



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**Borospincék szellőzési viszonyainak
nyomjelzése természetes eredetű radonnal**

BÚZÁS ESZTER BÍBORKA

Kémia BSc, III.

Témavezető: Dr. Csige István
tudományos főmunkatárs

**Debreceni Egyetem Természettudományi és Technológiai Kar
MTA Atommagkutató Intézet
Kihelyezett Környezetfizikai Tanszék**

2014

Tartalom

1.	Bevezetés	1
2.	Irodalmi előzmények	3
3.	Az alkalmazott kísérleti módszerek.....	7
3.1.	Passzív eljárás	7
3.2.	Aktív eljárás	9
4.	Az elért eredmények és értékelésük	10
4.1.	A mérések helyszíne	10
4.2.	Eredmények közlése	12
4.2.1.	Függőleges változás.....	14
4.3.	Eredmények értékelése	16
4.3.1.	A ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációt meghatározó tényezők.....	17
4.3.2.	Szellőzési sebességek becslése	20
4.3.3.	Légnyomás-változás hatása	24
4.3.4.	Relatív páratartalom	26
5.	Összefoglalás	27
6.	Irodalomjegyzék	28

1. Bevezetés

A levegő környezetünk egyik alapvető eleme, mely 78 térfogat % nitrogénből, 21 térfogat % oxigénből és 1 térfogat % egyéb anyagból áll. Az egyéb összetevők között találjuk a széndioxidot és a nemesgázokat. A nemesgázok közül a legritkább, legnehezebb, de radioaktivitása miatt az élő szervezetek számára a legveszélyesebb a radon (Rn). Az atmoszféra radontartalmát $7 \cdot 10^{-17}$ térfogat %-ra becsülik. Kis mennyiségben a földkéreg is tartalmazza ezt az elemet, hiszen a radon a kőzetekben kis mennyiségben megtalálható rádiumból keletkezik¹⁾.

Kis mennyisége ellenére a radon (a dohányzás után) a tüdőrák második legjelentősebb kockázati tényezője. A radon szintén radioaktív rövidéletű bomlástermékei fémek (polónium, bizmut, ólom), amelyek a levegő szilárd részecskéihez kapcsolódva légzés során a tüdőbe jutnak, ott megtapadnak a tüdő falán. A bomlástermékek tovább-bomlanak alfa-, és kisebb jelentőségű béta- és gamma-sugárzást kibocsátva. A bomlási sor végét elérve pedig szilárd anyaggá, stabil ólomizotóppá alakulnak. Ez a sugárterhelés tehető részben felelőssé a tüdőrák kialakulási kockázatának növekedésért.

Ma Magyarországon a 16/2000. (VI. 8.) EüM. Rendelet szerint a borospincékben „... a természetes forrásoktól származó munkahelyi sugárterhelést szabályos körülmények mellett tartósan fennálló sugárterhelésnek kell tekinteni, amelyre a beavatkozásokkal szemben támasztott követelmények érvényesek. Az ilyen esetekre vonatkozó cselekvési szint 1000 Bqm^{-3} radon-koncentráció a levegőben, éves átlagban.”. Ezt a szintet, ha meghaladja a ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció, akkor cselekvési tervet kell készíteni a csökkentésére. Amennyiben a radonkoncentráció csökkentésére nincs lehetőség, mint például védett barlangok esetében, úgy a munkaidő korlátozásával lehet biztosítani, hogy a radontól származó sugárterhelés a kívánt szint alatt maradjon. Borospincék esetében is felvetődhet az a kérdés, hogy egyes pincékben, ahol nagy radonkoncentrációk fordulnak elő, esetleg szükség lehet valamiféle beavatkozásra. Ennek a munkának az egyik célkitűzése, hogy ilyen szempontból is megvizsgálja egyes borpincék légterében kialakuló radonszinteket, vagyis az éves átlagos ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációkat.

Méréseimet 2008 nyarán kezdtem 20 tokaj-hegyaljai pincében. Céлом az éves átlagos értékeknek a meghatározása volt, hiszen földalatti üregek, így borospincék légterében is jelentős mennyiségben fordulhat elő a ^{222}Rn (radon) és a ^{220}Rn (toron) izotóp. Jelenlétük sugárveszélyt jelenthet dolgozókra. Mérésem kezdetekor kíváncsi voltam, hogy

pincetulajdonos, vagy a pincéket csak gyakran látogató ismerőseimre, barátaimra mekkora veszélyt jelent a pincéikben felhalmozódott ^{222}Rn által okozott sugárterhelés. Pincénként egy pár (az MTA Atommagkutató Intézet Radon csoportjában kifejlesztett) Radamon típusú maratottnyom-detektoros radon- és toronmérővel, amelyeket évszakonként cseréltem, egy éven át mértem a pincék radon-aktivitáskoncentráció szintjét.

A radon és toron térbeli és időbeli változásainak a vizsgálata lehetővé teszi, hogy ismereteket nyerjünk a borpincék szellőzési viszonyaira. A szellőzés mértéke és milyensége a bor minősége szempontjából is igen lényeges, hiszen Tokaj-hegyalján a pincékben található (a borral szimbiózisban élő) nemes penész is a világörökség részét képezi. Ezért ennek a munkának a célkitűzése a pinceklíma vizsgálata a radonnak és a toronnak, mint természetes nyomjelzőnek az alkalmazása a pince szellőzési viszonyainak a megismerésére.

Kutatásaim folytatásaként vizsgáltam a radon gáz pincén belüli eloszlását 1-1 kiválasztott pincében. Több mint egy éven keresztül, évszakonként cserélt detektorokkal, 20-20 detektorpárral mértem a pince hossza mentén, illetve függőleges profil mentén a Rn-aktivitáskoncentráció térbeli eloszlását.

A gyors időbeli változások tanulmányozására egy AlphaGUARD PQ2000 típusú ionizációs kamrás radonmonitort is használtam.

Továbbá célom volt egyszerű matematikai modellek alkalmazásával elméleti úton is kiszámítani ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció térbeli és időbeli változásait, és a kísérletileg mért adatoknak a modellszámítások eredményeivel való összevetéséből becsülni a radonkoncentrációt befolyásoló tényezők (mint például a szellőzési sebesség) értékeit.

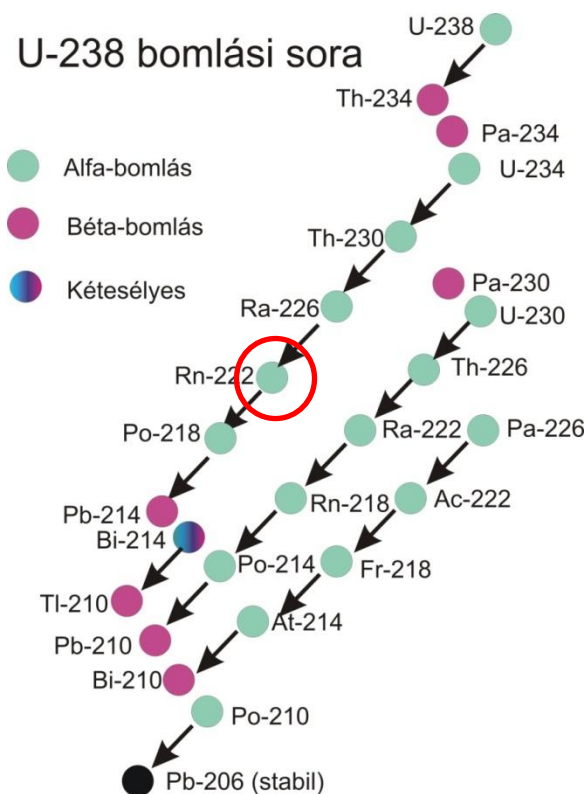
2. Irodalmi előzmények

A radon egy szintelen, szagtalan, íztelen radioaktív nemesgáz. A természetben előforduló izotópjai alfa-sugárzóak. Mindenhol megtalálhatóak, a kőzetekben, talajokban lévő rádiumizotópok bomlásakor keletkeznek. A pórusterbe jutva bárhova eljuthatnak a pórusteret kitöltő szállító közeg (legyen az akár levegő akár talajvíz) által, de diffúzióval is jelentős mennyiség kerülhet belőlük földalatti üregekbe. Zárt, szellőzetlen, földalatti helyeken mennyisége felhalmozódik, ilyen helyek a barlangok, bányák, borospincék, stb.

Az emberek által épített házakban kb. tízszer, pincékben kb. ötvenszer-százszor, míg barlangokban több ezerszer akkora a ^{222}Rn aktivitáskoncentrációja, mint szabad téren.

A radonnak két izotópját vizsgáltam:

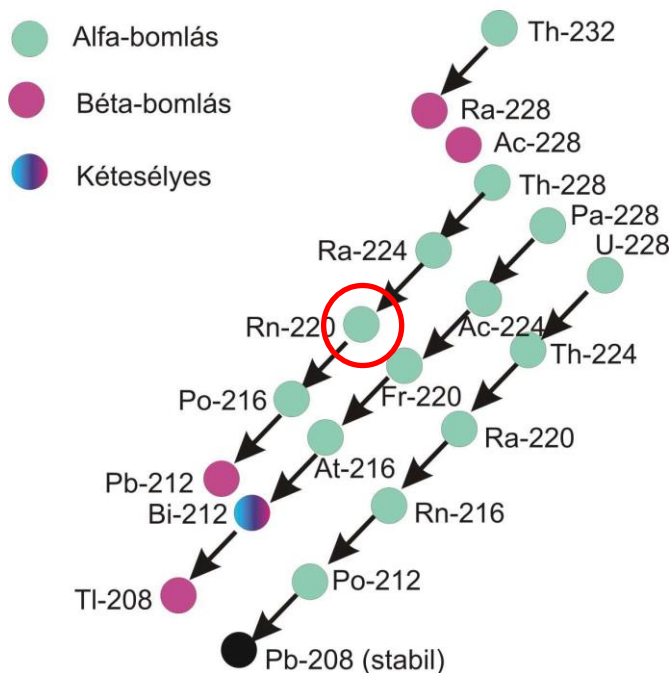
- ^{222}Rn (radon):
 - felezési ideje: 3,82 nap
 - ^{238}U bomlási sorában található meg (1. ábra)



1. ábra. A ^{222}Rn az ^{238}U bomlási sorában.

- ^{220}Rn (toron)
 - felezési ideje: 55,6 s
 - ^{232}Th bomlási sorában található meg (2. ábra)

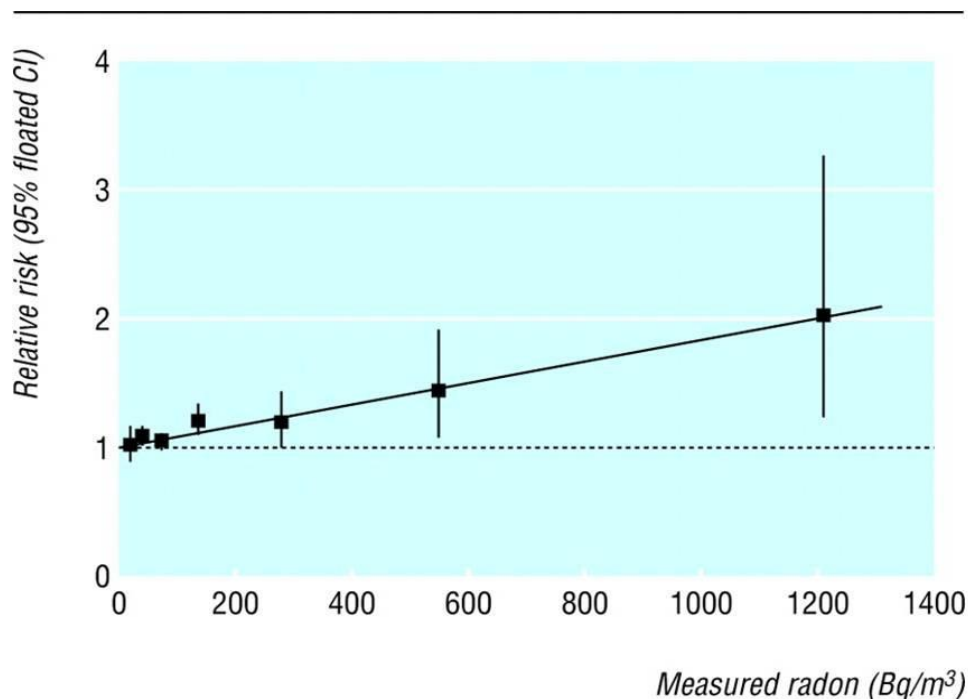
Th-232 bomlási sora



2. ábra. A ^{220}Rn a ^{232}Th bomlási sorában.

Világátlagban a lakosság természetes forrásokból eredő sugárterhelésének kb. felét (1-2 mSv/év) a radon rövidéletű bomlástermékeinek a belégzése adja.

Egy átlagos családi házban pár 10, esetleg pár 100 Bq/m³-es (vagy nagyon ritkán még ennél is lényegesen nagyobb) radon-aktivitáskonzentráció van. A 3. ábrán ^[6] láthatjuk, hogy hogyan változik a tüdőrák relatív kockázata a lakóépületekben mért radon-szint függvényében. A grafikon több országban végzett felmérések elemzése alapján készült, amelyekben összességében több tízezer lakás radonszintjét, és a lakásokban élő emberek egészségügyi állapotát vizsgálták. Látható, hogy 1200 Bqm⁻³-es mért évi átlagos radon-aktivitáskonzentrációnál két- háromszorosára is növekedhet a tüdőrák relatív kockázata.



3. ábra. A tüdőrák relatív kockázatának változása a mért évi átlagos ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció függvényében [6].

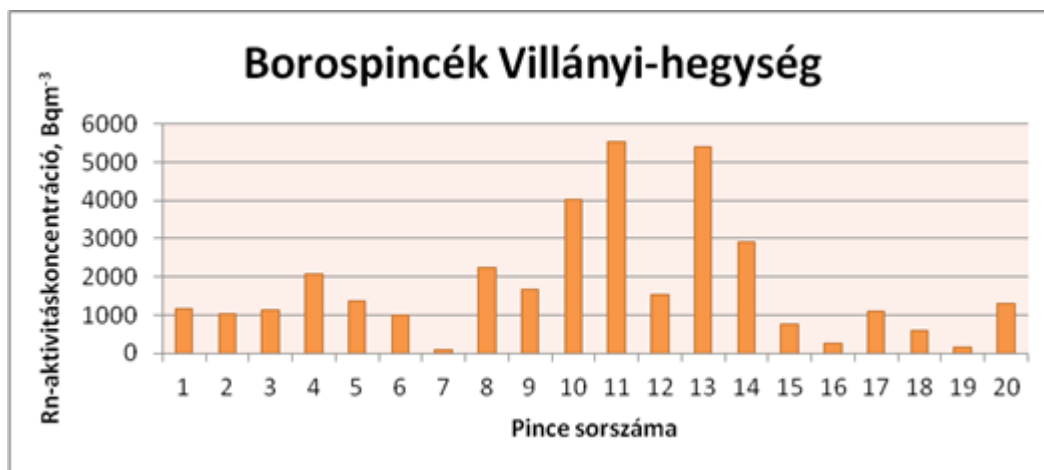
A lakótéri radon vizsgálatára Magyarországon már 1978-ban (*Tóth Árpád*) és 1981-ben (*Bozóky László*) is javaslatot tettek. Az első szélesebb körű lakótéri radonvizsgálatról 1988-ban számoltak be *Somogyi György és munkatársai*. Ebben a tanulmányban 122 magyarországi lakótér LR-115 nyomdetektorral történt másféléves méréséből a radon éves átlagos aktivitáskoncentrációjának középértékére 55 Bq/m^3 -t kaptak. Egy későbbi, reprezentatívnak mondott, 998 lakásra kiterjedő, egy éves felmérés szerint pedig a magyarországi radon szint súlyozott középértéke 107 Bq/m^3 [8].

A lakásokban lévő pár tízes értékekkel szemben egyes barlangokban több tízezres értékek is mérhetőek [7]. Hasonlóan borospincékben is találtak több száz illetve több ezer Bq/m^3 -es ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációkat [11]. A magas radon-veszélyű területeken (ilyen helyek lehetnek pl. a barlangok, pincék, borospincék) dolgozók számára egészségvédelmi célú szabályozások korlátozhatják például a munkaidőt.

A radonra visszavezethető betegségeket a XV. században először ércbányászok körében írták le, bár maga a radon, sőt maga a tüdőrák is akkor még nem volt ismert. Felfigyeltek a bányászok körében elterjedt tüdőbetegségre, mint halált kiváltó okra. Később rájöttek, hogy ez a betegség a tüdőrák. Ezt követően már csak arra kellett rájönni, hogy a bányák magas radon aktivitáskoncentrációja vezetett a tüdőrák nagyszámú kialakulásához. A tudományos kutatások eredményeképpen csak a XIX. és a XX. század fordulóján sikerült azonosítani a

radont, és csak a XX. század közepén kezdték vizsgálni az emberi szervezetre gyakorolt hatásait, amelyek alapján megszülettek a radonnal kapcsolatos első munkavédelmi szabályozások és ajánlások is. A lakótérben lévő radon felmérése pedig csak mintegy 30-40 évvel ezelőtt kezdődött meg.

Kevés mérés foglalkozik borospincék ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációjának vizsgálatával. A következő 4. ábra ezek közül mutat egy példát: a debreceni Atommagkutató Intézet és az OSSKI által a Villányi borvidék 20 pincéjének radon értékeit mutatja.^[3]



4. ábra Villányi borvidék 20 pincéjének ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációja 2003-ban

A radon és a toron részletes térbeli és időbeli változásainak vizsgálata azonban eddig nem képezte tárgyát részletes kutatásoknak, ezért ebben a munkában célul tűztem ki, hogy ebből a szempontból is megvizsgáljam a radon viselkedését a borospincékben.

3. Az alkalmazott kísérleti módszerek

A zárt terek radon-tartalmát általában szilárdtest nyomdetektoros (ritkábban aktív-szenes, vagy elektret-detektoros) technikával vizsgálják. A radon illetve leánytermékeinek vizsgálatára többféle műszert is kifejlesztettek: vannak aktív eljárások, melyek pillanatnyi értékeket adnak órás, félórás bontásokban, valamint passzív eljárások, melyek hosszabb időre (hetek, hónapok) adnak átlagértékeket.

Én kétféle mérési módszerrel dolgoztam, egy aktívval és egy passzívval.

3.1. Passzív eljárás

Az MTA Atommagkutató Intézet Radoncsoportja által kifejlesztett Radamon típusú maratott-nyomdetektoros radondetektort ^[3] használtam (5. ábra). Ez egy 35 mm átmérőjű, 18 mm magasságú műanyaghenger, amely egy 1-2 cm² területű CR-39 (allil-diglikol-karbonát) típusú polimer nyomdetektort tartalmaz.

A Radamon tartalmaz egy papír szűrőfóliát, a levegő szilárd részecskéinek és a radon bomlástermékeinek leválasztására, illetve egy polietilén szűrőfóliát a toron (²²⁰Rn) kiszűrésére.



5. ábra. Radamon detektorok kihelyezve

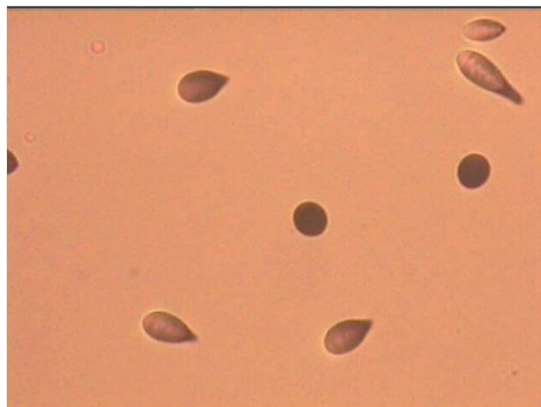
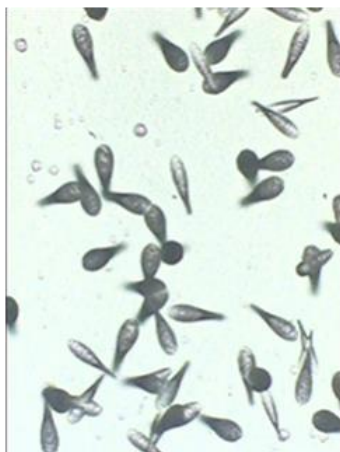
Méréseimhez „iker” detektorokat használtam, melyek közül az egyikben nem volt polietilén fólia, ennek következtében a toron értéket is megállapítottam (hiszen a mindkét fóliával rendelkező detektorba nem jut be a toron, mivel túl kicsi a felezési ideje ahhoz, hogy átdiffundáljon a polietilén szűrőfólián).

A detektorokat a pincék talaján, a talaj és a fal találkozásánál helyeztem el a bejárattól (legtöbb esetben) a lehető legtávolabb.

Az évszakos változást vizsgálva negyedévenként, évszakokhoz igazítva cseréltem a detektorokat.

A begyűjtött detektorokat kémiai maratásnak kell alávetnünk, hogy felületükön az alfa részecskék szemmel láthatóak legyenek. Közvetlenül maratás előtt egy órán át 100°C-os vízben áztattuk a detektorokat, majd 20 %-os NaOH oldatban 70 °C-on 5 órán át maratattuk. A

következő (6. és 7.) ábrákon így kimaratott alfa-részecskenyomokat láthatunk optikai mikroszkóp segítségével készített felvételeken.



6. és 7. ábra. Alfa-részecskék maradt nyomai a detektor maratása után, optikai mikroszkópon keresztül.

Ezután optikai mikroszkóp alatt megszámlálva a maradt alfa-részecske nyomoknak a sűrűségét és figyelembe véve a besugárzási időt megállapíthatjuk a besugárzási időre eső átlagos radon-aktivitáskoncentrációt.

Egyes esetekben hibás (nem valós) értékek megállapítása is lehetséges, mivel a detektorok többféle veszélynek vannak kitéve: rágsálók megrághatják a papírszűrőt (a 8. ábrán látható detektorok esetében ez a valószínűsíthető probléma), elveszhetnek, beázhatnak, bepenészedhetnek, stb.



8. ábra. Példa a mérés során megrongálódott Radamon detektorokra

3.2. Aktív eljárás

A másik mérési műszer az AlphaGuard, ami egy ionizációs kamrás radonmonitor (0,56 liter térfogatú és 750 V feszültségen üzemelő ionizációs kamra, melyhez kapcsolódik egy digitális feldolgozó egység), amely nem csak a radon, hanem a hőmérséklet, a nyomás és a relatív páratartalom folyamatos mérésére szolgál.



9. ábra. Az AlphaGuard ionizációs kamrás radonmérő műszer

4. Az elért eredmények és értékelésük

4.1. A mérések helyszíne

Tokaj-hegyalján jelentős bortermelés folyik. A pincetulajdonosok és munkásaik esetenként sok időt töltenek pincékben.

A borvidék területe magába foglalja a legkiemelkedőbb termőhelyeket, melyek összesen kilenc település - Tokaj, Bodrogkeresztúr, Bodrogkisfalud, Mád, Mezőzombor, Rátka, Szegi, Tarcál, Tállya - közigazgatási területének részét képezik, továbbá ide tartozik Sátoraljaújhelyen az Ungvári Pince, Sárospatakon a Rákóczi Pince, Hercegkúton a Kőporosi és a Gomboshegyi Pincék, valamint Tolcsván az Oremus és a Tolcsva Bormúzeum Pincék. Az elmúlt ezer év alatt kialakult szőlőművelési hagyományok érintetlen, eredeti formában való továbbélése és a borvidék évezrede tartó egysége indokolta, hogy az UNESCO Világörökség Bizottsága a Tokaji borvidéket 2002-ben, mint kultúrtájat felvette a Világörökségi Listára. A világörökségi helyszín összesen 132,555 négyzetkilométernyi (13245 ha).

20 pince vizsgálatával kezdtem a mérésorozatot:

- Hercegkúton (11 pince),
- Sárospatakon (4 pince),
- Sátoraljaújhelyben (2 pince),
- Olaszliszkán (2 pince) és
- Sározsadányban (1 pince).

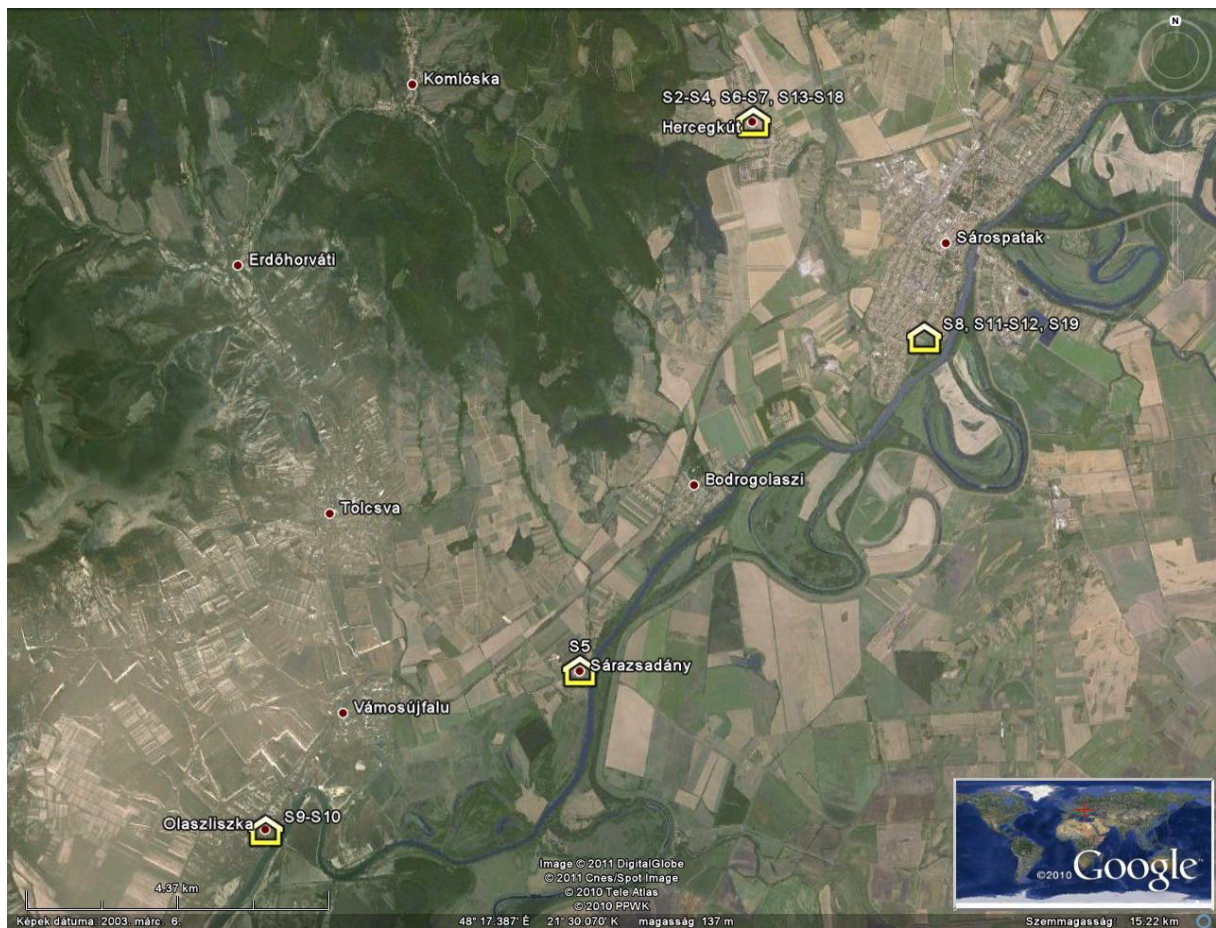
Hercegkúton két pincesor található.

A Kőporosi pincesoron elhelyezett detektorok: S2-, S3-, S6-, S7-, S15-, S17-, S18 pince, a Gombos hegyi pincesoron elhelyezett pincék pedig: S4-, S13-, S14-, S16 pince.

Majd a Sátoraljaújhelyi Ungvári pincesor 9 pincéjében végeztem vizsgálatokat.

A mérések helyszínéül választott pincék területi elhelyezkedését mutatja a 10. ábra.

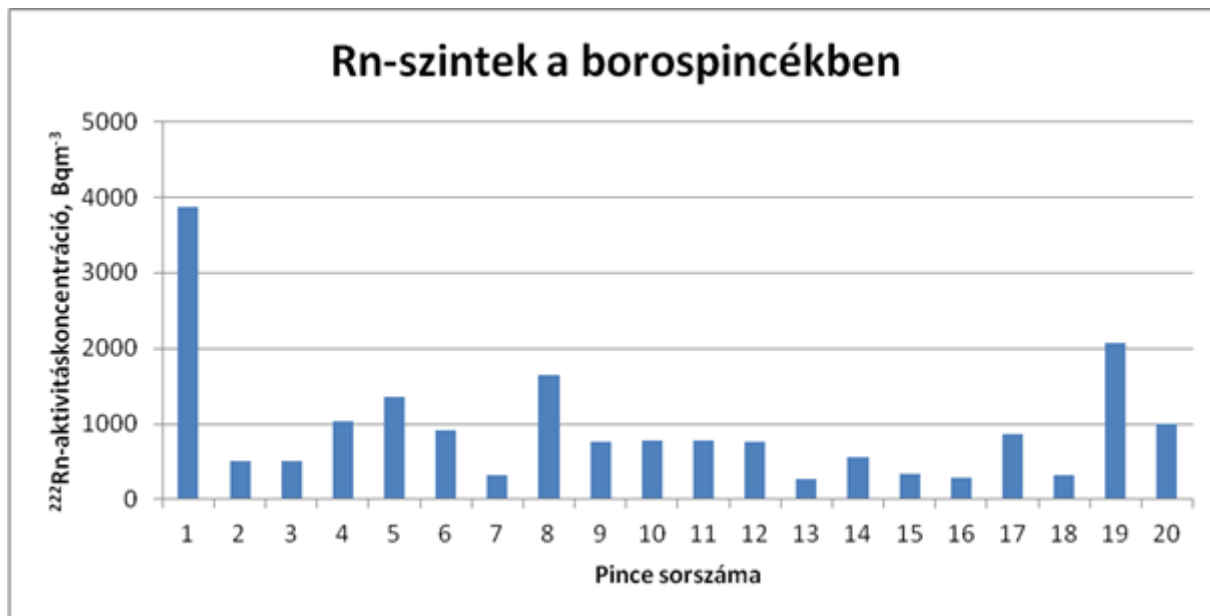
Földtani szempontból vizsgálva a mérések helyszíneit javarészt homokos/agyagos finomszemű talajt találunk. De ezen kívül van kavicsos talajba vájt pince is (S20), illetve a hercegkúti Gombos hegyi pincesor riolit és andezit tufa alapú. Sátoraljaújhelyben található riolittufa, összesűrűsödött, perlites riolit is (az S1-es pince esetében). (Budai, 2009)



10. ábra. A maratottnyom-detektoros mérési helyek elhelyezkedése Tokaj-hegyalján a Google Earth térképén bejelölve.

4.2. Eredmények közlése

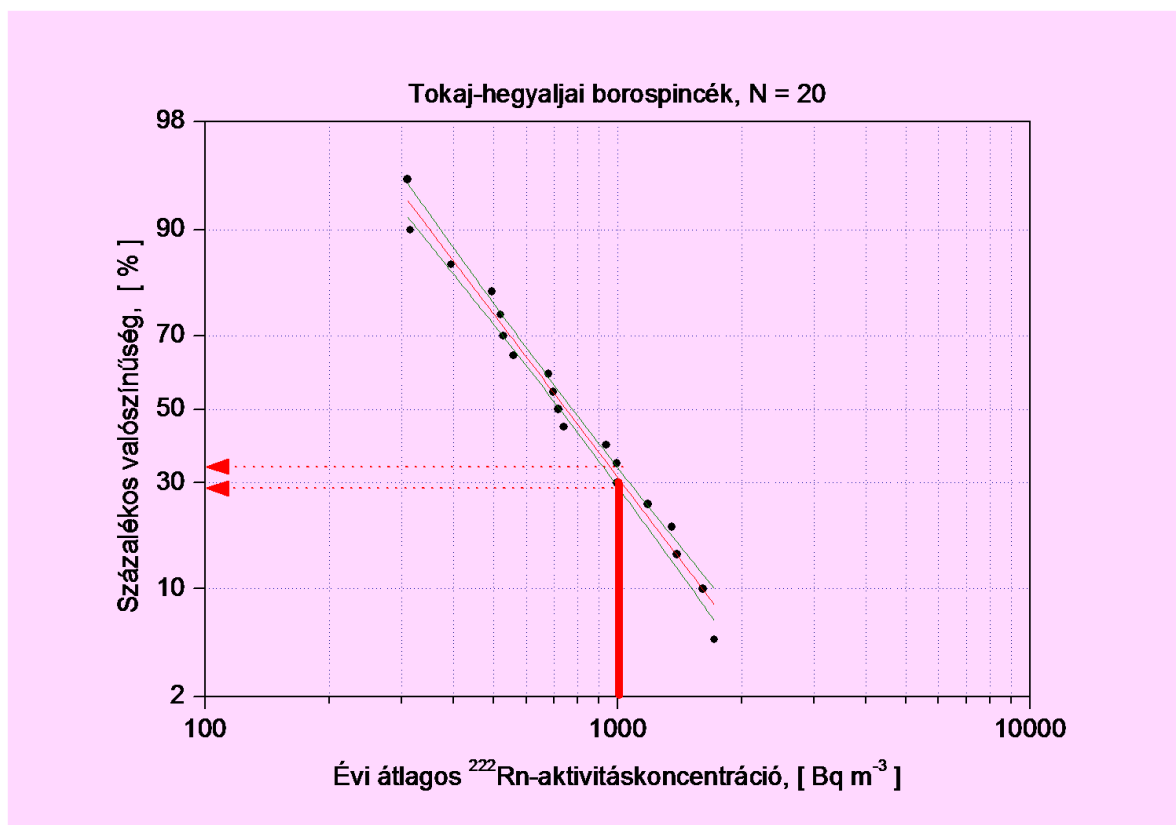
Az első mérésorozatomat 2008 nyarán kezdtem. A 20 pincében évszakonként cserélt detektorpárral dolgoztam egy éven át. Ennek átlagolt illetve részletes eredményei a következő ábrákon láthatóak.



11. ábra. Az egyes pincék éves átlagos ^{222}Rn -aktivitáskonzentráció értéke (a negyedéves mérési adatok átlaga)

Az ábrán a 20 pince egy évi átlagértékét mutatja (ez az érték a 2008 nyarától 2009 tavaszáig, összesen négy turnusban kirakott műszerek értékeinek átlaga). Az 1-es pincében kimagaslóan magas érték tapasztalható, majdnem a 4000 Bqm^{-3} -es értéket éri el az éves radonaktivitáskonzentráció átlaga.

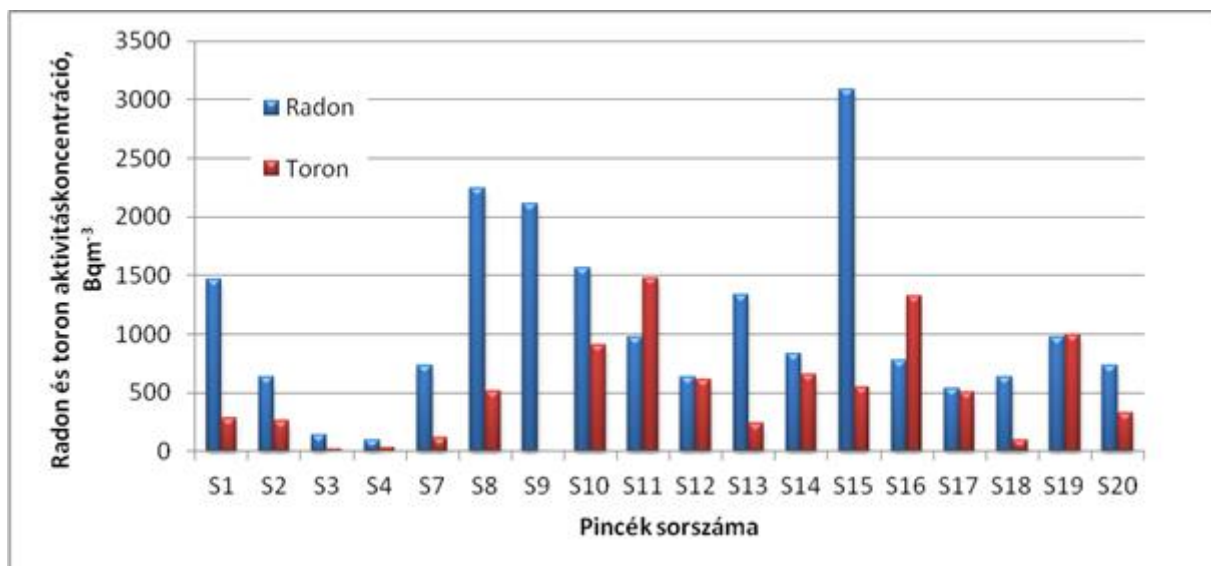
A hercegkúti két pincesor között nem figyelhető meg jelentősebb radon-aktivitáskonzentráció különbség.



12. ábra. Évi átlagos radon-aktivitáskonzentráció

A 12. ábrán szintén a pincék évi átlagos radon-aktivitáskonzentrációja található, azonban egy másfajta ábrázolásban. Az ábra az összegzett százalékos gyakorisági eloszlást mutatja. A vízszintes tengely logaritmikus, a függőleges tengely pedig valószínűségi skálázású. Amennyiben a pincékben a radonszintek eloszlása lognormális, úgy ebben az ábrázolási módban a mérési adatoknak egy egyenes mentén kell elhelyezkedniük. (A mi esetünkben ez ránézésre is jól teljesül.) Ebben az ábrázolási módban egyenest illesztve a mérési adatokra azt olvashatjuk le, hogy a pincék hány százalékában várható egy bizonyos ^{222}Rn -aktivitáskonzentráció szint (pl. az 1000 Bq m^{-3} beavatkozási szint) feletti érték (vastag piros vonal jelzi ezt). Ha az illesztett egyeneshez meghatározzuk a 95%-os megbízhatósági intervallumot határoló görbéket is (az ábrán zöld színnel jelölve), akkor kiderül az ábráról, hogy ezen a megbízhatósági szinten a pincék 29-33%-a várható az egészségügyi határérték felett. (Az ábrát és az illesztést az Origin nevű programmal készítettem illetve végeztem.)

Az Ungvári-pincesoron végzett mérések (ez látható a 13. ábrán) hasonló eredményeket mutattak. Az értékek kb. egyharmada volt a beavatkozási szint felett, viszont mivel egy pincébe olykor több detektort is helyeztem, ezért összességében a pincék felénél volt tapasztalható 1000 Bq m^{-3} -t meghaladó ^{222}Rn -aktivitáskonzentráció.



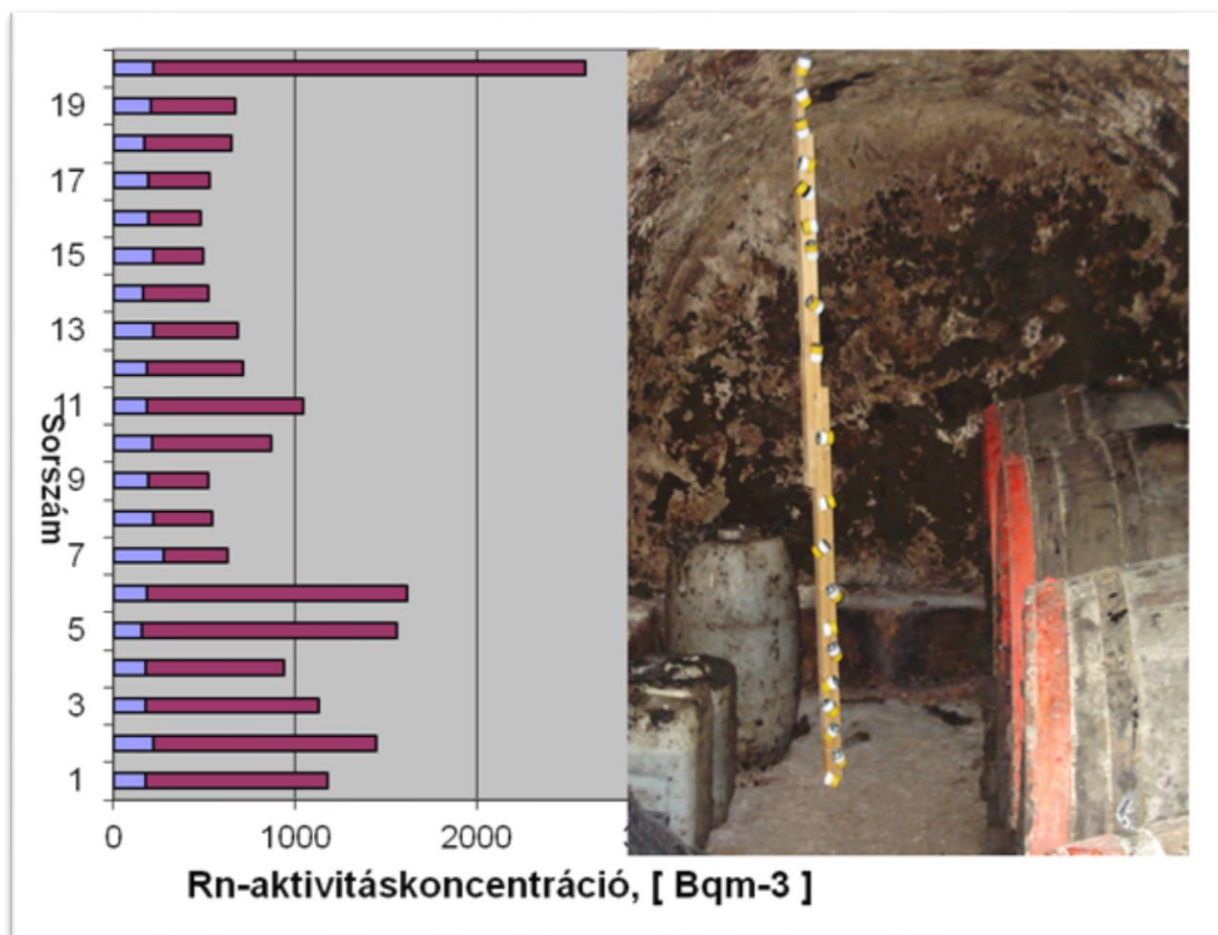
13. ábra. A ^{222}Rn - és ^{220}Tn -aktivitáskonzentrációk az Ungvári pincékben

Továbbá az S14-S20 detektorpárok mind egyetlen négyszintes pincerendszer különböző pontjain voltak. Ez utóbbiak közül csak egy haladja meg a határértéket, átlagolva a pincében végzett 7 mérés eredményét a pince átlagos aktivitáskonzentrációja 1080 Bqm^{-3} . A látogató (vagy kóstoló) térben 970 Bqm^{-3} -es aktivitáskonzentráció volt.

Ez a pincesor a világörökség részét képezi, ezért különös jelentőséggel bír pontos ismerete.

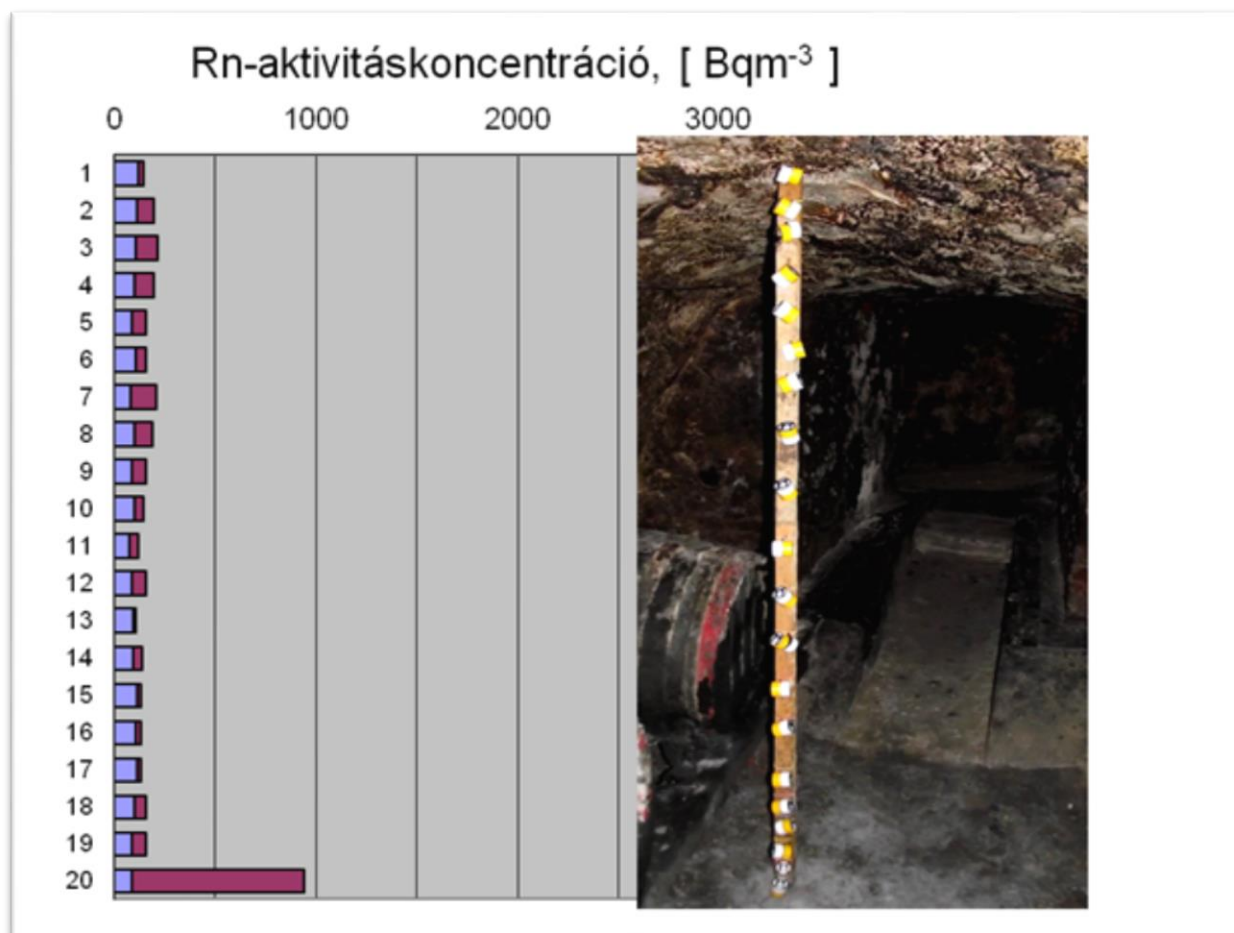
4.2.1. Függőleges változás

A 14-es ábrán láthatjuk az S19 jelű pincében a pince főágából nyíló egyik kis oldalág végén függőlegesen elhelyezett detektorok mérési adatait a 2009. december 19. – 2010. március 1. téli időszakban mérve. A ^{222}Rn -aktivitáskonzentráció értékei közel azonosak a pince minden magasságában, azonban a ^{220}Rn (toron) aktivitáskonzentrációja a padló és plafon (falak) közelében nagyobb. Ez a kis felezési időnek köszönhető, mivel a levegő teljes elkeveredéséhez több időre lenne szükség, mint amennyi idő alatt a toron elbomlik.



14. ábra. A ^{222}Rn - és ^{220}Tn -aktivitáskonzentráció függőlegesen elhelyezett detektorok esetében. (S19-es pince, 2009-2010 tél, kék: ^{222}Rn , lila: ^{220}Tn).

Megfigyelhető, hogy míg a ^{222}Rn -aktivitáskonzentráció értékek viszonylag kicsik, addig a toron relatívan nagy koncentrációban van jelen. Későbbi méréseim az évnek ugyanebben (téli) időszakban (15. ábra) viszont azt mutatták, hogy ugyanennek a mellékágnak a bejáratánál a toron aktivitáskonzentrációja már nagyon kicsi, alig kimutatható. Ez azt mutatja, hogy az oldalág végének a szellőzése sokkal kisebb, mint az oldalág bejárat részének a szellőzése. Az oldalág végén lévő mérések átlagértéke (197 Bqm^{-3}) közel duplája a főághoz közelebb elhelyezett detektorokkal mért értékek átlagánál (100 Bqm^{-3}).



15. ábra. A ^{222}Rn - és ^{220}Tn -aktivitáskoncentráció függőlegesen elhelyezett detektorok esetében. (S19-es pince, 2010-2011 tél, kék: ^{222}Rn , lila: ^{220}Tn).

4.3. Eredmények értékelése

A hercegbúti pincesorok ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációi közel azonosak, ennek oka hogy ugyanabba a kőzetbe, azonos elrendezéssel és formával rendelkeznek. Ennek megfelelően szellőzési mechanizmusuk szintén nagyon hasonló.

4.3.1. A ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációt meghatározó tényezők

A radon koncentrációját több tényező is meghatározza:

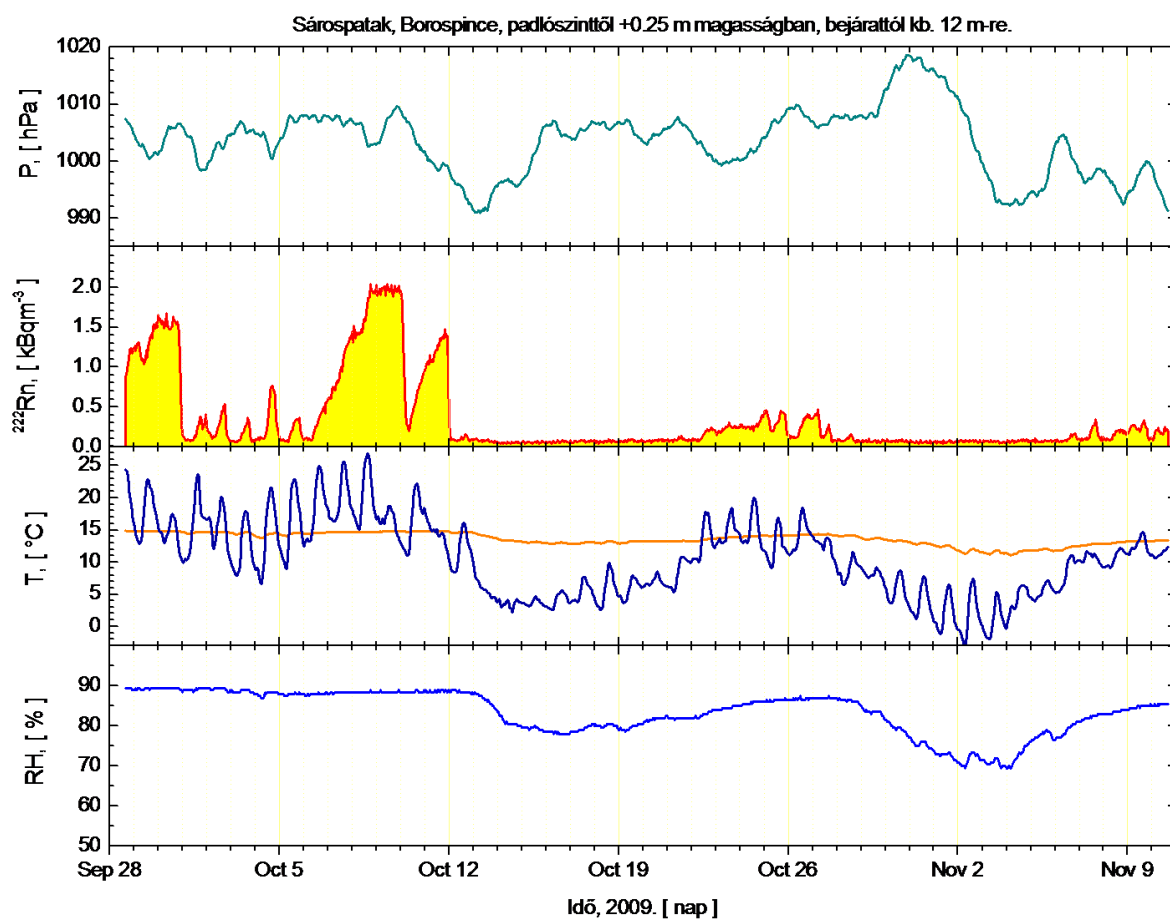
- A pince talajának és a falának minősége, tehát az azokból kiáramló radon gáz mennyisége (az anyag rádium, radon tartalma).
- Szellőzés

Ezt meghatározza a külső hőmérséklet.

Télen: amint a külső hőmérséklet a pince hőmérséklete alá csökken, beindul a légkörvzés: a kinti, sűrűbb levegő beáramlik a pince bejárat padlójánál, tovább halad, felmelegszi, felemelkedik, és a pincebejárat tetejénél távozik. Ez az állandó légkörvzés a radon gáz mennyiségének csökkenését eredményezi.

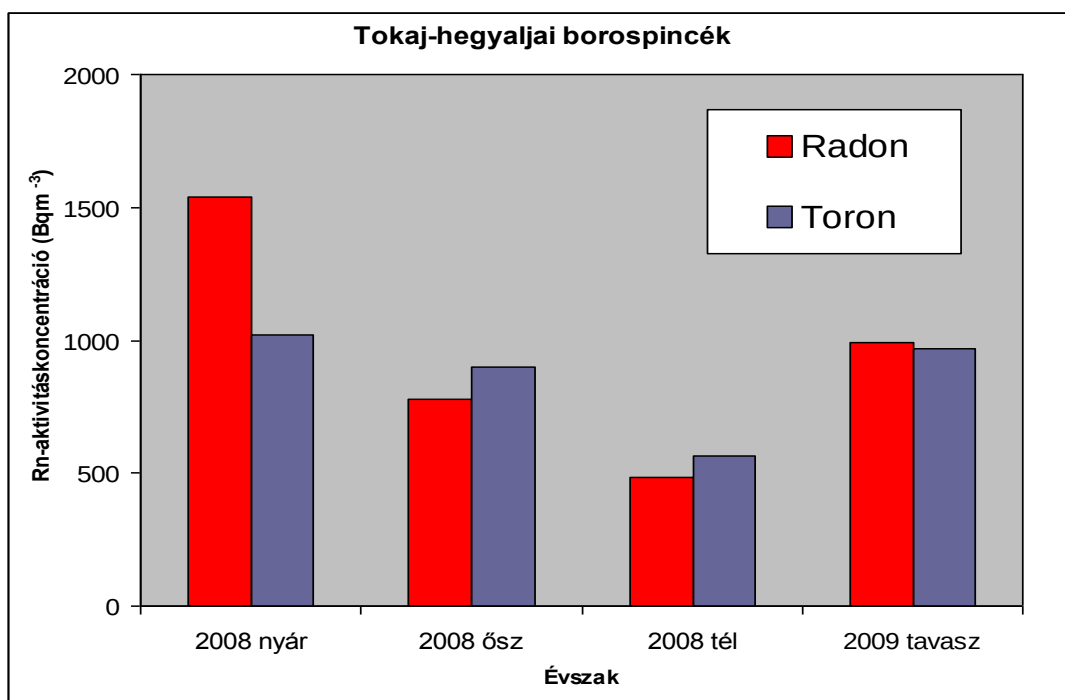
Nyáron: a külső, jóval melegebb levegőt kiszorítja a pincében lévő sűrűbb, hidegebb. Nem alakul ki légkörvzés, megnövekszik a radon mennyisége.

Ez látszik az AlphaGUARD műszer alapján készített grafikonon (16. ábra), ahol felülről a harmadik görbén látható a külső (kék) és a belső (piros) hőmérsékleti görbe az idő függvényében. Szintén az idő függvényében láthatjuk felülről a második grafikonban a radon-koncentráció változását. Megfigyelhető, hogy szeptember 28-a és október 12-e között időnként magasabb volt a pince radontartalma (a 2000 Bq/m^3 -es értéket is meghaladta), ekkor a külső hőmérséklet magasabb volt a pince hőmérsékleténél (a kék hőmérsékletgörbe a piros felett volt). Azonban október 13-án, amikor a külső hőmérséklet a pince hőmérséklete alá csökkent a radonszint ugrásszerűen lecsökkent (pár 100 Bq/m^3 -re). Megfigyelhető az is, hogy október 22-én amint a külső hőmérséklet ismét a pincehőmérséklet fölé kúszott, a radonszint növekedni kezdett (körülbelül 500 Bq/m^3 -es magasságig).



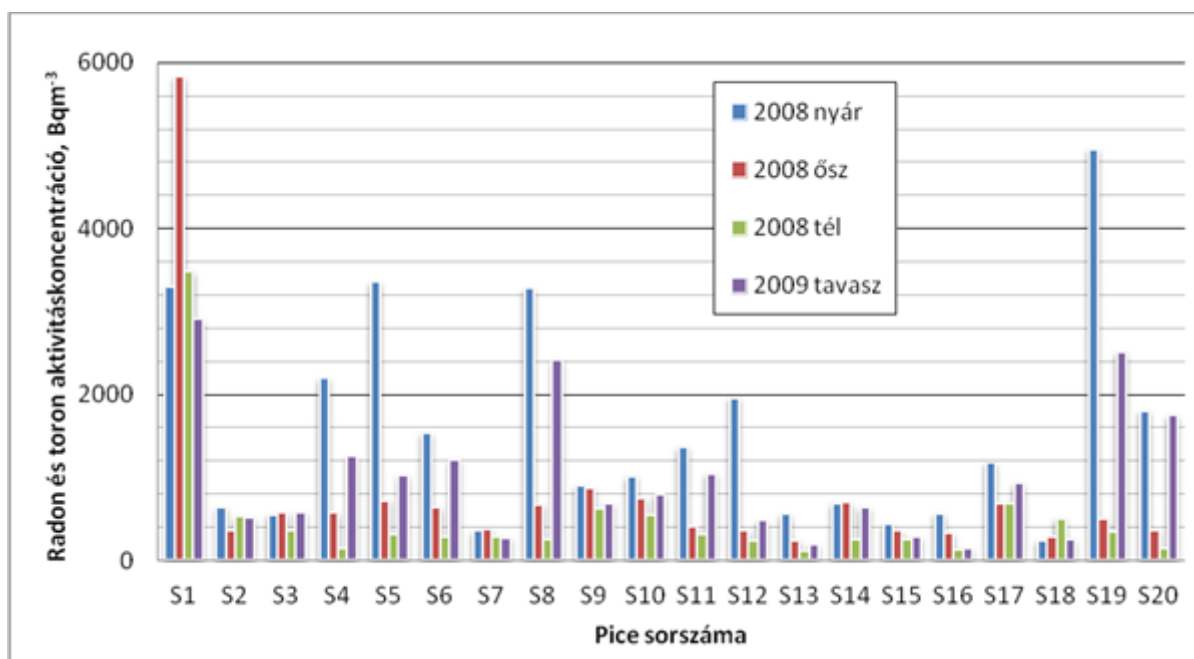
16. ábra. AlphaGuard mérés, 2009. szeptember 28 - november 11-ig, az S19-es pincében

A 17. ábrán a 20 pince évszakonkénti átlagát olvashatjuk le. A mérési eredményeim télen 100-700 (egy helyen 3500) Bq/m^3 értékek között mozognak, nyáron 400-2000 (5000) Bq/m^3 közötti értékeknek bizonyultak. Ez igazolja az évszakonként változó (hőmérsékletfüggő) szellőzési mértéket. Látható, hogy a téli hőmérséklet-különbség által beindított szellőzés által az átlagos téli radon érték fele a nyári átlagértéknek.



17. ábra. Radamon detektor mérés alapján a 20 pince átlaga évszakokra vonatkoztatva.

A 18. ábra alapján láthatjuk, hogy nem minden pincénél teljesül a téli (hőmérséklet által beindított szelőzés által kiváltott) radon koncentráció csökkenés, sőt ellentétes ütemű változás tapasztalható. (S18).



18. ábra. Radamon detektor mérés alapján a 20 pince négy évszakon át mért értékei.

4.3.2. Szellőzési sebességek becslése

A pince szellőzési sebessége ($v_{sz} = q/V$, ahol q a pincébe egységnyi idő alatt beáramló külső levegő térfogata, V pedig a pince térfogata) is fontos tényező a pince radontartalmának szempontjából, hiszen a külső levegő ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációja (C_0) nagyon alacsony, szinte elhanyagolható a pince levegőjének ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációjához (C) képest, így minél jobban szellőzik a pince, annál kisebb lesz légterének a radontartalma.

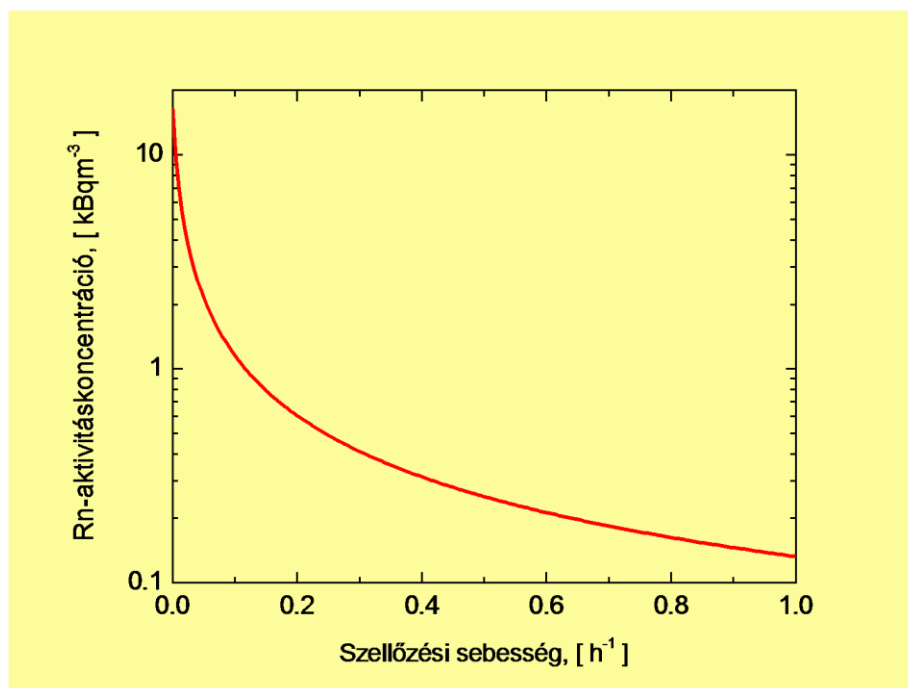
Legyen a pince talajának és falainak teljes felülete: A , [m^2]. A pince falain (beleértve a pince talaját is) a ^{222}Rn aktivitásáram-sűrűsége j , [$\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$]. Ez a mennyiség az egységnyi felületen egységnyi idő alatt átáramlott radonatomok aktivitását jelenti. A radonáram mértékegysége: [s^{-1}], pontosabban [mól s^{-1}], de az anyagmennyiség helyett használhatjuk az atomok számát is [db Rn-atom s^{-1}]. A radonáram-sűrűség ekkor [$\text{db Rn-atom m}^{-2} \text{s}^{-1}$], a radon aktivitásáram-sűrűség pedig [$\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$] mértékegységben van kifejezve. A radon aktivitásáram-sűrűséget a radonáram-sűrűségből a ^{222}Rn bomlási állandójának ($\lambda = 2,09838 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$) a szorzásával kapjuk: $j = \lambda \rho_{\text{Rn}}$. A ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció időbeli változását a pince légterében így az alábbi differenciál-egyenlettel írhatjuk le:

$$\frac{dC}{dt} = +\frac{jA}{V} + \frac{qC_0}{V} - \frac{qC}{V} - \lambda C. \quad (1)$$

Stacionárius esetben, vagyis amikor a pince légterében a ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációja időben nem változik, a fenti egyenletet egyenlővé tehetjük nullával, és így egy közönséges algebrai egyenletet kapunk, amelyet meg tudunk oldani a pince légterének ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációjára. Ez a helyzet akkor áll elő, amikor mind a radon forráserőssége, mind a pince szellőzési sebessége kellően hosszú időn keresztül időben állandó. Ez alapján az összefüggést felhasználva az egyenletet átrendezve kiszámíthatjuk a pince légterében kialakuló ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációt:

$$C = \frac{\frac{jA}{V} + v_{sz}C_0}{\lambda + v_{sz}}.$$

Amennyiben a többi paraméter értékét rögzítjük, ezt a formulát tekinthetjük úgy, mint a ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció függését a szellőzési sebességtől. Például $j = 10 \text{ mBqm}^2\text{s}^{-1}$, $A = 200 \text{ m}^2$, $V = 2000 \text{ m}^3$ és $C_0 = 10 \text{ Bqm}^{-3}$ esetén a következő (19.) ábra szerinti eredményt kapjuk:



19. ábra. A ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció függése a pince szellőzési sebességétől rögzített paraméterek ($j = 10 \text{ mBqm}^2\text{s}^{-1}$, $A = 200 \text{ m}^2$, $V = 2000 \text{ m}^3$ és $C_0 = 10 \text{ Bqm}^{-3}$) esetén.

Láthatjuk, hogy hogyan változik a radon-aktivitáskoncentráció a szellőzés függvényében (ezt az ábrát úgy kapjuk meg, hogy különböző szellőzési sebesség értékeket helyettesítünk be).

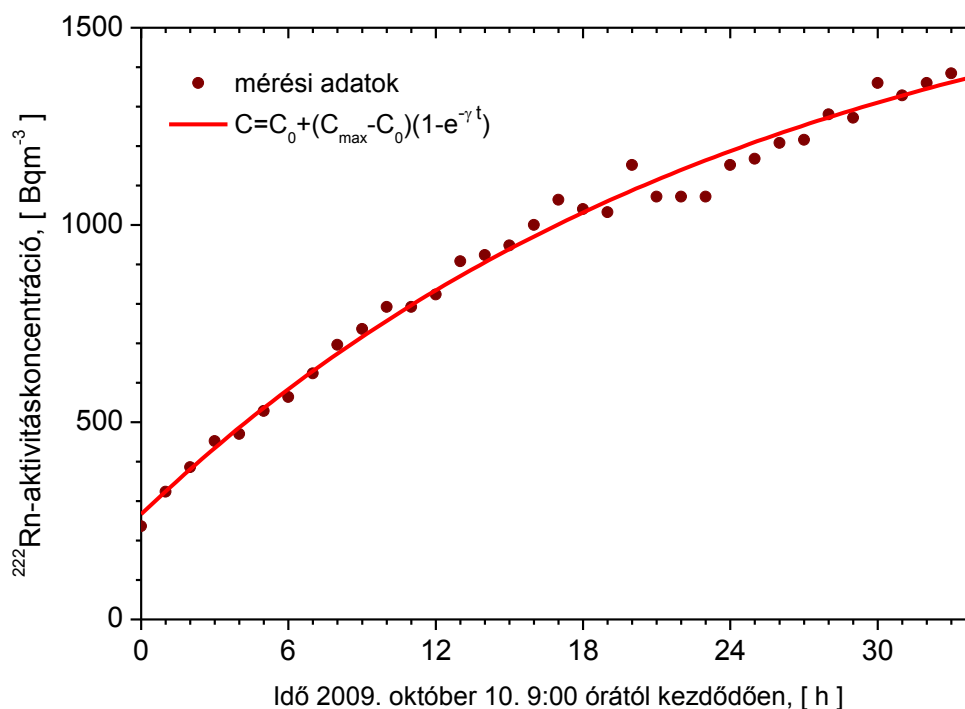
Az általam vizsgált pincékben a radon aktivitáskoncentrációja pár száz és néhány ezer (néhány esetben kis híján tízezer), tehát bennük a szellőzési sebesség $0,03 - 0,30 \text{ h}^{-1}$. Ez azt jelenti, hogy az egyes pincék légterének levegője kb. 3-30 óra alatt cserélődik ki.

Amennyiben a pincére jellemző egyik, például a hideg időszakra jellemző stacionárius állapotot követően hirtelen megváltozik a pince szellőzési sebessége, vagyis a pince átvált a meleg időszakra jellemző sokkal kisebb, de időben szintén állandó szellőzési sebességre, akkor a fenti (1) differenciálegyenlet explicite megoldható. A megoldás alakja ebben az esetben:

$$C(t) = C_0 + (C_{\max} - C_0)(1 - e^{-(\lambda + v_{sz})t}).$$

Gondosan elemezve a ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció idősorát tartalmazó ábrát, találhatunk egy olyan (a 2009. október 10-én 9:00 órától kezdődő és 35 órán át tartó) időszakot, amikor ezek a feltételek teljesültek. Elvégezve az erre az időszakra eső mérési adatokra a fenti analitikus megoldás paramétereinek a legkisebb négyzetek módszerével való illesztését eredményül az alábbi ábrán látható görbét kaptuk. (Az illesztést az OriginPro 8 SR2 nevű programmal

végeztük.) A kitevőben szereplő paraméter értéke alapján a pince szellőzési sebességére ebben az időszakban $v_{sz} = 0,04 \text{ h}^{-1}$ értéket kaptunk.



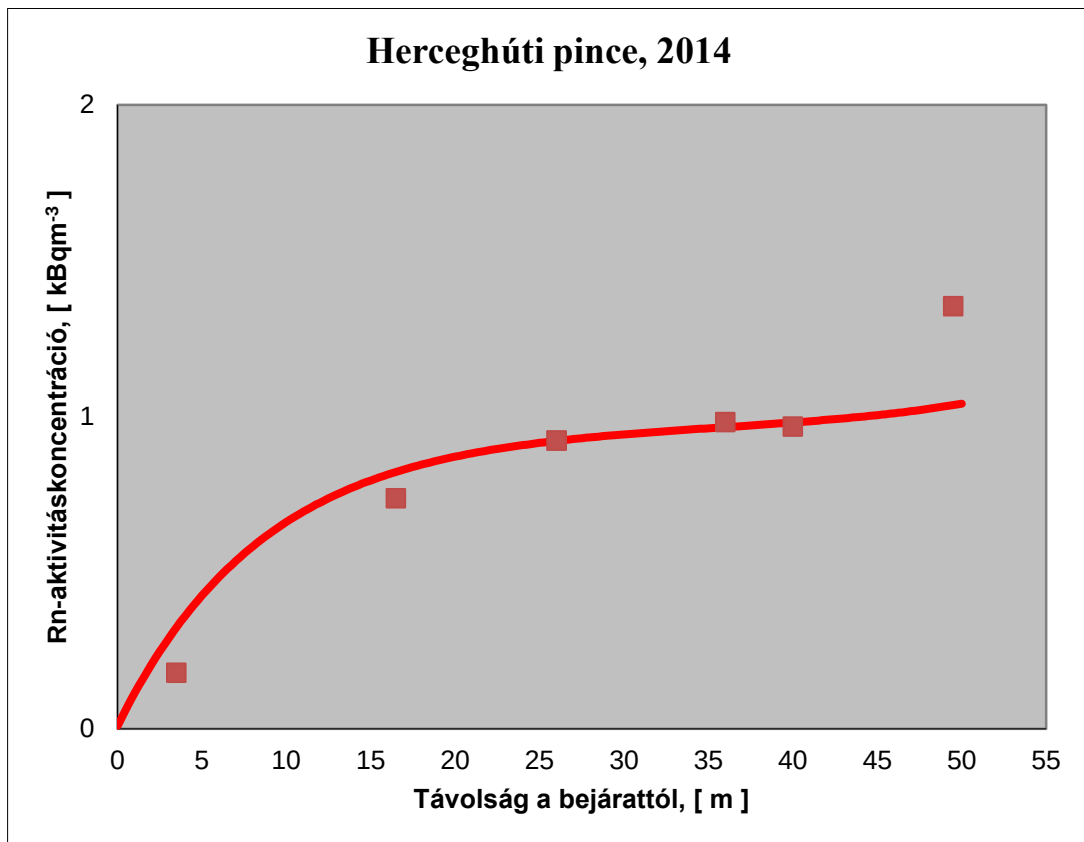
20. ábra. A ^{222}Rn -aktivitáskonzentráció felépülése egy pince légterében. Az (1) differenciálegyenlet megoldásából kapott felépülési görbe illesztett paramétereit szerint a pince szellőzési sebessége ebben az időszakban $0,04 \text{ h}^{-1}$ volt.

A radon-aktivitáskonzentráció változásának pincehossz menti meghatározására 2014-ben egy herceggúti pincében végeztem méréseket, 6 pár Radamon és az AlphaGuard kihelyezésével. A pince paramétereivel elméleti számításokat végeztem az (2) egyenlet alapján, majd ehhez hozzávettem a mért adatokat, ez látható a 21. ábrán.

A mérés paramétereit:

- A ^{222}Rn bomlási állandója $2,10 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$
- A Pince méretei:
 - Szélessége 5 m
 - Magassága 2,1 m
 - Hossza 50 m
 - Térfogata (V) 525 m^3
 - Felülete (A) $720,5 \text{ m}^2$

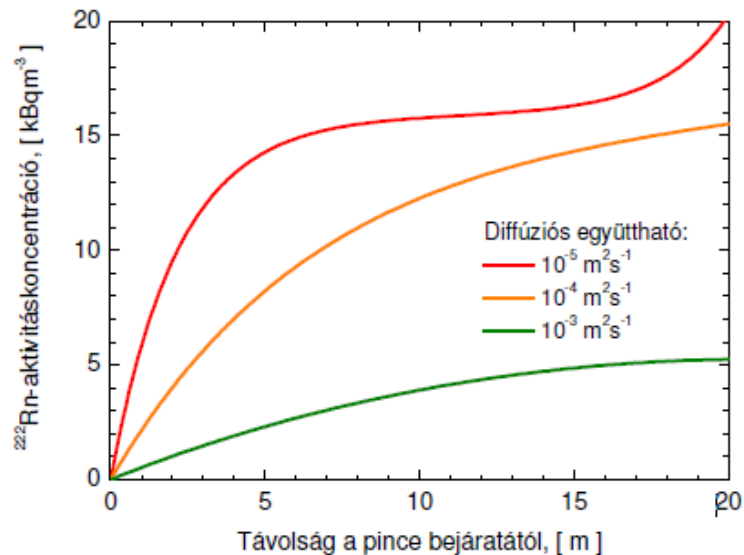
- ^{222}Rn aktivitásáram-sűrűsége (j) $0,0015 \text{ Bqm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- ^{222}Rn aktivitáskoncentráció a külső levegőben (C_0) 10 Bqm^{-3}
- Diffúziós együttható $1,60 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$



21. ábra. Herceghúti borospince radon aktivitáskoncentrációja a bejáratától való távolság függvényében, a Radamonnal mért értékek pontokkal, míg az elméleti számított értékek folytonos vonallal vannak jelölve.

Ha a pince légterének keveredését az általános diffúziós egyenlettel közelítjük, és a pincét egy K területű, F keresztmetszetű egyenes csőnek tekintjük, D a keveredési-diffúzió együtthatója:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + j \frac{K}{F} - \lambda C \quad (2)$$



21. ábra. A ^{222}Rn -aktivitáskonzentráció változása a pince bejáratától mért távolság függvényében. A ^{222}Rn aktivitásáram-sűrűsége a pince falán: $j=0,02 \text{ Bqm}^{-2}\text{s}^{-1}$. A különböző diffúziós együtthatók a pince levegőjének keveredését jellemzik.

Ha $D \sim 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$: nincs keveredés, a ^{222}Rn csak a molekuláris diffúzió miatt áramlik. A ^{222}Rn diffúziós hossza levegőben kb. 2 m. A pince végén megemelkedik a radonkoncentráció, mert az oldalfalakkól származó radonhoz hozzáadódik a pince hátsó falából származó radon is! A $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ diffúziós állandó kb. 5 kBq m^{-3} -re csökkenti a ^{222}Rn -aktivitáskonzentrációt, vagyis ez kb. $0,02 \text{ h}^{-1}$ szellőzési sebességnek felel meg! Ez nagyon kicsi szellőzési sebesség, de egyes pincékben előfordulhat. A diffúziós együttható további ($10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) növelésével néhány 100 Bqm^{-3} -re is lecsökkenthető az aktivitáskonzentráció. Ilyen értelemben valamiféle megfeleltetés létesíthető a szellőzési sebesség és a keveredési diffúziós együttható között. ^[13]

4.3.3. Légnyomás-változás hatása

A csökkenő légnyomás gyakorlatilag „kiszippantja” a radon gázt a pince falaiból. Ennek hatása egyes borpincékben jól megfigyelhető.

A talaj pórusait részben kitöltő talajgáz a fellépő nyomásgradiensek miatt a talajban áramolhat. A gáz transzportját a telítetlen zónában a Darcy-egyenlettel közelítjük: $\bar{q} = -K / \mu (\text{grad}P - \rho \bar{g})$, ahol $\bar{q}$ a gáz térfogatáram-sűrűsége; K a talaj gázáteresztő-képessége; μ a gáz dinamikai viszkozitása; P a gáz nyomása; ρ a gáz sűrűsége; g a gravitációs gyorsulás. A talajgáz áramlásának kontinuitási egyenlete: $\varepsilon (\partial \rho / \partial t) = -\text{div}(\rho \bar{q})$, ahol ε a talaj gázporozitása. Az ideális gázokra vonatkozó állapotegyenlet: $p = \rho RT$, ahol R az adott gázra vonatkozó gázállandó és T a gáz hőmérséklete.

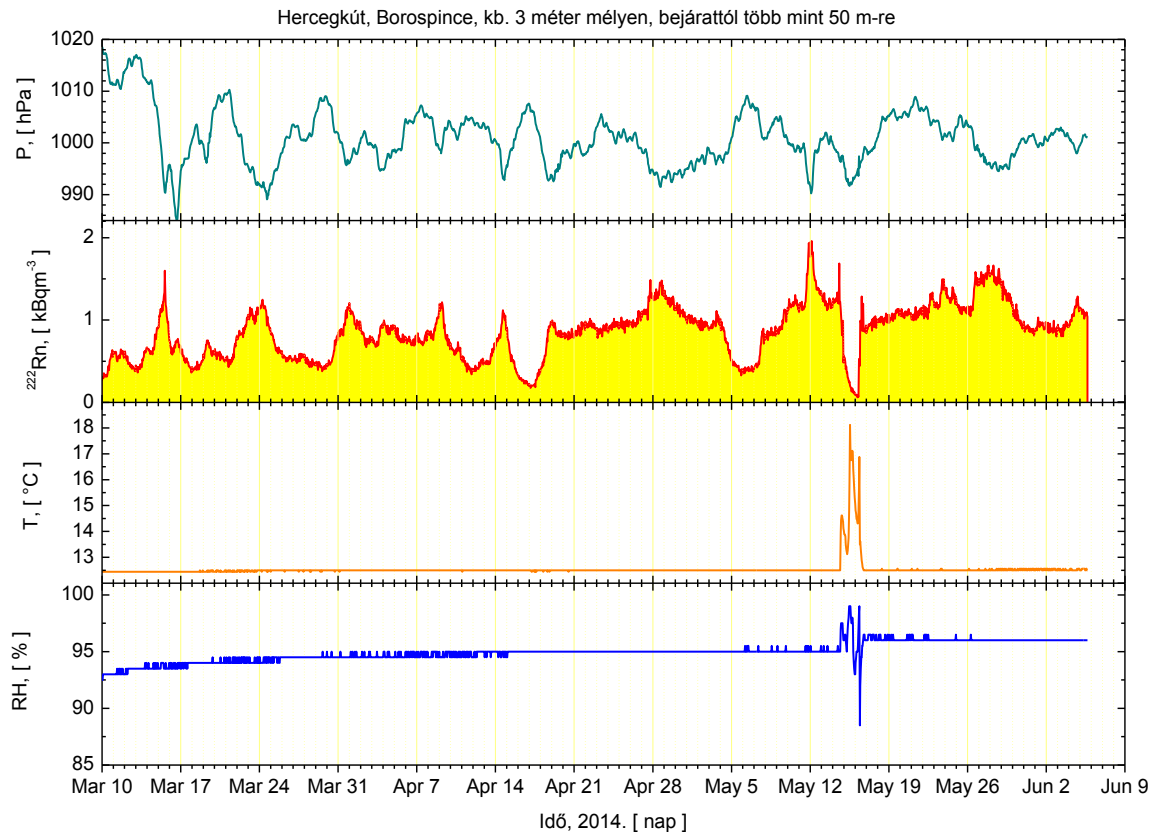
Az állapotegyenletből kifejezhetjük a gáz sűrűségét, és azt beírjuk a Darcy-törvénybe, valamint a kontinuitási egyenletbe, majd a Darcy-törvény szerinti térfogatáramot behelyettesítjük a kontinuitási egyenletbe, és így kapjuk a talajgáz áramlásának alapegyenletét:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \alpha \left\{ P \Delta P + \beta P \frac{\partial P}{\partial t} + (\nabla P)^2 \right\}, \text{ ahol } \alpha = \frac{K}{\mu \varepsilon}, \text{ és } \beta = \frac{2g}{RT}. \quad (3)$$

A radon gáz transzportegyenletét az alábbi alakba írhatjuk:

$$\beta \frac{\partial C}{\partial t} = D \operatorname{div} \operatorname{grad} C - \bar{q} \operatorname{grad} C + G - \lambda \beta C, \quad (4)$$

ahol C a ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció a pórustér gázfázisában, $G = f \rho_d A_{\text{Ra}} \lambda$ a ^{222}Rn pórustérben való keletkezési üteme, f a ^{222}Rn kibocsátási tényező, ρ_d a száraz talaj sűrűsége; A_{Ra} a száraz talaj ^{226}Ra aktivitáskoncentrációja, λ a ^{222}Rn bomlási állandója. A pórustér vízzel kitöltött hányadát víztelítettségnek nevezzük, és m betűvel jelöljük. Feltesszük, hogy a pórustérben lévő ^{222}Rn mindenkor az Otswald-féle megoszlási tényezőnek megfelelően oszlik meg a víz és a gázfázis között. Az L megoszlási tényező: $L = C_w / C_g$, aminek hőmérséklettől való függését a Clever H. L. [14] által levegőre összegyűjtött adatokból a következő formulával illesztettük: $L(T) = 0.425 \exp(-0.05 T) + 0.104$. $\beta = (1 - m + Lm)\varepsilon$, az úgynevezett megoszlás-korrigált porozitás. Mivel ebben a megközelítésben a víz és gázfázisban történő diffúziót nem tárgyaltuk elemi szinten, ezért a D_e effektív diffúziós együtthatóba van beépítve a diffúziós áram összes környezeti feltételtől való függése: $D_e = D_e(\varepsilon, m, \dots)$. A D_e (m^2s^{-1}) effektív diffúziós együttható porozitástól és a víztelítettségtől való függését Rogers és Nielson [15] szerint így közelíthetjük: $D_e = D_{e0} \exp(-6m\varepsilon - 6m^{14\varepsilon})$.



22. ábra. AlphaGuard mérés, 2014. március 10 – június 8-ig, hercegkúti borospincében

A 22. ábrán látható a légnyomás hatása a pince légterének radon-aktivitáskoncentrációjára, hiszen a legfelső nyomás görbe a legtöbb helyen ellentétes tendenciát mutat, mint a radon-aktivitáskoncentráció görbe. Tehát ha a pince légterében csökken a nyomás, az a falakból „kiszippantja” a radon-dús levegőt, ezáltal a légtér radon aktivitáskoncentrációja növekszik. Ezeknek a mérési eredményeknek a radontranszport fenti egyenletével végzett számításokkal való összevetése terveim szerint egy későbbi munkám témája lesz.

4.3.4. Relatív páratartalom

Az első AlphaGUARD ábrán (16. ábra) megfigyelhető az is hogy a relatív páratartalom görbe (a legalsó függvénygörbe) együtt mozog a külső hőmérséklet görbéjével. Ez a pince légcseréjével hozható összefüggésbe. Hiszen a csökkenő hőmérséklet a szellőzés beindulásához vezet, ezáltal a benti páradús levegő kinti, párában ritka levegőre cserélődik.

5. Összefoglalás

Dolgozatomban a radon és toron aktivitáskoncentrációk borospincék légterében való térbeli és időbeli változásait vizsgáltam. Méréseimet tokaj-hegyaljai borospincékben végeztem maratottnyom-detektoros és ionizációs kamrás radonmérő műszerekkel. Nyomdetektoros méréssorozatot 20 pincében, az évszakokhoz illeszkedően negyedévente cserélt detektorokkal végeztem. AlphaGUARD műszerrel őszi és téli időszakokban egy-egy kiválasztott pincében 1-2 hónapos folyamatos méréseket végeztem. Egy kiválasztott pincében vizsgáltam a radon-aktivitáskoncentráció térbeli változását függőlegesen elhelyezett nyomdetektorokkal. A detektorokat szintén évszakonként cseréltem.

Kimutattam, hogy a borospincék egyharmadában várható a munkahelyekre megállapított cselekvési szint (1 kBqm^{-3}) feletti évi átlagos aktivitáskoncentráció. Annak ellenére, hogy az általam vizsgált pincék közül több is meghaladja a cselekvési szintet, mégsem kell aggódnunk, mivel a pincék egyike sem minősül munkaterületnek, és sem a pincetulajdonosok, sem a látogatók nem tartózkodnak rendszeresen hosszabb ideig ezekben a pincékben. Megfigyeltem, hogy a pincék döntő többségében a ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációja nyáron lényegesen, átlagosan mintegy 3-szor nagyobb, mint télen. Ennek okát a pincék természetes szellőzésének téli és nyári különbözőségében találtam. Folyamatos radonmérésekkel is igazoltam, hogy amint a külső hőmérséklet a pince hőmérséklete alá csökken a természetes szellőzés sokkal nagyobb, mint ellenkező esetben. A mért koncentrációkat összevetve egyszerű modellszámításokkal becsültem a pincék szellőzési sebességeit. Kimutattam továbbá hogy a pince falainak közelében a toron aktivitáskoncentrációja szintén néhány száz és néhány ezer Bqm^{-3} körüli, és az sokkal kevésbé függ a szellőzés intenzitásától, mint a radoné.

Eredményeim hozzájárulnak a borospince klíma jobb megértéséhez, és felhívják a figyelmet az esetleges sugárvédelmi intézkedések szükségességére is.

6. Irodalomjegyzék

- [1] Rontó Györgyi és Tarján Imre: A biofizika alapjai, Semmelweis kiadó, 1999
- [2] Csige István: Radon and Space Radiation Protection Measurements, Ph.D dissertation, Kossuth Lajos Egyetem, Debrecen, 1997
- [3] Csige I. and Csegzi S. (2001) The Radamon radon detector and an example of application. Radiation Measurements, 34(1-6), pp. 437-440.
- [4] Csige István, Svingor Éva: Természetes eredetű sugárzások a környezetben. Fejezetek a környezetfizikából. Egyetemi Jegyzet. Szerk.: Kiss Ádám, Debreceni Egyetem, 2004, Debrecen
- [5] Csige I. (2011) A barometrikus pumpa hatása a radon és a toron exhalációjára. Sugárvédelem, 4, pp. 33-41.
- [6] Darby S., D Hill, A Auvinen, J M Barros-Dios, H Baysson, F Bochicchio, H Deo, R Falk, F Forastiere, M Hakama, I Heid, L Kreienbrock, M Kreuzer, F Lagarde, I Mäkeläinen, C Muirhead, W Oberaigner, G Pershagen, A Ruano-Ravina, E Ruosteenoja, A Schaffrath Rosario, M Tirmarche, L TomáBek, E Whitley, H E Wichmann, R Dol (2004) Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, BMJ, doi:10.1136/bmj.38308.477650.63 (published 21 December 2004)
- [7] Hakl J., Hunyadi I., Csige I., Géczy G., Lénárt L. and Töröcsik I. (1992) Outline of natural radon occurrence on karstic terrains of Hungary. Radiat. Prot. Dosimetry. 45 pp. 183-188.
- [8] Nikl I. (1995) Survey of gamma dose rate of the natural radiation environment and of the radon activity concentration in domestic houses. Final report of OMFB project No.: MEC-93-0115. Budapest. (in Hungarian)
- [9] Ray Machintosh, Jim Al-Khalili, Björn Jonson, Teresa Pena: Az Atommag - Utazás az anyag szívébe, Akadémia Kiadó, 2003
- [10] Somogyi Gy., Nikl I., Csige I. és Hunyadi I. (1989) Radon aktivitáskoncentrációjának mérése és a belégzésből eredő sugárterhelés meghatározása hazai lakások légterében. Izotóptechnika, Diagnosztika, 32, pp. 177-183.
- [11] Szerbin P., Vaupotic J., Csige I., Kobal I., Hunyadi I., Baradács E. (2005) Radioactivity in wine cellars in Hungary and Slovenia. International Congress Series 1276, 362-364.
- [12] Budai Tamás, Gyalog László: Magyarország földtani atlasza országhatároknak, kiadta a Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 2009

- [13] Györfi T., Csige I. (2009) Az atmoszférikus légnyomás változásainak hatása egy borpince légterében lévő ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációra. Sugárvédelem, II. évf, 1. szám, pp 44-49
- [14] Clever H. L. ed. (1979) Solubility data series 2, Pergamon Press, 227-234
- [15] Rogers, V. C.; Nielson, K. K. (1991) Multiphase radon generation and transport in porous materials. Health Phys. 60(6), pp. 807-815.