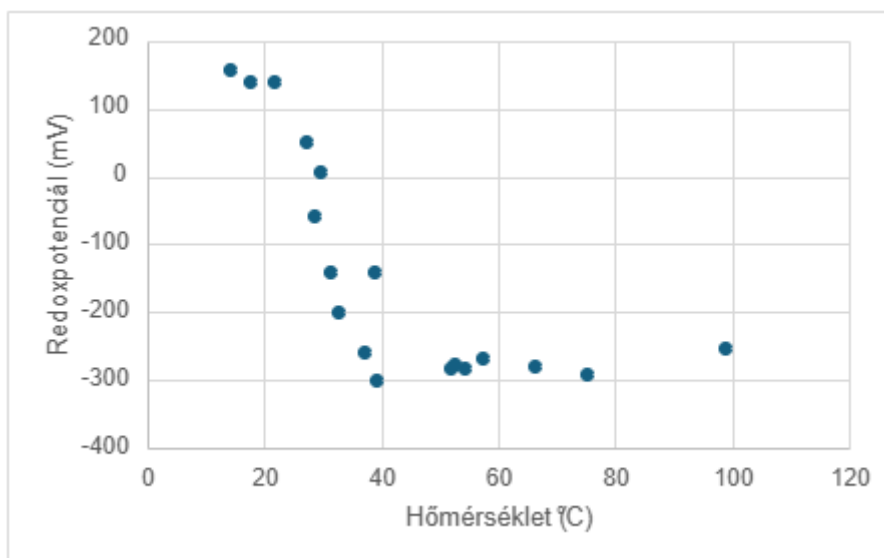
A minták hőmérséklete és fajlagos elektromos vezetőképessége között alapvetően egy lineáris összefüggés látható, három mintavételi helyszín kivételével (11. ábra). A BPGT-01 (Bánk), BPGT-04 (Vác) és BPGT-08 (Apenta) minták esetében a magasabb oldott anyag tartalomhoz alacsonyabb hőmérséklet párosul. Itt más közet-víz kölcsönhatás okozhat nagyobb oldott anyag tartalmat, melyet a minták teljes vízkémiai elemzésével tudnánk részleteiben elemezni, amelyre még nem volt lehetőségünk, mert nem álltak rendelkezésre a mintavételhez kapcsolódó

vízkémiai eredmények. A legalacsonyabb hőmérsékletű és fajlagos elektromos vezetőképességű mintavételi helyszín, a BPGT-07 (Pilisborosjenő) az oxidatív viszonyaival rövidebb áramlási pályát valószínűsít, közeli utánpótlódási területtel. A hőmérséklet széles skálán történő mozgása mutatja, hogy a területen mély, hosszú tartózkodási idejű, magasabb hőmérséklettel rendelkező, illetve sekélyebb, rövidebb áramlási pályákhoz, ill. általában ezek megcsapolódási területéhez tartozó, alacsonyabb hőmérsékletű vizek is voltak.



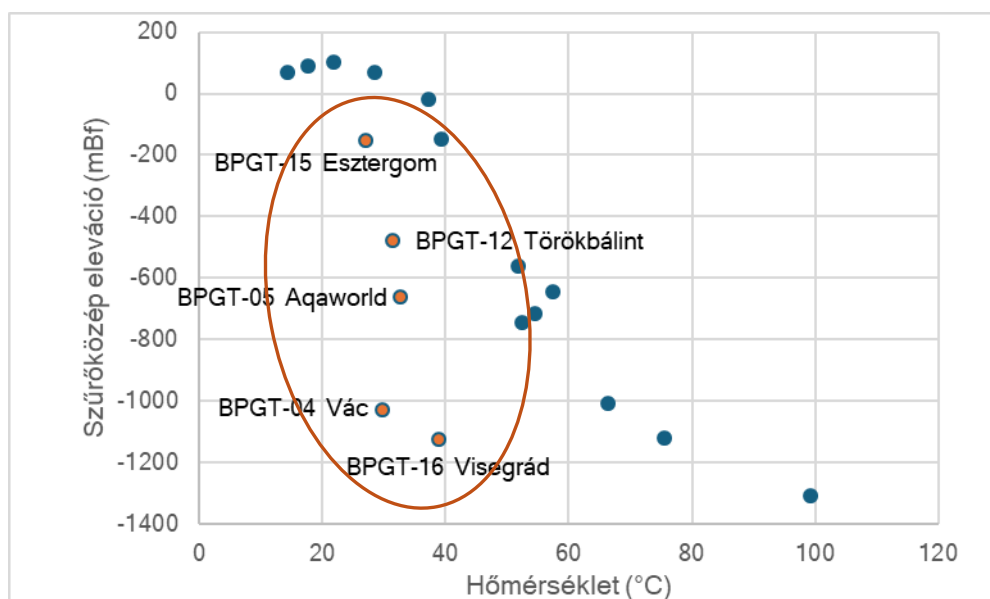
11. ábra: Fajlagos elektromos vezetőképesség - hőmérséklet diagram

A redoxpotenciál és a hőmérséklet kapcsolatáról az állapítható meg, hogy a hőmérséklet növekedésével egyre negatívabb redoxpotenciál értékeket kapunk (12. ábra). A legnagyobb változás a redoxpotenciálban 20 ° és 40 °C között látható. A 40 °C feletti vizek egységesen erősen negatív (-300 mV) körüli értéket mutatnak. Vagyis annál redukтивabb a víz, minél magasabb a hőmérséklete, mely a hosszú felszín alatti tartózkodási idejű, regionális áramlási pályán mozgó vizek jellemzője.



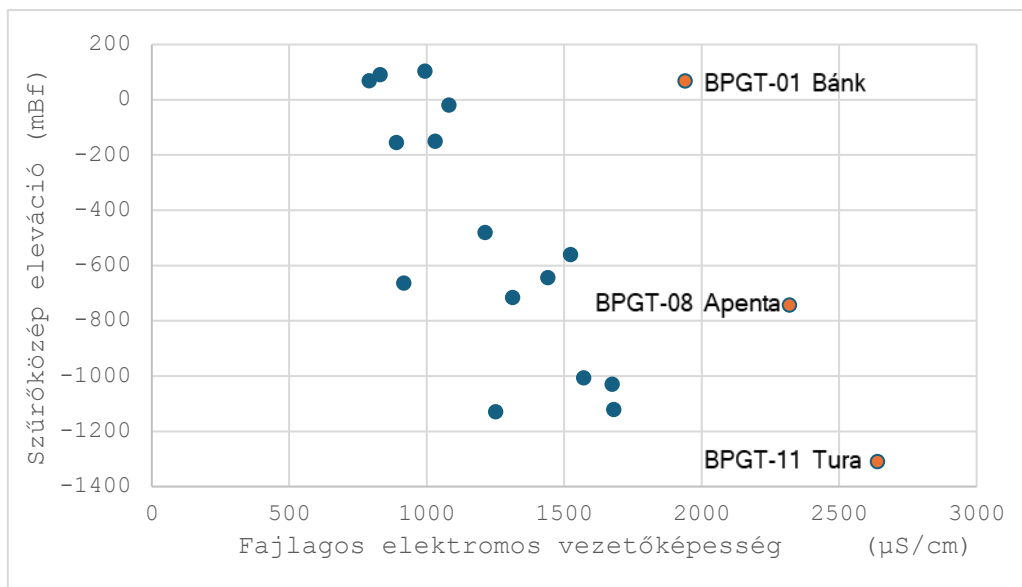
12. ábra: Redoxpotenciál- hőmérséklet diagram

Ha azt is figyelembe vesszük, hogy a mintázott kutak milyen mélységtartományban mintázzák meg a karsztrezervoárt, akkor a szűrőközep eleváció és hőmérséklet viszonyában az állapítható meg, hogy az alacsonyabb szűrőközep eleváció értékekhez, magasabb hőmérséklet tartozik (13. ábra). Vagyis minél mélyebben vagyunk, annál magasabb a vizek hőmérséklete, mely a nagyobb behatolási mélységnek és az itt ható földhőnek köszönhető. Ezen összefüggést nem feltétlen bizonyítja a 18 vízminta közül 5, a BPGT-04 (Vác), BPGT-05 (Aquaworld), BPGT-12 (Törökbálint), BPGT-15 (Esztergom), BPGT-16 (Visegrád). Ezeknél az látható, hogy a többi hasonló mélységbe szűrőzött kút vizének hőmérsékletéhez képest jóval alacsonyabb hőmérséklettel rendelkeznek. Ezen kutak esetében eltérő (sekélyebb) áramlási pályák, rövidebb felszín alatti tartózkodási idejű vizek valószínűsíthetők.



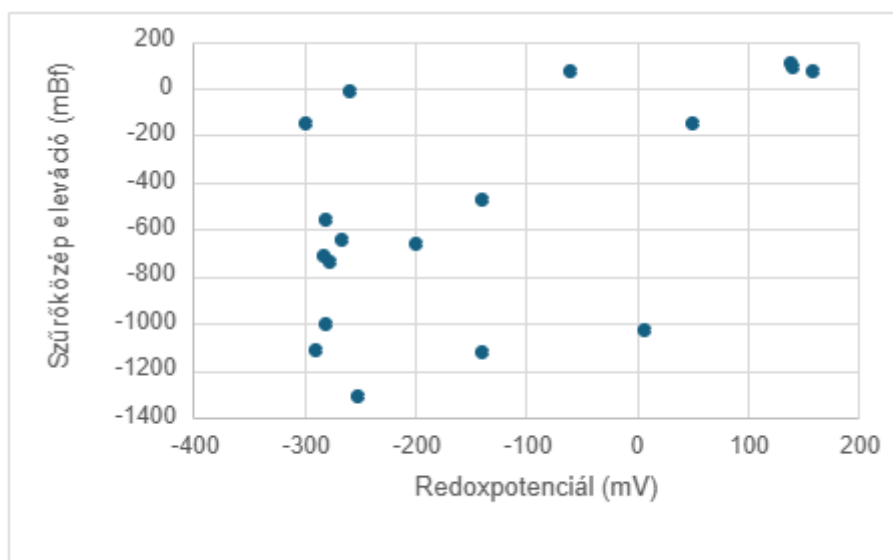
13. ábra: Szűrőközep eleváció- hőmérséklet diagram

A fajlagos elektromos vezetőképességet a szűrőközep elevációval összevetve a mélységgel növekvő oldott anyag tartalom látható (14. ábra). Az egyik kiugró értékünk a BPGT-11 (Tura) minta volt. Ez a kutatási terület keleti peremén fekszik, mély medencehelyzetben, ebből adódóan jellemzően hosszabb tartózkodási idejű áramlási rendszert mintáz. Ehhez több oldottanyag-tartalom társul, így a fajlagos elektromos vezetőképessége nagyobb lesz. A másik ilyen kiugró értékünk a BPGT-08 (Apenta-2) kút volt. Ez a dél-budapesti területen helyezkedik el, ahol általában magasabb az oldottanyag-tartalom, mint északabbra (ERŐSS et al., 2012). Ez adódhat más kőzetekkel való érintkezésből, vagy következhet hosszabb tartózkodási időből. A harmadik eltérő értékünk a BPGT-01 (Bánk) minta. Itt a hőmérséklet alacsonyabb, mint a BPGT-08 és BPGT-11 kutak esetében. De a sekélyebb mélység ellenére magasabb oldott anyag tartalom jellemző. A kút valószínű hosszabb tartózkodási idejű, regionális áramlási pálya megcsapolódási zónájában helyezkedik el, ahol némi keveredés is valószínűsíthető lokálisabb vizekkel, melyre a minta radon tartalma (18 Bq/L) enged következtetni.



14. ábra: Szűrőközép eleváció- fajlagos elektromos vezetőképesség diagram

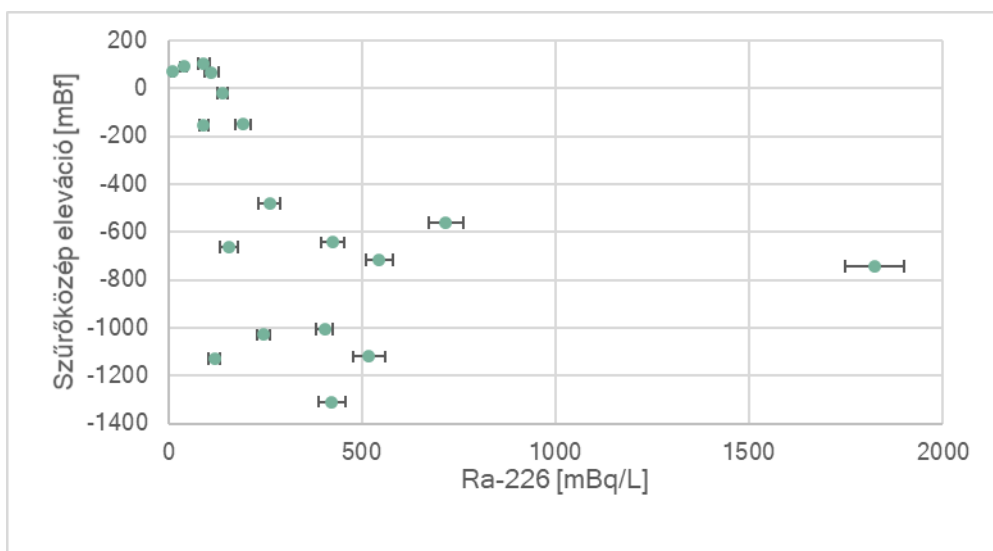
A redoxpotenciál- szűrőközép eleváció diagramján egyszerre több összefüggést is meg tudunk állapítani (15. ábra). A negatív redoxpotenciálú mintázott kutak mély, regionális áramlási pályákhoz, vagy ezek sekély, megcsapolódási területeihez tartoznak (ilyenek például a budapesti mintázások). Vannak olyan sekélyebb kútjaink, ahol a redoxpotenciál pozitív értéket mutat. Ez abból adódik, hogy ezek alacsonyabb rendű áramlási rendszerekhez tartoznak, hiszen megmarad az oxidatív állapotuk. Azoknál az értékeknél, ahol a kút mélyebb mégis pozitív a redoxpotenciál, azt mutatja, hogy az előző esetről említett, oxidatív állapotú vízzel keveredik mélyebbről érkező, redukzív víz.



15. ábra: Redoxpotenciál- Szűrőközép eleváció diagram

A radionuklidok közül a rádiumot elemezzük részletesen (16. ábra), mert az urán esetében alacsony értékeket, illetve kimutatási határ alatti értékeket mértünk, mely a minták dominánsan redukzív viszonyával hozható összefüggésbe. A mélységgel növekvő rádiumtartalom jellemző, bár -400 mBf alatt a rádium aktivitáskoncentrációk változatos értékeket vesznek fel. A kiugró

érték itt is a BPGT-08 (Apenta-2) kúthoz tartozik. A magas rádiumtartalom nagyon hosszú tartózkodási idejű, magas oldott anyag tartalmú vizekre jellemző, illetve olyanokra, amelyek esetében szénhidrogén rezervoár van a közelben, és az erős redukzív viszonyok kedveznek a rádium mobilizációjának (ERŐSS et al. 2015). A nagyon hosszú tartózkodási idő mellett szól az is, hogy a kút a második legmagasabb oldott anyag tartalmú vizet szolgáltatja.



16. ábra: Szűrőközép eleváció - Ra-226 aktivitás koncentráció diagram

A pH értékeink nem mutatnak nagy eltéréseket, mivel a kutaink vizei kivétel nélkül karsztvizek. Jellemző rájuk a semleges pH, mert a bennük előforduló HCO_3 egyfajta pufferként működik. A pH azonban nem tökéletesen 7, hanem enyhe savasságot mutat, amelyet a benne lévő többlet CO_2 okoz. Ennek jelenléte a karbonátos kőzetek metamorfózisából származik (FÓRIZS et al., 2008).

7. Méréseink egészségügyi vonatkozásai

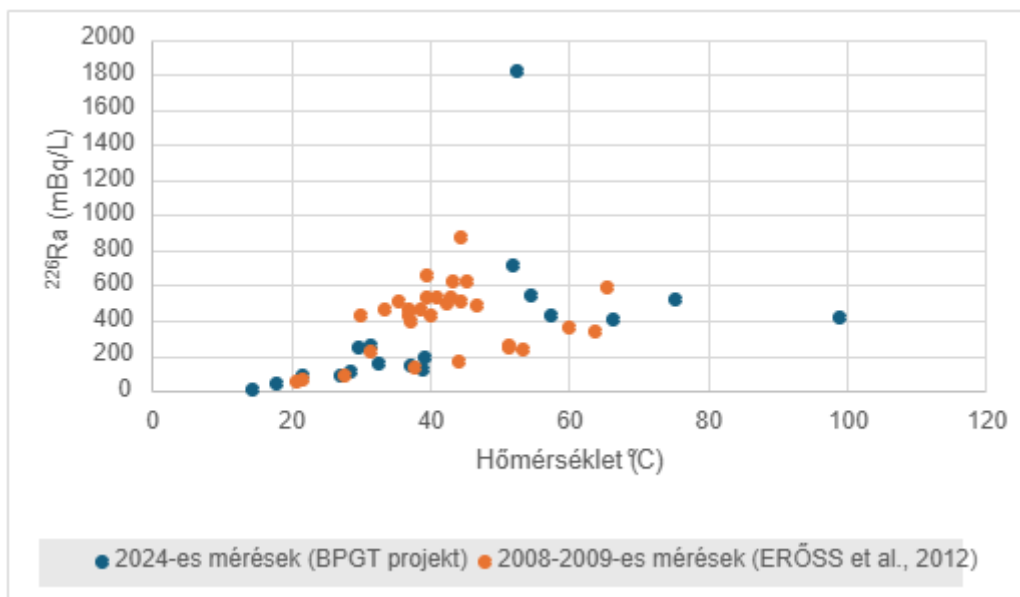
Mivel Magyarországon a lakosság ivóvízellátása leginkább felszínalatti vizekből származik, ezért elengedhetetlen azok folyamatos monitorozása és az ennek során kapott adatok kiértékelése. Ennek szabályozása céljából a törvény az összesalfa-aktivitást 0,1 Bq/L, az összesbéta-aktivitást pedig 1,0 Bq/L határértékben határozza meg. Ha egy minta aktivitás értékei határérték alatt vannak, nincsen szükség további izotópspecifikus radiológiai vizsgálatokra. Kivételt képez ez alól az az eset, melyben a felügyeleti hatóságnak tudomása van olyan radioaktív izotópok jelenlétéről, amely az indikatív dózis 0,1 mSv határértéket megnövelhetik (5/2023. (I. 12.) kormányrendelet). Az összesalfa- és összesbéta- aktivitás magába foglalja az összesalfa bomló, illetve összesbéta bomló elemet, ezek radioaktív bomlásának összegét adja meg határértéknek. Ebből adódóan egy összesalfa, illetve összesbéta bomlás számításánál az egyes alkotókra nem kapunk külön értéket. Így amennyiben a mérés során kapott érték meghaladja a szabályzatban foglalt határértéket, további nuklidspecifikus mérésekre van szükség, amely a komponensekre nézve is részletes értéket adnak

(2013/51/EURATOM). Munkánk ebben is segítséget tudott nyújtani, hiszen kutatásunk során két vízműkutat is mintáztunk (BPGT-14 és BPGT-15), melyek esetében a rádium és urán, mint alfabomló radionuklidok, aktivitáskoncentráció értékeinek mérésével az összesalfa mérések értelmezéséhez járultunk hozzá. Elmondható, hogy mindkét kút esetében az urán értékek kimutatási határ alattiak, a rádium aktivitás koncentráció 39 (BPGT-14) és 91 (BPGT-15) mBq/L, melyek határérték alatti értékek. A radon a BPGT-15 esetében kimutatási határ alatti, a BPGT-14 esetében is nagyon alacsony, 8 Bq/L. Összehasonlításképpen, a radon parametrikus értéke, amely felett beavatkozás szükséges, 100 Bq/L. A legmagasabb radon aktivitásra vonatkozó értéket a BPGT-12 (Törökbálint) kút esetében mértük, 284 Bq/L-t, ahol a rádium aktivitás koncentrációja is magas, 260 mBq/L volt. Ennél a mintázási helyszínnél nem ismert számunkra a víz hasznosítása, de amennyiben ivóvízként is fogyasztják, a 100 Bq/L feletti radon aktivitás koncentráció beavatkozást igényel.

8. Diszkusszió

A mért ^{226}Ra aktivitáskoncentráció adatainkat összevetettük témavezetőnk, Dr. Erőss Anita eredményeivel (17. ábra narancssárga jelölés), amelyek a 2008-2009-es időszak mintavételi kampányából származtak, és kizárólag budapesti, főleg a megcsapolódási zónához (Dunához) közeli helyszíneket foglaltak magukban (ERŐSS et al., 2012). Elmondható, hogy a mintáinknak jelentős része hasonló értékeket mutatott az Erőss és munkatársai által mértekkel. Az egyedüli eltérést az esetünkben mért BPGT-08 (Apenta-2) kút mintázása jelenti, melyhez nem találunk hasonlót.

A Boltív-forrás radon tartalmáról több időszakból is áll rendelkezésünkre adat, amivel a mi méréseinket összehasonlíthatjuk. Erőss és munkatársai 2008-ban 58 Bq/L-t (ERŐSS et al., 2012), Csondor és munkatársai 2015-ben több mintázás során 40 és 84 Bq/L közötti aktivitás koncentrációkat (CSONDOR et al., 2017), Erőss és munkatársai 2014-2015-ben több alkalommal 27 és 71 Bq/L közötti értékeket mértek (ERŐSS et al., 2024). Mindezek alapján elmondható, hogy 91 Bq/L aktivitáskoncentrációval a valaha mért legmagasabb radontartalmat mértük a Boltív-forrásban. A Boltív-forrás radon tartalma a szerkezeti zóna mentén feláramló termálvizek és a közeli beszivárgási területek (Budai-hegység) intermediér pályáján mozgó karsztvizeinek keveredésének eredményeképpen keletkező vas-oxihidroxidos kiválásokhoz köthető. Ezek a kiválások a termálvízből adszorbeálják a rádiumot, és a kiválás közelében magasabb radon tartalmat okoznak a vízben (CSONDOR et al., 2017; ERŐSS et al., 2012; ERŐSS et al., 2024). A mintavételi csövet valószínűleg egy olyan hasadékba sikerült a bűvároknak elhelyezni, mely közel van ehhez a keveredési zónához.



17. ábra: Az általunk mért rádium aktivitáskoncentráció értékek (kék) összehasonlítva a Budai Termálkarszt korábbi rádium aktivitás mérési eredményeivel (Erőss et al. (2012)) (narancssárga).

9. Összefoglalás

Munkánk során a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága átfogó kutatási projektjébe kapcsolódunk be, mely a budapesti termálkarsztrendszer működésének minél jobb megismerését tűzte ki célul. A kutatásunk célja a budapesti termálkarsztrendszerben előforduló urán, rádium és radon izotópok aktivitáskoncentrációjának vizsgálata volt. Ezen izotópok eltérő geokémiai környezetekben való előfordulása fontos szerepet játszik a hidrogeológiai kutatásokban, mivel segítenek megérteni a felszínalatti vizek áramlási rendszereit, keveredési folyamatait. A kutatásunk jelentősége abban rejlik, hogy hozzájárul a termálkarsztrendszer vízminőségi és geokémiai paramétereinek jobb megértéséhez, és segít az áramlási rendszerek feltérképezésében. A radontartalmat folyadékszintillációs módszerrel mértük. A vízminták rádium és urán tartalmának meghatározásához egy hazánkban egyedülállóan csak az ELTE-n alkalmazott módszert használtunk, mégpedig a szelektíven adszorbeáló Nucfilm diszkeken alapuló alfa spektroszkópiát. A karsztos rezervoár 17 kútjából és egy forrásából 2024. október 16. és november 20. között vett vízminták budapesti és környékbeli településekről, a rezervoár regionális területéről származnak.

A terepi paraméterek széles skálán változtak. A mért legmagasabb érték 99,1 °C, míg a legalacsonyabb 14,4 °C volt, amely azt tükrözi, hogy a fedetlen nyugati rezervoárrésztől a mély fedett keleti rezervoárrészig voltak mintáink. A fajlagos elektromos vezetőképesség (azaz az oldott anyag tartalom) a hőmérséklettel általánosan növekvő trendet mutatott. Ettől eltérő esetek eltérő közet-víz kölcsönhatásra, és/vagy áramlási pályákra utalhatnak. A vízminták radontartalmára általánosságban kimutatási határ alatti vagy alacsony (kisebb, mint 40 Bq/L) értékek jellemzőek. Említésre egyrészt csak a Boltív-forrásban mért 91 Bq/l-es érték méltó, mely a korábbi adatokhoz képest a legnagyobb mért érték. Másrészt a BPGT-

12 minta esetében magas, 284 Bq/L aktivitáskoncentrációt mértünk, mely az ivóvizekre érvényes 100 Bq/L-es értékkel összehasonlítva számít magasnak.

Az urán aktivitáskoncentrációja alacsony volt (8-17 mBq/l), és csak hat esetben haladta meg a mért érték az 5 mBq/L-es kimutatási határt. Ez a minták zömmel reduktív állapotával hozható összefüggésbe. Azaz magasabb rendű, hosszabb tartózkodási idejű áramlási rendszereket mintáztunk meg. Magasabb rendű áramlási pályák reduktív környezetére magasabb rádiumtartalom jellemző, melyet megerősítenek a mintavételi eredményeink is. A minták rádium tartalma 10 és 1823 mBq/L között volt. A legmagasabb rádiumtartalommal a BPGT-08 minta rendelkezik, mely minta magas oldott anyag tartalma hosszú felszín alatti tartózkodási idejű vizekre és esetlegesen magas szervesanyagtartalmú környezet (szénhidrogének) jelenlétére enged következtetni. A többi aktivitás hasonló értékeket mutat Eröss és munkatársai által mért értékekhez (ERÖSS et al., 2012).

Két vízműkut is mintáztunk (BPGT-14 és BPGT-15), melyek esetében a rádium és urán, mint alfabomló radionuklidok, aktivitáskoncentrációjának mérésével az összesalfa mérések értelmezéséhez járultunk hozzá. Elmondható, hogy mindkét kút esetében az urán értékek kimutatási határ alattiak, a rádium aktivitáskoncentráció 39 (BPGT-14) és 91 (BPGT-15) mBq/L, melyek alacsony értékeknek mondhatók. A radon a BPGT-15 esetében kimutatási határ alatti, a BPGT-14 esetében is nagyon alacsony, 8 Bq/L. Tehát ezeknél a kutaknál nincs a radionuklidok jelenlétéből adódó egészségügyi kockázat. A kutatás eredményei hozzájárulnak a felszínalatti vízben leggyakrabban előforduló radionuklidok, a radon, rádium és urán felszínalatti vízben való előfordulásának hazai feltérképezéséhez. Mintázásunk során olyan területekről is keletkeztek adatok, melyekről eddig nem voltak információk ezen radionuklidok előfordulására.

10. Köszönetnyilvánítás

Először is szeretnénk kifejezni köszönetünket Dr. Eröss Anitának - témavezetőnknek- aki kezdeményezése és lelkesítése nélkül az SZTFH-val való együttműködés és a munkánk sem jöhetett volna létre. A dolgozatírás és a mintavétel időszaka alatt mindvégig segítségünkre volt és nagy tudásra tehettünk szert általa. Másik témavezetőnknek, Horváth Ákosnak is köszönettel tartozunk, amiért rendelkezésünkre bocsátotta az Atomfizikai Tanszéken lévő TriCarb 1000 TR eszközt a radon méréséhez, emellett segített minket a folyamatban. Külön köszönet Rádl Attilának, aki a TriCarb eszköz használatában nyújtott kezdeti segítséget.

Szeretnénk megköszönni a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága munkatársainak, hogy lehetőséget biztosítottak a kutatásba való bekapcsolódásba. Köszönjük a terepi mérések lebonyolításában való rugalmasságukat és a rengeteg információt, amit megosztottak velünk a munkánk során. Köszönjük Szabó Zsóknának, Szőcs Teodórának, Gál Nórának, Szűcs Andreának, Tihanyiné Szép Eszternek és Vári Zoltánnak a közreműködést.

Szintén köszönettel tartozunk Pál Mártonnak a térkép szerkesztésében nyújtott segítségével.

A rádium és urán aktivitás koncentrációjának méréséhez a Heinz Surbeck professzor által kifejlesztett módszert használhattuk az Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék Müller-Surbeck laborjában. Köszönjük a lehetőséget.

11. Felhasznált irodalom

2013/51/EURATOM rendelet az Európai Unió tagországaira érvényes ivóvízminőségi előírásokról:

489/2015. (XII. 30.) Korm. rendelet a lakosság természetes és mesterséges eredetű sugárterhelését meghatározó környezeti sugárzási helyzet ellenőrzési rendjéről és a kötelezően mérendő mennyiségek köréről

489/2015. (XII.30.) KORMÁNYLENDELET

5/2023. (I. 12.) kormányrendelet az ivóvíz minőségi követelményeiről és az ellenőrzés rendjéről:

<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A2300005.KOR&searchUrl=/gyorskereso?keyword%3D5/2023>

APPELTON, J. D. (2012). Radon in air and water. Essentials of medical geology: Revised edition (pp. 239-277): Springer

BARADÁCS E. 2002 Hévízek és ásványvizek radon- és rádiumtartalma. – Doktori disszertáció, Debreceni Egyetem, 103p

BEAN, JA, ISACSON, P, HAHNE, RMA, KOHLER, J. (1982). Drinking water and cancer incidence in Iowa: II. Radioactivity in drinking water. American Journal of Epidemiology, 116(6), 924-932

BOURDON, B., TURNER, S., HENDERSON, G. M., & LUNDSTROM, C. C. (2003). Introduction to U-series geochemistry. Reviews in mineralogy and geochemistry, 52(1), 1-21.

BOURDON, B., TURNER, S., HENDERSON, G. M., & LUNDSTROM, C. C. 2003: Introduction to U-series geochemistry. – Reviews in Mineralogy and Geochemistry 52, 1–21

CSONDOR, K., ERŐSS, A., HORVÁTH, Á., & SZIEBERTH, D. (2017). Radon as a natural tracer for underwater cave exploration. Journal of environmental radioactivity, 173, 51-57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.10.020>

DINH CHAU, N., DULINSKI, M., JODLOWSKI, P., NOWAK, J., ROZANSKI, K., SLEZIAK, M., & WACHNIEW, P. 2011: Natural radioactivity in groundwater - a review. – Isotopes in Environmental and Health Studies 47/4, 415–437

EISENLOHR, L., SURBECK, H. (1995). Radon as a natural tracer to study transport processes in a karst system. An example in the Swiss Jura. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. Serie 2, Sciences de la Terre et des Planetes, 321(9), 761-767.

ERŐSS, 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.

ERŐSS, A., CSONDOR, K., IZSÁK, B., VARGHA, M., HORVÁTH, Á., & PÁNDICS, T. (2018). Uranium in groundwater–The importance of hydraulic regime and groundwater flow system's understanding. *Journal of environmental radioactivity*, 195, 90-96.

ERŐSS, A., HEGEDŰS-CSONDOR, K., KOVÁCS-BODOR, P., SZIEBERTH, D., HORVÁTH, Á., CZUPPON, G., MINDSZENTY, A., LEÉL-ÓSSY, S., MÁDL-SZŐNYI, J., 2024. Revealing the ongoing speleogenetic processes in an underwater cave through the application of natural radionuclides and stable isotopes: case study from the hypogene Buda Thermal Karst. *International Journal of Speleology*, 53(2), 147-158. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.53.2.2510>

ERŐSS, A., HORVÁTH, Á., HEGEDŰS-CSONDOR, K., BAJÁK, P., KOVÁCSNÉ BODOR, P., & MÁDLNÉ SZŐNYI, J. (2021). RADON A FELSZÍNALATTI VIZEKBEN. *Sugárvédelem*, 14(2), 37-42.

ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J., SURBECK, H., HORVÁTH, Á., GOLDSCHIEDER, N., & CSOMA, A. É. (2012b). Radionuclides as natural tracers for the characterization of fluids in regional discharge areas, Buda Thermal Karst, Hungary. *Journal of Hydrology*, 426, 124-137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.031>

ERŐSS, A., SURBECK, H., CSONDOR, K., HORVÁTH, Á., MÁDL-SZŐNYI, J., & LÉNÁRT, L. (2015). Radionuclides in the waters of the Bükk region, Hungary. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303(3), 2529-2533. doi: 10.1007/s10967-014-3802-x

FÓRIZSI, DEÁKJ., MÜLLERP & TÓTHGY.2008: A többlet-szén-dioxid eredete a budapesti termál-karsztvíz rendszerben. Elektronikus dokumentum, Fava.hu/balatonfured2008/eloadasok/elozetes/forizs.pdf

Forrás - WOLTERS KLUWER - Minden jog fenntartva!

Fürdőkutató Intézete Kiadványa, Mérnökök Nyomdája, Budapest

GAINON, F., GOLDSCHIEDER, N., & SURBECK, H. (2007). Conceptual model for the origin of high radon levels in spring waters–the example of the St. Placidus spring, Grisons, Swiss Alps. *Swiss Journal of Geosciences*, 100(2), 251-262.

Gyógyfürdő Monográfiája. A Budapesti Központi Gyógy- és Üdülöhelyi Bizottság Rheuma- és

HOEHN, E. (1998). Radionuclides in groundwaters: contaminants and tracers. IAHS Publication no. 250

KOVÁCS-BODOR, P., ANDA, D., JURECSKA, L., ÓVÁRI, M., HORVÁTH, Á., MAKK, J., POST, V., MÜLLER, I., MÁDL- SZŐNYI, J., 2018. Integration of in situ experiments and numerical simulations to reveal the physicochemical circumstances of organic and inorganic

precipitation at a thermal spring. *Aquatic Geochemistry*, 243, 231- 255.
<https://doi.org/10.1007/s10498-018-9341-2>

KOVÁCS-BODOR, P., CSONDOR, K., ERŐSS, A., SZIEBERTH, D., FREILER-NAGY, Á., HORVÁTH, Á., . . . MÁDL-SZŐNYI, J. (2019). Natural radioactivity of thermal springs and related precipitates in Gellért Hill area, Buda Thermal Karst, Hungary. *Journal of environmental radioactivity*, 201, 32-42.

KÖTELES GYÖRGY - Sugáregészségtan (2002)

KURTTIO, P, HARMOINEN, A, SAHA, H, SALONEN, L, KARPAS, Z, KOMULAINEN, H, AUVINEN, A. (2006). Kidney toxicity of ingested uranium from drinking water. *American journal of kidney diseases*, 47(6), 972-982.

LINZBAUER XF (1837) Die warmen Heilquellen der Hauptstadt Ofen. – In: KUNSZT J (1947) A Rudas

LYMAN, GH, LYMAN, CG, JOHNSON, W. (1985). Association of leukemia with radium groundwater contamination. *Jama*, 254(5), 621-626.

MÁDLNÉ SZŐNYI, J., 2020. Felszínalatti vízáramlások mintázata fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos víztartó rendszerekben, a Budai-termálkarszt tágabb környezetének példáján. DSc Thesis, Hungarian Academy of Sciences. <https://real-d.mtak.hu/1317/>

MÁDL-SZŐNYI, J., TÓTH, Á., 2015. Basin-scale conceptual groundwater flow model for an unconfined and confined thick carbonate region. *Hydrogeology Journal*, 237, 1359-1380.

MÁDLNÉ SZŐNYI J. M., ERŐSS A., HAVRIL T., POROS Z., GYŐRI O., TÓTH Á., CSOMA A., MINDSZENTY A. (2018) Fluidumok, áramlási rendszerek és ásványtani lenyomataik összefüggései a Budai Termálkarszton. *Földtani Közlöny*, 148 (1), pp. 75-96.

MINDSZENTY, A. (2013) (szerk.) Budapest: földtani értékek és az ember. ELTE Eötvös Kiadó, 311 p.

STOCKER, L. (1721) *Thermographia Budensis*

SURBECK, H. (2000): Alpha spectrometry sample preparation using selectively adsorbing thin films, *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 53, Issues 1–2, 97-100, [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(00\)00119-6](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(00)00119-6).

SWARZENSKI, P.W. (2007). U/Th series radionuclides as coastal groundwater tracers. *Chemical Reviews*, 107(2), 663–674.

TÓTH, J. (1999). Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, 7, 1-14.

WEIN, Gy. (1977): *Tectonics of Buda Hills*. — Magyar Állami FöldtaniIntézet Alkalmi Kiadványa, 76 pp., Budapest.

WRENN, ME, DURBIN, PW, WILLIS, DL, Singh, NP. (1987). The potential toxicity of uranium in water. *Journal-American Water Works Association*, 79(4), 177-184.

ZSIGMONDY V (1878) A városligeti artézi kút Budapesten. Földtani Közlöny IX: 128.

Internetes források:

<https://atomfizika.elte.hu/kornyfizlab/docs/rad.html#:~:text=A%20felsz%C3%ADn%20alatti%20vizek%20%C3%A1ltal%C3%A1ban%20nem%20%C3%A9rintkeznek%20a,felsz%C3%ADn%20alatti%20k%C5%91zetek%20ur%C3%A1n-%20vagy%20t%C3%B3rium-tartalm%C3%A1nak%20a%20k%C3%B6vetkezm%C3%A9nye.>

<https://doi.org/10.1007/s10040-015-1274-x>

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0051&from=CS>

<https://www.amerispec.com/blog/radon-poisoning-learn-risks>

<https://www.arcanum.com/hu/online-kiadvanyok/pannon-pannon-enciklopedia-1/magyarorszag-foldje-1D58/az-eghajlat-a-vizek-a-talaj-es-az-elovilag-foldrajza-25FA/felszinalatti-vizek-liebe-pal-2746/a-felszinalatti-vizkeszletek-hasznositasa-2764/>

https://www.rieth.hu/Vilagom/44_RadioaktivBomlasiSorok.htm

[\(\(https://www.nnk.gov.hu/index.php/nemzeti-radon-cselekvesi-terv-2/a-radioaktivitasrol-diohejban.html\)\)](https://www.nnk.gov.hu/index.php/nemzeti-radon-cselekvesi-terv-2/a-radioaktivitasrol-diohejban.html)

12. Melléklet

Mintaazonosító	Mintavétel ideje	Helyszín	Kataszteri szám	Kút típusa	Felső szűrő (m)	Alsó szűrő (m)	Szűrőközep eleváció (m)	Kút mélysége (m)	Vízadó közet	T (°C)	EC (µS/cm)	DO (%)	DO (mg/L)	pH	ORP (mV)	Radon idő	TRIC ARB Rn (Bq/L)	TRIC ARB Rn hiba	U összes (mBq/L)	U összes hiba	Ra-226 (mBq/L)	Ra-226 hiba
BPGT-01	2024.10.16	Bánk	Bánk-2, Rétság 2/a	szivattyús	67	141	67,96	150,2	T3 mkő	28,6	1940	0,2	0,02	6,20	-59	11:55	18	2	<5		111	17
BPGT-02	2024.10.16	Göd	Göd-K8	pozitív	655	695	-560,3	695	T3 mkő	51,9	1523	0,9	0,05	6,02	-281,2	15:14	12	2	<5		716	45
BPGT-03	2024.10.17	Veresegyház	K-25	szivattyús	1126,4	1202	-1006,44	1202	T3 mkő	66,4	1571	nem mérhető		5,97	-279,8	10:37	<5		<5		403	21
BPGT-04	2024.10.17	Vác Strandfürdő	Vác B58	szivattyús	1101	1177	-1029	1177	T3 mkő E3	29,8	1674	42	3,19	6,40	7,7	14:41	<5		<5		245	16
BPGT-05	2024.10.22	Aquaworld Budapest IV. kerület	Budapest IV. ker. 121	szivattyús	763	775	-663,04	780	T3 mkő, dol E3	32,7	916	0,3	0,02	6,71	-198,8	11:40	10	2	<5		156	22
BPGT-06	2024.10.22	Budapest XIV. kerület BVSC uszoda	B-56	szivattyús	1224,8	1233,4	-1120,76	1233,2	T3 mkő	75,4	1680	nem mérhető		5,90	-290	14:33	<5		13	4	517	41
BPGT-07	2024.10.24	Pilisborosjenő	DMRV 2-e kút	szivattyús	107	144,6	69,39	180	T3 dol	14,4	791	63,6	6,46	7,26	158,1	10:05	<5		7	2	10	4
BPGT-08	2024.10.24	Budapest Őrmező,	Apenta-2	szabad kifolyású	800	898	-743,47	902	T3 mkő	52,5	2320	nem mérhető		6,03	-275,8	14:48	25	3	10	3	1823	76

		Apenta kutak																				
BPGT-09	2024.10.28	Budapest Vadász utca 30.	B-30	szivattyús	698	798,8	-643,02	800,3	T3 mkő	57,5	1440	nem mérhető		6,16	-266,7	11:50	<5		<5		424	31
BPGT-10	2024.10.28	Budapest XIII. kerület Elektrom os sporttelep	B-43	szivattyús	241	271	-150	280	E3 mkő	39,4	1030	0,3	0,02	6,51	-298,4	16:06	<5		8	3	191	20
BPGT-11	2024.10.31	Tura	K-109	szivattyús	1462, 5	1489	-1310,15	1489	E3 mkő	99,1	2640	nem mérhető		6,56	-251,6	12:14	<5		<5		422	34
BPGT-12	2024.11.04	Törökbáli nt Depo II. kapu	K22	szivattyús	592	632	-480	634	T3 dol	31,5	1212	0,2	0,02	6,78	-139,2	10:10	284	19	18	4	260	27
BPGT-13	2024.11.04	Budapest Dagály fürdő (Duna Aréna)	B-14	pozitív	117	123	-19	125,9	E3 mkő	37,2	1080	0,3	0,02	6,52	-259,5	14:45	38	8	<5		140	14
BPGT-14	2024.11.14	Sárisáp	1	szivattyús	41,3	42,5	91,36	42,5	T3 dol	17,8	830	1,1	0,11	7,02	140,9	11:07	8	2	<5		39	8
BPGT-15	2024.11.14	Esztergo m	B5	szivattyús	242,3	280	-153,84	323,5	T3 dol	27,2	890	0,3	0,03	6,73	51,1	13:52	<5		<5		91	12
BPGT-16	2024.11.19	Visegrád	7	szivattyús	1187	1301	-1128,3	1301,7	T3 mkő	39,1	1250	0,5	0,03	6,44	-139,8	11:07	<5		<5		118	16
BPGT-17	2024.11.19	Leányfalu	4	szivattyús	715	985,5	-715,55	1009	T3 mkő	54,5	1312	0,3	0,02	6,12	-282,7	15:36	9	2	<5		544	35
BPGT-18	2024.11.20	Molnár János Barlang, Boltív- forrás		forrás			104		E3 mkő, mga	21,8	993	21,7	1,87	6,89	138,9	15:39	91	6	17	6	91	16

13. Függelék: Saját eredmények bemutatása

- A Budapesti termálkarsztrendszer és az ehhez tartozó utánpótlódási területek mintázása 18 helyszínen, kutakból és egy forrásból
- Mintavételek természetes radioaktív alfabomló izotópokra: urán (^{234}U , ^{238}U) ^{226}Ra , ^{222}Rn
- TriCarb folyadékszintillációs mérőműszer használata a radon aktivitáskoncentrációjának méréséhez
- Az urán és a rádium méréséhez szelektíven abszorbeáló diszkeket alkalmazó mintaelőkészítés elvégzése, mely egyedülállóan csak az ELTE-n alkalmazott módszer az országban
- Az urán és a rádium diszkek mérése alfa spektrométerrel
- A kapott eredmények elemzése, kiértékelése
- Uránizotópok esetén:
 - 18 mintából 6 minta esetén érték el a minták 5 mBq/L-es kimutatási határérték feletti értéket, ezek a mért értékek 7 és 18 mBq/L között voltak
 - Ezek az értékek alacsonyak, nem jelentenek egészségügyi kockázatot
 - A mért értékek is alátámasztják az a feltevést, mely szerint a területen hosszabb tartózkodási idejű, regionális áramlási rendszerek vannak, amelyekre nem jellemző magas urán aktivitáskoncentráció, mert az urán oxidatív környezetben mobilis és a mintáink zömét reduktív viszonyok jellemezték
- Rádium izotópnál:
 - Mind a 18 minta értéke az 5 mBq/L-es kimutatási határérték felett volt
 - Az értékek 10 és 1823 mBq/L között alakultak
 - Bár vannak kiugró értékeink, az összesalfa koncentrációra vonatkozó egészségügyi határértéket így sem érték el a mintákban mért aktivitáskoncentrációk, így nem áll fent egészségügyi kockázat
 - A kapott értékeink is jól tükrözik, hogy a területen hosszabb tartózkodási idejű, regionális áramlási rendszerek jellemzőek, reduktív viszonyokkal, mely kedvez a rádium mobilitásának
- Radon izotópnál:
 - 18 mintából 9 minta érte el az 5 Bq/L kimutatási határértéket
 - Az értékek 8 és 284 Bq/L között változtak
 - A 284 Bq/L-es értékkel rendelkező törökbálinti kút esetén fennállhat egészségügyi kockázat, amennyiben a kút valamilyen módon ivóvízellátást szolgál
- A terepi paraméterek esetében a
 - Hőmérséklet: 14,4 és 99,1 °C között változott
 - Fajlagos elektromos vezetőképesség: 791 és 2640 $\mu\text{S/cm}$ között változott
 - Oldott oxigén: 0,20 és 63,6 % között értékeket mutatott,
 - Oldott oxigén mg/L-es értékelésnél: 0,02 és 6,46 mg/L értékek között
 - pH: 5,9 és 7,26 közötti ingadozást mutattak a minták
 - Redoxpotenciál: -298,4 és 158,1 mV közötti értékeket között mértünk
- Eredményeink összevetése a méréseinket megelőző kutatásokkal
 - Összességében hasonló értékeket kaptunk, de méréseink – egy kivételével – más, eddig nem mintázott helyszíneket jellemeznek, azaz eredményeink a mintázott helyszínekről új információt szolgáltattak a radioizotópok tekintetében

- A Boltív-forrásnál mért eredményünk eltérése feltehetően a mintázás módszerének pontosításából adódott
- Az egészségügyi kockázatot kizártuk a vízműutak esetében