

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

AZ ÉVI ÁTLAGOS RADON-KONCENTRÁCIÓ ÉS A SUGÁRTERHELÉS MEGHATÁROZÁSA KÜLÖNBÖZŐ MUNKATERÜLETEKEN

Szerző:

Kávási Norbert

Környezettudományi Doktori Iskola

Témavezető:

Dr. Somlai János

egyetemi docens

Készült:

Radiokémia Tanszék

Pannon Egyetem

Veszprém

2006

**Az évi átlagos radon-koncentráció és a sugárterhelés meghatározása különböző
munkaterületeken**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:
Kávási Norbert

Készült a Pannon Egyetem Környezettudományi Doktori Iskolája keretében

Témavezető: Dr. Somlai János

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton % -ot ért el,

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: igen /nem

.....
(aláírás)

Bíráló neve:) igen /nem

.....
(aláírás)

***Bíráló neve:) igen /nem

.....
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján% - ot ért el

Veszprém/Keszthely,

.....
a Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....
Az EDT elnöke

Tartalomjegyzék

Bevezetés-célkitűzés.....	8
1. Irodalmi rész	10
1.1. A sugárterhelés meghatározásánál leggyakrabban használt dózismennyiségek...	10
1.2. Ionizáló sugárzás hatása az élővilágra.....	12
1.2.1. Determinisztikus hatás.....	12
1.2.2. Sztochasztikus hatás	13
1.2.3. Alacsony dózisok problémája.....	14
1.3. Természetes eredetű sugárterhelés	16
1.4. A radonról	19
1.4.1. A radon fontosabb fizikai, kémiai tulajdonságai	19
1.4.2. A radon keletkezése.....	21
1.4.3. A radon és leányelemeinek egészségügyi hatásai	24
1.4.4. A radon feldúsulásának várható területei	24
1.5. Törvényi szabályozás.....	25
1.5.1. Radonra vonatkozó nemzetközi ajánlások.....	26
1.5.2. Magyarországi szabályozás	26
1.5.3. Magyarországi szabályozás összevetése európai országok szabályozásaival	27
1.6. Vizsgálati helyek bemutatása	30
1.6.1. Bányák	30
1.6.2. Fürdők.....	32
1.6.3. Barlangok.....	34
1.7. A radon és leányelemeinek koncentráció meghatározása.....	39
1.7.1. Radon mérés közvetlen és közvetett módon.....	39
1.7.2. Radon mérési módszerei.....	40
1.7.3. Radon mérésre alkalmas detektorok.....	41
1.7.4. Leányelem mérési módszerei	44

2. Kísérleti Rész.....	45
2.1. Mérő eszközök és berendezések	45
2.1.1. Légtéri radon-koncentráció meghatározásának eszközei	45
2.1.2. Vízminták radon-koncentráció meghatározásának eszköze	49
2.1.3. Munkaszint meghatározásának eszköze	50
2.1.4. Személyi dozimetria eszköze.....	50
2.1.5. Mérőeszközök kalibrálása	50
2.1.6. Mérőeszközök eredményeinek megbízhatósága.....	51
2.2. Számítási módszerek	54
2.2.1. Egyensúlyi ekvivalens koncentráció számítása	54
2.2.2. Egyensúlyi faktor számítása	54
2.2.3. Radon és leányelemeitől származó sugárterhelés számítása	54
2.3. Vizsgálatok ismertetése munkaterületenként	55
2.3.1. Úrkúti mangánbánya.....	55
2.3.2. Ajkai Ármin szénbánya	57
2.3.4. Egri Török Fürdő	57
2.3.3. Tapolcai Kórház-barlang	58
2.3.5. Idegenforgalmi barlangok.....	60
2.3.6. Bakonyi-barlangok	60
2.4. Mérési eredmények és következtetések	62
2.4.1. Mérési idő befolyásoló hatása az éves átlag meghatározása során.....	62
2.4.2. Mérési helyek befolyásoló hatása az éves átlag meghatározása során	68
2.4.3. Munkahelyek mérési eredményeinek elemzése a munkaidőben végzett mérések alapján.....	72
2.4.4. Egyensúlyi faktor vizsgálata.....	78
2.4.5. Munkavégzők dózisbecslése.....	84
3. Összefoglalás	92
4. Irodalomjegyzék	95
5. Függelék	101
6. Tézisek	112
7. Theses	113
Köszönetnyilvánítás.....	114

Kivonat

A szerző doktori munkája során elemezte a munkahelyi radon-koncentrációra és meghatározására vonatkozó nemzetközi ajánlásokat, európai és a magyarországi szabályozásokat. Az ezekben található ajánlások, mérési eljárások és saját mérési eredmények figyelembevételével a szerző meghatározta a munkahelyi radon mérés és dózisbecslés hibalehetőségeit.

Ehhez az úrkúti mangánbányában, az Egri Török Fürdőben, a Tapolcai Kórház-barlangban és hat magyarországi idegenforgalmi barlangban több ponton mérte az éves átlagos radon-koncentrációt, majd vizsgálta a mérés időtartamának és helyének befolyásoló hatásait.

Ugyanezen munkahelyeken a munkaidőben kialakuló radon-koncentrációt összehasonlította a teljes idő radon-koncentrációjával.

Vizsgálta az egyensúlyi faktor értékeit az úrkúti mangánbányában, az ajkai Ármin szénbányában és a Tapolcai Kórház-barlangban. A kapott értékeket összehasonlította az ajánlott értékkel.

Radon mérést végzett még hét bakonyi túra-barlangban, mivel egyes barlangászok barlangban töltött ideje vetekszik a hivatásos barlangi túravezetők barlangban töltött idejével.

A mért adatok birtokában, és a radon által veszélyeztetett területen töltött időt figyelembe véve a szerző becsülte a munkavégzők és bakonyi barlangászok radontól származó sugárterhelését.

A néhány napos vagy hetes mérésekhez folyamatos működésű ionizációs kamrával, félvezető detektorral vagy szcintillációs detektorral felszerelt mérőeszközöket alkalmazott. A hosszabb idejű vizsgálatokhoz nyomdetektort használt.

A szerző doktori munkájában megállapította, hogy a nemzetközi gyakorlattól eltérően az évi átlagos radon-koncentrációt 1-3-6 havi mérésekből meghatározni nem lehet, az egész évet végig kell mérni.

Az éves átlagos radon-koncentráció munkahelyi meghatározásánál a mérési helyeknek is befolyásoló hatásuk van. Ezeket általánosan kijelölni nem lehet, minden esetet egyedileg kell elbírálni.

Egyes munkahelyek esetén az egyensúlyi faktor nagyobb és kisebb is lehet az ajánlott 0,4 -hez képest, ezért értékét minden esetben meg kell határozni.

A szerző becslése alapján a Tapolcai Kórház-barlang karbantartói és a bakonyi barlangászok éves sugárterhelése elérheti, vagy meghaladhatja a 20 mSv-et.

Abstract

Difficulties in determining the average annual radon concentration and dose effect in different workplaces

During his work, the author carried out radon and daughter element examinations in mines, caves, as well as in a medicinal bath. Measurements were implemented through active methods in the case of periods of days and weeks, whilst passive methods were utilised in the case of longer surveys.

It was observed that it was practicable to carry out radon monitoring throughout a year at several points within workplaces, in relation to the work processes, in order to gain reliable results. As the equilibrium ratio differs from the recommended ratio at the workplaces under examination, this should also be investigated for exact dose assessment.

The dose effect originating from radon absorption by workers can be precisely determined from the results of personal dosimeters. Among the examined areas, a significant radiation dose is to be accounted for in some caves: in some cases this may even exceed the value 20 mSv/year.

Abriss

Die Bestimmung der Strahlenbelastung und der jährlichen durchschnittlichen Radonkonzentration auf verschiedenen Arbeitsgebieten.

Der Autor führte während seiner Tätigkeit in Berggruben, Höhlen und in einem Bad Untersuchungen von Radon und Tochterelementen durch. Im Falle von paar wöchigen Messungen wurden aktive, im Falle von längeren wurden passive Methoden verwendet.

Es wurde bewiesen, dass es sich lohnt, das Monitoring von Radon an den Arbeitsstellen den Arbeitsprozessen entsprechend, an mehreren Punkten ein Jahr lang durchzuführen. Da sich das Faktor der Gleichheit an den untersuchten Arbeitsstellen von dem empfohlenen unterscheidet, sollte dies im Interesse der genauen Doseschätzung untersucht werden.

Die vom Radon stammende Strahlbelastung der Arbeiter kann aus den Ergebnissen der persönlichen Dosimeter am genauesten festgestellt werden. Von den untersuchten Gebieten soll bei einigen Höhlen mit bedeutender Strahlbelastung gerechnet werden, die in einigen Fällen sogar 20 mSv/Jahr überschreitet.

Bevezetés-célkitűzés

A radioaktivitást, felfedezése óta hol áldásként, hol átokként kezeli az emberiség. A korai időkben egyfajta életelixírként élt az emberek tudatában. A kutatások során bekövetkezett balesetek és halálesetek kapcsán már a veszélyei is előtérbe kerültek. Ezen a területen a legnagyobb áttörés az atomenergia munkába állítása volt, amiben többek közel végtelen mennyiségű energia előállítására láttak lehetőséget. Ebből kiindulva a II. világháborúban megszülettek a nukleáris fegyverek, ami a hidegháború korszakában teljes kipusztulással fenyegette az egész emberiséget, illetve a folyamatos robbantási kísérletek számos radionukliddal szennyezték az egész Földet [1].

Az atomenergia békés felhasználásának széles körű elterjedése 20 éve, 1986 április 26-án Csernobilban tört derékba, amikor is a reaktor baleset hatására számos országba eljutottak az így felszabadult radionuklidok [2].

Annak ellenére, hogy ma már a radioaktív anyagokat a gyógyászat számtalan területén alkalmazzák megbízhatóan, a radioaktivitás, vagy sugárzás szó a legtöbb emberben félelmet kelt.

A ma embere folyamatosan figyeli az atomerőművekkel kapcsolatos híreket, rettegve gondol egy esetlegesen bekövetkező baleset hatásaira. Viszont saját lakó és élő környezetére sokkal kevésbé figyel, pedig a természetes radionuklidoknak, ezen belül is a radonnak egy átlag ember sugárterhelésében sokkal nagyobb a szerepe.

Az ember természetes sugárterhelésének több mint felét a radontól szenvedni el. Ugyanakkor, mint arra számos munka fel hívta a figyelmet, nagyobb mennyiségének hosszabb idejű belélegzése növeli a tüdőrák kialakulásának kockázatát.

Ennek megfelelően nagyon sok országban foglalkoznak munkahelyi, lakóépületbeli vizsgálatával, és igyekeznek szabályozni mennyiségét, vagy az általa okozott sugárterhelést.

Magyarországon az 1996. évi CXVI. Atomenergiáról szóló törvény 16/2000 (VI. 8.) EüM végrehajtási rendelete 2003 január 1-én lépett életbe, amely munkahelyekre éves átlagban az 1000 Bq/m³-es radon-koncentráció értéket, mint cselekvési szintet határozza meg. Lakóépületek radon-koncentrációjának szabályozásával a rendelet nem foglalkozik. Veszélyeztetett munkahelyeknek gyógyfürdők, barlangterápiás részlegek, turisztikai látványosságot képező barlangok, föld alatti bányauzemek és egyéb föld alatti munkahelyek számítanak [3]. Ugyanakkor méréstechnikai módszerekre, eljárásokra, az éves átlag pontos

értelmezésére, és a dózisbecslés során alkalmazandó tényezőkre nézve semmiféle előírás nem található.

Az éves átlag meghatározása és értelmezése mérés technikai oldalról számos problémát vet fel. Doktori munkám célja ezen problémákat illetve a dózis becslése során fellépő bizonytalanságokat feltárni, elemezni, különböző radon által veszélyeztetett munkahelyeken, valamint becsülni az itt dolgozók radontól származó sugárterhelését.

Ennek érdekében egy éven keresztül, több mérési ponton mértem a radon-koncentrációt az úrkúti mangánbányában, az Egri Török Fürdőben, a Tapolcai Kórház-barlangban és hat magyarországi idegenforgalmi barlangban. Ugyanezen a területeken mértem a munkaidőben kialakuló radon-koncentrációt különböző mérőeszközök használatával.

Vizsgáltam az egyensúlyi faktor értékeit az úrkúti mangánbányában, az ajkai Ármin szénbányában és a Tapolcai Kórház-barlangban.

Radon mérést végeztem még hét bakonyi túra-barlangban, mivel egyes barlangászok barlangban töltött ideje vetekszik a hivatásos barlangi túravezetők barlangban töltött idejével.

1. Irodalmi rész

1.1. A sugárterhelés meghatározásánál leggyakrabban használt dózismennyiségek

Elnyelt dózis (D):

A besugárzott anyag térfogatelemében elnyelt energia és a térfogat tömegének hányadosát elnyelt dózisként nevezzük. Mértékegysége: *Gray* ($1\text{ Gy}=1\text{ J/kg}$).

Egyenérték dózis (H_T):

Az **R** típusú és minőségű, sugárzás súlytényezőjével súlyozott, a **T** szövetben vagy szervben elnyelt dózis. Mértékegysége: *J/kg*, melynek neve: *Sievert (Sv)*.

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}$$

Ahol:

W_R - a sugárzási súlytényező,

$D_{T,R}$ - a **T** szövetben vagy szervben az **R** sugárzásból eredő elnyelt dózis átlagértéke.

Többféle sugárzás egyidejű jelenléte esetén a hatások számtani összegződését tételezzük fel és így a **T** szervre jellemző egyenérték dózis:

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{TR}$$

Effektív dózis (E):

Az emberi test összes szövetére vagy szervére (**T**) vonatkozó, súlyozott egyenérték dózisok (**H_T**) összege:

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T$$

Ahol:

W_T - a **T** szövet vagy szerv súlytényezője,

Az effektív dózis mértékegysége: *J/kg*, melynek neve: *Sievert (Sv)*.

A hosszabb ideig, évekig a szervezetben maradó radionuklidokból eredő sugárhatás jellemzésére szolgál a *lekötött dózis*. A kezdeti akkumuláció után a radionuklidok mennyisége és így a sugárterhelés mértéke csökken a fizikai bomlás, élettani kiválasztás eredményeként. Ezt számoláskor figyelembe kell venni.

Lekötött elnyelt dózis ($D(\tau)$):

menyiségét az alábbi kifejezés határozza meg:

$$D(\tau) = \int_0^{\tau} \dot{D}(t) dt$$

Ahol:

$D(\tau)$ - elnyelt dózis τ időtartam alatt,

$\dot{D}(t)$ - az elnyelt dózisteljesítmény a felvételt követő t időpontban. Amikor nincs megadva, akkor felnőtteknél 50 évig, gyermekeknél 70 évig kell integrálni. Mértékegysége: *Gray (Gy)*.

Lekötött egyenérték dózis ($H_T(\tau)$):

Mennyiséget az alábbi kifejezés határozza meg:

$$H_T(\tau) = \int_0^{\tau} \dot{H}_T(t) dt$$

Ahol:

$H(\tau)$ - a T szövet egyenérték dózisa τ időtartam alatt,

$\dot{H}(t)$ - az egyenérték dózisteljesítmény a felvételt követő t időpontban. Amikor nincs megadva, akkor felnőtteknél 50 évig, gyermekeknél 70 évig kell integrálni. Mértékegysége: *Sievert (Sv)*.

Lekötött effektív dózis ($E_T(\tau)$):

Mennyiséget az alábbi kifejezés határozza meg:

$$E_T(\tau) = \int_0^{\tau} \dot{E}_T(t) dt$$

Ahol:

$E(\tau)$ - elnyelt dózis τ időtartam alatt,

$\dot{E}(t)$ - az effektív dózisteljesítmény a felvételt követő t időpontban. Amikor nincs megadva, akkor felnőtteknél 50 évig, gyermekeknél 70 évig kell integrálni. Mértékegysége: *Sievert (Sv)* [3].

1.2. Ionizáló sugárzás hatása az élővilágra

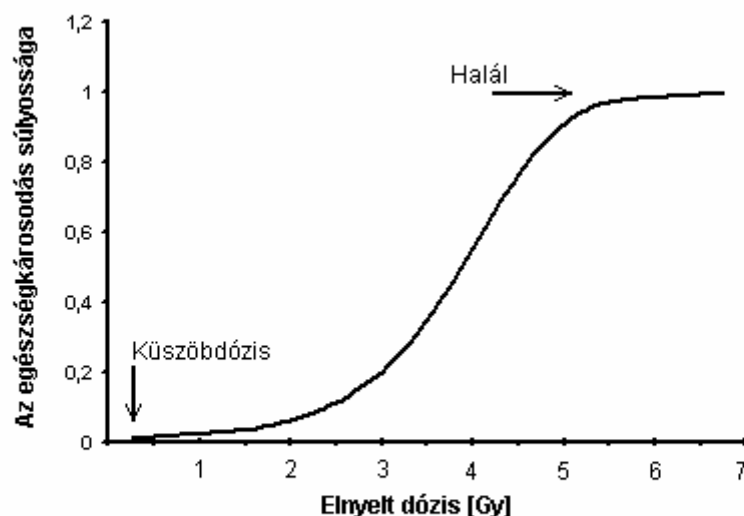
A radioaktivitás és a vele járó sugárzások felfedezését az egészségre gyakorolt káros hatások lehetőségének felismerése követte. Bequerel mellényzsebben hordott rádiumsótól nehezen gyógyuló bőrgyulladást kapott, már 1902-ben rádium okozta bőrrákot azonosítottak, és radonnal elárasztott térben tartott kísérleti állatok pusztulását figyelték meg. A hamburgi Szent György Kórház udvarán, a Röntgenosztály mögött, emlékoszlopot állítottak fel, azok emlékére, akik a radioaktív sugárzások kutatásának, alkalmazásának lettek áldozatai. Ezek között Maria Curie, Albers-Schönberg, és sok más kutató neve mellett 11 magyar név is szerepel [4]. A több mint egy évszázada halmozódó tapasztalatok ellenére, a radioaktív sugárzások egészségügyi hatásait tekintve még napjainkban is sok bizonytalanság van, különösen a kis dózisok hatásait tekintve. A tendencia az egyre nagyobb óvatosságra utal, azaz a kezdetektől napjainkig egyre szigorodó egészségmegővő szabályok a jellemzők.

A sugárzások hatása összetett. Először fizikai, kémiai, majd biokémiai, s végül biológiai változások következnek be, melyek a szervek, szövetek részleges vagy teljes elhalásához vezethetnek. Egy élőlényt ért sugárterhelés hatására jelentkező károsodás két nagy csoportra, determinisztikusra és sztochasztikusra osztható [5, 6].

1.2.1. Determinisztikus hatás

Az egyszeri nagy dózisok hatására rövid időn belül bekövetkező változások a determinisztikus hatások. Következményei többségében néhány órán vagy napon belül jelentkeznek, de lehet ún. késői hatása is (mint pl. a krónikus bőrgyulladás, katarakta).

A determinisztikus hatásokra jellemző, hogy csak egy bizonyos dózis felett jelentkeznek, azaz létezik egy küszöbdózis, és a hatás súlyossága a dózistól függ (1. ábra). Az eddigi tapasztalatok szerint évi 0,5 Sv effektív dózis alatt nem lépnek fel determinisztikus hatások, így a környezeti dozimetriában csak igen súlyos balesetek esetén kell ezzel számolni.

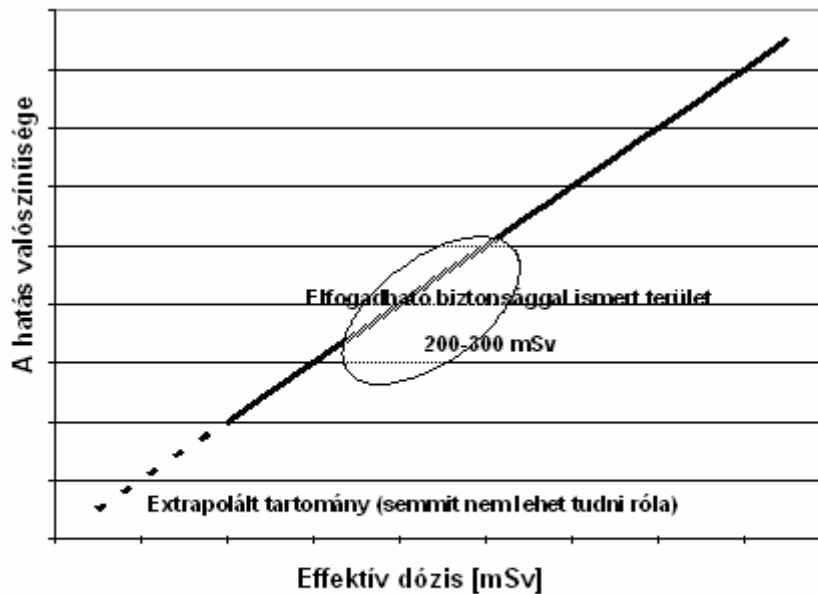


1. ábra. Determinisztikus hatás [5]

1.2.2. Sztochasztikus hatás

A sztochasztikus hatásokra jellemző, hogy nincs küszöbdózis, tehát akár egész kis dózisok is kiválthatják. A hatás nem minden egyednél következik be, de a sugárterhelés növekedésével a károsodott egyedek száma nő (2. ábra).

Ezek a káros hatások elsősorban daganatos megbetegedések formájában, illetve kisebb mértékben genetikus károsodásként jelentkeznek. A legújabb sugárvédelmi ajánlások alapján 1 Sv sugárterhelés halálos kimenetelű rákkockázata $5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$. A linearitás elvét elfogadva, ez azt jelenti, hogy ha 10 000 000 (Magyarország lakossága) fő 1 mSv sugárterhelést kap, akkor valószínű, hogy 500 fő emiatt fog a későbbiekben, daganatos betegségben elhunyni. Emellett nem elhanyagolható a teljes ($7,3 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ - 730 fő) kockázat sem, ami a halálos kockázaton túl, részben genetikus ($1,3 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ - 130 fő), részben ($1 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ - 100 fő) gyógyulással járó rákos megbetegedést valószínűsít [6, 7].



2. ábra. Sztochasztikus hatás [5]

1.2.3. Alacsony dózisok problémája

Sztochasztikus hatást okozó dózisok esetében igen sokszor felmerül az a kérdés, hogy az alacsony dózisok esetén létezik-e egy küszöbszint, ami alatt a sugárzásnak nem tulajdonítható káros hatás, vagy pedig minden sugárzási szint, a mértékével arányos kockázati tényezőt jelent. A problémát az okozza, hogy a kis dózisú sugárzások egyetlen olyan elváltozást sem okoznak, amelyet más környezeti károsító hatás ne okozhatna. Így a kis dózisok okozta növekmények statisztikailag nehezen illetve nem kimutatható változást eredményeznek [8-10].

Hogy lehet-e extrapolálni a magasabb dózisoknál tapasztalható egészségügyi kockázatot egészen a 0 szintig küszöbdózis nélkül (Linear No-Threshold Theory „LNT”) arra különböző szerzők különböző válaszokat adnak. Az LNT dózis-hatás arányosságot feltételező modell mellett vannak szupralineáris, szublineáris, stb. modellek. Csaknem mindegyik változatnál lehet kísérleti bizonyítékokra hivatkozni [11-13]. Az LNT modell elfogadása esetén a maximális biztonságot tarthatjuk szem előtt, viszont ekkor fölösleges gazdasági teher érheti a társadalmat. Egy küszöbszint meghatározása esetén pedig a maximális biztonság elve sérül. Az ALARA-elv (As Low As Reasonably Achievable) a fenti dilemmára próbál elfogadható

megoldást kínálni. Ez azt javasolja, hogy az ésszerűen elérhető legkisebb kockázat elvét kell alkalmazni, ami az adott ország társadalmi-gazdasági szintjének megfelelő, teljesíthető [14].

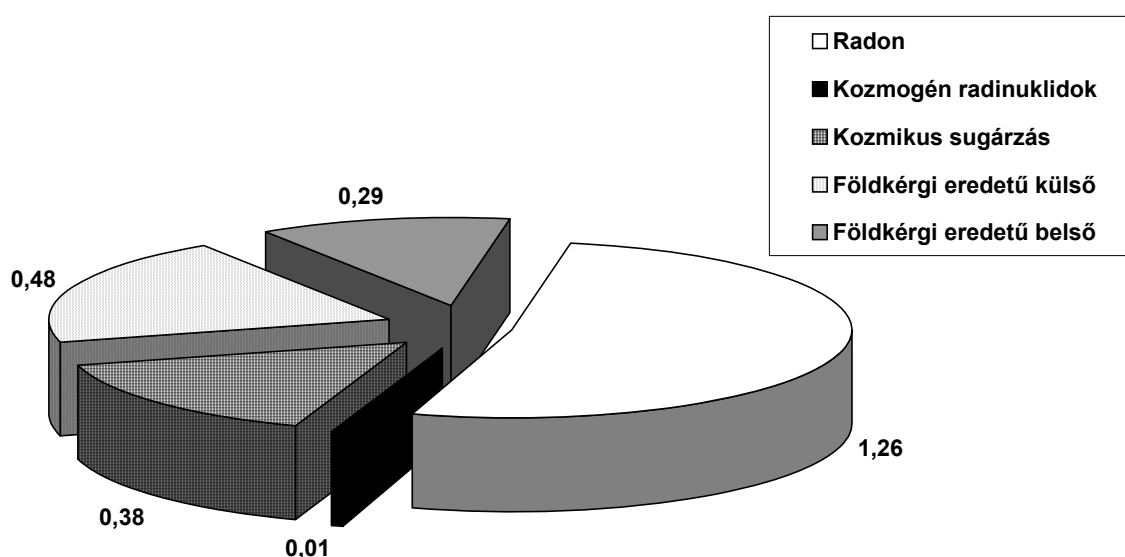
Mivel a földi élet kialakulása adott háttérsugárzás mellett zajlott és ez jelenleg is fennáll, elfogadható, hogy minden élő szervezet rendelkezik egyfajta sugárterhelést tűrő képességgel, ugyanakkor kérdéses, hogy ez szükséges lenne-e az optimális működéshez. Ezt végig gondolva az ALARA elv megint csak elfogadhatónak tűnik.

Az alacsony dózisok hatásait vizsgálva több szerző arra következtetett, hogy kis mértékű sugárzás még előnyösebb is lehet a zérus szintnél [11, 13, 15]. Vannak pozitív tapasztalatok, magas radon-koncentrációjú helyeken folytatott terápiákkal kapcsolatosan [16-18]. Ezen eredményeket azzal magyarázzák, hogy a sugárzás stimulálja a védekező mechanizmusokat, és alacsony szintnél ez lesz domináns a károsító hatással szemben (hormézis). Ugyanakkor bizonytalanságot okoz, hogy a terápiák pontos és következetes leiratai sehol sem ismertek, nincsenek egységes terápiás eljárások kidolgozva. Például nehezen értelmezhető, hogy radon fürdőnél ugyanolyan gyógyhatású az 1000 Bq/dm³, mint a 100 Bq/dm³ radon-koncentráció. Ellentétként említhetők viszont colorádói uránbányászok körében 1950 és 1990 között végzett vizsgálatok, amely szerint hosszabb ideig való tartózkodás alacsonyabb radon-koncentrációjú térben veszélyesebb, mint a rövidebb idejű, de nagyobb radon-koncentrációjú térben való tevékenység [19].

Alacsony radon-koncentrációjú térben való huzamosabb idejű tartózkodás egészségkárosító hatása ettől függetlenül még nem teljesen tisztázott. Számos cikkben állítják, hogy a magasabb radon tartalmú lakások lakói körében, figyelembe véve a dohányzásra vonatkozó korrekciót is, alacsonyabb a tüdőrák miatti elhalálozási arány [20, 21], illetve, hogy a kettő között nincs kimutatható összefüggés [22, 23]. Míg más esetekben epidemiológiai felmérésekkel, és különböző modellek segítségével bizonyítják ugyanennek egészségkárosító kockázatát [24-29]. Az egységes véleményt ezen a területen valószínűleg csak a későbbiekben, a különböző modellek, mérési módszerek, és az eltérő radon szintek eredményeinek összevetésével lehet majd kialakítani [30-32].

1.3. Természetes eredetű sugárterhelés

Természetes eredetű, a természetben előforduló sugárzásból származó sugárterhelés. Idetartoznak a kozmikus sugárzások, illetve a kozmikus sugárzásnak a légkör atomjaival lejátszódó kölcsönhatás során keletkező úgynevezett kozmogén radionuklidok, továbbá a föld kialakulásakor már jelen lévő, de hosszú felezési idejük miatt mindmáig le nem bomlott földkérgi eredetű (primordiális) radioizotópok és ezek bomlástermékei által okozott sugárterhelések. A természetes eredetű sugárzást háttérsugárzásnak is nevezik, s értékét nagymértékben befolyásolják a környezeti tényezők. A természetes eredetű sugárterhelés megoszlását a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra. Természetes eredetű sugárterhelés megoszlása [mSv/év]] [7]

Kozmikus sugárzás és a kozmogén radionuklidok okozta sugárterhelés

Az űrből a Föld légkörébe érkező nagy energiájú részecske sugárzások az elsődleges kozmikus sugárzások. Egy részét a Föld mágneses tere eltéríti, melynek mértéke a földrajzi szélességtől illetve a naptevékenység keltette mágneses terek változásától függ. Eredetük szerint megkülönböztethető galaktikus és szoláris kozmikus sugárzás.

- Galaktikus eredetű: főleg nagy energiájú protonokból ill. kisebb mennyiségben (kb. 10%) He- és nehezebb atommagokból áll.

Energiaspektrumuk: $1 \text{ MeV} - 10^{14} \text{ MeV}$, 300 MeV-os eloszlási maximummal.

Feltehetően a csillagközi térből származnak, pl. szupernóva robbanásokból.

- Szoláris eredetű: naptevékenység okozza. A napkitörések során a látható, az ultraibolya, valamint a röntgensugárzás tartományában nagy energiamennyiség kerül ki, ill. töltött részecskék is kiszabadulnak. A szoláris kozmikus részecskék energiája viszonylag kicsi (1-100 MeV), így a felső légköri rétegekben lefékeződnek, ezért hatásuk a Föld felszínén jelentéktelen.

Igen fontos, hogy légi közlekedés esetén számolni kell a kozmikus sugárzásból származó sugárterheléssel. Mértéke a repülési magasságtól és az esetleges naptevékenységektől is nagymértékben függ. 10 km magasságban repülve $5 \mu\text{Sv/óra}$, míg 15 km magasságban már $10 \mu\text{Sv/óra}$ átlagos dózisteljesítménnyel kell számolni, amit a naptevékenység erősen befolyásolhat.

Az elsődleges kozmikus sugarak belépve a légterbe magreakciók, ionizáció és gerjesztések révén elveszítik energiájukat, és neutronok, protonok, müonok, pionok, kaonok stb., (valamint ún. kozmogén radioizotópok) keletkeznek. Az így keletkezett részecskék alkotják a *másodlagos kozmikus sugárzásokat*, melyek újabb magreakciókat hozhatnak létre. A protonok és neutronok gyorsan elvesztik energiájukat, ezért hatásuk csak a felsőbb légrétegekben meghatározó. A pionok és kaonok a rövid élettartamuk miatt nem érik el a Föld felszínét, de a müonok az atmoszféra legalsó rétegeibe is eljutnak. Így a Föld felszínén (tengerszinten) a kozmikus sugárzás kb. 25%-a neutronokból és fotonokból, 75%-a pedig müonokból áll.

Ahhoz, hogy a Föld felszínén a kozmikus sugárzásból származó effektív dózis becsülhető legyen, ismerni kell az effektív dózisteljesítmény változását és a népesség eloszlását a tengerszint feletti magasság függvényében. Ezeket figyelembe véve az évi effektív dózis világátlaga $380 \mu\text{Sv}$, amelyből $80 \mu\text{Sv}$ a neutrontól, $300 \mu\text{Sv}$ pedig az ionizáló komponensektől származik. A kozmikus sugárzás értéke magasság és földrajzi szélesség függő. A magasabban fekvő helyeken a 1,5-2 mSv/év értéket is elérheti.

Árnyékoló hatással vannak rá az épületek. A gyengítés az építőanyagtól függ. Faházaknál átlagosan 0,96, betonházaknál 0,42 a dóziscsökkentő szorzótényező. Ha nincs helyi adat, akkor a 0,8-as árnyékolási faktort célszerű alkalmazni.

A kozmikus sugárzás hatására keletkezett kozmogén radionuklidok külső sugárterhelés szempontjából elhanyagolhatók, de a belső terhelést tekintve is csak a ^{14}C izotóp említhető meg, amely évi $12 \mu\text{Sv}$ sugárterhelést okoz [5, 33, 34].

Földkérgi (terresztriális) eredetű sugárterhelés

A kozmogén radionuklidokon kívül ma már csak azok a radioizotópok (valamint bomlástermékeik) találhatók meg a Földön, (a mesterségesen előállítottakat nem számítva) melyeknek felezési ideje összemérhető a Föld korával. A dózisterhelés szempontjából az alapvető primordiális radionuklidok a ^{40}K , ^{232}Th és ^{238}U . A ^{87}Rb és ^{235}U csak másodlagosak. A ^{232}Th és ^{238}U bomlási sorában található radioizotópok többsége dozimetriai szempontból szintén jelentős. Már egyre több helyen monitorozzák a természetes eredetű radioizotópokból származó gamma-sugárzás okozta sugárterhelést. A vizsgált országokban, az átlagérték szabadban, 1 m magasságban: 24 és 160 nGy/h között változik. Népeséggel súlyozott világátlag 59 nGy/h. A gamma dózisteljesítmény nagy része a ^{238}U sorban a ^{214}Pb és a ^{214}Bi , míg a ^{232}Th sorban a ^{208}Tl és a ^{228}Ac radioizotópoktól származik. A Föld felszíni külső dózishoz a 30 cm-nél mélyebben fekvő kőzetek radionuklidjai már alapvetően nem járulnak hozzá. A ^{238}U , ^{232}Th és ^{40}K átlagos koncentrációja a talajban 33-45 illetve 420 Bq/kg. A magas ^{226}Ra , ^{232}Th és bomlástermékeit tartalmazó ásványok miatt a világ néhány helyén a levegőben mért dózisteljesítmény magasabb az átlagosnál (pl. India, Irak, Szudán). Egyes helyeken 12000 - 30000 nGy/h.

A terresztriális gamma-sugárzásból származó külső sugárterhelés népeséggel súlyozott világátlaga 0,48 mSv. Gyerekek és csecsemők esetén ez az érték 10 ill. 30%-kal magasabb.

Belső sugárterhelés szempontjából - a külön tárgyalt ^{222}Rn izotópot nem tekintve – a táplálékláncban mindig előforduló ^{40}K a legjelentősebb. A légzéssel és élelem-fogyasztással a szervezetbe kerülő földkérgi radionuklidok okozta belső effektív dózis 0,29 mSv, amelyből 0,19 mSv a ^{40}K -tól, 0,1 mSv a ^{238}U és ^{232}Th radionuklidtól származik [7, 34].

Radontól származó sugárterhelés

Mivel a természetes sugárterhelés több mint a fele (1,26 mSv/év) a ^{222}Rn -tól származik, ez az izotóp külön figyelmet érdemel. Szabadban gyorsan felhígul, de zárt terekben (lakások, munkahelyek) feldúsulhat. Lakásokban mérhető évi átlagos radon-koncentráció világátlaga 40 Bq/m³, szabadban 5-10 Bq/m³ [7]. Részletesebben a következő fejezetben tárgyalom.

1.4. A radonról

A téma ismertetése előtt a fontosabb fogalmakat összefoglaltam:

Potenciális alfa-energia: egy, a radon bomlási sorában lévő nuklid potenciális alfa-energiája, pontosabban azon alfa-részecskék energia összege, amelyek ezen atommagnak a viszonylag stabilis ^{210}Pb -á való bomlása során szabadul fel. Mértékegységei: MeV, J.

Potenciális alfa-energia koncentráció: az egységnyi levegő térfogatban jelenlevő nuklidok potenciális alfa-energiájának összege. Mértékegységei: MeV/m³, J/m³.

Egyensúlyi ekvivalens koncentráció (EEC): a radonnak azon aktivitás-koncentrációja, amelynél a radon radioaktív egyensúlyban van a rövid felezési idejű bomlástermékekkel, amelyeknek ugyanakkora a potenciális alfa-energia koncentrációja, mint a kérdéses nem egyensúlyi keveréké. Mértékegysége: Bq/m³.

Munkaszint (Working Level, WL): az a potenciális alfa-energia koncentráció, amely 3700 Bq/m³ aktivitás-koncentrációjú, egyensúlyban lévő radon bomlástermékek felel meg. Régebben a bányabeli munkahelyek ellenőrzésénél ezt használták, mivel, mint ahogy neve mutatja ez volt az a szint, ami mellett még folytatható volt a munka így a kifejezetten bányabeli körülményekre kifejlesztett mérőeszközök még ma is ebben adják meg eredményeiket.

Egyensúlyi faktor vagy tényező (F): a levegőben lévő radon egyensúlyi ekvivalens koncentráció és az aktivitás koncentráció hányadosa. Mértékegység nélküli, értéke 0 és 1 között változhat [5, 33, 35].

1.4.1. A radon fontosabb fizikai, kémiai tulajdonságai

A radon színtelen, szagtalan nemesgáz, rendszáma 86, forráspontja -62 °C, olvadáspontja -71 °C. Szobahőmérsékleten és légköri nyomáson ebből következően gáz halmazállapotú. Vízben és különböző szerves oldószerekben oldódik. Szilárd és cseppfolyós állapotban radioaktivitása miatt foszforeszkál.

A radon 222-es izotópját 1900-ban Halle-ban (Németország) Friderich. E. Dorn német kémikus fedezte fel, amelyet a rádium bomlástermékeként (rádium emanáció) nevezett meg. Később Ramsay és Gray is izolálta (1908), ők nitonnak nevezték el. 1923 óta radonnak nevezik. 220-as izotópját 1899-ben két angol tudós R.B. Owens és Ernest Rutherford fedezte fel.

A természetben előforduló három radioaktív bomlási sor mindegyikében megtalálható a radon nemesgáz egy-egy izotópja (1. táblázat) [36-38].

1. táblázat. A bomlási sorok radon izotópokkal kapcsolatos fontosabb jellemzői [37]

Bomlási sor	Urán	Tórium	Aktínium
Tömegszám kód	4n+2	4n	4n+3
Kiindulási elem és felezési ideje	^{238}U 4,5 · 10 ⁹ év	^{232}Th 1,41 · 10 ¹⁰ év	^{235}U 7,1 · 10 ⁸ év
Rádium anyaelem és felezési ideje	^{226}Ra 1622 év	^{224}Ra 3,64 nap	^{223}Ra 11,7 nap
Radon leányelem és felezési ideje	^{222}Rn (radon) 3,82 nap	^{220}Rn (toron) 55,6 sec	^{219}Rn (aktinon) 3,9 sec
Potenciális alfa-energia a rövidéletű bomlási sorban	19,2 MeV per atom	20,9 MeV per atom	20,8 MeV per atom
Stabil végmag	^{206}Pb	^{208}Pb	^{207}Pb

Az aktinon és általában a toron nem eredményez jelentősebb sugárterhelést. Ennek oka az aktinon esetében az, hogy környezetünkben a ^{235}U nem fordul elő számottevő koncentrációban (a természetes urán 0,71 %-a), másrészt az aktinon olyan rövid felezési idejű izotóp, hogy nagy része már a keletkezése helyén elbomlik és csak igen elenyésző hányada kerül a légkörbe. Az okok a tórium esetében hasonlóak. Rövid élettartama miatt csak abban az esetben eredményez jelentősebb dózisterhelést, ha a talaj, kőzet, vagy építőanyag magas ^{232}Th koncentrációjú. A ^{222}Rn esetében más a helyzet, hiszen 3,82 napos felezési idejének köszönhetően a földkéregből laza talaj esetében akár 1-2 m mélységből, sőt egyes esetekben jóval mélyebbről is feláramolhat s így az ember közvetlen közelébe juthat [5, 39].

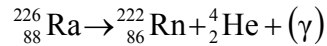
A radon instabil elem. Nincs stabil izotópja. Bomlása során alfa részecske szabadul fel. Sorozatos bomlások eredményeként jönnek létre leányelemei, melyek szintén radioaktívak. A rövid élettartamú radioaktív izotópok (bomlás-termékek) különböző felezési idejű alfa-, béta- és gamma-sugárzók (Függelék 1.) [36].

A következőkben a „radon” név alatt minden esetben a ^{222}Rn izotópot értem.

1.4.2. A radon keletkezése

A radon közvetlenül a talajban és a kőzetekben lévő rádiumból keletkezik, ezért mennyiségét elsősorban az anyag ^{226}Ra aktivitás-koncentrációja határozza meg [35].

A radon alfa-bomlással keletkezik a ^{226}Ra -ból:

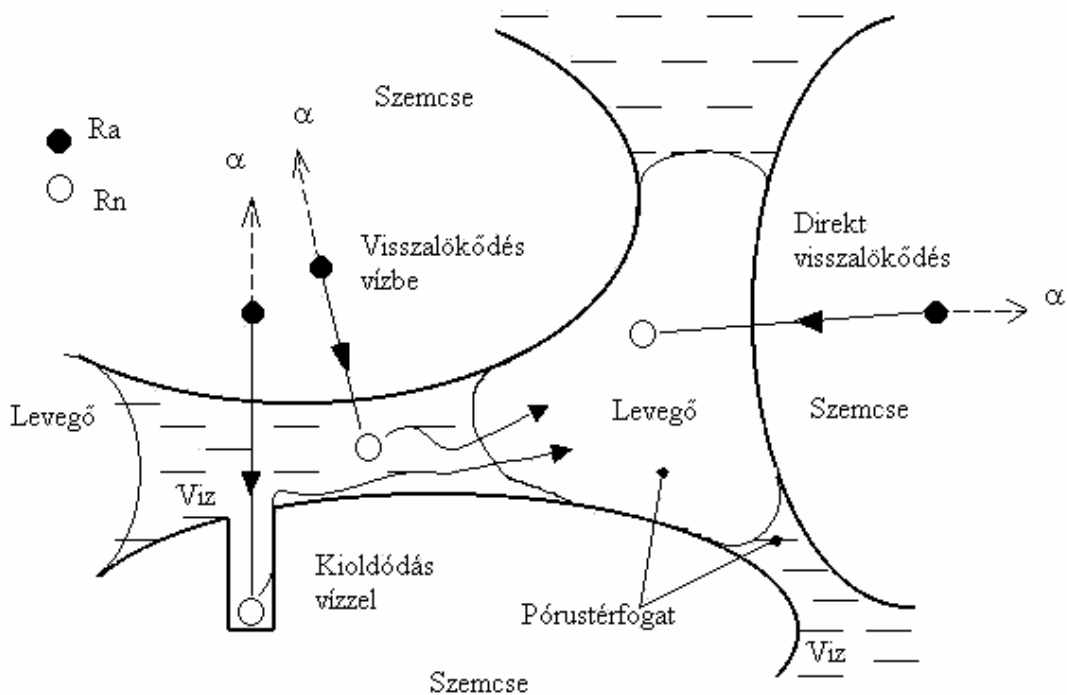


Ahol:

^4_2He - alfa-részecske,

(γ) - a bomlást kísérő gamma-sugárzás.

A talajban és a kőzetekben a rádiumatomok a szilárd anyagba épültek be, így a belőlük keletkező radon csak úgy képes a felszínre, vagy a nagyobb földalatti terekbe jutni, ha ki tud lépni a szilárd anyagból a kristályok és a talaj szemcséinek pórusai közé.



4. ábra. A radon szemcséből való kijutásának folyamatai Tanner szerint [35]

Az anyaelem bomlásakor a kristályrácsban keletkező radon legfőképpen visszalökődés által kerülhet a pórustérbe (direkt visszalökődési hányad). Azonban a radon atom általában

nagyobb mozgási energiával rendelkeznek, mint ami a pórustérbe jutáshoz szükséges, emiatt igen valószínű, hogy becsapódik a szemközi szemcsébe és ott fékeződik le. Az így megállított radon atom az általa roncsolt csatornán keresztül víz oldás révén juthat ki a pórustérbe (indirekt visszalökődési hányad), (4. ábra).

Amennyiben a pórustér részben vagy teljesen telített vízzel, az már képes elnyelni a mozgó radon atom energiáját, így nagyobb valószínűséggel a pórusvízben marad, ahonnan lehetősége nyílik kidiffundálni a pórusközi térnek levegővel töltött részeibe [35].

A pórustérbe kijutott, és a kristályokban keletkezett összes radon atomok számának hányadosa az emanációs tényező (ϵ).

Az emanációt befolyásoló tényezők:

- Sűrűség: a sűrűségtől függően a radon a szilárd anyag 20-70 nm-es mélységéből képes kijutni a pórustérbe.
- Szemcseméret: nagyobb méretű szemcsék esetén több bomlás történik a 20-70 nm-nél nagyobb mélységben, így ez csökkentő hatással van az emanációra.
- Nedvességtartalom: a pórusközi víz lassítja a kijutott radon atomot, így olyan részecskék is a pórusközi térbe kerülnek, melyek mozgási energiájukat tekintve a lassító hatás nélkül átjutnának egy másik szemcsébe. A pórusok közötti nedvesség tehát növeli a direkt kijutások számát. A jelenlevő víz azonban oldja a radon gáz egy részét, valamint a radon diffúzióját is gátolja, így a nagy víztartalom már gátolja a radon gáz kiáramlását.
- Porozitás: minél porózusabb egy anyag, annál nagyobb az egységnyi tömegre jutó felület, és annál nagyobb az esély arra, hogy a rádium alfa-bomlásakor keletkező radon kijut a szemcséből.
- Rádium-eloszlás: az emanációt az is befolyásolja, hogy a ^{226}Ra eloszlása mennyire homogén, illetve lokálisan mennyire halmozódik fel [37].

A pórusközi térbe kijutott radon mozgását a talajban két fizikai folyamat határozza meg:

- a diffúzió, mely a koncentrációkülönbségen alapul,
- a pórusokat kitöltő közeg (folyadék, gáz) mozgása, amely magával viszi a radont (advekcio).

A felszín alatti radon-transzport a következő egyenlettel írható le:

$$\frac{dC}{dt} = D_{eff} \nabla^2 C - \nabla(\vec{v}C) - \lambda C + \phi$$

Ahol:

C - radon pórustérfogati koncentrációja,

D_{eff} - radon effektív diffúziós együtthatója,

$\vec{v}$ - szállító közeg sebessége,

λ - radon bomlási állandója,

ϕ - forrástag.

Első tag a diffúziót, második az advekciót, harmadik a bomlást, negyedik pedig a radon források hatását jellemzi. A földalatti radon transzportnak kiemelt jelentősége van a földalatti légterekben való változások nyomon követésében. Mivel a nyomás, hőmérséklet, nedvesség tartalom kis mértékben ingadozik a földalatti üregek légterében, a radon-koncentráció változásai árulkodnak leginkább a légmozgások tulajdonságaikról. Egyes esetekben rejtett geológiai képződmények feltárásában is segítséget nyújthatnak a koncentrációváltozások nyomon követése.

A légterbe kiáramló radon fluxusa (exhaláció) az egységnyi felületen, egységnyi idő alatt kiáramló radon aktivitása. Az exhaláció mértékegysége Bq/m²s [35].

Az exhalációt közvetlenül és közvetve befolyásoló tényezők:

- a pórusközti tér radon-koncentrációja,
- a talaj gázáteresztő képessége,
- a talaj nedvességtartalma,
- a talaj szemcseszerkezete,
- az emanációs tényező,
- a napszak,
- az évszak,
- az időjárási viszonyok,
- árapály effektus.

Ezen információk birtokában már látható, hogy a rádium jelenléte adott területen még nem feltétlenül jelenti a légteri radon-koncentráció megnövekedését, hiszen ez függ az emanációtól és exhalációtól, amit igen sok más tényező befolyásol [35, 37].

1.4.3. A radon és leányelemeinek egészségügyi hatásai

Radon és leányelemeinek belélegzéséből eredő sugárterhelés egészségkárosító hatását urán és szénbányászok körében végzett epidemiológiai vizsgálatok, valamint állatkísérletek bizonyították. Több ilyen felmérés eredményei szerint a nagyobb radon sugárterhelés esetén a tüdőrák kialakulásának valószínűsége arányos a sugárterhelés mértékével. A lakosság körében végzett epidemiológiai és eset-kontroll tanulmányok többsége is azt mutatta, hogy magasabb radon-koncentrációk esetén ez az összefüggés a lakosság körében is érvényes [41, 42].

A szervezetet érő sugárterhelés elsősorban nem a radontól, hanem annak rövidéletű alfa-sugárzó leányelemeitől ered. Ennek az a magyarázata, hogy míg a belélegzett radon nagy valószínűséggel kilélegzésre kerül, csak egy elenyészően kis hányada, kb. 3%-a bomlik el a tüdőben, addig a leányelemek kötődve a levegőben lévő aeroszol részecskékhez, a belélegzést követően jelentős arányban maradnak a tüdőben, lerakódva annak felületére. Itt tovább bomlanak, és így roncsolják a hámsejteket. Mivel az aeroszokok lerakódásának helye a tüdőben erősen függ a méretüktől, így az elnyelt dózis is különböző a tüdő más-más részein [43-46].

1.4.4. A radon feldúsulásának várható területei

Magas U-Ra koncentrációval jellemezhető területek

A gránitok, savanyú csillámpalák és a permi homokkő felszíni megjelenési területei (Mecsek térsége, Mórág, Velencei-hegység, Balaton felvidék, Alpok-alja, a Bükk egyes területei) [47-49].

Technológiailag megnövelt koncentrációjú természetes radioaktív anyagok (TENORM) környezete

Ezek az anyagok a természetes előfordulású radioaktív anyagokat tartalmazó nyersanyagok feldolgozása, felhasználása során keletkezhetnek és akár nagyobb aktivitású hulladékok, melléktermékek létrejöttét eredményezhetik. Ilyen anyag lehet például, uránbánya meddő, zagy, széntüzelésű erőmű pernyéje, salakja, ivóvíztisztítók hulladékai, foszfor műtrágya, egyéb ásványi anyag feldolgozás mellékterméke (pl. bauxit, ritka földfémek stb.) [50-52].

Magas emanációs, exhalációs tényezővel jellemezhető képződmények

Az emanáció és exhaláció meghatározó tényező, hiszen hiába magasabb az adott terület rádium tartalma, ha a belőle keletkezett radon gáz jelentős mennyiségben nem tud kijutni a légterbe. Ezért fontos ugyan az adott terület U-Ra tartalmáról információkat gyűjteni, de az emanációs tényező és az exhalációs képesség meghatározása nélkül ezen adatok a várható

radon mennyiségéről nem adhatnak teljesen megbízható eredményeket. Ugyanez építőanyagokra nézve is igaz, melyek radionuklid tartalmára nézve az Európai Unió is egységes szabályozást vezetett be.

Korlátozott légcseréjű, rosszul szellőző zárt terek

Adott paraméterviszonyoknak megfelelően (levegő aeroszol, nedvesség tartalom, porozitás, emanációs tényező, stb.) csekélyebb levegőmozgású helyeken, ahol a radonnak lehetősége nyílik felhalmozódni a radon-koncentráció megemelkedése várható.

Speciális, a radon szempontjából hatékony transportmechanizmusok megléte

Egyes barlangoknál tapasztalható levegőszűrési folyamatok, víz által való kimosódás, törésvonalak mentén való áramlás lehetősége, hordozógázok áramlási folyamatai.

Egy feltétel teljesülése általában nem jelenti a radon-koncentráció megnövekedését, de több paraméter együttes megléte már növeli ennek valószínűségét [53].

1.5. Törvényi szabályozás

A világ országai sugárvédelmi szabályainak döntő többségét nemzetközi ajánlások, és azok irányelvei határozzák meg. Az ajánlásokat nemzetközi szervezetek adják ki, mint az ICRP (International Commission on Radiation Protection), UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on Effects on Atomic Radiations) és az ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements). Ezek közül a legfontosabb az ICRP, amely a legújabb tudományos eredményeket és tapasztalatokat összesítve és elemezve rendszeresen ajánlásokat tesz közzé, pl. ICRP No. 26 (1977), ICRP No. 50 (1987) ICRP No. 60 (1990) ICRP No. 65 (1993). Az ajánlások gyakorlati bevezetéséhez szükséges és konkrét technikai megoldásokat is tartalmazó javaslatok az IAEA (International Atomic Energy Agency) irányításával nemzetközi összefogásban készülnek. Így jelentette meg az IAEA a biztonsági szabályzatát (International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, röviden IBSS) 1995-ben. Ezt követte az Európai Unió EUROATOM direktívaival, valamint hazánk az 1996-ban született atomtörvényével, és az ehhez kapcsolódó végrehajtási rendelettel [3, 54-57].

1.5.1. Radonra vonatkozó nemzetközi ajánlások

Az ICRP szabályozási irányvonala különbséget tesz munkahely és lakóépület között. Az ajánlott cselekvési szint radonra lakóépületekben 200 Bq/m^3 , munkahelyeken pedig 1000 Bq/m^3 . Ebből származó becsült évi sugárterhelés átlagosan 7000 illetve 2000 óra tartózkodási idővel, mindekét területen 0,4 egyensúlyi faktort használva, 5 illetve 6 mSv. A sugárterhelés becslése eltérő dóziskonverziós tényező alkalmazásával történik Lakóépületek esetén $1,1 \text{ Sv/Jhm}^{-3}$ -t, míg munkahelyeknél $1,4 \text{ Sv/Jhm}^{-3}$ -t használtak [54]. Ami aktivitáskoncentrációra vonatkoztatva: $6,2 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bqhm}^{-3}$ -t, illetve $7,9 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bqhm}^{-3}$ -t jelent.

Az IAEA a biztonsági szabályzatában (IBSS-ben) követve az ICRP ajánlását és irányvonalát 1000 Bq/m^3 -es cselekvési szintet javasol munkahelyre. A sugárterhelés öt egymást követő év átlagában nem haladhatja meg a 20 mSv/évet , illetve egyetlen évben sem az 50 mSv értéket. Az ICRP-hez képest különbség, hogy a dózis becslése során nem a radon, hanem a leányelemek koncentrációját helyezi előtérbe, 0,4-es egyensúlyi faktor mellett. Fontos, hogy az IBSS is a lakóépületekre alacsonyabb dóziskonverziós tényezőt javasol [58].

Az Európai Unió ajánlása az IBSS-nek megfelelően nem a radonra, hanem a leányelemeire vonatkozóan hozza meg direktíváit. A munkahelyi cselekvési szintet nem vezeti be, csupán a dóziskonverziós tényezőre és a maximált munkahelyi sugárterhelésre ad rendelkezést. Az IBSS-hez hasonlóan eltérő dóziskonverziós tényezőt javasol munkahely és lakóház esetében [53-57].

1.5.2. Magyarországi szabályozás

Az 1996. évi CXVI. Atomenergiáról szóló törvény 2000-ben megjelent 16/2000 (VI. 8.), és 2003. január 1-ével életbe lépett Egészségügyi Miniszter végrehajtási rendelete 2. számú mellékletének a *dóziskorlátok, radon-koncentrációk munkavállalókra vonatkozó cselekvési szintjei* című I. fejezete szerint az 1.3 és a 2-es pontjai, illetve a 2. számú melléklet 2. számú függelékének 26. pontja, valamint a *sugárterhelés ellenőrzése* című IV. fejezet 1.5 és 1.6 pontjai alatt találhatók a területre vonatkozó előírások [3].

A végrehajtási rendelet cselekvési szintként éves átlagban 1000 Bq/m^3 -t határoz meg a radon koncentrációjára nézve levegőben. A munkavállaló foglalkozás közbeni sugárterhelésénél a dóziskorlátokat a radontól származó dózishányad figyelembevételével kell alkalmazni, vagyis a sugárterhelés egymást követő 5 naptári évre összegezve nem haladhatja meg a 100 mSv effektív dózist. Az effektív dózis egyetlen naptári évben sem haladhatja meg az 50 mSv értéket. Továbbmenve, amennyiben a sugárzási szint mértéke indokolja, az Országos

Tisztiorvosi Hivatal elrendeli az egyéni sugárterhelés rendszeres ellenőrzését és meghatározza annak módját. Dózisbecsléssel kapcsolatban az alkalmazandó egyensúlyi faktorra és dóziskonverziós tényezőre vonatkozóan a rendelkezések nem tartalmazzak leírást. Az ajánlott 0,4-es egyensúlyi faktorról és az ICRP ($7,9 \cdot 10^{-9}$ Sv/Bqhm⁻³) dóziskonverziós tényezőjével számítva, 1000 Bq/m³-es radon-koncentráció 6,3 mSv sugárterhelést jelent.

A magyar szabályozás és nemzetközi ajánlások összevetése a 2. táblázatban látható

Mind a négy szabályozásban közös, hogy a barlangot, bányát, fürdőt, más jellegű földalatti munkahelyeket veszélyeztetett munkahelyként jelölik meg, a megengedett sugárterhelés mértéke 20 (max 50) mSv/év.

2. táblázat. Magyarországi szabályozás összehasonlítva az ICRP, IBBS és Európai Unió ajánlásokkal

	Cselekvési Szint [Bq/m ³]		Megengedett éves sugárterhelés [mSv/év]		Dóziskonverziós tényező [mSv/mJhm ⁻³]	
	Munkahely	Lakóház	Munkahely	Lakóház	Munkahely	Lakóház
ICRP	1000	200	20 (max 50) 6*	5*	1,4 ($7,9 \cdot 10^{-9}$)**	1,1 ($6,2 \cdot 10^{-9}$)**
ISBB	1000	-	20 (max 50)	-	1,4 ($7,9 \cdot 10^{-9}$)**	1,1 ($6,2 \cdot 10^{-9}$)**
EU	-	új:200 régi: 400	20 (max 50)	új: 10* régi: 20*	1,4 ($7,9 \cdot 10^{-9}$)**	1,1 ($6,2 \cdot 10^{-9}$)**
Magyarország	1000	-	20 (max 50)	-	-	-

*várható éves sugárterhelés, **[Sv/Bqhm⁻³]

1.5.3. Magyarországi szabályozás összevetése európai országok szabályozásaival

Európa számos országában található szabályozás a munkahelyi radon-koncentrációra. Ezek összefoglalását a 3. táblázatban mutatom be.

Mint látható az európai országok radonra vonatkozó cselekvési szintjei igen eltérőek. A szélső szabályozási értékek 200-3000 Bq/m³ között változnak. Vannak országok, ahol eltérő cselekvési szintek használatával megkülönböztetik a felszín feletti és felszín alatti munkahelyeket. Az esetek többségében aktivitás-koncentrációra van korlát, de Lengyelország

esetében dóziskorlát, míg Romániában munkaszint az irányadó, és csak földalatti munkaterületekre érvényes. A földalatti munkahelyek esetén figyelemre méltó a belga, német és a svéd megoldás, ahol a munkahelyen eltöltött órák száma határozza meg a megengedhető radon-koncentrációt.

3. táblázat. Európai országok munkahelyeire vonatkozó szabályozási szintek

Ország	Föld feletti munkahely [Bq/m ³] új/régi épület	Föld alatti munkahely [Bq/m ³]
Ausztria	-	-
Belgium	800*	800*
Csehország	1000	1000
Dánia	400	400
Finnország	400	400
Franciaország	400/1000	-
Németország	200/400	2000*
Görögország	400	400
Írország	200/400	400
Olaszország	500	500
Hollandia	-	-
Lengyelország	-	<20**
Portugália	-	-
Románia	-	4***
Szlovénia	1000	1000
Spanyolország		-
Svédország	400	2500*
Svájc	3000	3000
Egyesült Királyság	400	400
Magyarország	1000	1000
Határok	200-3000	400-3000

*[kBq/m³], **[mSv/év], ***[WLM/év] (1 WLM (Working Level Month)=5mSv)

Ezen túlmenően számos (6) országban szabályozott formát kapott a radon munkahelyeken történő mérésének eljárása is. Konkrétan, mikor (pl. fűtési szezonban, novembertől áprilisig), mennyi ideig (integrális mérési módszer esetén: 5 nap, 1 hét, 10 nap, 1-2-3 hónap, minimum 3 hónap), és milyen módszerrel (folyamatos, integrális) vagy eszközzel (CR-39, elektret detektor, akkreditált labor eszközei) hajtható végre a vizsgálat.

A mérés végrehajtására vonatkozóan több esetben található szabvány leírás is. Például Finnország esetében ez a szabvány a következő:

- o a mérési eljárást hatóságilag el kell fogadtatni,
- o integrált mérés esetén a minimális mérési időtartam 2 hónap,
- o méréseket november és április között a fűtési szezonban kell végrehajtani,
- o nagyobb méretű munkaterület esetén meghatározott számú ponton kell a méréseket végrehajtani.

Amennyiben 400 Bq/m^3 fölé esik a radon szintje, a további eljárások követendők:

- o $400 < 500 \text{ Bq/m}^3$, ellenőrző mérést kell végrehajtani más időszakban,
- o $500 < 2000 \text{ Bq/m}^3$ a radon-koncentrációt meg kell határozni munkaidőben, vagy csökkenteni kell a mennyiségét,
- o $> 2000 \text{ Bq/m}^3$ csökkenteni kell a radon koncentrációját [59].

Ezen szabályozás szerint a cselekvési szintek egész évre vonatkoznak, ugyanakkor az előírt mérések időtartama meg sem közelíti ezt.

Mint már említettem a hazai szabályozás cselekvési szintként éves átlagban 1000 Bq/m^3 -t határoz meg a levegő radon koncentrációjára. A megfogalmazás szerint ebbe beleértendő a munkaidőn kívüli radon szint átlaga is, illetve nem dönthető el pontosan hogy mit is kell érteni alatta, és esetleg csak a munkaidőre eső átlagot kell-e figyelembe venni.

A hazai szabályozás nem tartalmaz iránymutatást az elvégzendő radon mérés végrehajtási módjáról. Nincs arra útmutató, hogy mikor, hány mérési ponton, milyen mérési eljárással és eszközzel történjenek a vizsgálatok

A végrehajtási rendelet a sugárterhelés jelentős részét okozó leányelemek mérésére és előfordulására vonatkozóan sem nyilatkozik. A sugárterhelés becslésével kapcsolatban nincs útmutatás az alkalmazandó egyensúlyi faktor és dóziskonverziós tényezők értékéről. Eszerint a magyar szabályozásból nem világos, hogy adott radon-koncentráció adott területen milyen sugárterhelésnek felel meg, illetve milyen tényezőket kell a sugárterhelés becslése folyamán figyelembe venni.

1.6. Vizsgálati helyek bemutatása

Vizsgálataimat az úrkúti mangánbányában, az ajkai Ármin szénbányában, az Egri Török Fürdőben, hat idegenforgalmi barlangban: Abaligeti-, Pálvölgyi-, Szemplőhegyi-, Szent István-Anna-, és Baradla-barlangban, valamint hét bakonyi túra-barlangban: Szentgáli Kölik-, Csatár-hegyi-, Ménesakol-árki 1-es számú víznyelő (M1), Kab-hegyi Baglyas-, Zsófiapusztai 2-es számú víznyelő, Miklós Pál-hegyi Rókalyuk, és a Som-hegyi Rókalyuk barlangban végeztem.

1.6.1. Bányák

Mára már közzismert tényné vált, hogy nem csak az uránbányászat területén kell kiemelt figyelmet fordítani a munkavégzők sugárvédelmére, hanem más jellegű bányáknál is (pl. szén, bauxit, stb.). Mivel a mélyművelésű bányák vágatait minden irányból kőzetfalak határolják, adott a lehetőség magas radon-koncentráció kialakulására. Ehhez természetesen elengedhetetlen a kőzettestben lévő rádium, mint forrás megléte, illetve a keletkező radon légtérbe való jutásának lehetősége.

Bányában a radon kőzetből való kijutására a munkafolyamat további kedvező lehetőséget teremt, hiszen alapvető a kőzettestek aprítása, morzsolása, zúzása, ami a kibocsátási felület megsokszorozódását jelenti. Mindezekhez hozzájárulhat még a kőzetek igen magas emanációs koefficiense is [60-64].

Bányákban az emberi munkavégzés elengedhetetlen feltétele a folyamatos légcirkuláció biztosítása. A levegőt légaknán keresztül szívják be, majd légzsilipeken keresztül juttatják le a bánya légterébe, végül a szállítóaknán vezetik ki a szabad térbe. Ettől függetlenül a bányabeli légtérben lehetséges a radon és a leányelemeinek nagymértékű feldúsulása [61, 65].

Bányákban jellemző az áthúzó szellőztetés, amely a behúzó és kihúzó levegő útját összekötő vágatrendszerekben valósul meg nagyteljesítményű ventilátorok segítségével. Ez általában kielégítő légcserét biztosít. Ugyanakkor a szellőztetés szempontjából léteznek külön szellőztetett bányaterületek, ahol csak az ún. parciális szellőztetés valósítható meg. Ez esetben a ventilátorral mozgatott friss levegő egy cső segítségével jut be a vágat végébe, és magában a járatban áramlik visszafelé. Leginkább ezek azok a szakaszok, ahol a radon-koncentráció megnövekedésére lehet számítani [66].

Úrkúti mangánbánya

A Dunántúli-középhegység mangános összeleteit már az őskortól ismerték, használták, s viszonylag nagy távolságra is elszállították. Ezt követően a huszadik század elején barnaköszén után kutatva találták meg ismét az Úrkúti vasas oxidos mangánércet, s 1925-1930 között külszíni fejtéssel, 1935-től mélyműveléssel, az I. akna megnyitásával bányászták. A bánya 1963-92 között az Országos Érc- és Ásványbányák műveként, 1992-ben leányvállalatként, 1993-tól Kft-ként működik.

Az úrkúti mangánérc két fő formája az oxidos és a karbonátos mangánérc.

A karbonátos mangánérc üledéktani szempontból finoman laminált agyagmarga/mészmarga sorozatnak minősül, rétegződése elsődleges leülepedési jelenség [67].

A mangán érc, fedő, fekvő és iszap természetes radionuklid tartalmára korábban már történtek vizsgálatok, ez alapján a vizsgált mintákban átlagosan 417 Bq/kg (8 - 1369 Bq/kg) ^{40}K , 16 Bq/kg (2 - 87 Bq/kg) ^{226}Ra , 14 Bq/kg (3 - 40 Bq/kg) ^{232}Th , és 16 Bq/kg (2 - 75 Bq/kg) ^{238}U található. Összevetve a kőzetek radionuklid tartalmának világátlagával, egyik sem kiugró érték, sőt ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{238}U esetében jóval az átlag alatt van [68].

Ajkai Ármin szénbánya

Az Ármin akna mélyítését 1900-ban kezdték el, a bányát 1904-ben helyezték üzembe, nevét a köztisztviselőben álló Riethmüller Ármin (1833-1911) bányavezetőről kapta. 2004. szeptember 3-án tolták ki belőle az ajkai szénmedence utolsó csille szénét.

A bánya az ajkai szénmedencében található, amely mintegy 1,5-2 km széles, ÉK-DNy-i tengelyirányban 10 km hosszú. A medence tektonikai helyzetét a földtani múltban többször megismétlődő kéregszerkezeti mozgások alakították ki [69].

Az itt található szén terasztriális radionuklidoktól származó jelentős radioaktivitása közismert, többek által kutatott és vizsgált, a világátlaghoz képest jóval magasabb. Emiatt a radon-koncentráció feldúsulása a bányában várható. A lakosság sugárterhelésének megnövekedése is várható, mivel a több mint 50 éve üzemelő Ajkai Hőerőmű a szén elégetése révén eddig körülbelül 1 millió tonna pernyét emittált a levegőbe. A város területén illetve közvetlen szomszédságában mintegy 11 millió tonna pernye és salak halmozódott fel. A lakosság pedig előszeretettel használta ezt a salakot házának szigetelésére, utak feltöltésére [47].

A szenekre általánosságban nem jellemző a túlzott radioaktív anyagtartalom (4. táblázat), az általában a talajban mérhető aktivitás-koncentrációkkal mozog egy szinten. Emiatt a szén bányászata során nem feltétlenül várható magas radon-koncentráció kialakulása [69-72].

4. táblázat. Különböző bányákból származó szenek radioaktív elemtartalma [73]

A szén származási helye	²³⁸ U (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)
Ajka	120-480	15-35	56-190
Pécs	175	127	560
Borsod	38-52	32-62	190-264
Dorog	40	36	194
Pennsylvania	15	12	148
India	19-52	19-75	37-526
Kanada	12	8	26
Világátlag (kőzetek)	33	45	420

1.6.2. Fürdők

A világon a balneológiai terápiák egyre inkább előtérbe kerülnek számos betegség kezelése esetén, mint természetes gyógymódok. Az esetek többségében a feltörő források vizében radon mindig jelen van kisebb vagy nagyobb mennyiségben, oldott összetevőiktől függetlenül. Ez hatással van a fürdő, illetve a hozzá kapcsolódó légterekben kialakuló radon-koncentrációra. A víz radon tartalmától, a fürdő szellőztető rendszerének sajátosságaitól függően számos esetben jelentős radon-koncentrációra lehet számítani. Magyarországon eddig a Rudas, Gellért, Rác és az Egri Török Fürdőben mértek 100 Bq/dm³ körüli és ezt meghaladó radon-koncentrációkat (5. táblázat) [74-77].

Egri Török Fürdő

Az egri fürdőkultúra története a régmúlt időkbe nyúlik vissza. A termálforrások vizéből kialakult tavakat a város lakossága már a kezdetektől használta fürdésre, mosásra.

Egy 1448-ból származó középkori oklevél szerint Eger első fürdője, a „Balneum Chartusiensum”, azaz karthauzi fürdő, a mai Eger középpontjában, az Eger patak mentén állt.

A régi gyógyfürdő épületéhez 1965-ben épült a dél felől úgynevezett nyaktaggal csatlakozó Heves megyei kórház Reuma Osztálya. A Heves megyei kórház egri Reuma Osztályának gyógyfürdője 1979-ben nyílt meg Török Fürdő néven [78].

A kórház épületét a Fürdő mellé építették fel, azaz a légterük nem közös, a két épület között egy, az átjárást lehetővé tevő ajtó biztosítja a kapcsolatot.

Az egri gyógyforrások eredete

A Bükk hegység hazánk karsztos jelenségekben egyik leggazdagabb hegysége. A hegység környezetében olyan vízföldtani viszonyok jöttek létre, amelyek kedvezőek a karsztos hévizek felhalmozódásához. A hegység környezetében levő karsztos hévíztároló rendszer a felszíni karsztos kőzetekkel összefüggésben áll (azaz vízföldtani szempontból nyitott tárolórendszer-típusba tartozik). A kőzetek karsztosodása és erős tektonizáltsága révén kedvező feltételeket biztosít a csapadék és a felszíni vizek elnyelődésének és mélybe jutásának. Így a hegység területén, a felszínen levő karsztos kőzetösszlet a hévíztároló rendszer tápterülete, ahonnan a vízutánpótlás történik. Az egri gyógyforrások vize is innen ered.

5. táblázat. Különböző országokban található fürdők vizeinek radon-koncentrációja
[53, 74-76, 79]

Fürdő megnevezés	Forrásvíz átlagos radon-koncentrációja [Bq/dm³]
Rudas Fürdő, Juventus forrás	135
Rudas Fürdő, Attila forrás	289
Rudas Fürdő, Hungária forrás	393
Rácza Fürdő	123
Gellért Fürdő III. forrás	49
Gellért Fürdő VI. forrás	104
Egri Török Fürdő Török medence forrása	103
Taishan (Kína)	57
Nanshui (Kína)	280
Polichnitos spa (Görögország)	210
Badgastein (Ausztria)	662
Bad Steben (Németország)	800
Bad Elster (Németország)	1300
Jachymov (Cseh Köztársaság)	4250

A természetes vízfeltörések lényegében három önálló forráscsoportra különülnek el. Az első és legjelentősebb forráscsoportot a Tükör-, Török- és a Nagymedencei források alkotják. Ez a csoport a legbővebb vizű és a legmagasabb hőfokú. A források egy része a fürdő épületén

belüli medencék fenekén tör fel, míg a másik része az épületen kívül található. A fürdő épületén belül fakadó vizet gyógyászati célra hasznosítják.

A második forráscsoportot északon, a versenyuszdai források alkotják. A harmadik forráscsoportként az ún. József-forrás különíthető el, amely a természetes források közül a legkisebb [78].

Az Egri gyógyvizek közül a Török, a Tükör medence, a sportfürdő, a nyitott versenyuszoda és a József-forrás forrásvize az egyszerű radioaktív termális vizek közé sorolhatóak. Ez azt jelenti, hogy a víz literenkénti oldott ásványisó-tartalma nem éri el az 1000 mg-ot, de a megkívánt hőfokon kívül a radon minimum 37 Bq/dm^3 -es koncentrációban jelen van.

Az egészségügyi miniszter 1975-ben a fürdőt gyógyhellyé nyilvánította bizonyítható orvosi vizsgálatok alapján.

A vizek radon tartalma az általuk érintett kőzetek rádium tartalmából eredeztethető, mivel jelentős mennyiségű oldott rádiumot nem tartalmaznak ($51,8\text{-}155 \text{ mBq/dm}^3$). A korábbi elemzések szerint a víz radon koncentrációja 63 és 110 Bq/dm^3 közötti.

A Török Fürdő forrásaiból jelentős mennyiségben törnek felszínre gázok (Török, Tükör és Pezsgő medencék), melyekben korábbi elemzések alapján a radon-koncentráció $300\text{-}510 \text{ kBq/m}^3$ közötti [78].

Az 5. táblázat adatait tanulmányozva az Egri Török Fürdő terápiás vizeinek radon tartalma hazai viszonylatban közepes, míg világviszonylatban alacsony radon tartalmú.

1.6.3. Barlangok

A barlangokban, mint minden oldalról kőzetekkel körülvett terekben magas radon-koncentrációra lehet számítani. Karsztos kőzetekben (mészkő, dolomit, só stb.) kialakuló barlangokban az urán radioaktív bomlási sorában keletkező elemek a kőzetben maradnak, feldúsulhatnak, illetve tovább mozoghatnak. A barlangok repedésrendszerére a nagy felület és a kis légtérfogat a jellemző, ezért ezekben a repedésekben nagy radon-koncentráció léphet fel [35, 80, 81].

A barlangok radon szintje, amely leggyakrabban a néhány kBq/m^3 -tól a több tíz kBq/m^3 -ig terjedő tartományba esik, tipikus példa arra, hogy aránylag alacsony radionuklid tartalmú közegben is kialakulhatnak magas radon-koncentrációk [80-84], ezért egyes szerzők szerint az üledékes magas rádium tartalmú agyagrétegek is felelősek [85]. A hazai barlangok általában karsztosodásra hajlamos karbonátos kőzetekben találhatók, amelyek általában a földkérgi átlagnál alacsonyabb radionuklid tartalmúak. A barlangi levegő ennek ellenére viszonylag magas radon-koncentrációja a légtér zártságának, a gyakran csekély mérvű légcserének és a

barlangok sajátos légáramlási rendszerének köszönhető. További jellemzője a barlangi radon szinteknek, hogy a meteorológiai paraméterek (hőmérséklet, nyomás, páratartalom stb.) változásaira érzékenyen reagálnak. A radon szintet befolyásolja még a kőzetbe szivárgó víz is [35, 86].

A barlangokat az emberek látogathatják turisztikai, gyógyterápiás, sport és kutatási célból.

A barlangok osztályozása

A barlangok a légáramlás és a barlangi levegő minősége szerint három osztályba sorolhatók:

- hegyláb barlangok,
- zsákszerű barlangok,
- inverz működésű barlangok.

Hegyláb barlangok

Az ún. hegyláb típusú barlangok bejárata jó közelítéssel a barlangjáratokkal azonos szinten található. Jellemző az időszakosan eltérő huzatirány és az aránylag jó szellőzőtség (pl. Béke-barlang, Aggtelek). Kétféle légkörzés alakulhat ki egyfajta kémény hatásként, a felszíni levegő hőmérsékletétől függően. Télen a külső, hidegebb levegő bejut a barlang üregeibe, ott felmelegedve a repedések mentén feláramlik. Ekkor a barlang terében alacsonyabb radon-koncentráció mérhető, a radon mintegy visszaszorul a repedésekbe, illetve a repedésekből nem a barlangi tér felé, hanem ellentétes irányba áramlik. Ezért télen a barlang feletti kőzettestekben megbúvó repedésekben magasabb koncentrációk mérhetők. Nyáron a légkörzés iránya megfordul, a barlangi levegő áramlik kifelé, a külső levegő a repedés rendszereken átszűrve jut le a barlangtérbe, magával ragadva a repedésekben feldúsult radont. Nyáron magasabb radon-koncentráció lesz a jellemző a barlang légterében [35, 87].

Zsákszerű barlangok

Zsákszerűség azokra a barlangokra jellemző, ahol a bejárat(ok) a felső szinten található, ami miatt nem alakul ki jelentős légmozgás a barlang terében, vagyis a szellőzés hiánya miatt igen nagy radon- és szén-dioxid koncentrációk alakulhatnak ki (pl. Cserszegtomaji-Kútbarlang.). Itt a hőmérsékletváltozás helyett az atmoszférikus nyomásváltozás által létrehozott levegőváltozás a jellemző. Nyomás növekedés hatására befelé, csökkenéskor kifelé áramlik a barlangból a levegő. Ebbe a típusba sorolhatók általában a zsombolyok (függőleges, aknaszerű barlangok) és a két eltérő kőzet határán kialakult barlangok.

Nagyobb légterű barlangok esetén a térfogatváltozás miatti légáramlás akár viharos szelek (~100 km/h) kialakulását is jelentheti szűkebb keresztmetszetű bejáratoknál [35, 87].

A valóságban a barlangok átmenetet képeznek a két idealizált modell között. A bejáratok elhelyezkedésén kívül befolyásoló tényező lehet még a kőzetek minősége, helyzete, átjárhatósági, diffúziós paraméterei, más szinteken jelenlévő terek és üregek.

Inverz működésű barlangok

Egy külön kategóriába sorolhatók az inverz működésű barlangok, amelyeknél télen mérhető a magas radon szint, nyáron az alacsony. A jelenség a környező térszínhez képest magasan fekvő barlangoknál fordul elő, és a vizsgált barlang fordított légkörzése okozza. Ilyen esetekben a barlang alatt még egy (alsó) barlang húzódik. Télen a hideg felszíni levegő az alsó barlang bejáratán keresztül jut a karsztba, felmelegszik és felszáll. A két barlang között fekvő kőzetrétegen keresztüljutva dúsul fel radonnal, majd a felső barlang bejáratán át jut ki a külső környezetbe. Nyáron a felszíni levegő a felső barlang bejáratán keresztül jut be a rendszerbe, kiszellőzteti a radont, így a vizsgált barlangban alacsony radon-koncentráció jön létre. A lehűlt levegő az alsó barlang bejáratán át jut ki ismét a felszínre. Ezekből az következik, hogy az alsó barlang légkörzése és radon görbéje a hegylábi barlangoktól elvárható módon működik [87].

Tapolcai Kórház-barlang

A közismert Tapolcai Tavas-barlang mellett Tapolca másik barlangi kincse a Kórház-barlang, amely nem csak hidrológiai értelemben függ össze a Tavas-barlanggal, hanem feltárásának történetével is. 1925-ben szintén kútásás közben jutottak be első üregeibe, amikor a városi kórház vízellátásának megoldásán dolgoztak. Mivel a kórház vezetése nem szerette volna, hogy zavarják az intézmény nyugalma, a bejáratot befalazták.

1972-ben kísérleti jelleggel indult meg a gyógyászati kezelés, 1982-től pedig már hivatalosan is gyógybarlangként üzemel. Egyedüli gyógybarlang az országban, amely mellett közvetlenül ott található a kórház, illetve az orvosi ellátás. Az itt lévő liftnak köszönhetően mozgásszervi betegségekkel küzdők előtt sincs elzárva a terápia lehetősége, hiszen így csekély fizikai megterheléssel lejuthatnak a barlangba. 2004 nyarától a terápiás betegeken kívül az újonnan épült szomszédos Hotel Pelion szálló vendégei is használják a barlangot délutáni időszakban [86].

A barlang nagytermében már 1993-tól történtek radon mérések, egészen 1997-ig [88].

Idegenforgalmi barlangok

Abaligeti-barlang

A Mecsek 50 km²-nyi, zömmel triászból származó karszterületein több mint 210 barlang található. A karsztot nyolc nagyobb karsztforrás vízgyűjtőterületére lehet felosztani melyeknek nagy szerepük, van a környék vízellátásában is, ezek: a Tettye-, Vízfő-, Kőlyuk-, Paplika (Abaligeti-), Kisaplika-forrás, illetve a Mélyvölgyi-, a Mészégető-, és a Melegmányi-forráscsoport.

A hegység legnagyobb barlangja már a XIX. században látogatott és kutatott Abaligeti-barlang. Teljes hossza 1750 m, amiből a patakos Fő-ág fél kilométeres szakasza az idegenforgalom számára is nyitva áll, a kapcsolódó mellékágak viszont csak a barlangkutatók számára látogathatók.

Pálvölgyi-barlang

A Pálvölgyi-barlang Budapesten a Szépvölgyi út 182. sz. előtti kőfejtő keleti részében nyílik. A kőfejtőben megnyílt barlangok kutatását 1902-ben kezdték meg, de a legnagyobb barlangot csak 1904-ben fedezték fel, majd 1927-ben villanyvilágítást alakítottak ki.

Szemlőhegyi-barlang

A Szemlőhegy északi lejtőjén, a budapesti Barlang utca 15312 hrsz. telkén nyílik. A telken folyó kőbányászás közben 1930-ban meredeken lefelé vezető, a végén eltorlaszolt sziklahasadék nyílt, amelyből bontás útján továbbjutottak és felfedezték az akkor még páratlan szépségű aragonit- és alabástrom kristályokkal díszített barlangot.

Szent István-és Anna-barlang

Hazánk barlangokban leggazdagabb karszterülete a zömében szintén triász üledékes kőzetekből felépülő Bükk, ahol jelenleg több mint 1000 barlangot tartanak nyilván.

E rendszer legelső tagja a Szinva-völgyében, az országút mellett nyíló Szent István-barlang is, melynek cseppkődiszes. Idegenforgalmilag kiépített szakasza a bükki kirándulások kedvelt célpontja.

A hegység nagy karsztforrásaiból kiváló forrásmészkő tömegek lerakódásuk során gyökerek és egyéb növénymaradványok bevonásával kisebb-nagyobb üregeket, ún. mésztufa-barlangokat zártak körbe. A legtöbb ilyen barlang Lillafüreden ismert, ahol a Szinva-patak

vízése által lerakott mésztufadomb belsejének üregeit a mesterséges áttörésekkel kialakított Anna-barlang fűzi fel 600 m hosszú összefüggő rendszerre.

Baradla-barlang

Az Aggteleki-Karsztvidék legnagyobb, s egyben az egész Föld eddig ismert második legnagyobb cseppkőbarlangja a Baradla-Domica-barlangrendszer. Felmért folyosóinak összes hosszúsága meghaladja a 22 km-t. Az ismert barlangrendszerből 7 km-es szakasz Szlovákia területe alatt húzódik, míg a magyarországi szakaszok hossza 15 km. A szlovákiai barlangszakasz neve Domica, a magyar barlangrész ősi neve, pedig Baradla [89, 90].

Szabadidős, túra-barlangok a Bakonyban.

Dunántúli-középhegység délnyugati része hazánk barlangokban második leggazdagabb karsztterülete. Itt a mezozoos karbonátok mellett jelentős a nem karsztosodó kőzetek aránya is. Közel 900 nyilvántartott barlangjának zöme (több mint 500 db) kis kiterjedésű, inaktív, feltöltődő-pusztuló üreg.

Az Északi-Bakony barlangjai, víznyelői több koncentrált csoportban helyezkednek el. A legjelentősebbek a Som-, Kab- és Kőris-hegy térségében találhatók [91]. Ezek a barlangok a nagyközönség számára nem állnak nyitva, nehéz megközelíthetőségük miatt, illetve mert nincsenek kiépítve idegenforgalmi bemutatásra. Elsősorban a barlangászat szerelmeseinek, a barlangászattal amatőr módon foglalkozó sportembereknek nyújtanak szórakozást, szabadidős tevékenységet. A barlangász egyesületek évente akár több alkalommal is szerveznek barlangfeltáró hétvégeket, nyáron általában tíznapos időtartamú kutató táborok formájában. Ilyenkor a résztvevők huzamosabb időt töltenek a föld alatt, naponta akár hat-nyolc órát is, üledék kitermeléssel, járatok tágításával, vésésével, feltárásával.

Szentgáli Kőlik

A Szentgáli-Kőlik jelenleg az egyik leglátogatottabb barlang a bakonyi barlangászok között, mivel a közelmúltban több új járat is feltárással került, jelentősen növelve a barlang látogatható szakaszait. Itt minden nyáron megrendezésre kerül a Bakonyi Barlangkutató Szövetség tíznapos nyári kutatótábora, átlagosan napi hétórás lenntartózkodási idővel.

Csatár-hegyi-barlang

A közelmúlt egyik nagy reménye a Csatár-hegyi-barlang volt a barlangászok számára, hogy esetleg egy nagyobb barlangrendszer tárul fel kutatása során, ami miatt igen komoly

számú munkaórát fektettek bele a feltáró munkákba. Ezek a munkák a szabadságolások, illetve az időjárás miatt általában a melegebb, nyári hónapokra estek.

Ménesakol-árki 1-es számú víznyelőbarlang (M1), Kab-hegyi Baglyas-barlang, Zsófiapusztai 2-es számú víznyelőbarlang, Miklós Pál-hegyi Rókalyuk, Som-hegyi Rókalyuk

Bakonyi barlangászok által feltáró munka céljából gyakran látogatott barlangok.

1.7. A radon és leányelemeinek koncentráció meghatározása

A radon és leányelemeinek radioaktivitása egyrészt megkönnyítik, másrészt viszont bonyolítják a radon detektálását. Megkönnyíti azért, mert a radon alfa-sugárzása, leányelemeinek alfa- béta- és gammasugárzása miatt számos mérési módszerrel kimutatható. Nehezíti viszont azért, mert igen körülményesen különíthető el a radon alfa-sugárzása saját leányelemeinek és más radioaktív bomlási sorok termékeinek (pl. toron) alfa-sugárzásától.

A radon mérési eljárásait csoportosítom a radontól és/vagy leányelemeitől származó alfa-sugárzás mérése alapján (közvetlen, közvetett mérés), módszerek alapján (pillanatnyi mintavétel, néhány napig vagy hétig tartó folyamatos, illetve integrális mérés), és az alkalmazható detektorok (Lucas cella, ionizációs kamra, nyomdetektor stb.) alapján. A leányelem detektálási módszereket a mérési módszerek alapján csoportosítom.

1.7.1. Radon mérés közvetlen és közvetett módon

Közvetlen radon mérés

A mérés során a radonból származó alfa-részecske kerül detektálásra, általában a leányelemekből (^{218}Po , ^{214}Po) származó alfa-részecskékkel együtt. Ezt a radon-koncentrációjának kiszámítása során figyelembe kell venni.

Az alfa részecskék detektálásának alapvető problémája az igen rövid hatótávolság. Ezért biztosítani kell, hogy a radonból és leányelemeiből származó alfa-részecskék eljussanak a detektor felületére. Előnye viszont a nagy fajlagos ionizációs képesség, amely biztosítja, hogy ha az alfa-részecske már bekerült a detektor érzékeny terébe, akkor ott energiáját leadja, vagyis 100%-os valószínűséggel kölcsönhatásba lép a detektor anyagával [36].

Közvetett radon mérés

Radon koncentrációjának meghatározása történhet leányelemeinek kibocsátott alfa-, béta-gamma-sugárzásának detektálása alapján is. Ezt csapdázási módszernek is hívják, mivel a mérés azon alapszik, hogy a gáz halmazállapotú radonból keletkező szilárd fém leányelemek valamilyen eljárással egy adott felületen felfoghatók (csapdába ejthetők) majd egyszerűen mérhetők. Ilyen eljárás lehet a leányelemek nagyfeszültségű térrel való elkülönítése, az aktívszenes, és a kétfilteres eljárás [36, 92, 93].

1.7.2. Radon mérési módszerei

Pillanatnyi mintavétel mérési módszer

Pillanatnyi mintavétel módszerével általában csak tájékoztató jellegű adatokhoz lehet hozzájutni, hiszen egy szoba légterének, vagy forrás vizének radon-koncentrációja folyamatosan változik. Ezzel a módszerrel a radon előfordulásának nagyságrendi behatárolására lehetséges. Erre a célra leggyakrabban a Lucas cellával felszerelt eszközöket használják.

Néhány napig vagy hétig tartó folyamatos mérési módszer

Folyamatos mérési módszer alkalmazása esetén már adatokat nyerhetők a radon napi változásait illetően. Ez leginkább óránkénti átlagokból áll, de fél, vagy kétóránkénti átlagok alkalmazása is előfordulhat. Hosszú távú (pl. egész éves) mérésekre ritkán alkalmazzák, mivel az ekkor alkalmazott mérőeszközök igen költségesek. Erre a célra félvezető detektorral, ionizációs kamrával, szcintillációs cellával felszerelt eszközök egyaránt használatosak.

Integrális mérési módszer

Ennek során az adott mérési ponton elhelyezésre kerül a radon detektor, és hosszabb időn keresztül (több hétig, hónapig) gyűjti a radontól származó elváltozásokat. A mérési periódus végén a detektorokat összegyűjtése és kiértékelése következik. A kiértékelés során kapott eredmény arányos a mérési időszak alatt a detektor mérőrészébe jutó radon-koncentráció időintegráljával.

Az integrális radon mérések sikerrel küszöbölik ki a pillanatnyi mintavételen alapuló mérések legnagyobb hátrányát, az időbeli fluktuációt. Mindazonáltal az integrális radon mérések eredményei is jeleznek hosszúperiódusú (szezonális) ingadozásokat.

Az integrális radon mérések céljára az olyan detektorok jöhetnek szóba, amelyek nagyszámban kihelyezhetők és ott is hagyhatók, következésképpen kisméretűek, olcsók és egyszerűek. Erre a célra legelterjedtebben a nyomdetektorok, illetve az elektret detektorok használatosak.

1.7.3. Radon mérésre alkalmas detektorok

A legelterjedtebben alkalmazott detektorok az alábbiak:

Ionizációs kamra

A radon-koncentráció, a radon és leányelemeinek bomlása során fellépő alfa-sugárzás keltette ionizációval, és így az ionizációs árammal arányos. Mivel az ionizációs kamránál nem kell speciális töltőgáz, a radon tartalmú levegő közvetlenül a kamrába vezethető. Ez a gyakorlatban diffúzióval, vagy átáramoltatással biztosítható. Lényeges, hogy a mérőtérbe csak a radon jusson be, a leányelemei ne. Ezt megfelelő szűrő (pl. üvegszál) feltétellel lehet biztosítani. Ez a módszer nagyon pontos, az érzékenység $0,5 \text{ Bq/m}^3$ alá mehet. Sok laboratóriumban standardnak használják, más műszerek kalibrálásához [94]. Mintavételes és folyamatos üzemben is alkalmazható, hátránya viszont, hogy drága.

Szcintillációs cella

A szcintillációs cella, mely Lucas-cellaként ismert, széles körben elterjedt a radon mérésére, mivel a módszer egyszerű és megbízható eredményt ad.

A Lucas-cella lényegében nem más, mint egy kamra, amelynek a belső felülete vékony ezüsttel szennyezett cink-szulfid-réteggel bevont. A cellában bomló radon (és leánytermékei) által kisugárzott és a belső falat elérő alfa-sugárzás hatására a ZnS(Ag) -rétegben fényfelvillanás történik, amit a kamrával összeköttetésben álló fotoelektronsokszorozó mérhető elektromos jellé alakít át. A Lucas-cellával való radon-mérés hátránya, hogy a leányelemek kontaminációja miatt a cella ismételt felhasználása csak a lecsengés ideje után lehetséges, vagy pedig előre meg kell határozni a lecsengés időbeli lefutását. Ezen kívül a ZnS -réteg felületén megkötődött hosszú felezési idejű radon leánytermék kontaminációja miatt a ZnS -réteg időnkénti cseréje is szükséges [95].

Félvezető detektor

A mérendő levegő szűrőn keresztül jut a mérőkamrába. Itt a radon és leányelemeinek bomlása során keletkező alfa-sugárzás detektálható félvezető detektorral. Az összes alfa-

impulzusszámból már számolható a radon-koncentráció, de a jó felbontású spektrumból diszkriminátor kivágja a rövid felezési idejű ^{218}Po 6 MeV-es csúcsát, amit ezek után egy egyszerű számlálóval regisztrálni lehet. Ez utóbbi megoldás előnye, hogy a radon-koncentráció változását aránylag gyorsan lehet követni [37].

Szilárdtest-nyomdetektor

Nemzetközileg elterjedt elnevezés és rövidítés: solid state nuclear track detector, SSNTD.

Sokféle alfa-részecske detektálásra alkalmas nyomdetektor-alapanyag ismeretes, a nemzetközi és hazai radon mérési gyakorlatban azonban ezek közül kettő terjedt el igazán:

- Cellulóznitrát detektor: élénkpiros színű anyag, amely általában néhány mikrométer vastag rétegben egy átlátszó, színtelen hordozófoliára van felhordva. A kémiai maratással felnagyított alfa-nyomok optikai mikroszkóp alatt, mint piros alapon látható világos „lyukak”, egyszerűen megszámlálhatók.
- Polikarbonát (CR-39) detektor: átlátszó műanyag, amelyet optikai tulajdonságai miatt leggyakrabban szemüveglencsék gyártására alkalmazható, és amely különlegesen érzékeny az alfa-sugárzásra (érzékenysége többszöröse a cellulóznitrát detektorénak). A kémiai előkészítés után az alfa-nyomok mikroszkóp alatt, mint szürkés foltok jelentkeznek az átlátszó háttéren.

A nyomdetektoros radon mérés során a detektort egy diffúziós kamrába helyezve az folyamatosan gyűjti a radontól és leányelemeitől származó alfa-nyomokat.

A diffúziós kamrának az a feladata, hogy a nem kívánt (a diffúziós cellán kívül keletkezett) leányelemeket távol tartsa a detektoranyagtól. Egyes megoldásokban maga a kamra anyaga a diffúziós szűrő (például a polipropilén anyagú kamrák esetében), más detektortartóknál külön filter gondoskodik a leányelemek távoltartásáról. Erre a feladatra alkalmazott filter készülhet papírból, műanyagból vagy akár üvegszálból is.

A mérési idő a lakótéri méréseknél általában 1-3 hónap. A detektálás helyét gondosan kell megválasztani, mivel a szélsőséges környezeti körülmények befolyásolhatják a kapott értékeket. A besugárzás végeztével a detektort el kell távolítani a kamrából, és radon mentes környezetben kell tartani feldolgozásig. Ha a detektor a detektálás után hosszabb időn keresztül a diffúziós kamrában marad, akkor a kamra anyagába abszorbeált radon (és leánytermékei) túlexponálhatja a detektoranyagot.

A mérőcellába jutott radon ill. leányelemeinek bomlása során keletkezett alfa-részecskék a detektor anyagát roncsolják. A nyomok közvetlenül a besugárzás után még nem láthatóak,

azokat vegyi maratással kell „előhívni”, maratószerként NaOH vagy KOH alkalmazható. A tömény lúg egyenletes sebességgel oldja a sértetlen detektorfelületet, de ahol az alfa-rész elroncsolta az anyagot, ott a maratási sebesség nagyobb. Ez a nyomok kitágulásához vezet.

A következő lépés a nyomsűrűség, azaz a detektor egységnyi felületére jutó nyomok meghatározása, vagyis a nyomszámlálás. Erre különböző módszerek állnak rendelkezésre.

A vizuális nyomszámlálás során a detektort mikroszkóp alá helyezve, a látott nyomok egyenként megszámlálhatók.

A képszimulációs kiértékelés során, a mikroszkóp látómezejében látható képet különböző ismert nyomsűrűségű ábraszorozattal lehet összehasonlítani.

Az automatikus képelemzés során számítógéppel összekötött képanalizátor végzi a kiértékelést. A detektor egységnyi felületén kialakuló nyomsűrűség a besugárzási idő alatti átlagos radon-koncentrációval lesz arányos.

Ez a módszer rendkívüli egyszerűsége, olcsósága, a filmek terepállósága, a gamma- ill. béta-sugárzások iránti érzéketlensége és az eredmények dokumentálhatósága miatt nagyon elterjedt. Hátránya, hogy a filmek kiértékelése lassú, nehézkes, speciális laboratóriumi módszereket igényel [96-98].

A szilárdtest nyomdetektor mérés körébe tartozik még a retrospektív radon mérés. A retrospektív mérésre olyan anyag használható (üveg, kerámia, lakk, stb.) amelyen a radonból és leányelemeiből keletkező alfa-részecskék nyomokat hagytak, és ezek utólag kiértékelhetők. Természetesen ez akkor alkalmazható, ha tudjuk, hogy az illető anyag (tárgy) biztosan az adott helyen volt az eltelt időben. E módszer bizonytalansága meglehetősen nagy [99-101].

Elektret (kondenzátor ionizációs, E-PERM- Electret Passive Environmental Radon Monitor) detektor

Elektret (ionizációs kondenzátor) detektor passzív radon mérő detektor. Műanyag fallal készült (pl. teflonnal bevont) ionizációs kamra jelenti a detektort. A mérés során a mérőtérbe bediffundált radon és az itt keletkező leányelemeinek alfa-részecskéi ionizálják a levegő molekuláit, amik a feltöltött kamra falához jutva csökkenik annak elektromos töltöttségét. Az elektromos töltöttség csökkenése arányos a mérőtérbe bejutott radon mennyiségével [93, 102].

1.7.4. Leányelem mérés módszerei

Folyamatos mérési módszer

Folyamatos üzemmód esetén, a leányelemeket tartalmazó levegőmintát általában alacsony térfogatárammal $0,1-1 \text{ dm}^3/\text{perc}$ hajtódik keresztül egy szűrőrétegen. A szűrőrétegen megtapadt leányelemek alfa részecskéinek detektálása félvezető detektorral történik. A detektor beállítása alapján általában 2 és 8 MeV közötti energiájú alfa-részecskéket detektál. A radon alfa-sugárzó leányelemeinek energiái ezen a sávon belül esnek. Ez az alfa-spektrometriai módszer lehetőséget ad nemcsak a radontól, hanem a torontól származó leányelemek megkülönböztetésére is.

Pillanatnyi mintavétel mérési módszer

A módszer során adott térfogatú levegőben lévő leányelemek egy szűrőrétegen kiválnak. A szűrőrétegen megtapadt leányelemek aktivitásának mérése a szűrés befejeztével történik. Ezen a területen a legjobb eredménnyel Kusnetz illetve Tsivoglou (módosította Thomas) módszerek alkalmazhatók. Ezek egyben a legelterjedtebbek is.

Kusnetz módszer: akkor érdemes használni, amikor nem szükséges egymástól megkülönböztetni a leánytermékeket, hanem egy összkoncentráció meghatározása a cél. Az eljárás során kb. 100 liternyi levegő mintát kell keresztül áramoltatni egy szűrő rétegen 5 perc alatt. A szűrőrétegen megkötött leányelemek összalfa-aktivitásának mérési időtartama 40 és 90 perc közé esik, a mintavétel után. Itt már megfelelő számlálási hatásfokú szcintillációs detektor is kiválóan alkalmazható az alfa részecskék detektálására. A mérés során a rövid felezési idejű leányelemek lebomlásából bekövetkező aktivitás csökkenésből a Kusnetz-faktoriall történik a munkaszint számítása, a mérési idő figyelembe vételével.

Thomas által módosított Tsivoglou módszer: munkaszint illetve radon leányelem meghatározásra alkalmas módszer. A mintavétel módja megegyezik a Kusnetz módszerrel ismerttetettel. A szűrőn megtapadt leányelemek alfa-részecskéinek vizsgálata három különböző időintervallumban történik. A mintavételtől számított 2 és 5 perc között, 6 és 20 perc, valamint, 21 és 30 perc között. A kapott eredményekből a megfelelő számítási módszerekkel a ^{218}Po , ^{214}Pb és ^{214}Po koncentrációja, illetve a munkaszint meghatározható [103, 104].

2. Kísérleti Rész

2.1. Mérő eszközök és berendezések

2.1.1. Légtéri radon-koncentráció meghatározásának eszközei

A légtéri radon-koncentrációk meghatározásánál mintavételes, folyamatos és integrális módszert alkalmaztam. Az egyes méréseknél használt mérőeszközöket, mérési módszereket az alábbiakban foglalom össze.

A mintavételes módszer eszköze

RGM-3, Radon Gáz Monitor

Általános jellemzés: az RGM-3 radon gáz monitor hordozható, mikroszámítógéppel ellátott, robusztus alumínium tokozású radon mérő berendezés, amely villamos hálózatról vagy akkumulátorról működtethető.

Alkalmazott detektor típus: 3,3 dm³ térfogatú szcintillációs cella.

Működési mód: a készülék a levegő mintavételét a mikroszámítógép által irányított 2-8 dm³/perc térfogatáramú gázpumpával végzi. A radon leányelemeit szűrő távolítja el a mintából.

A műszernek három lehetséges működési módja van:

- pillanatnyi mintavételező,
- folyamatos mintavételező,
- teszt-mód.

Mérési időintervallum: folyamatos mintavételező módban az órás átlagértékek meghatározása történik.

Mérési tartomány: 9-1200000 Bq/m³

Előny: masszív kialakításának köszönhetően barlangok, bányák vizsgálatának egyik legjobban bevált eszköze.

Hátrány: meglehetősen nehéz (12 kg), csak hálózatról működtethető hosszabb időn keresztül, zajos [105].

Alkalmazása: az RGM-3 radon gáz monitort mintavételes mérési üzemmódban alkalmaztam az ajkai Ármin szénbányában.

A folyamatos módszer eszközei

PYLON AB-5 CPRD

Általános jellemzés: az AB-5 hordozható, fotóelektronsokszorozóval felszerelt kisméretű eszköz, cserélhető detektor feltétekkel. Belső akkumulátorról és hálózatról is működtethető.

Alkalmazott detektor típus: ZnS(Ag) szcintillációs detektor (CPRD - Continuous Passive Radon Detector, 330 cm³ térfogatú, diffúziós elven működő Lucas-cella).

Működési mód: a mintavétel diffúzióval, beépített 0-3 dm³/perc térfogatáramú pumpával és vákuum technikával történhet.

A műszernek kettő lehetséges működési módja van:

- pillanatnyi mintavételező,
- folyamatos mintavételező.

Mérési időintervallum: folyamatos mintavételező módban az órás átlagértékek meghatározása történik.

Mérési tartomány: 3-800000 Bq/m³

Előny: csendes üzemmódja, kis mérete miatt lakások, általános munkahelyek radon vizsgálatára is alkalmas, ugyanakkor jó por és nedvesség tűrő tulajdonsága miatt barlangokban és bányákban is kiválóan alkalmazható [106].

Alkalmazása: bányákban, fürdőben használtam.

RADIM 5-WP radon monitor

Általános jellemzés: A Radim 5-WP radon monitor kifejezetten barlangi körülményekhez, magas páratartalmú vagy poros környezetben való mérésekre kifejlesztett kisméretű mérőeszköz. Hálózatról nem, csak a belső akkumulátoráról működtethető.

A készülékbe jutó levegő páratartalmának csökkentése céljából a mérőműszerbe CaCl₂ szárítószerves töltet helyezhető, amely a páratartalmat megkötí, de a radont nem. A szárítóanyagot a mérés befejeztével ellenőrizni kell, illetve célszerű eltávolítani, mivel a megkötött nedvesség hatására elfolyósodik, károsítva a mérőeszközt.

Alkalmazott detektor típus: félvezető detektor, amely nagyfeszültségű térrel leválasztott ²¹⁸Po és ²¹⁴Po leányelemek alfa-részecskéit detektálja.

Működési mód: folyamatos diffúziós mintavételező.

Mérési időintervallum: a készülék harminc perce alatt mért értékek átlagát tárolja a memóriájában.

Mérési tartomány: 80-50000 Bq/m³ [107].

Előny: magas páratartamú helyeken kiválóan alkalmazható.

Hátrány: a szárító anyag miatt a diffúzió lassú, így jelentős 4-6 órás késéssel jelzi csak pontosan a radon szintet. Ezáltal a radon koncentrációjában bekövetkező változásokról is lassabban ad információt. A félórás mérési intervallum meglehetősen sűrű, sokszor felesleges, megfelelő és pontosabb lett volna az óránkénti átlag alkalmazása a konstrukció kialakítása során.

Alkalmazása: barlangok vizsgálata során használtam.

Alphaguard PRO2000

Általános jellemzés: az Alphaguard mérőeszköz a radon-koncentráció meghatározása mellett páratartalom, hőmérséklet és légnyomás mérésére is alkalmas. Belső akkumulátoráról, vagy hálózati áramforrásról üzemeltethető. Magas páratartalom mellett is optimálisan működik, gyorsan érzékeli a radon-koncentráció változásait.

Alkalmazott detektor típus: 0,56 dm³-es hengeres ionizációs kamra

Működési mód: a mintavétel diffúzióval üvegszálalás szűrőn keresztül, vagy külső, 0,1-1 dm³/perc térfogatáramú szivattyúegység segítségével történhet.

A műszernek kettő lehetséges működési módja van:

- pillanatnyi mintavételező (külső szivattyúval),
- folyamatos mintavételező (diffúziós).

Mérési intervallum: diffúziós mintavételezésnél: 10 vagy 60 perc átlaga kerül a memóriába.

Külső szivattyúval történő mintavételezésnél pedig 1 vagy 10 perc átlaga kerül a memóriába.

Mérési tartomány: 2-2000000 Bq/m³ [108].

Előny: Nagy érzékenységu és pontosságú mérőeszköz. Por és nedvesség tűró tulajdonsága révén kiválóan bevált barlangi és bányabeli körülmények között egyaránt. Halk üzemű és gyors az eredménykijelzése.

Hátrány: drága.

Alkalmazása: Bányákban, barlangokban alkalmaztam diffúziós üzemű mintavételezéssel, az óras átlagok mérésével. Az Egri Török Fürdő terápiás medencéinél feltörő gázok mérésére szivattyúval üzemeltetve használtam 10 perces mérésekkel.

RGM-3

Lásd: a mintavételes módszer eszköze

Alkalmazása: folyamatos üzemmódban használtam bányabeli körülmények között.

Az integrális módszer eszköze

A szilárdtest nyomdetektoros mérés

Általános jellemzés: a detektorok 16 cm^3 térfogatú, polipropilén diffúziós kamrákban kerültek kihelyezésre, amely az NRPB (National Radiation Protection Board, UK) hivatalos detektortartója. A kamrába való rögzítést egy Blue-tech nevű ragasztóval végeztem, amely nem sérti a detektor felületét, nem hagy szennyeződést rajta és hosszabb időn keresztül stabilizálja a detektor helyét a kamrában. Nyomok előhívása során a detektorokat 6M-os NaOH oldatban, $90 \pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$ -on 2,5 óráig marattam. Maratás után a desztillált vízzel megtisztított detektorokat kiértékeltem.

A kiértékelés a menüvezérelt VIRGINIA képanalizáló rendszerrel történt, amelyet a KFKI-ban fejlesztettek ki.

Alkalmazott detektor típus: A nyomdetektoros mérésekhez TASTRAK CR-39 (Track Analysis Systems Ltd. Bristol, U.K.) szilárdtest nyomdetektort használtam. A TASTRAK átlátszó polikarbonát (alil-diglikol-karbonát), hőkezelt műanyag, amely kémiai és fizikai összetételéből adódóan képes alfa-részecskék detektálására [109]. Sűrűsége $1,3\text{ g/cm}^3$ a lapkák vastagsága 1,5 mm, területük 1 cm^2 .

Működési mód: diffúziós üzemű, folyamatos mintavételezéssel.

Mérési időintervallum: néhány naptól akár fél évig. Minden mérés esetén 1 hónapos mérési intervallumot alkalmaztam.

Mérési tartomány: $50\text{--}35000\text{ Bq/m}^3$ 1 hónapos mérési idő esetén.

Előny: olcsó, egyszerűen kezelhető mérőeszköz.

Hátrány: a radon-koncentráció napi ingadozásairól nem ad felvilágosítást, csak a mérési időtartam alatti átlagról.

Alkalmazása: az összes vizsgált területen alkalmaztam. Mivel a diffúziós kamra késleltetése csupán néhány perc ezért személyi doziméterként is alkalmaztam.

2.1.2. Vízminták radon-koncentráció meghatározásának eszköze

Radim 3-WR radon monitor

Általános jellemzés: a Radim 3-WR radon monitor a vízben és a levegőben levő radon folyamatos mérésére, vagy a radon vízmintából történő mintavételes meghatározására alkalmas készülék. Belső akkumulátorról, vagy hálózatról működtethető.

Alkalmazott detektor típus: félvezető detektor, amely nagyfeszültségű térrel leválasztott ^{218}Po leányelemek alfa-részecskéit detektálja.

Működési mód: a mintavétel minden esetben $0,3 \text{ dm}^3/\text{perc}$ térfogatáramú külső szivattyú egység segítségével történik.

A műszernek kettő lehetséges működési módja van:

- pillanatnyi mintavételező,
- folyamatos mintavételező.

A vízben levő radon mérése háromféle módon kivitelezhető:

- folyamatos mérés,
- mintavételes mérés magas koncentrációjú minta esetében, ($>1000 \text{ Bq/dm}^3$),
- mintavételes mérés alacsony koncentrációjú minta esetében ($<1000 \text{ Bq/dm}^3$) [110].

Mérési időintervallum: vízminta esetén 0,5 óra, levegőminta esetén 0,5-24 óra között beállítható.

Mérési tartomány: vízminta esetén $1-122000 \text{ Bq/dm}^3$, levegőminta esetén $40-200000 \text{ Bq/m}^3$.

Előny: könnyű szállíthatóság mellett gyors a vízminta radon-koncentrációjának meghatározása. Terepi mérések kiváló eszköze.

Hátrány: a mérés során a mérőtér tisztítása a környezetből felvett levegővel történik. Ezért 200 Bq/m^3 -nél magasabb radon-koncentrációjú térben való méréskor csak úgy használható, ha biztosítjuk a mérőtér radon mentes levegővel való feltöltését.

Alkalmazása: munkám során vízmintákat az Egri Török Fürdőben elemeztem, minden esetben mintavételes üzemmódban.

2.1.3. Munkaszint meghatározásának eszköze

Pylon WLx

Általános jellemzés: a WLx mérőrendszer radon és toron koncentrációk munkaszintjének meghatározására alkalmas berendezés. Masszív alumínium tokozásának köszönhetően ipari, bányabeli, petrokkémiai, laboratóriumi használatra egyaránt alkalmazható. Hálózatról és belső akkumulátorról is üzemeltethető.

Alkalmazott detektor típus: félvezető detektor, amely a cserélhető szűrőrétegre leválasztott ^{218}Po és ^{214}Po radon és ^{216}Po és ^{212}Po toron leányelemek alfa-részecskéit detektálja.

Működési mód: a mintavétel belső, $0,5 \text{ dm}^3/\text{perc}$ térfogatáramú szivattyú egység segítségével történik folyamatos üzemmódban.

Mérési időintervallum: 1 óra.

Mérési tartomány: 0,001-100 WL.

Előny: Por és nedvesség tűrő, halk üzemű [103].

Hátrány: drága.

Alkalmazása: a munkaszint meghatározását az úrkúti mangán bányában, az ajkai Ármin bányában, és a Tapolcai Kórház-barlangban végeztem a Pylon WLx mérőberendezés alkalmazásával.

2.1.4. Személyi dozimetria eszköze

Személyi doziméterként minden esetben nyomdetektorokat alkalmaztam, melyeket a munkavégzők munkaidőben maguknál tartottak, sisakra rögzítve, nyakba akasztva, vagy zsebre téve. Munkaidő leteltével alacsony háttérű, folyamatos radon mérés alatt álló térben helyeztettem el a detektorokat, és havonta cseréltem őket.

2.1.5. Mérőeszközök kalibrálása

A mérőeszközök és a nyomdetektorok kalibrálását a Genitron Instrument által gyártott EVO 3209 számú kalibrációs kamrával végeztem, a *Radim 3-WR* és a *Pylon WLx* eszközök kivételével, amelyeket a gyártó kalibrált.

A kalibráló kamra saválló acélból készült hordó, melynek fedelén csappal zárható csomok, kémlelő nyílások, egy RS-232 kimenet, és 2 db 12 V-os egyenáram bevezető csatlakozó van.

A csatlakozók szerepe, a ventilátor és az elektromosan vezérelhető radon forrás áramellátásának biztosítása. A csapokkal lezárt csomópontokon át lehet mintát szívni a 210,5 dm³ térfogatú hordóból.

A kalibrációhoz PYLON modell 2000A jelű radon forrást használtam. A radon forrás (²²⁶Ra): aktivitása 105,7±0.4% kBq, radonkibocsátása a fém edényben 100%, -20 és +40 °C, ill. 0-300 kPa között. A kalibráció során különböző nagyságrendű radon-koncentrációkat állítottam be a forrás segítségével a kalibráló hordóban, majd összevettem a mérőeszközök által detektált értékekkel, illetve nyomsűrűségekkkel.

2.1.6. Méréseszközök eredményeinek megbízhatósága

A mintavételes és folyamatos működésű eszközök a mérés időtartama alatt a radonból vagy/és a bomlástermékekből származó detektált alfa-részecskék által kiváltott impulzusokat számolják. A mérés során figyelembe kell venni a bomlási sorban található, szintén alfa-sugárzó ²¹⁰Po hatását, amely a detektor felületre tapadt hosszú felezési idejű (21 év) ²¹⁰Pb-ből keletkezik. A ²¹⁰Po alfa-részecskéi növelik a háttérrel, ezáltal csökken a mérési érzékenység [37]. Integrális mérési módszer esetén ez elhanyagolható, mivel minden új mérés megkezdése előtt a diffúziós védőtokot desztillált vízzel és alkohollal megtisztítottam. A hosszabb ideje használt tokoknál pedig ellenőrző háttér méréseket hajtottam végre.

Az *Alphaguard PRO2000* működése során figyelembe veszi ezt a tényezőt, és a mért radon-koncentráció függvényében automatikus háttérkorrekciót hajt végre [108]. Ugyanez a többi mérőeszköz esetén nem mondható el. A háttér alacsony szinten tartása érdekében törekedni kell a minél nagyobb aktivitások minél rövidebb idejű mérésére. Diffúziós üzemmódban működő mérőeszközök esetében kikapcsolt állapotban is bejut a radon a detektortérbe, ellenőrizetlen háttérrel hozva létre, akár az *Alphaguard PRO2000* esetében is. Ezért üzemen kívül a mérőműszereket lehetőségekhez mérten radon mentes helyen kell tárolni.

A mért impulzusszám a következő összefüggéssel jellemezhető:

$$I_M = I_{H+M} - \frac{I_H^* t_M}{t_H} = I_H + I_M - \frac{I_H^* t_M}{t_H}$$

ahol:

I_M - mért impulzus szám

I_{H+M} - mért és a háttér impulzus szám

I_H - háttér impulzus szám

I_H^* - t_H alatt mért háttér impulzus szám

t_H - háttérmérés időtartama

t_M - mérés időtartama

A szórás négyzet a következő kifejezéssel jellemezhető:

$$\sigma^2 = I_M + I_H I_H^* \left(\frac{t_M}{t_H} \right)^2$$

ahol:

σ - szórás

ez átrendezve:

$$\sigma^2 = I_M + I_H^* \left(\frac{t_M}{t_H} \right) \left(1 + \frac{t_M}{t_H} \right)$$

mivel $i_H = \frac{I_H}{t_H}$, ezért:

$$\sigma^2 = I_M + i_H t_M \left(1 + \frac{t_M}{t_H} \right)$$

A standard deviáció a következő kifejezéssel jellemezhető:

$$s = \frac{\sigma}{I} 100(\%)$$

így:

$$\frac{\sigma^2}{I_M^2} = \frac{1}{I_M} + \frac{i_H t_M}{i_M^2 t_M^2} \left(1 + \frac{t_M}{t_H} \right) = \frac{1}{i_M t_M} \left\{ 1 + \frac{i_H}{i_M} \left(1 + \frac{t_M}{t_H} \right) \right\}$$

ahol $i_M = \frac{I_M}{t_M}$

egyszerűsítve:

$$s = \frac{1}{I_M^{\frac{1}{2}}} \left\{ 1 + \frac{i_H}{i_M} \left(1 + \frac{t_M}{t_H} \right) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

i_M a következő összefüggéssel is jellemezhető:

$$i_M = C_{Rn} k$$

ahol:

C_{Rn} - mért radon-koncentráció [Bq/m^3],

k - mérőeszközre jellemző állandó [imp/Bq], amely magában foglalja a sugárzás detektálásánál mutatkozó ingadozásokat, és a mérés elrendezés okozta rendszeres hibák ingadozásait [36, 108, 109].

$k = 0,8$ esetén a standard deviációs értékek adott paraméterek mellett a 6. táblázatban láthatók.

6. táblázat. Aktív működésű mérőeszközök várható standard deviációi különböző paraméterek mellett

C_{Rn} [Bq/m^3]	50	100	200	500	Háttér [imp/h]	t_H [óra]	t_M [óra]
S [%]	20	14,9	10,5	6,7	0	0,5	0,5
S [%]	22	15,2	10,7	6,7	2	0,5	0,5
S [%]	25	16,5	11,1	6,8	10	0,5	0,5
S [%]	29	17,9	11,6	7	20	0,5	0,5
S [%]	49	26,8	15,3	8	100	0,5	0,5
S [%]	15	10,9	7,5	4,7	0	0,5	1
S [%]	16	10,8	7,6	4,7	2	0,5	1
S [%]	19	12,1	8,0	4,8	10	0,5	1
S [%]	23	13,5	8,6	5	20	0,5	1
S [%]	41	21,8	12,1	6,1	100	0,5	1

Tehát annál pontosabb lesz a mérési eredmény, minél hosszabb ideig van lehetőség minél nagyobb aktivitást mérni minél kisebb háttér mellett. 0,5 órás mérésnél 0 imp/h háttér esetén 50 Bq/m^3 , a fenti eszköz jellemzők mellett 20 %-os, míg 1 órás mérésnél 0 imp/h háttér esetén 500 Bq/m^3 , 4,7 %-os standard deviációval mérhető. Az esetek legtöbbszörében a mért radon-koncentráció meghaladta a 100 Bq/m^3 -t egyórás mérési intervallum mellett, miközben a háttér nem haladta meg a 10 impulzust. Ezért az elektromos működésű mérőeszközök eredményeinek standard deviációja 10% körüli, vagy az alatti.

Integrális mérési módszer esetén a mérés a véletlenszerűen elhelyezkedő nyomok megszámolásán alapszik, a nyomszámra érvényes az az általános összefüggés, hogy n megszámolt nyom esetén a 10%-os standard deviáció eléréséhez legkevesebb 100 nyom megszámolása szükséges. Minden detektor esetén a nyomszámolást addig végeztem, hogy a standard deviáció ne haladja meg a 10%-ot.

A mérés során felhasznált TASTRAK CR-39 detektor radonzáró fóliában vásárolható meg, de a gyártás során előfordulhat szennyeződése. Ezért minden új vásárlás esetén ellenőriztem a detektorokat, az esetleges háttérnyomok meghatározása miatt.

2.2. Számítási módszerek

2.2.1. Egyensúlyi ekvivalens koncentráció számítása

A Pylon WLx műszer által jelzett munkaszint értékekből a következőképpen számolható az egyensúlyi ekvivalens koncentráció:

$$EEC = WL \cdot 3700$$

ahol :

EEC - egyensúlyi ekvivalens koncentráció [Bq/m³],

WL - munkaszint.

2.2.2. Egyensúlyi faktor számítása

$$F = EEC/C_{Rn}$$

ahol :

F - egyensúlyi faktor,

C_{Rn} - a mért radon-koncentráció [Bq/m³].

2.2.3. Radon és leányelemeitől származó sugárterhelés számítása

Az egyensúlyi faktor, a mért radon-koncentráció és a tartózkodási idő ismeretében a sugárterhelés (effektív dózis) számítását az alábbi összefüggéssel végeztem:

$$E = C_{Rn} \cdot F \cdot t \cdot D$$

Ahol:

E - éves effektív dózis [mSv/év],

t - tartózkodási idő [h/év],

D - munkahelyre vonatkozó ICRP dózis-konverziós tényező [7,9·10⁻⁹ Sv/Bqhm⁻³].

2.3. Vizsgálatok ismertetése munkaterületenként

A légtéri radon-koncentrációt, az összes ismertetett területen vizsgáltam. Rövidebb idejű folyamatos mérést az idegenforgalmi barlangok kivételével, nyomdetektoros mérést hat bakonyi túrabarlang kivételével mindenhol végeztem.

Víz radon mérés az Egri Török Fürdőben, egyensúlyi faktor vizsgálat az úrkúti mangánbányában, az ajkai Ármin szénbányában és a Tapolcai Tavas-barlangban történt.

2.3.1. Úrkúti mangánbánya

Az úrkúti mangánbányában végrehajtott radon-koncentráció mérések két (a bánya kiválasztott pontjain végzett radon mérés, illetve személyi dozimetriai) csoportba oszthatók.

A bánya kiválasztott pontjain végzett radon mérések

Mivel a bánya különböző területein eltérőek a munkafolyamatok, illetve a szellőztetés intenzitása, így helyenként lényegesen eltérő radon-koncentrációk alakulhatnak ki. A hatások mértékének meghatározása céljából a bánya különböző pontjain egy éven keresztül havi cserével nyomdetektorokkal végeztem integrális radon-koncentráció méréseket.

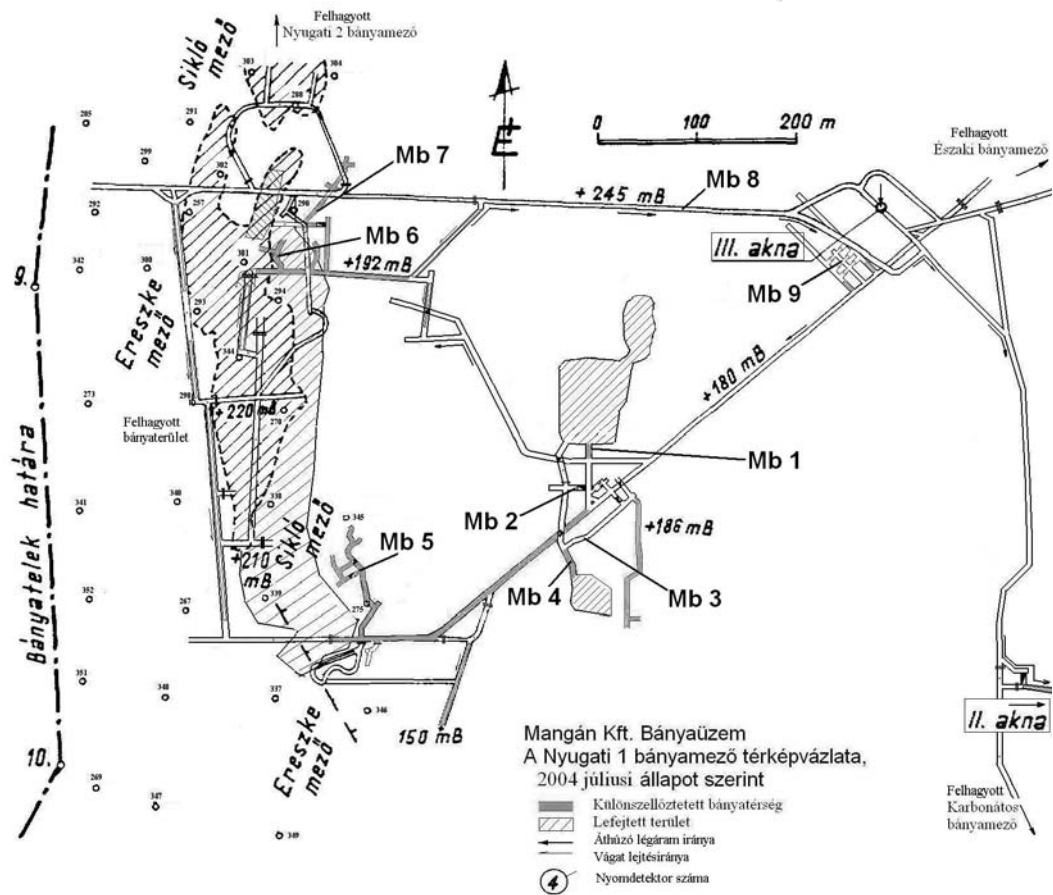
A mérési pontok kiválasztásánál figyelembe vettem, hogy a bányába a friss levegőt a III. számú aknán keresztül vezetik be, és miután végighaladt a főbb vágatokon a II. számú aknán keresztül vezetik ki.

7. táblázat. Mérési helyek megnevezése a mangánbányában

Detektorszám	Helyszín
Mb1	178 mBf szintű fejtési mező
Mb2	186 mBf szintű fejtési mező (rég. ferde gurító)
Mb3	186 mBf szintű fejtési mező (déli haránt vágat)
Mb4	186 mBf szintű fejtési mező (déli csapásvágat)
Mb5	180 mBf szintű fejtési mező
Mb6	192 mBf szintű fejtési mező
Mb7	203 mBf szintű fejtési mező
Mb8	241 mBf szintű főkihúzó légvágat
Mb9	175 mBf szintű szivattyúkamra (fő vízmentesítő telep)

Ennek megfelelően létezik egy fő szellőztető vágat, amin keresztül természetes úton is mozog a levegő, illetve külön szellőztetett mellék vágatok, ahol a légcseré csak ventilátorok segítségével valósul meg. Általában ide tartoznak az egyes fejtési frontok is. Ennek

megfelelően hét detektor a fejtési mezőkön (Mb1-7), és egy a főkihúzó légvágatban (Mb8), és egy a szivattyúkamrában (Mb9) lett kihelyezve. A detektorok kihelyezési pontjait az 5. ábrán, helyek megnevezéseit, pedig a 7. táblázatban mutatom be.



5. ábra. Mérési pontok a mangánbányában

A fő szellőztető vágatban lévő detektorok: Mb1, Mb8 Mb9(Dmb1, Dmb2),.

Különszellőztetett vágatban lévő detektorok: Mb2, Mb3(Dmb5), Mb4, Mb5, Mb6(Dmb3), Mb7(Dmb4). Zárójelben az ott dolgozók detektor száma van feltüntetve.

Az egyműszakos munkavégzés miatt a szellőztető rendszert a munkaidő lejártával leállítják. hogy lássam a napi ingadozást néhány ponton rövidebb idejű folyamatos radon mérést is végeztem.

Személyi dozimetriai célú radon mérések

Mivel a bányában csak egy műszakban 6-14 óra közt folyik a munka, kivéve a szivattyúkezelőknél, akik 21-7 óra közt dolgoznak, nem csak a bányában kialakuló átlagos radon-koncentrációt vizsgáltam, hanem konkrétan a bányában tartózkodás ideje alatti értéket is. Ez utóbbi adat ugyanis sokkal pontosabban utal adott dolgozók radontól származó sugárterhelésére. Ezért szintén havi cserével, öt fővel személyi doziméterként viseltettem a nyomdetektorokat, akik közül kettő szivattyúkezelő (Dmb1, Dmb2) három, pedig csapatvezető vājár volt (Dmb3, Dmb4 Dmb5). A munkavégzők által viselt nyomdetektorok számozása a 8. táblázatban látható.

8. táblázat. Munkavégzők által viselt nyomdetektorok számozása

Detektorszám	Munkavégző megnevezése
Dmb1	Szivattyúkezelő 1
Dmb2	Szivattyúkezelő 2
Dmb3	2-es csapat csapatvezető vājár
Dmb4	3-as csapat csapatvezető vājár
Dmb5	5-ös csapat csapatvezető vājár

A különböző csapatok különböző fejtési területeken dolgoztak, eltérő minőségű ércet fejtve le. Munka közben a csapat tagjai együtt mozognak, így elegendő volt a három főből álló csapat vezetőjénél egy detektor elhelyezése.

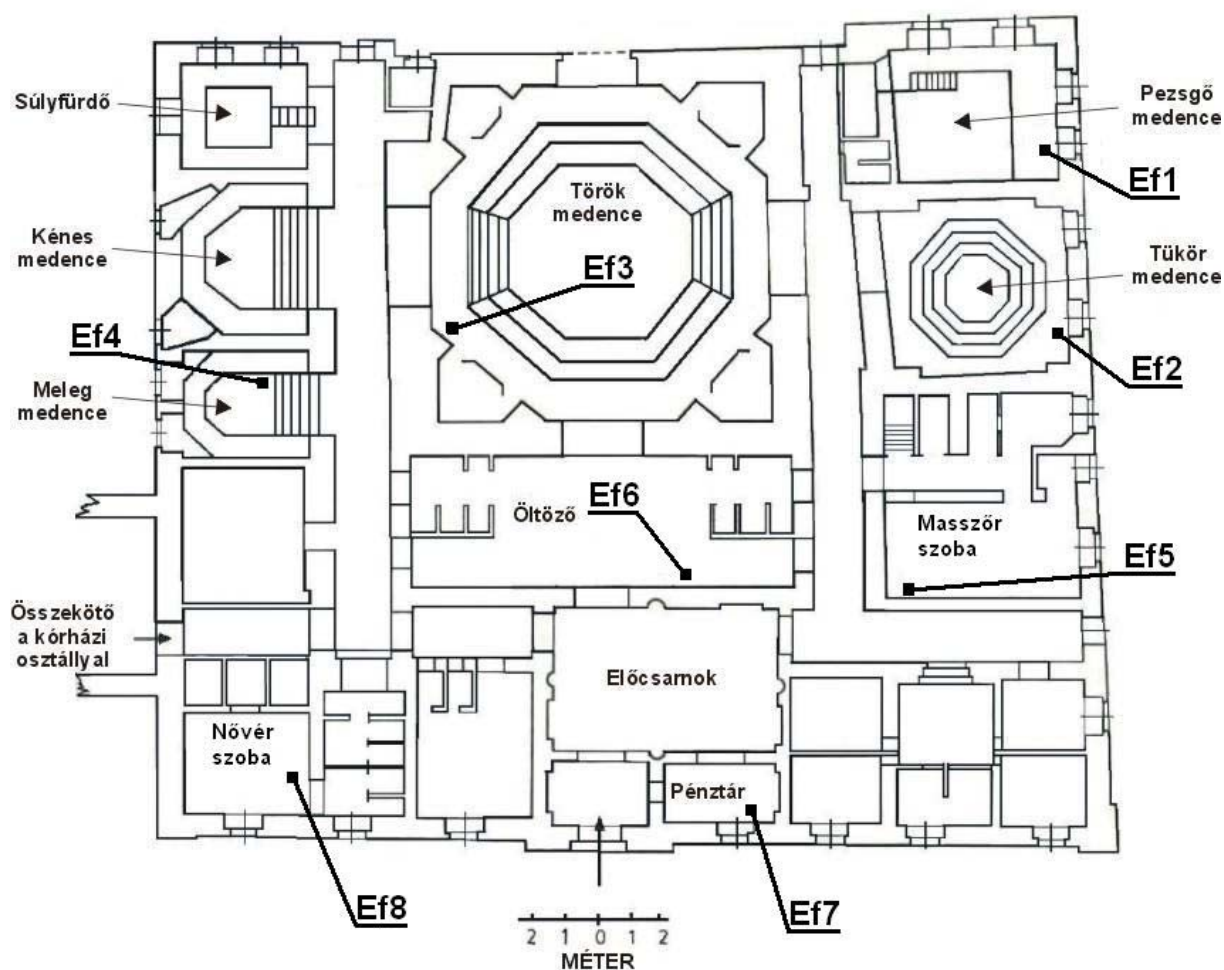
2.3.2. Ajkai Ármin szénbánya

A ma már nem üzemelő Ármin szénbányában folyamatos és mintavételes radon méréseket végeztem. A bányabezárás közelsége és egyéb befolyásoló tényezők miatt hosszabb és átfogó vizsgálatra lehetőségem nem volt.

Ebben a bányában három műszakban folyt a munkavégzés, így a szellőztető ventilátorok éjjel-nappal üzemeltek.

2.3.4. Egri Török Fürdő

Munkám során havi cserével négy helyen fél, másik négy helyen, pedig egy éven át nyomdetektorokkal integrális méréseket végeztem. A detektorokat egyrészt a fürdőben (Ef1-4), más részt a kapcsolódó helységekben (masször szoba Ef5, öltöző Ef6, pénztár Ef7, nővérszoba Ef8) helyeztem el (6. ábra). A fürdőben munkaidőben egy szellőztető rendszer üzemelt, a páratartalom csökkentése miatt.



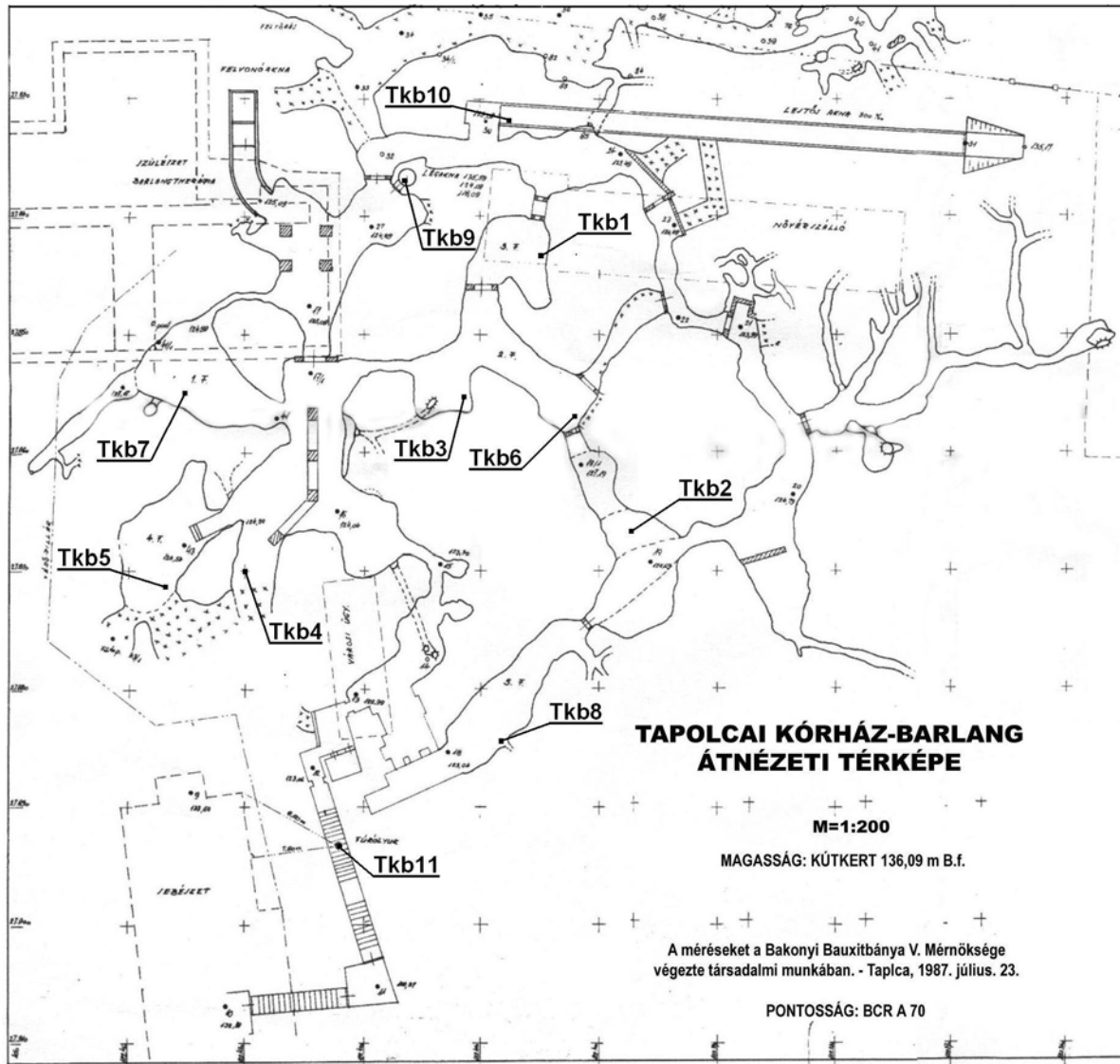
6. ábra. Az Egri Török Fürdő helységeinek elhelyezkedése, és a mérési pontok

A nyomdetektoros mérések mellett a munkaidő alatti radon-koncentráció meghatározása céljából néhány napig folyamatos radon-koncentráció méréseket is végeztem. Emellett a fürdőben legtöbb ideig tartózkodó két dolgozó esetén nyomdetektorokkal mértem a munkaidő alatti átlagos radon-koncentrációt, havi bontásban. Munkaidő kívül a személyi detektorokat itt is ellenőrzötten alacsony radon-koncentrációjú helyen tartattam. A radon forrásának meghatározása céljából mintavételes módszerrel több alkalommal vizsgáltam a fürdő medencék (illetve a kapcsolódó uszoda, források) vizének radon-koncentrációját. Három medencénél vizsgáltam a feltörő gázok radon-koncentrációját.

2.3.3. Tapolcai Kórház-barlang

Munkám során egy éven át 11 mérési ponton nyomdetektoros, illetve augusztus hónapban néhány napon keresztül folyamatos méréseket végeztem.

A mérési pontok a barlangterápiás kezeléseknél használt különböző termekben (Tkb1-8), illetve a szellőző pontok közelében választottam ki (Tkb9-11), mint az a 7. ábrán látható.



7. ábra. Nyomdetektoros mérések helyei a Tapolcai Kórház-barlangban

Ez a barlang munkaterületként tekintve sokkal egyszerűbb, mint egy bánya, hiszen egyetlen szintből áll, ahol a betegek kezelése, vagyis a munkavégzés is folyik, aránylag kis területen. Ami viszont még lényeges, hogy nincs mesterséges szellőztető rendszer, mivel az befolyásolná a levegő természetes, gyógyító paramétereit.

2.3.5. Idegenforgalmi barlangok

Hat különböző idegenforgalmi barlangban végeztem nyomdetektoros vizsgálatokat, havi bontásban, egy éven keresztül. Minden esetben minimum 1 detektor került kihelyezésre a barlangban, nagyobb barlang esetében kettő. Ezzel egy időben mértem a túravezetők munkaideje alatti átlagos radon-koncentrációt, akik barlangban való tartózkodásukról naplót vezettek. Munkaidőn kívül a detektorokat itt is ellenőrzötten alacsony radon-koncentrációjú helyen kellett tartani. A túravezetők barlangi munkájuk során rögzített útvonalon haladtak végig, nagyjából mindig ugyanannyi idő alatt.

A vizsgált barlangok túravezető létszáma, és azok detektorainak jele a 9. táblázatban láthatók. A Szent István-, és Anna-barlangot együtt tárgyalom, mivel a két barlang közelsége miatt azonos túravezetők dolgoznak mindkét helyen.

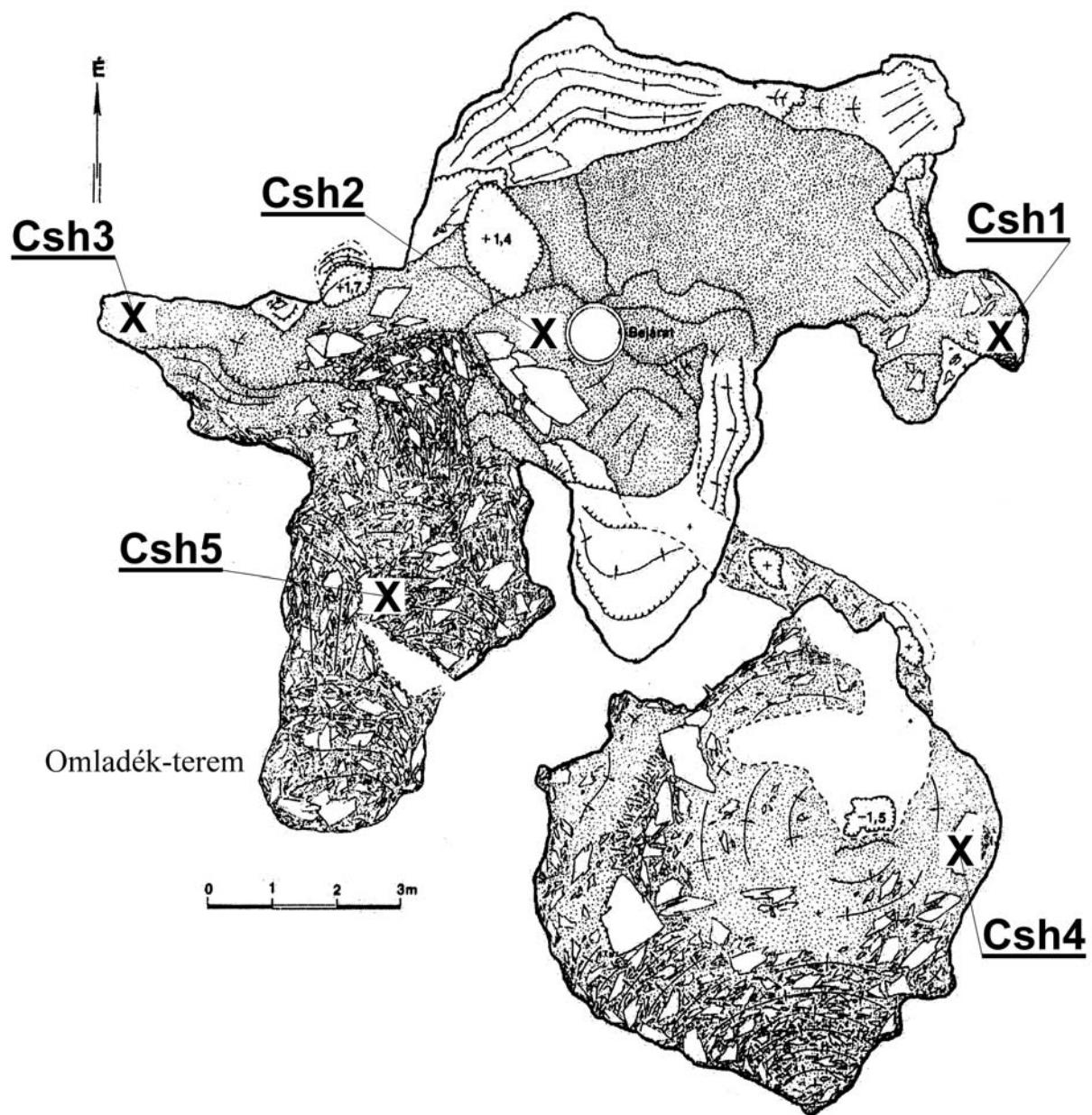
9. táblázat. A vizsgált barlangok túravezetőinek és detektorainak száma

Vizsgált idegenforgalmi barlang	Vizsgált túravezetők száma	Detektorok jele
Abaligeti-barlang	7	Dib1-7
Pálvölgyi-barlang	2	Dib8-9
Szemlőhegyi-barlang	4	Dib10-13
Szent István-, Anna-barlang	5	Dib14-18
Baradla-barlang	8	Dib19-26

2.3.6. Bakonyi-barlangok

Tájékoztató jellegű radon vizsgálatokat végeztem folyamatos működésű eszközökkel mind a hét bakonyi túra barlangban.

A Csatár-hegyi-barlangban folyamatos mérések mellett már lehetőségem nyílt nyolc hónapon keresztül, öt mérési ponton nyomdetektoros mérésekre is. A mérési pontok a 8. ábrán láthatók.



8. ábra. Mérési pontok a Csátár-hegyi-barlangban

2.4. Mérési eredmények és következtetések

Mind a nemzetközi ajánlások, mind az európai országok legtöbbje és a hazai szabályozás is a cselekvési szintet éves átlagra vonatkoztatják, tehát elvileg egy teljes év vizsgálatának eredményét kellene, hogy jelentse. Ezzel szemben a nemzetközi gyakorlatban több országban is előfordul, hogy bizonyos időtartomány (általában 1-3 hónap) vizsgálatának eredménye alapján döntenek, további, akár egészéves vizsgálatokról, vagy a szükséges beavatkozásról.

Abból kiindulva, hogy egy egész évet (vagy akár 3-6 hónapot) végig kell mérni, leginkább integrális mérési módszer jöhet számításba, mivel folyamatos mérőeszköz alkalmazása meglehetősen költséges mérési módszer, bár az eredményei alapján óránkénti változások is nyomon követhetővé válnak.

Adott munkahelyeken az egész éven át tartó nyomdetektoros mérések eredményeit a következő tényezők szerint vizsgálom:

- mérés időtartama,
- mérési pontok helye.

2.4.1. Mérési idő befolyásoló hatása az éves átlag meghatározása során

A havi cserével egy évig tartó nyomdetektoros mérések során a munkahelyeket igyekeztem úgy megválasztani hogy minél nagyobb, szélesebb területet öleljen fel. Ezek után összevetettem a különböző időtartamú mérések eredményeit az egész év átlagos értékéhez viszonyítva. A méréseim során azt vizsgáltam, hogy az 1, 3 és 6 hónap nyomdetektoros mérések eredményeiből következtetett éves átlag meghatározása során mekkora lehet az eltérés. Az átlag megfogalmazás alatt minden esetben a számtani átlagot értem.

Úrkúti mangánbánya

A nyomdetektoros mérések eredményeit részletesen a Függelék 2.1.-ben mutatom be.

A bányában mért értékek összefoglalását a 10. táblázatban tüntettem fel. Az egyes mérési pontokra vonatkozóan kigyűjtöttem az 1-3-6 hónapos mérések legnagyobb, illetve legkisebb értékeit, melyek a mérési pontoktól függően eltérő hónapokra is eshettek.

10. táblázat. Különböző pontokon mért radon-koncentráció 1-3-6 és 12 havi átlag értékei a mangánbányában

Mérési pont	Átlagos radon-koncentráció [Bq/m ³]						
	1 hónap minimum maximum		3 hónap minimum maximum		6 hónap minimum maximum		12 hónap
Mb1	147	3484	330	2251	303	1633	968
Mb2	329	2168	700	1317	709	1068	794
Mb3	263	1586	339	1008	441	756	575
Mb4	355	1749	564	1238	941	1027	984
Mb5	231	2137	571	1665	721	1364	997
Mb6	357	1140	471	935	597	913	718
Mb7	368	2339	504	1532	652	1294	970
Mb8	229	2017	424	1373	532	1027	756
Mb9	118	1427	427	1030	285	901	593

A különböző időtartamú mérések eredményeit többféleképpen elemeztem. Meghatároztam az összes mérési pontnál a legnagyobb és legkisebb átlagos értékek arányát a mérés időtartamának függvényében. Majd ugyanezen legkisebb és legnagyobb átlagos értékeket az éves átlagértékhez viszonyítottam a mérés időtartamának függvényében (11. táblázat).

11. táblázat. A mérési pontok legnagyobb és legkisebb értékeinek aránya egymáshoz, és az éves átlaghoz képest a mérési idő függvényében a mangánbányában

	Mérési idő		
	1 hónap	3 hónap	6 hónap
Legnagyobb ill. legkisebb értékek aránya	23,7-3,2	6,8-1,9	5,4-1,1
Legnagyobb ill. legkisebb értékek éves átlaghoz viszonyított aránya	6,6-0,6	2,9-0,9	3,2-1,0

Látható, hogy 1 hónapos mérés esetén, több mint 20-szoros eltérés is előfordulhat az értékek között, a vizsgált hónaptól függően. Még a fél éves mérések eredményei között is több mint ötszörös lehet az eltérés. Ha az éves átlaghoz történik a viszonyítás, már kisebb de még mindig jelentős eltérések figyelhetők meg. Egy hónap esetén több mint hatszoros, de még fél év esetén is háromszoros az eltérés. Ezek a jelentős eltérések a bányában kialakuló természetes légmozgásnak tulajdonítható, amit a bányabeli és a felszíni levegő közötti hőmérséklet és nyomáskülönbségének köszönhetően alakul ki (kéményhatás). Ennek hatására a radon-koncentráció az évszakoknak megfelelően változik a bányában (nyáron magas, télen alacsony), ami a természetes légmozgás által érintett mérési pontokon (Mb1, Mb8, Mb9 Függelék 2.1.) jól nyomon is követhető.

A mangánbánya esetében az éves átlag rövidebb idejű mérésekből nem határozható meg.

Egri Török Fürdő

A nyomdetektoros mérések eredményeit részletesen a Függelék 4.1.-ben látható.

Itt négy ponton végeztem egy éves méréseket, ezek összefoglalását a 12. táblázatban mutatom be.

12. táblázat. Különböző pontokon mért radon-koncentráció 1-3-6 és 12 havi átlag értékei az Egri Török Fürdőben

Mérési pont	Átlagos radon-koncentráció [Bq/m ³]						
	1 hónap minimum maximum		3 hónap minimum maximum		6 hónap minimum maximum		12 hónap
Ef1	818	2040	818	1958	1294	1729	1512
Ef2	339	928	403	638	495	610	553
Ef3	605	934	605	825	709	773	741
Ef5	163	662	238	501	294	401	348

A különböző időtartamú mérések eredményeit itt is hasonlóan elemeztem. Azaz meghatároztam az összes mérési pontnál a legnagyobb és legkisebb átlagos értékek arányát a mérés időtartamának függvényében. Majd ugyanezen legkisebb és legnagyobb átlagos értékeket az éves átlagértékhez viszonyítottam a mérés időtartamának függvényében (13. táblázat).

13. táblázat. A mérési pontok legnagyobb és legkisebb értékeinek aránya egymáshoz, és az éves átlaghoz képest a mérési idő függvényében az Egri Török Fürdőben

	Mérési idő		
	1 hónap	3 hónap	6 hónap
Legnagyobb ill. legkisebb értékek aránya	4,1-0,7	2,4-0,7	1,3-0,9
Legnagyobb ill. legkisebb értékek éves átlaghoz viszonyított aránya	2,1-0,8	1,8-0,9	1,2-0,9

A Török Fürdő esetében a radon-koncentrációját nem befolyásolják külső tényezők, emiatt a fentebbi munkahelyhez viszonyítva kisebb mértékű eltéréseket figyelhetünk meg. Ennek ellenére az 1 hónapos mérések eredményei még mindig igen nagy eltérést mutatnak (4,1), de a fél éves mérések már elfogadható eredményeket biztosítanak.

Az egyes mérési pontok eredményeit viszonyítva az éves átlaghoz egy hónap esetén több mint 2-szeres, viszont fél év esetén már a legrosszabb esetben is csak 1,2-szeres az eltérés. Az Egri

Török Fürdő esetén hat havi mérés eredményeiből már megbízható mértékben becsülhető az éves átlag.

Tapolcai Kórház-barlang

A nyomdetektoros mérések eredményei részletesen a Függelék 5.1.-ben láthatók.

A kezelésre szolgáló nyolc helyiségben, illetve a légvágatokhoz közeli terekben mért értékek összefoglalását a 14. táblázatban mutatom be.

14. táblázat. Különböző pontokon mért radon-koncentráció 1-3-6 és 12 havi átlag értékei a Tapolcai Kórház-barlangban

Mérési pont	Átlagos radon-koncentráció [Bq/m ³]						
	1 hónap minimum maximum		3 hónap minimum maximum		6 hónap minimum maximum		12 hónap
Tkb1	349	10701	1944	10126	1777	6982	4359
Tkb2	693	15271	1118	13249	1751	8460	5100
Tkb3	929	17866	1505	14108	1918	9219	5555
Tkb4	529	16657	1001	10091	1765	7093	4429
Tkb5	714	14974	1357	12879	1821	8805	5313
Tkb6	375	20473	888	15379	1515	9738	5626
Tkb7	200	15354	813	12492	1086	7900	4493
Tkb8	211	14864	1087	12852	1538	8195	4866
Tkb9	501	4531	1130	3503	1202	2882	2005
Tkb10	354	9567	478	7211	620	4118	2369
Tkb11	549	5510	662	4182	925	3114	2019

A különböző időtartamú mérések eredményeit az előzőekhez hasonlóan elemeztem. Az eredményeket a 15. táblázatban tüntettem fel.

15. táblázat. A mérési pontok legnagyobb és legkisebb értékeinek aránya egymáshoz, és az éves átlaghoz képest a mérési idő függvényében a Tapolcai Kórház-barlangban

	Mérési idő		
	1 hónap	3 hónap	6 hónap
Legnagyobb ill. legkisebb értékek aránya	76,8-9,07	17,3-3,1	7,2-2,4
Legnagyobb ill. legkisebb értékek éves átlaghoz viszonyított aránya	23,1-0,4	6,3-0,6	4,1-0,7

Látható, hogy 1 hónapos mérésnél rendkívül nagy több mint 70-szeres eltérés adódhat, még a legkisebb eltérés is 9-szeres.

Az egyes mérési pontok eredményeit viszonyítva az éves átlaghoz egy hónap esetén akár több mint 20-szoros, de még fél év esetén is 4-szeres lehet az eltérés. A nagy arányú eltérés a barlang hegylábi jellegéből következik, ez a radon-koncentráció nagy mértékű változásaiból is látható (Függelék 5.2.)

A Tapolcai Kórház-barlang esetében az éves átlag meghatározása egy évnél rövidebb idejű mérésekből nem lehetséges.

Idegenforgalmi barlangok

Az idegenforgalmi barlangokban mért eredmények részletesen a Függelék 6.-ban láthatók. Az összefoglalást a 16. táblázatban mutatom be. A Baradla és az Abaligeti-barlangban két ponton történt a radon mérése, a többi barlang esetében csak egy ponton.

Az adatokat az előzőekben ismertetett módon elemezve a kapott értékeket a 17. táblázatban tüntettem fel.

16. táblázat. Különböző pontokon mért radon-koncentráció 1-3-6 és 12 havi átlag értékei
idegenforgalmi barlangokban

Mérési pont	Átlagos radon-koncentráció [Bq/m³]						
	1 hónap minimum maximum		3 hónap minimum maximum		6 hónap minimum maximum		12 hónap
Baradla-barlang Hangverseny terem	316	3051	658	2291	837	1704	1270
Baradla-barlang Kafka terem	986	4568	1453	3976	1651	2735	2193
Szt. István-barlang, Bástya	128	1600	148	1290	312	1174	708
Anna-barlang, Paradicsom	214	1369	245	827	406	676	541
Szemlőhegyi-barlang Hosszú-folyosó	3697	7520	4093	6618	4595	6373	5484
Pálvölgyi-barlang, Lakatos	141	4434	191	3809	490	3113	1801
Abaligeti-barlang, Pizzai-torony	143	9896	188	7983	642	4736	2689
Abaligeti-barlang, Szifon	86	5312	134	3127	510	1996	1253

17. táblázat. A mérési pontok legnagyobb és legkisebb értékeinek aránya egymáshoz, és az éves átlaghoz képest a mérési idő függvényében idegenforgalmi barlangokban

	Mérési idő		
	1 hónap	3 hónap	6 hónap
Legnagyobb ill. legkisebb értékek aránya	69,2-2,0	42,5-1,6	7,4-1,4
Legnagyobb ill. legkisebb értékek éves átlaghoz viszonyított aránya	18,8-0,7	14,3-0,8	4,2-0,8

Látható, hogy 1 hónapos mérésnél rendkívül nagy eltérés adódhat, akár 69-szeres, még a háromhavi mérés is 42-szeres különbséget jelent. A fél éves méréseknél is a legkisebb és legnagyobb érték között 7,4-szeres az eltérés, így itt még fél éves mérés is rendkívül nagy hibát eredményez.

Barlangtól függően az éves átlaghoz viszonyítva is jelentősek az eltérések. 1 hónap esetén legrosszabb esetben majdnem 20-szoros, míg fél év esetén is több mint négyszeres. Mivel több barlang eredményét tárgyalom együtt, a legkisebb arányú eltérések különböző barlangok eredményeit mutatják. Így a Szemlőhegyi és Anna-barlang esetében látható, hogy a hat havi mérések eredményei már csak 20%-os eltérés mutatnak az éves átlaghoz képest, ami barlangi körülmények között már elfogadhatónak tekinthető. A barlangok közötti eltérések az eltérő légmozgásoknak köszönhető (a Pálvölgyi-barlang mérési eredménye tipikus hegylábi, míg a Baradla-barlang Kafka termében mért eredmények tipikus inverz működésre utalnak (Függelék 6.2, 6.5)), ami befolyásolja a radon koncentrációját.

A mérési időtartam befolyásoló hatásának összegzése

A 18. táblázatban feltüntettem a különböző munkahelyeken az 1-3-6 havi nyomdetektoros mérések legnagyobb, illetve legkisebb értékeinek az éves átlaghoz való arányát.

Megállapítható, hogy a mérés időtartamának növelésével csökken az éves átlaghoz viszonyított eltérés mértéke. Egy és három hónapos mérések eredményei az éves átlaghoz viszonyítva egyik esetben sem voltak elfogadhatók (az eltérést maximum 20%-os különbségnél tartom elfogadhatónak). Hat havi vizsgálat esetén elfogadható az eltérés mértéke a vizsgált hét barlang esetében kettőnél, a Szemlőhegyi és az Anna-barlangnál, valamint az Egri Török Fürdőnél.

18. táblázat. Különböző munkahelyeken mért legnagyobb és legkisebb értékek éves átlagtól való eltéréseinek aránya a mérési idő függvényében

Vizsgálati helyszín	Mérési idő		
	1 hónap	3 hónap	6 hónap
Mangánbánya	2,4-0,5	1,7-0,6	1,4-0,8
Tapolcai Kórház-barlang	5,6-0,3	4,0-0,4	2,9-0,6
Egri Török Fürdő	2,1-0,8	1,8-0,9	1,2-0,9
Idegenforgalmi barlangok	18,8-0,7	14,3-0,8	4,2-0,8

A mangánbánya esetében ugyanez már elérheti a 40%-ot, ami túlságosan magas eltérés a megbízható éves becsléshez. Legnagyobb eltéréseket barlangi területek vizsgálata során tapasztaltam.

Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy gazdaságossági szempontból a rövidebb expozíciós idejű mérés ugyan előnyösebb lenne de a kilenc vizsgált területből hat esetében a nagyfokú nagyságrendi hiba miatt a mérési időtartamának lerövidítése nem ajánlott.

Földalatti területek esetében mindig tapasztalható természetes légcseré, ami befolyásolja radon-koncentráció éves átlagát, ezért ha a valós éves átlag meghatározása a cél, és nem csak tájékozódó jellegű méréseket szeretnénk végezni, akkor tényleg végig kell mérni egy egész évet. A fürdő esetében már hat havi mérés is megbízható eredményt adna, de mivel más fürdőben nem végeztem ilyen jellegű méréseket, ezen a területen további vizsgálatokat javaslok. Ennek legolcsóbb és legegyszerűbb módszere a havi cserével végrehajtott nyomdetektoros mérés.

2.4.2. Mérési helyek befolyásoló hatása az éves átlag meghatározása során

Úrkúti mangánbánya

Az egyes pontokon mért éves átlagos radon-koncentráció értékeket a 19. táblázatban tüntettem fel. A mangánbánya esetében, ami egy igen nagy kiterjedésű, többszintes munkaterület a 9 mérési pont 817 Bq/m^3 éves átlagot eredményezett. Ha az egyes pontok eredményeit figyeljük, úgy a legkisebb 593, a legnagyobb, pedig 997 Bq/m^3 –nek adódott (1,7-szeres eltérés). A mennyiben csak a legkisebb eredményt adó mérési ponton hajtottam volna végre a mérést, úgy akár 0,7-szer kisebb értéket mértem volna a 9 mérési pont átlagához képest. A 9-ből három mérési pont kiemelése esetén az éves átlag 912 Bq/m^3 , ami igaz, hogy nem éri el az 1000 Bq/m^3 t, de a különbség látható. Ezek alapján megállapítható, hogy a

mangánbányában minden olyan helyen célszerű mérni, ahol eltérő munkakörülmények lehetnek.

19. táblázat. Radon-koncentráció éves átlaga a mangánbánya különböző mérési pontjain

Mérési pont	Évi átlagos radon-koncentráció [Bq/m³]
Mb1	968
Mb2	794
Mb3	575
Mb4	984
Mb5	997
Mb6	718
Mb7	970
Mb8	756
Mb9	593
Éves átlag (teljes)	817
Éves átlag (Mb1-2-4-5-7-8)	912
Intervallum	593-997

Egri Török Fürdő

A Török Fürdő esetén mért éves és hathavi átlagokat a 20. táblázatban mutatom be.

Az éves és hathavi átlagos radon-koncentráció nagyon nagymértékben változik, a mérés helyétől függően (94-1512 Bq/m³). Az Ef1-4 mérési pontok a terápiás medencék mellett voltak, azonos légtérben (223-1512 Bq/m³). A többi terület már nyílászárókkal határolt (94-348 Bq/m³).

Egy mélyművelésű bányához, de még egy barlanghoz képest is sokkal kisebb területű munkahelyről van szó. Ehhez képest a radon koncentrációja igen széles tartományban változik, távolodva a terápiás medencéktől egyre kisebb. A legnagyobb érték a legkisebb 16-szorosa. Ez a radon forrásának egyenetlen eloszlására utal. Ez a terápiás vizek (Függelék 4.2., 4.3.), és a vizekkel együtt feltörő gázok (Függelék 4.4.) radon tartalmának köszönhető.

A 20. táblázatban látható a mérési pontok mellett lévő terápiás medencék vizének, illetve a feltörő gázok radon tartalma. Jelentős eltérés nem fedezhető fel (kivéve Ef4 esetében, ahol a forrás kiömlő csonkjának lezárása miatt melegített csapvízzel töltik fel a medencét, a betegek felmelegítése miatt) Ef1 esetében a légtéri radon-koncentráció többszöröse az Ef2 vagy Ef3-

nak. Ennek az a magyarázata, hogy a legintenzívebb gázfeltörés itt tapasztalható, ami miatt érthető ennek a terápiás résznek a „Pezsgő-medence” elnevezése is.

Ha azon mérési pontok eredményeit vesszük figyelembe, ahol egy teljes év adatai állnak rendelkezésemre, akkor közel kétszeres eltérést tapasztalhatunk, a hat havi adatokat beszámító átlaghoz képest. Jelen esetben bátran figyelembe vehetem a hat havi adatokat is, mivel fentebb már bizonyítást nyert, hogy ez a legrosszabb esetben 20%-os eltérést jelenthet az éves átlaghoz képest.

20. táblázat. Radon-koncentráció átlagai az Eri Török Fürdő légterében, víz és gázmintákban különböző mérési pontokon

Mérési pont	Évi/hat havi* átlagos légtéri radon- koncentráció [Bq/m ³]	Átlagos radon-koncentráció vízmintákban [Bq/dm ³]	Átlagos radon-koncentráció gázmintákban [kBq/m ³]
Ef1	1512 (818-2040)	96,3 (81,6-107,9)	214,2 (186,4-234,7)
Ef2	553 (339-928)	110,6 (87,7-134,6)	217,0 (191,7-242,3)
Ef3	741 (605-934)	104,1 (82,5-126,1)	248,0 (232,3-256,5)
Ef4	223* (117-337)	7,1 (7,1-7,2)	-
Ef5	348 (163-662)	-	-
Ef6	160* (131-194)	-	-
Ef7	164* (109-248)	-	-
Ef8	94* (54-148)	-	-
Teljes átlag	493 (94-1512)	-	-
Éves átlag (Etf1-2-3, Etf5)	826 (497-1512)	-	-

Tapolcai Kórház-barlang

A barlangban mért éves átlagos radon-koncentráció értékeket a 21. táblázatban tüntettem fel. Megállapítható, hogy a friss levegő beáramlásához közeli mérési pontokon mért értékek (Tkb9-11), jóval alacsonyabbak, mint a kezelőtermekben mértek. Ez a külső, radonban szegényebb levegővel való érintkezésre utal. Ez egyben jelzi azt is, hogy itt nem a barlangi klíma az uralkodó. A kezelő termekben mért értékek átlaga 4968 (4359-5626) Bq/m³, tehát a maximális érték a minimális értéknek 1,3-szorosa.

Látható, hogy egy zártnak tűnő barlangban, ahol az egyes termek légtere egymásba nyílik és mesterséges szellőztetés nincs, az éves átlagok viszonylag azonos eredményt adtak, a legnagyobb eltérés az átlagtól 13%, ami elfogadható pontosságot jelent. Figyelni kell azonban arra, hogy a mérési pont ne legyen a friss levegő beáramlását lehetővé tevő nyílás, vágat

közelében. Azt pontosan előre megmondani, hogy a „közelében” mit jelent nem lehet, ki kell mérni. Ilyen helyeken az eltérés több mint kétszeres is lehet az éves átlaghoz képest.

21. táblázat. Radon-koncentráció éves átlaga a Tapolcai Kórház-barlang különböző mérési pontjain

Mérési pont	Évi átlagos radon-koncentráció [Bq/m³]	Min-Max radon-koncentráció [Bq/m³]
Tkb1	4359	349-10701
Tkb2	5100	693-15271
Tkb3	5555	929-17866
Tkb4	4429	529-16657
Tkb5	4866	211-14864
Tkb6	5313	714-14974
Tkb7	5626	375-20473
Tkb8	4493	200-15354
Tkb9	2005	501-4531
Tkb10	2369	354-9567
Tkb11	2019	549-5510
Éves átlag	4195	2005-5626
Éves átlag (Tkb1-8)	4968	4429-5626

Idegenforgalmi barlangok

Az idegen forgalmi barlangok közül csak az Abaligeti-barlangban és a Baradla-barlangban helyeztem el 2-2 detektort. Az összes mért adatot a Függelék 6.1. és 6.5.-ben, összefoglalásukat, pedig a 22. táblázatban mutatom be.

22. táblázat. Radon-koncentráció éves átlaga az Abaligeti-barlangban és a Baradla-barlangban különböző mérési pontok esetén

	Évi átlagos radon-koncentráció [Bq/m³]	
	Abaligeti-barlang	Baradla-barlang
1. mérési pont	2689	1270
2. mérési pont	1253	2193
Éves átlag	1971	1732

Mint látható a radon helytől való függése itt is tapasztalható, befolyásolva az éves átlag értékét. Az Abaligeti-barlang esetében a két mérési pont értéke között 2,1-szeres eltérés tapasztalható, míg a Baradla esetében 1,7-szeres.

A mérési helyek befolyásoló hatásának összegzése

Mivel a magyar szabályozásban nincs előírás arra vonatkozóan, hogy hány mérési pont átlagából lehet az éves átlagot meghatározni, ez akár egyetlen ponton végzett mérés eredményéből is megtehető. Viszont az így nyert adatokat komoly fenntartásokkal kell kezelni, mivel többszörös mértékben eltérhet a több ponton végzett vizsgálat eredményeihez képest. Ezért a sugárvédelmi okokból történő vizsgálatok során törekedni kell az összes terület vizsgálatára, ahol a munkavégzők huzamosabb ideig tartózkodhatnak.

Munkahelyeken végzett radon-koncentráció éves átlagának vizsgálata során pontosan megadni a megfelelő eredményhez szükséges mérési pontok számát és azok helyét nem lehet. A munkahelyek területének eltérő mérete, illetve a radon forrásának különböző mértékű eloszlása miatt minden munkahelyet külön kell kezelni, a jellemző sajátosságok figyelembe vételével. Kiváló példa erre az Egri Török Fürdő, ahol aránylag kis területen igen széles tartományban változik a radon-koncentráció, illetve az úrkúti mangánbánya, ahol hatalmas területen igen szűk tartományú a változás.

El kell fogadni, hogy egy munkahely jellemző radon-koncentrációjának meghatározása nem egyszerű, gyorsan végrehajtható feladat, hanem hosszabb idejű, megtervezést igénylő munka. Ebben a munkában a megfelelő mérési pontok helyének kiválasztása alapvető befolyásoló hatással bír az éves átlagos radon-koncentráció meghatározása szempontjából.

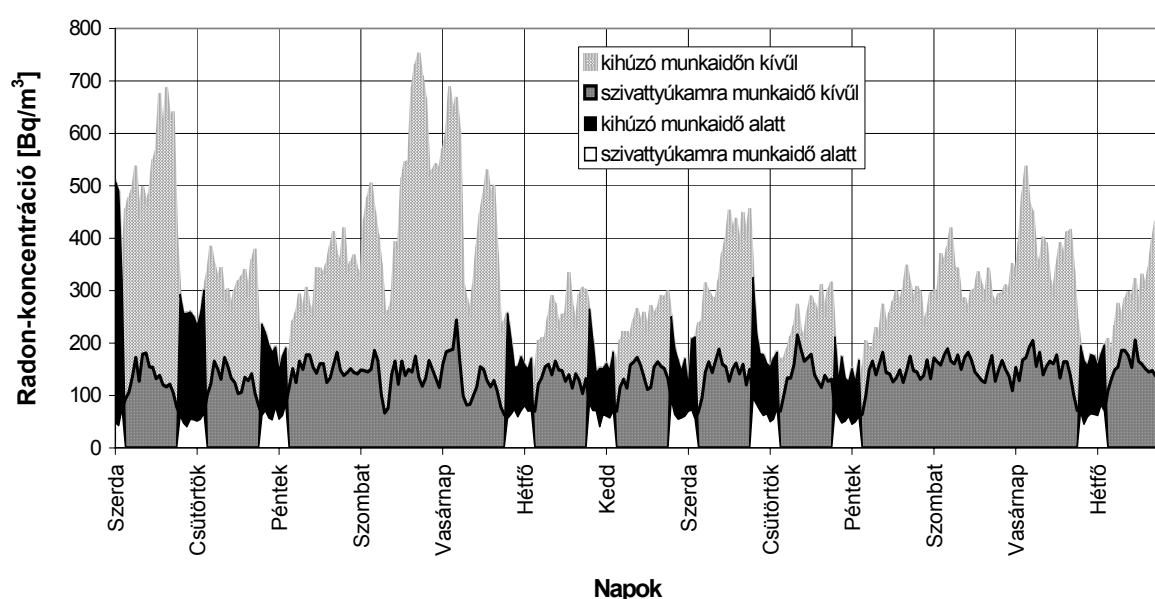
2.4.3. Munkahelyek mérési eredményeinek elemzése a munkaidőben végzett mérések alapján

Az eddigi eredményekből kiderült, hogy a munkahelytől függően, egész évre nézve a radon koncentrációja igen széles határok között váltakozhat, természetes hatásoknak köszönhetően. Ugyanakkor a munkahelyeken napszakonkénti váltakozások is megfigyelhetők, mesterséges illetve természetes hatások miatt.

Bányák és fürdők esetében a radon napi ingadozását mesterséges szellőztető rendszerek befolyásolják, amelyek működésük során jelentősen csökkentik a légtér radon-koncentrációját.

Úrkúti mangánbánya

Az úrkúti mangánbányában mivel ma már csak egy műszakban folyik a munkavégzés, a ventilátorok sem működnek folyamatosan, csak a munkaidőben. Ennek hatását a radon-koncentrációra a 9. ábrán láthatjuk. Munkanapokon, munkaidő alatt lényegesen alacsonyabb a radon koncentrációja, míg munkaidő után, illetve hétvégéken magasabb. Ingadozás a radon koncentrációjában ekkor is tapasztalható, a természetes szellőzésnek köszönhetően.



9. ábra. A radon-koncentráció változása a +175 mB szinti szivattyúkamrában és a +245 mB szinti főkihúzó légáramban, március hónapban

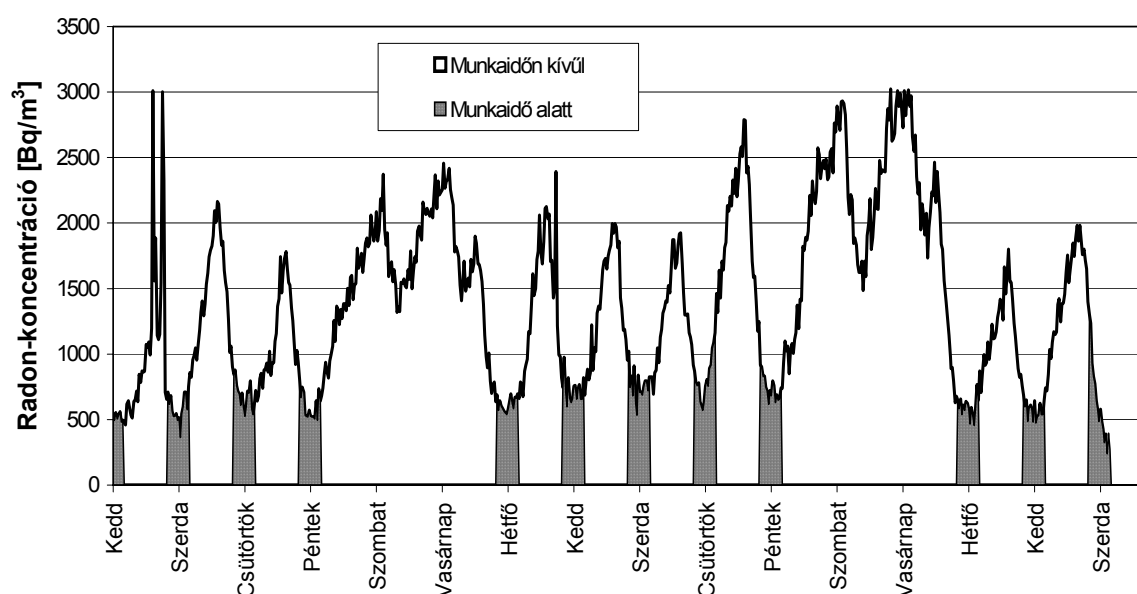
A szellőztető rendszer üzemeltetése nélkül magasabb radon-koncentráció lenne az uralkodó érték a bányában. Szellőztető rendszer üzemelése és az üzemelésén kívül fellépő radon-koncentrációk összevetését a 23. táblázatban tüntettem fel.

23. táblázat. Átlagos radon-koncentráció munkaidőben és azon kívül március hónapban a mangánbányában

Vizsgálat helye	Átlagos radon-koncentráció [Bq/m ³]					
	Munkanapokon			Hétvégén		
	6-14 óra	14-6 óra	Teljes átlag	6-14 óra	14-6 óra	Teljes átlag
Szivattyú kamra	63	141	104	149	144	146
Fő légkihúzó	204	312	258	399	400	400

Mivel mesterséges szellőztetés csak 6 és 14 óra között van, a szivattyúkamrában dolgozók esetén nem érvényesül a szellőztető rendszer kedvező hatása, mivel ők az éjszakai órákban dolgoznak, ennek ellenére detektoraik eredményei éves átlagban nem mutattak kiugró eltéréseket (Függelék 2.3.). A szivattyúkamrában több mint kétszer nagyobb a radon-koncentráció a ventilátor működése nélkül. Ugyanez a fő légkihúzóban kb. 1,5.

Még jelentősebb a változás a nyári hónapokban (10. ábra). Itt munkaidőben 500-700 Bq/m³, a szellőztető rendszer leállítását követően, pedig minden alkalommal 1700 Bq/m³ fölé nő a radon-koncentráció. A hétvégéken, pedig ugyanúgy látható a természetes légcseré hatása, ahol a minimális érték 1500, a maximális, pedig 3000 Bq/m³ körül van.



10. ábra. A radon-koncentráció napi változása a +192 mB osztószint áthúzó szellőztetésű szakaszán, augusztus hónapban

24. táblázat. Átlagos radon-koncentráció munkaidőben és azon kívül augusztus hónapban a mangánbányában

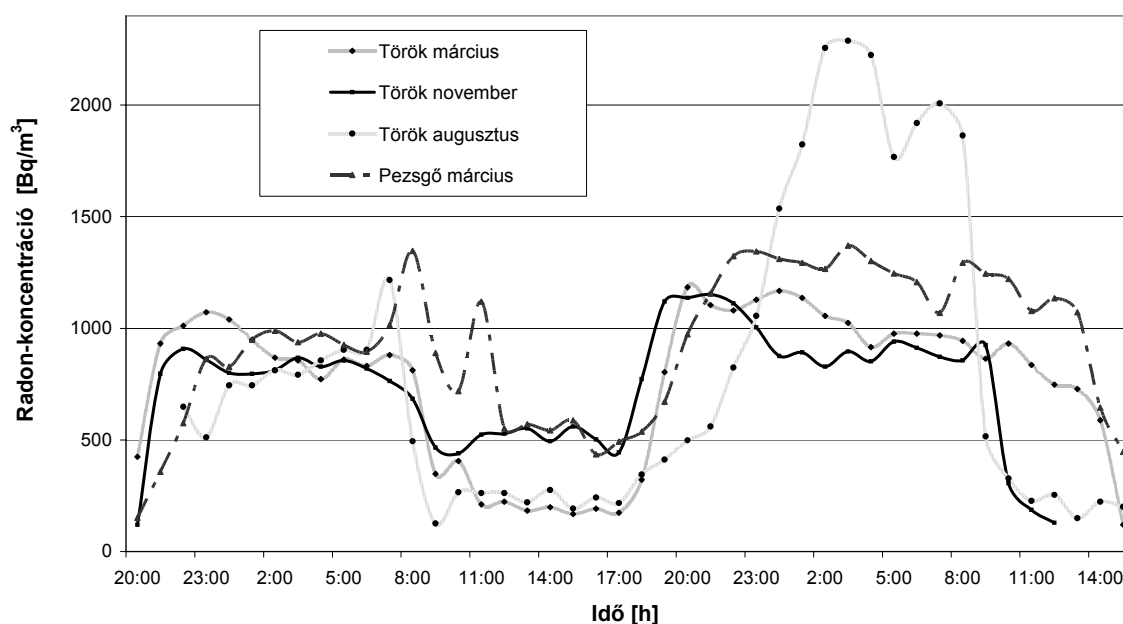
Vizsgálat helye	Átlagos radon-koncentráció [Bq/m ³]					
	Munkanapokon			Hétvégén		
	6-14 óra	14-6 óra	Teljes átlag	6-14 óra	14-6 óra	Teljes átlag
+192 mB osztószint	659	1296	1061	2437	1930	2097

A 24. táblázatban pontosabban látható, hogy nyáron, munkaidőn kívül kb. kétszer nagyobb a radon-koncentrációja, az átlag 1061 Bq/m^3 , de munkaidőben csak 659 Bq/m^3 ugyanakkor a téli eredményekhez viszonyítva nyáron akár háromszor nagyobb is lehet a munkaidőben mérhető radon-koncentráció. Ha a munkaidő átlagát a teljes átlaghoz viszonyítom, az utóbbi 2,4-szer nagyobb értéket jelent.

Egri Török Fürdő

Az Egri Török Fürdőben három alkalommal elvégzett 1,5-2 napos mérések (11. ábra) eredményein is jól nyomon követhető a szellőztető rendszer hatása.

A délután 18 óra körül a leállított szellőztetőrendszer miatt emelkedésnek indult a radon koncentrációja a fürdők légtérében, elérve egy 1000 Bq/m^3 körüli szintet, majd a reggeli órákban a munkakezdés miatt elindított szellőztető rendszernek köszönhetően csökkenése tapasztalható. A rendszer kézi vezérlése miatt leállítása és elindítása nem mindig pontosan azonos időben történik. Munkaidőben az átlagos radon-koncentráció $200\text{-}600 \text{ Bq/m}^3$ között mozgott. Augusztus hónapban a Török medencénél a radon-koncentráció az éjszakai órákban meghaladta a 2000 Bq/m^3 -t.



11. ábra A radon-koncentráció napi ingadozásai a Török, Pezsgő medencénél augusztus, november és március hónapokban

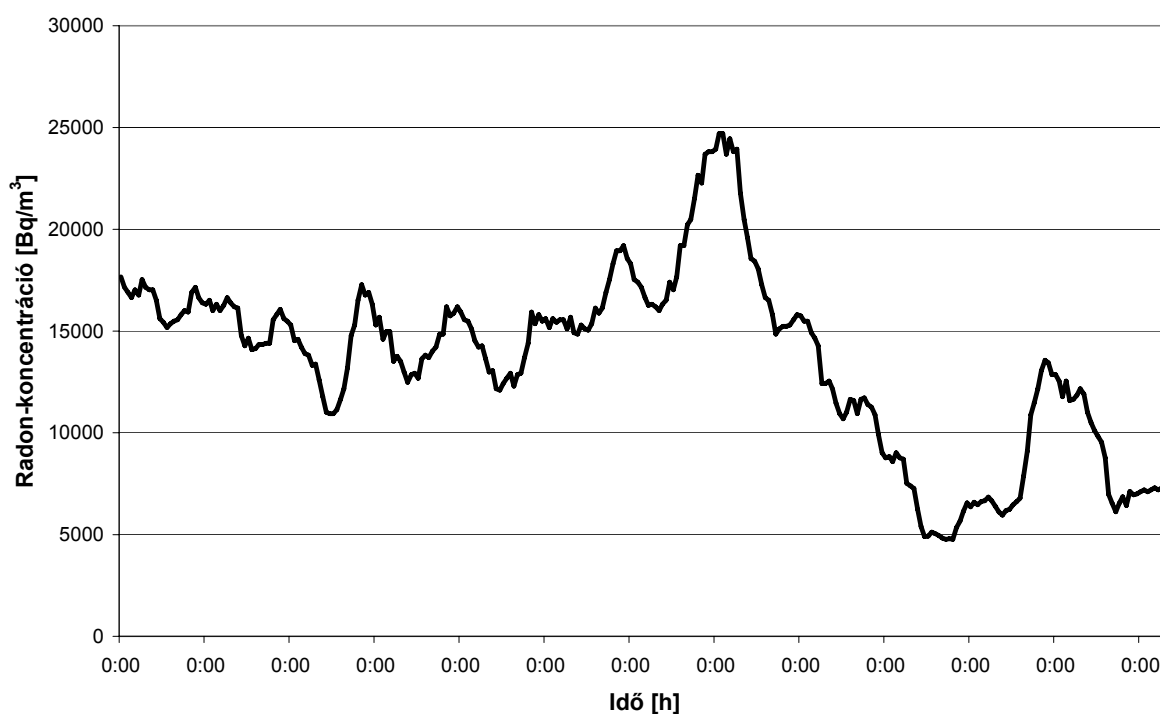
Fontos eredmény, hogy a szellőztető rendszer üzemeltetésének köszönhetően napközben, amikor is a munkavégzés történik és az emberek a fürdőben, tartózkodnak a radon koncentrációja három és félszer kisebb az éjszakai értékekhez képest, a teljes átlaghoz képest pedig közel kétszer kisebb (25. táblázat).

25. táblázat. Átlagos radon-koncentráció munkaidőben és azon kívül az Egri Török Fürdőben

Vizsgálat helye	Átlagos radon-koncentráció [Bq/m ³]		
	8-17 óra	17-8 óra	Teljes átlag
Egri Török Fürdő	281	972	627

Tapolcai Kórház-barlang

Barlangban is megfigyelhető napi, illetve napszaki váltakozás a radon-koncentrációjában (12. ábra) de ez azoknak a természetes tényezőknek köszönhető, amelyek légmozgást képesek előidézni a barlang járataiban, és nem esnek egybe a munkaidővel (26. táblázat).



12. ábra. Radon-koncentráció napi váltakozása a Tapolcai Kórház-barlangban augusztus hónapban

26. táblázat. Átlagos radon-koncentráció munkaidőben és azon kívül augusztusban a Tapolcai Kórház-barlangban

Vizsgálat helye	Átlagos radon-koncentráció [Bq/m ³]		
	8-12 óra	12-8 óra	Teljes átlag
Tapolcai Kórház-barlang	10904	11533	11219

Számos munkahelyen nyomdetektort viseltettem munkaidő alatt a munkavégzőkkel, így lehetőségem van egy év munkaidőre eső átlagát összevetni a teljes év átlagával.

A 27. táblázatban a munkahelyeken munkaidőben mért éves átlagos radon-koncentráció összehasonlítása látható a teljes év átlagához képest.

27. táblázat. Átlagos radon-koncentrációk munkaidőben különböző munkaterületeken

Mérés helye	Munkaidőben mért éves átlagos radon-koncentráció [Bq/m³]	A teljes évben mért éves átlagos radon-koncentráció [Bq/m³]
Mangánbánya	401 (5 személy)	817 (9 mérési pont)
Egri Török Fürdő	230 (2 személy)	493 (8 mérési pont)
Baradla-barlang	338 (8 személy)	1732 (2 mérési pont)
Abaligeti-barlang	258 (7 személy)	1971 (1 mérési pont)
Szemplőhegyi-barlang	659 (4 személy)	5484 (1 mérési pont)
Pálvölgyi-barlang	409 (2 személy)	1801 (1 mérési pont)
Szent István-, Anna barlang	159 (5 személy)	625 (2 mérési pont)

A mangánbánya és a fürdő esetében a munkaidőben mérhető éves átlagos radon-koncentráció megközelítőleg fele akkora, mint a teljes év átlaga, ami a szellőztető rendszerek munkaidő alatti üzemeltetésének köszönhető. Barlangok esetében viszont akár nyolcszoros is lehet ez az eltérés.

Munkaidőre vonatkozó radon-koncentrációt figyelembe véve a vizsgált munkaterületek feloszthatók folyamatosan illetve részlegesen használt területekre.

Bányák esetében a mélyművelésű munkákban résztvevő személyek folyamatosan a föld alatt tartózkodnak, csak a munkaidő leteltével jönnek újra a felszínre. A munkaidő átlagát az évszakok, és a szellőztető rendszer üzemelése határozza meg.

Ezzel szemben a csoportokat vezető barlangi túravezetők lenntartózkodása nem folyamatos, a látogatók számától (turisztikai szezontól) függően tág határok között változhat. A munkaidő átlagát az évszakok, és a munkavégző barlangban való tartózkodásának ideje határozza meg.

A gyógyfürdő munkatársainak terápiás térben való tartózkodása sem folyamatos, gyakori szünetekkel, vagy más a terápiás részekről távolabbi munkaterületen folytatott tevékenységgel tarkított. Itt a munkaidő átlagát, a mesterséges szellőztetés és a munkavégző terápiás térben való tartózkodásának ideje határozza meg.

Ezért a munkaidőre vonatkozó átlagot tovább lehet szűkíteni a magas radon-kockázatú területen való tartózkodás idejének átlagára. Az idegen forgalmi barlangok esetén, ahol jelentős távolság van a semleges és kockázatos terület között, könnyen megoldható lemeneteli napló vezetésével, de egy fürdő esetében, ahol néhány méter az elválasztó távolság, már nem illetve igen nehezen kivitelezhető.

Munkaidőben végzett mérések összegzése

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a munkaidő alatti radon-koncentráció általában alacsonyabb a teljes idő radon-koncentrációjához képest, ami a mesterséges szellőztetésnek, természetes környezeti hatásoknak és a munkavégzők magas radon-kockázatú területen való szakaszos tartózkodásának köszönhető.

Dózis becslés során emiatt nem elég a munkahelyre jellemző átlagos radon-koncentráció meghatározása, hanem a munkaidőben kialakuló radon-koncentrációt kell figyelembe venni.

Ennek meghatározására a legmegfelelőbb módszer a munkavégző által munkaidő alatt folyamatosan hordott havi ellenőrzésű nyomdetektor tekinthető. Alkalmazásakor két probléma merülhet fel. Az első a munkafegyelem, mivel ez a módszer mindennapi odafigyelést igényel a munkavégzőtől, ennek hiányában a mért eredmények helyessége megkérdőjelezhető. A másik fontos dolog, az alacsony radon-koncentrációjú, folyamatos radon mérés alatt tartott háttérterület kiválasztása, ahol munkaidő után a nyomdetektor elhelyezhető.

Amennyiben a munkavégzés során a radon kockázatos területen való tartózkodás nem folyamatos, illetve a terület fizikailag elhatárolható, a munkavégző kockázatos területen való tartózkodásának idejét is figyelembe kell venni.

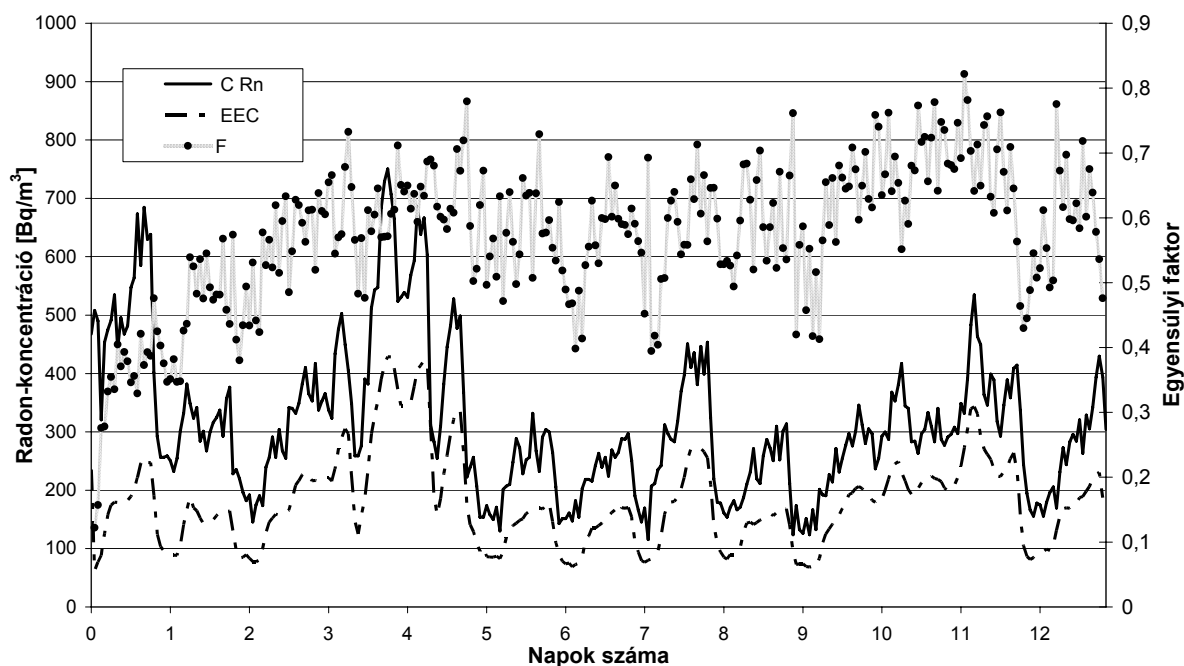
2.4.4. Egyensúlyi faktor vizsgálata

A radontól származó tényleges sugárterhelés becsléséhez elengedhetetlen fontosságú az egyensúlyi faktor ismerete. Bár az ajánlások a 0,4-es egyensúlyi faktor alkalmazását javasolják, néhány szacnikk alapján feltételezhető, hogy különösen a földalatti munkahelyeken (barlangok, bányák) az eltérő légcseré, illetve a speciális munkafolyamatok miatt ettől jelentősen eltérő értékek is adódhatnak. Ezért munkám során, különböző helyeken és időben a radon-koncentráció mellett mértem a munkaszintet is, és meghatároztam a tényleges egyensúlyi faktort, illetve ezek változását az időben.

Úrkúti mangánbánya

Március hónapban közel 2 héten át vizsgáltam a radon és leánytermékeinek koncentráció változásait.

A mérési eredmények, illetve az ebből számolt egyensúlyi faktor változása a 13. ábrán láthatók. A közel kéthetes mérések szerint munkaidőben az átlagos egyensúlyi faktor 0,57.

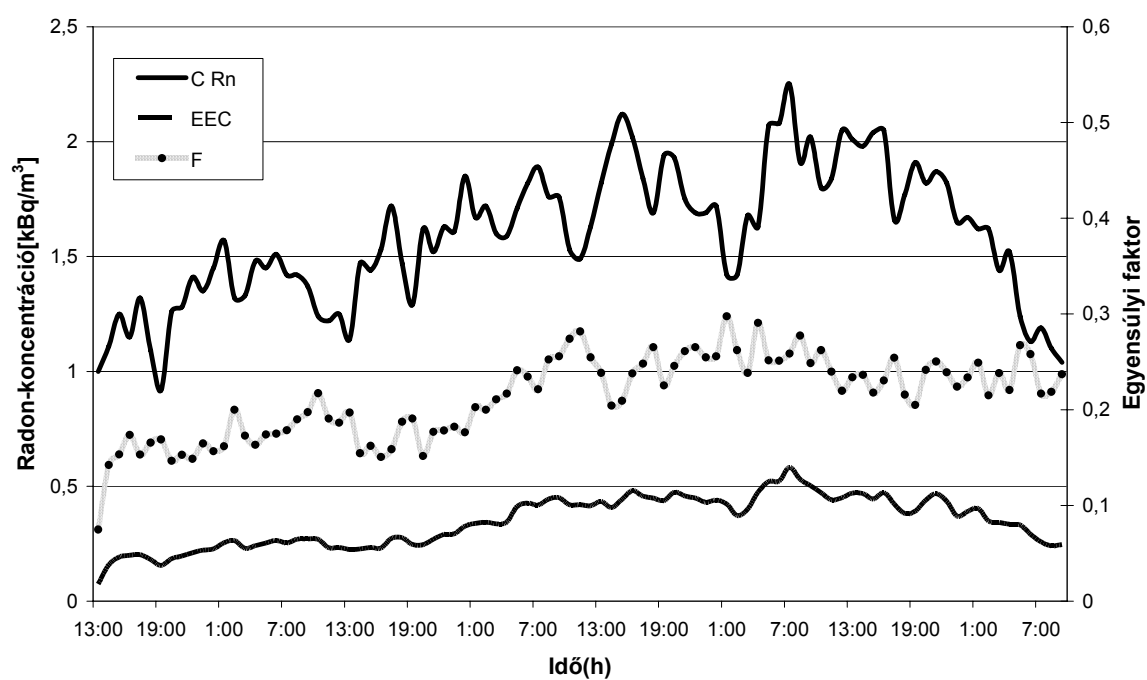


13. ábra. Egyensúlyi faktor és az egyensúlyi ekvivalens koncentráció a mangánbánya kihúzó légáramában március hónapban

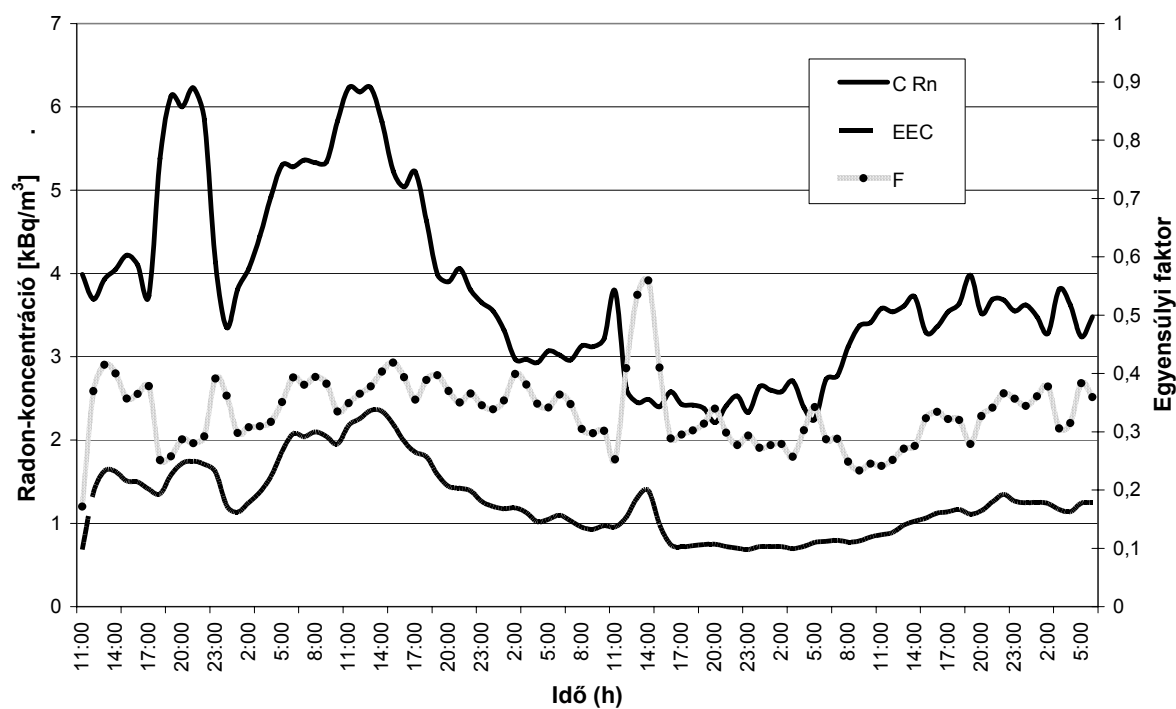
Ezen eredményeket a mérés aránylag rövid időtartama, és egyetlen munkapontra való koncentrálódása miatt fenntartásokkal kell kezelni, mindenesetre a figyelmet felhívja arra, hogy bányabeli területeken az egyensúlyi faktor vizsgálata a munkavégzők megbízható sugárterhelésének becsléséhez elengedhetetlen, mivel így a tényleges sugárterhelés az irodalmi értékekkel számoltnál közel 50%-al magasabb.

Ajkai Ármin szénbánya

A szénbányában februárban és októberben végeztem az egyensúlyi faktor meghatározásával kapcsolatos méréseket. Mindkét esetben a fejtési front közelében helyeztem el a detektorokat. A mérések eredményei a 14. és a 15. ábrán láthatók. Az egyensúlyi faktor alacsonyabb értékeit láthatjuk a szénbányában, átlagban 0,21 (14. ábra) és 0,33 (15. ábra) körüli értékkel.



14. ábra. Egyensúlyi faktor változása az Ármin bánya fejtési területén, október hónapban

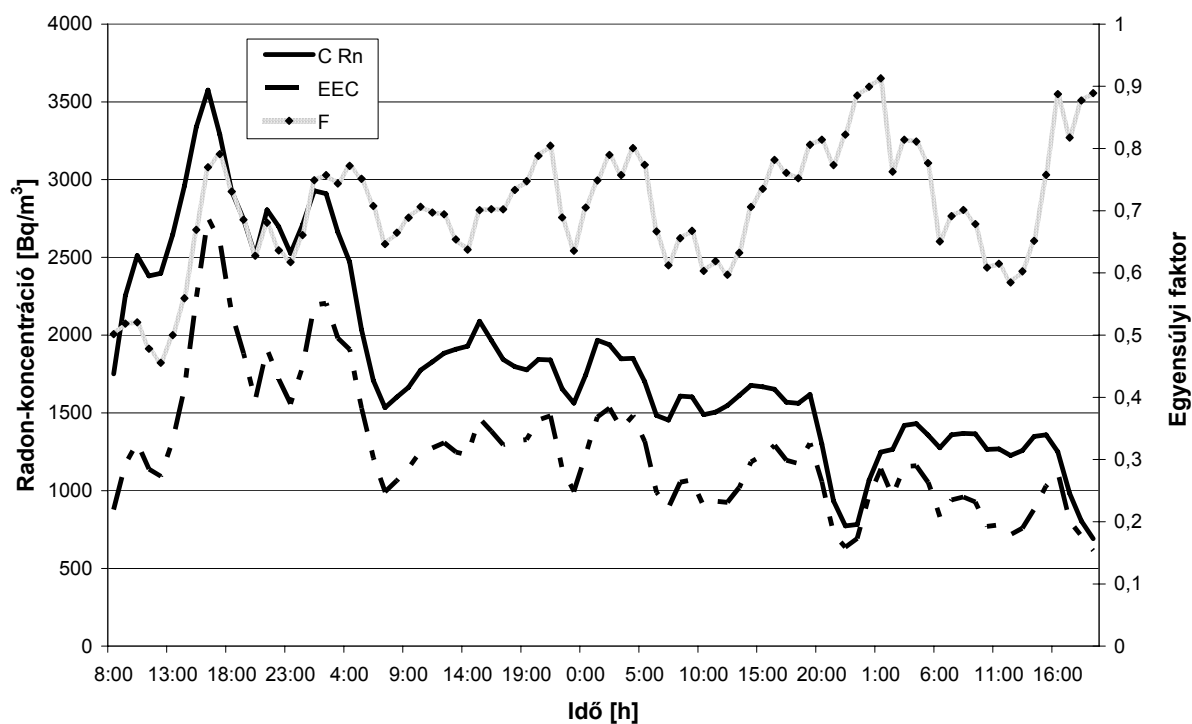


15. ábra. Egyensúlyi faktor változása az Ármin bánya fejtési területén, február hónapban

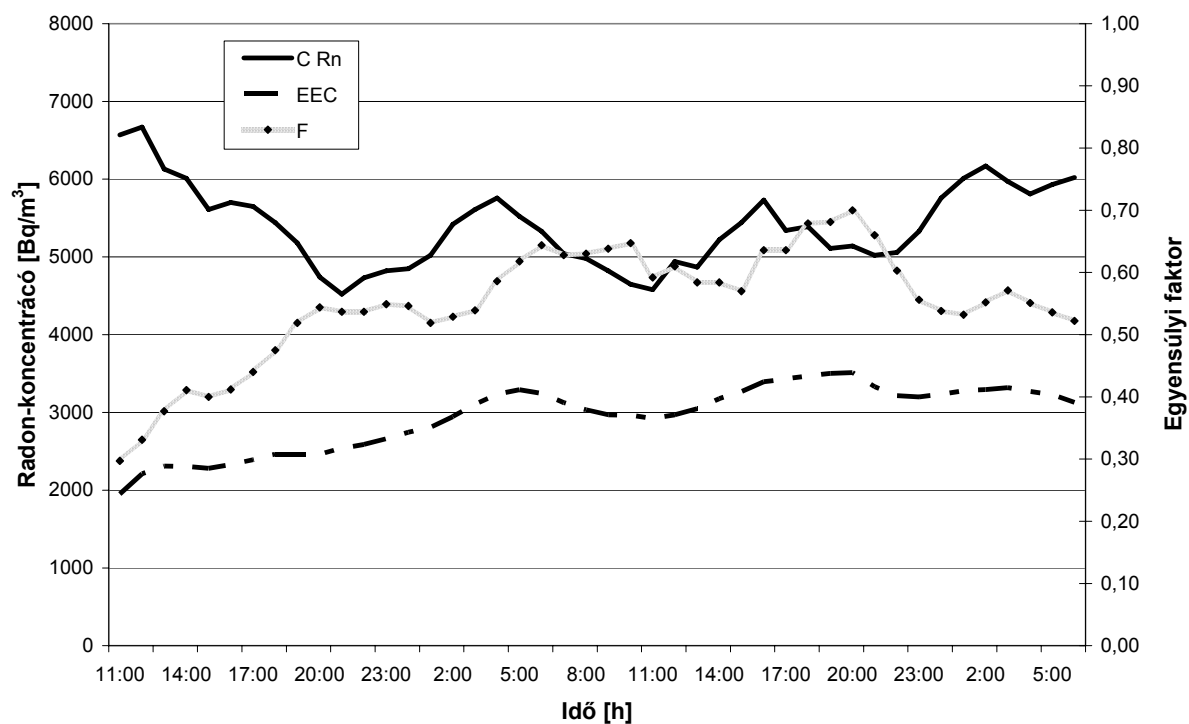
Október hónap vizsgált időszakában az egyensúlyi faktor 0,21, ami azt jelenti, hogy az átlagos radon-koncentráció hiába haladja meg a javasolt 1000 Bq/m³-es szintet, a várható sugárterhelés alatta marad a 0,4-es faktorról becsült dózistól. Február hónapban a nagyon magas radon-koncentráció okozza a gondot, itt már az egyensúlyi faktor is magasabb értéket ért el (0,33).

Tapolcai Kórház-barlang

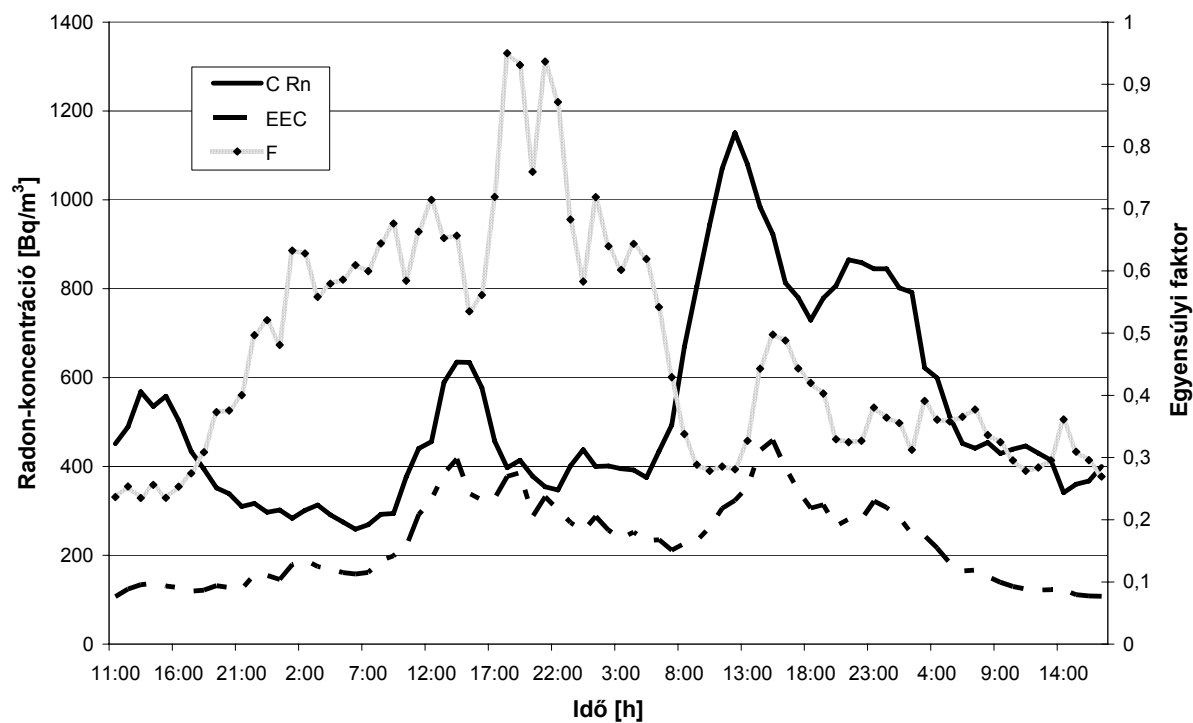
Tavaszi, nyári és téli időszakban néhány napon keresztül történt az egyensúlyi faktor vizsgálata. Mint a 16-18. ábrákon látható, mindhárom esetben az átlag meghaladta a 0,4-et. A három vizsgálat átlaga 0,58-nak adódott. Részletesebben elemezve az eredményeket a 28. táblázatban foglaltam össze. Ennyi mérési eredményből egész éves viszonyokra egyértelműen nem következtethetünk, az egyensúlyi faktor vizsgálatának fontosságára mégis felhívja a figyelmet.



16. ábra. Az egyensúlyi faktor változása a Tapolcai Kórház-barlang légterében, tavaszi hónapban (átlag: 0,71)



17. ábra. Az egyensúlyi faktor változása a Tapolcai Kórház-barlang légterében, nyári hónapban (átlag: 0,55)



18. ábra. Az egyensúlyi faktor változása a Tapolcai Kórház-barlang légterében, téli hónapban (átlag: 0,47)

28. táblázat. A radon-koncentráció és az egyensúlyi faktor átlag értékei munkaidő alatt, és a teljes időszakban a mérések időtartama alatt, a Tapolcai Kórház-barlangban

Időszak	Munkaidő alatt		Teljes időszakban	
	C_{Rn} [Bq/m ³]	F	C_{Rn} [Bq/m ³]	F
Tavaszi	1748	0,61	1818	0,71
Nyár	5514	0,48	5422	0,55
Tél	587	0,39	525	0,47
Átlag	2616	0,49	2588	0,58

Az egyensúlyi faktor vizsgálatának összegzése

Az eredmények alapján látható, hogy jelentős eltéréssel találkozhatunk az ajánlott értékhez képest az egyensúlyi faktor vizsgálata során. Ezt leginkább a különböző területek levegő minőségi paraméterei befolyásolják (nedvesség tartalom, aeroszol eloszlás és koncentráció, alkalmazott munkagépek fajtái, bányászott érc minősége, szellőztetés, stb.) Bánya és bánya között is jelentős különbség lehet ebből a szempontból, ami nem teszi lehetővé az általánosítást. Megbizonyosodni csak mérések útján lehetséges. Az egyensúlyi ekvivalens koncentráció mérése, így az egyensúlyi faktor meghatározása mérés technikailag bonyolultabb, mint a radon meghatározása, így legtöbb esetben erre nem kerül sor, ajánlott érték felhasználásával valósul meg a dózis becslése.

Az egyensúlyi faktor eltérése változtatja a megengedhető radon-koncentráció értékét, ha ugyanazt a sugárterhelést tartjuk szem előtt (29. táblázat). A mangánbánya és a Tapolcai Kórház-barlang magasabb értékei alacsonyabb, 700 Bq/m³ –es radon-koncentrációt engednek meg, míg a szénbánya esetében ugyanez 1500 Bq/m³ is lehet

29. táblázat. Megengedhető radon-koncentrációk különböző egyensúlyi faktorok esetén

Munkahely	Egyensúlyi faktor	Megengedhető radon-koncentráció [Bq/m ³]	Sugárterhelés [mSv/év]
Általános munkahely	0,40	1000	6,3
Mangánbánya	0,57	700	6,3
Tapolcai Kórház-barlang	0,58	700	6,3
Szénbánya	0,27	1500	6,3

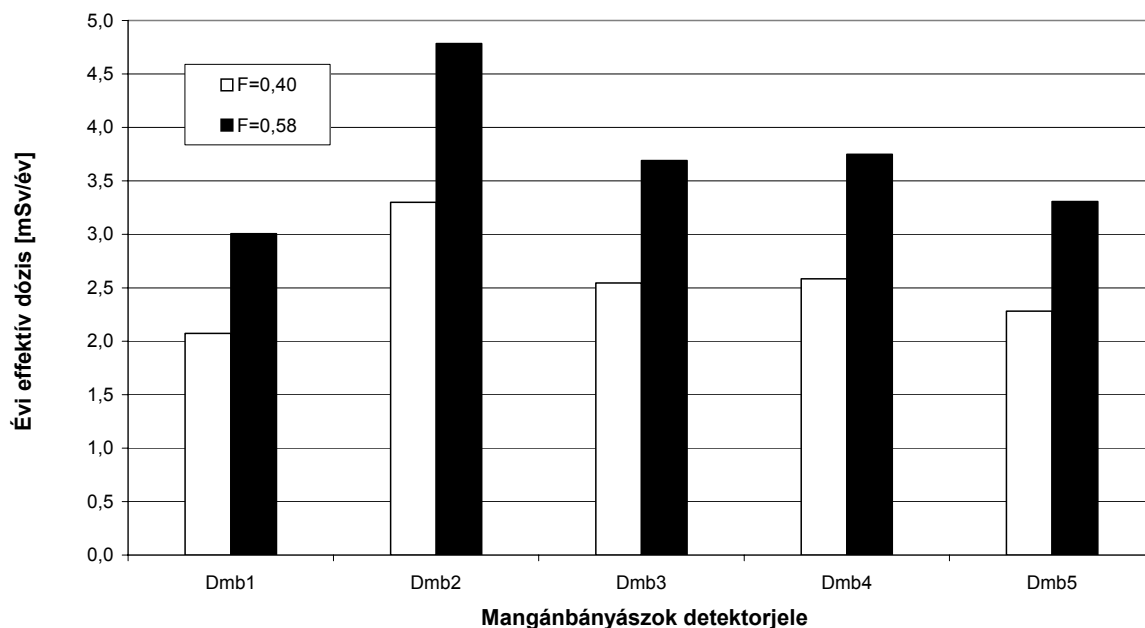
Mivel egyetlen ilyen jellegű mérőeszköz állt rendelkezésemre, adott területeken egyszerre csak egy ponton és a radon méréséhez képest csak rövidebb ideig volt lehetőségem a leányelemek vizsgálatára. Az eredmények pontosítása érdekében mindenképpen további vizsgálatok szükségesek. Amíg ez nem történik meg, nem marad más lehetőség, mint a radon vizsgálata, és belégzésből származó dózis becslése különböző bizonytalanságokkal. A gyakorlatban ez az érték, általában legszélsőségesebb esetben veszi fel a 0,1 és 0,9 értéket. Amennyiben 0,4 értéket alkalmazunk, úgy a tényleges dózisterhelés akár kisebb vagy nagyobb is lehet a becsült értéknél, ami sugárvédelmi szempontból megengedhetetlen. A szabályozás oldaláról nézve 20 és 40 mSv-nek között már igen jelentős különbség van. Ugyanis nem mindegy például egy bánya esetében, hogy kell-e beavatkozási tevékenységet végezni, vagy sem.

2.4.5. Munkavégzők dózisbecslése

A munkahelyi radontól származó dózisbecslés során számos, az eredményt bizonytalanná tevő tényezővel találkoztam. A becslés akkor a legpontosabb, ha a munkaidőre eső radon szinttel, mért egyensúlyi faktorról, a megfelelő munkaóra és dóziskonverziós tényező figyelembevételével végezem el.

Úrkúti mangánbánya

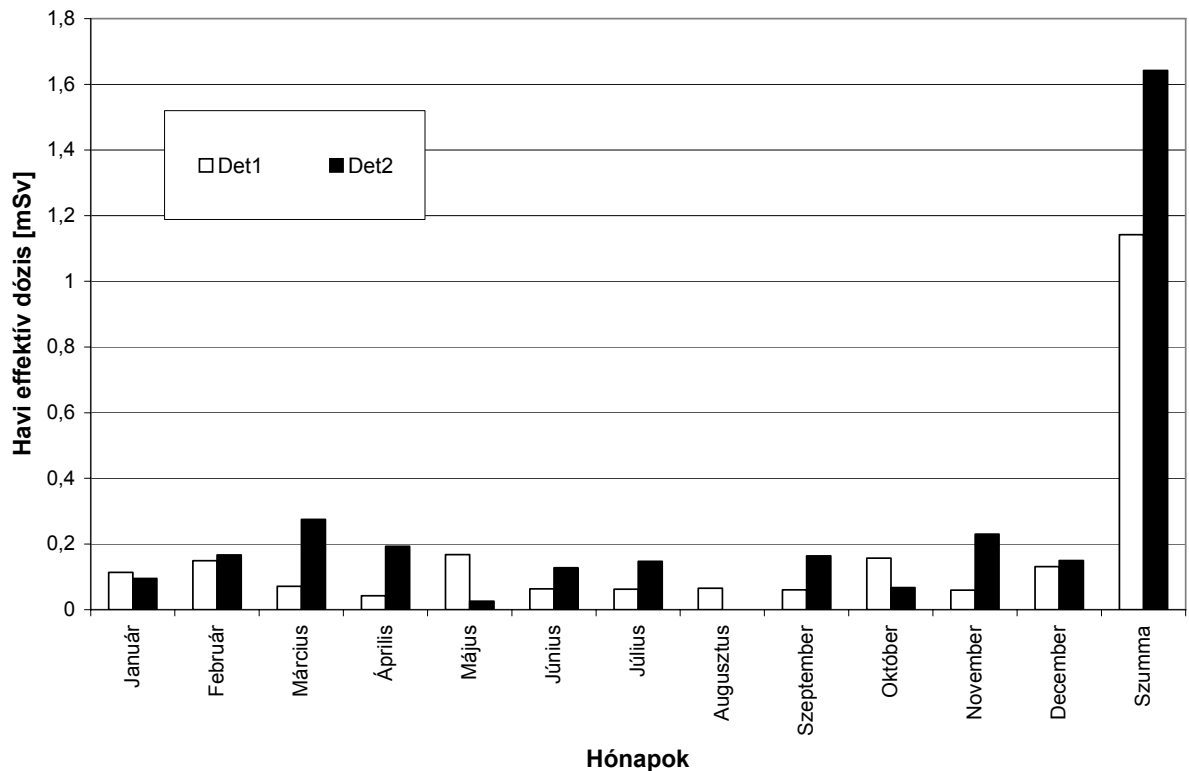
A munkaidőre vonatkozó átlagos radon-koncentrációk (Függelék 1.3.) és az egyensúlyi faktor ajánlott értékével, valamint mért eredményeivel becsültem a munkavégzők radon és leányelemeitől származó lehetséges sugárterhelésüket. (19. ábra). Ez maximális esetben sem ér el évi 5 mSv-et. A két eltérő egyensúlyi faktor alkalmazása esetén a becsült dózisok eltérése jelentős, közel 1,5 szerez.



19. ábra. Mangánbányászok radon és leányelemeitől származó becsült éves sugárterhelése ajánlott és mért egyensúlyi faktorok alapján

Egri Török Fürdő

Méréseim alapján (Függelék 4.1.) a pezsgő medencénél alakul ki a legnagyobb radon feldúsulás, ami éves átlaga a munkaidőn kívüli radon figyelembevételével meghaladja a magyar szabályozásban foglalt cselekvési szintet. Ezért az itt dolgozó két személy munkaidőben nyomdetektort viselt egy éven keresztül, havi cserével (Függelék 4.5.). A 20. ábrán látható, hogy a havi radontól származó sugárterhelés maximuma 0,3 mSv, míg minimuma 0,04 mSv körül mozog. Éves viszonylatban ez 1,14 és 1,64 mSv sugárterhelést jelent. A páciensek sugárterhelése ennél még alacsonyabb. Bennfekvő betegek esetén maximum 10 fürdő lehetséges két hét alatt, míg bejárók esetében 15, öt hét alatt. Évi két kúra a nagy betegszám miatt csak bejárós betegek esetén megoldható, alkalmanként 1 órással ott tartózkodást feltételezve 15 óránál több nem lehetséges, amit egy páciens a fürdőben tölthet. Ez a munkavégzők évi 2000 órájához képest elhanyagolható.



20. ábra. Radon és leányelemeitől származó havi sugárterhelés a Pezsgő medencénél dolgozó személyek esetén

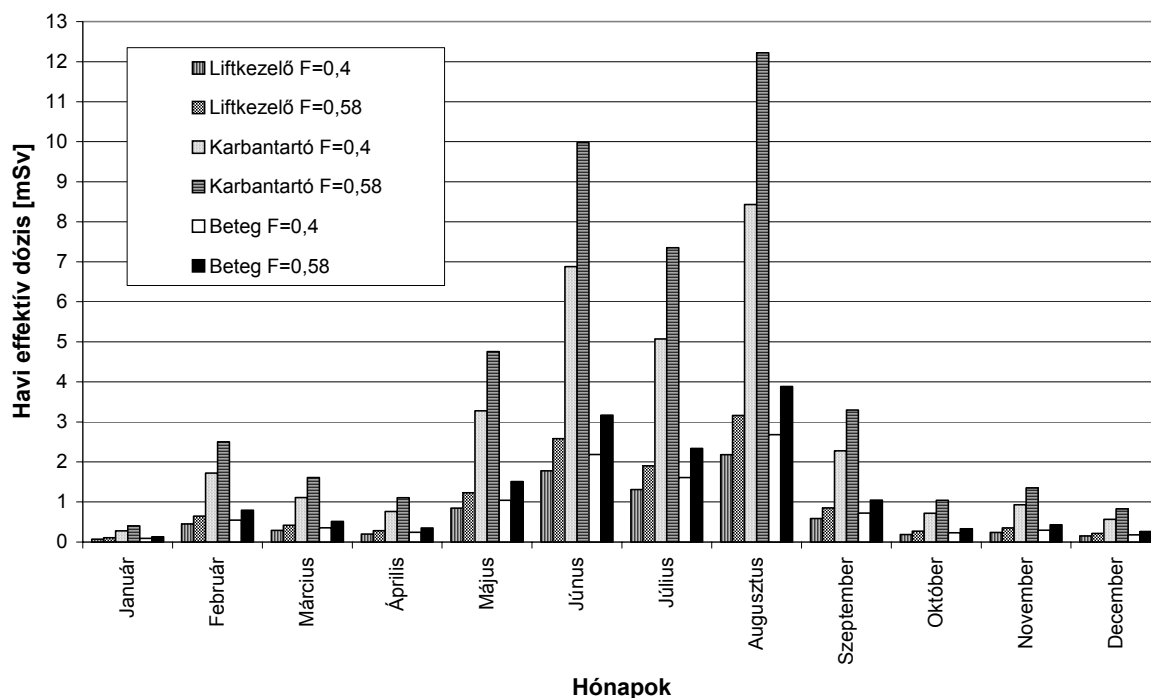
2004-től a fürdő megnyitotta kapuit a nagyközönség előtt. Ők hétvégenként, maximum 2 órát tölthetnek a fürdőben, így adott lakos, aki minden hétvégén szombaton és vasárnap is meglátogatja a Fürdőt évente maximum 408 órát tölthet itt el. Ez kb. 20 százaléka a munkaidőnek, tehát maximálisan lehetséges sugárterhelésük is a becsült érték 20 százaléka körül van, ami 0,33 mSv érték lehet (legrosszabb esetben a Török medencénél mért teljes idejű évi átlaggal (741 Bq/m^3) számolva sem lépi túl az 1 mSv-et.

Tapolcai Kórház-barlang

Jelenleg a liftkezelő, és egyben a barlang gondnoka az, aki a legtöbbet tartózkodik lenn a betegekkel, átlagosan két órát. Nővérek nagyon ritkán, csak kivételes esetben kísérik le a betegeket.

Barlangterápia esetén a betegek három hetes kezelésen vesznek részt, ami átlagosan napi három óra lenn tartózkodást jelent a barlangban heti hat napon keresztül. A jelentős betegszám miatt ilyen jellegű kezelésre a betegeknek évente csak egyszer nyílik lehetőségük,

ami maximum évi 54 óra expozíciós időt eredményez. Tanulmányozva a 21. ábra és a 30. táblázat eredményeit, megállapítható, hogy a várható sugárterhelések nem elhanyagolhatók.



21. ábra. Kezeltek, liftkezelő, karbantartó munkások radon és leányelemeitől várható sugárterhelésének mértéke, havi bontásban a Tapolcai Kórház-barlangban

A mért egyensúlyi faktor esetén a legmagasabb, teljes időre eső átlagot vettem figyelembe a mérés rövidsége miatt.

30. táblázat. Liftkezelő és karbantartó munkások várható éves sugárterhelése a Tapolcai Kórház-barlangban különböző egyensúlyi faktorok esetében

F	Radon és leányelemeitől származó éves effektív dózis [mSv/év]	
	Liftkezelő	Karbantartó
0,4	8,29	32,02
0,58	12,02	46,44

A radon és leányelemeinek hatását jelen esetben természetes forrásból származó sugárterhelésnek kell tekinteni. Ez kezeltek esetében a nyári hónapokban a legjelentősebb akkor akár 3 mSv-et is lehet. Ebből következően 18 év alatti egyének esetében nyári időszakon kívül eső, tehát leginkább a téli kezelések lennének az ajánlottak.

A liftkezelő, és egyben gondnok esetében nyilvánvaló, hogy 1000 Bq/m^3 -t meghaladó radon-koncentrációban végzi feladatát, így nem meglepő, hogy éves sugárterhelése 10 mSv körül ingadozik.

Amennyiben karbantartó, vagy felújító munkálatok végzése lenne szükséges a barlangban, és az esetleg egy egész éven keresztül tartana, akár 50 mSv -et megközelítő sugárterhelésre is számítani lehet, ami a sugárveszélyes munkahelyek esetében is kiugró érték, tehát védelmi intézkedéseket kell ilyenkor foganatosítani. Ha lehet, kerülni kell a nyári hónapokban történő munkavégzést, illetve ha erre nem nyílik lehetőség, szellőztető rendszert célszerű üzemeltetni munkaidő alatt, és addig fel kell függeszteni a barlangban végzett terápiás kezeléseket.

Idegenforgalmi barlangok

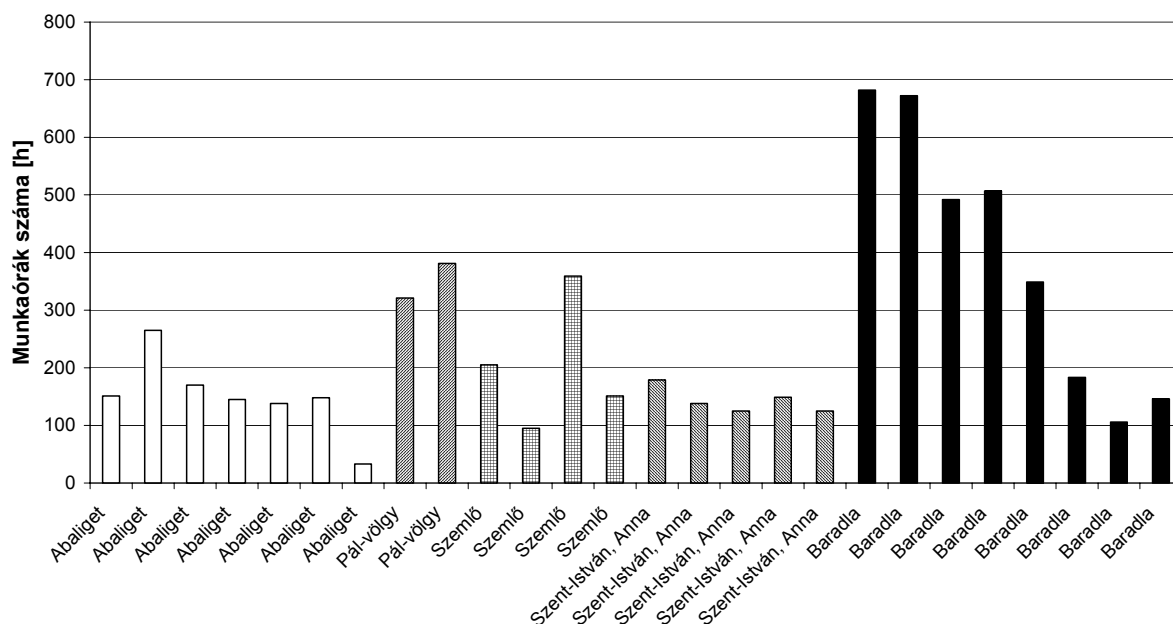
A vizsgálat során nem csak a munkaidő alatti radon-koncentrációt követtem nyomon, hanem a lemeneteli naplók révén a túravezetők barlangban való tartózkodását is.

Munkaórák a barlangban

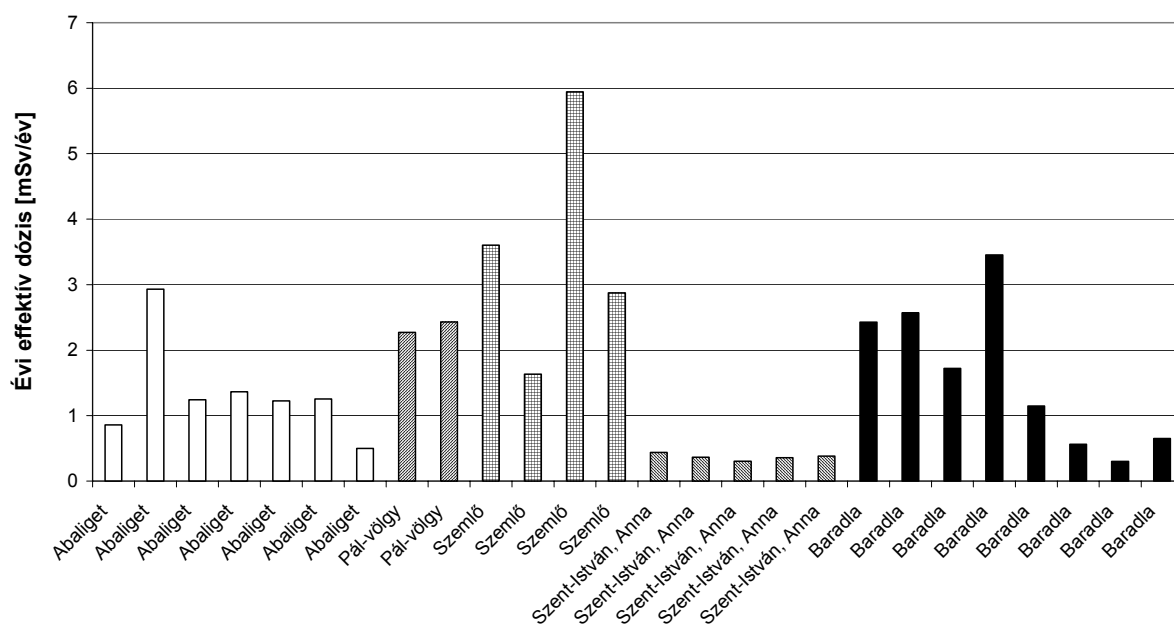
A munkaterületeken mért radon-koncentrációk alapján (Függelék 6.) a Szemlőhegyi-barlangban várható, hogy a munkavégzők éves effektív dózisa magasabb lesz, vagy megközelíti a $6,3 \text{ mSv}$ -et. Ugyanakkor figyelembe véve a barlangi túravezetők barlangban töltött munkaidő számát két, a Baradla-barlangban dolgozó ember esetén is magasabb sugárterhelést vártam, mivel ők töltötték a legtöbb időt a föld alatt, majdnem 700 órát (22. ábra).

Dózisok

A munkavégzők által munkaidőben hordott nyomdetektorok eredményeiből számított éves dózisok a Szemlőhegyi-barlang esetében várakozásaimnak megfelelően alakultak, ugyanakkor a Baradla-barlangban 700 órás lenn tartózkodás sem okozott kiugró sugárterhelést (23. ábra). Egyensúlyi faktor mérésére nem nyílt lehetőségem, így nemzetközi ajánlásoknak megfelelően a becslésnél $0,4$ -es értéket használtam. A két legmagasabb dózist a Szemlőhegyi-barlangban dolgozó túravezetők szenvedték el $5,9$, és $3,6 \text{ mSv}$ -el, míg a legalacsonyabb dózis a Szent István, Anna-barlang és a Baradla-barlang egyik dolgozóját érte $0,3 \text{ mSv}$ -el. A harmadik legmagasabb sugárterhelés a Baradla-barlangban volt megfigyelhető 500 óra körüli munkaidőnél, ez $3,5 \text{ mSv}$ -et jelentett.



22. ábra. Túravezetők éves átlagos barlangban tartózkodási óráinak száma különböző magyarországi idegenforgalmi barlangok esetében



23. ábra. Túravezetők radontól és leányelemeitől származó becsült sugárterhelése magyarországi idegenforgalmi barlangok esetében

Bakonyi túra barlangok

A Bakonyi Barlangász Szövetség elnökének (Schafer István Zsolt) szóbeli tájékoztatása alapján, az aktív tagok átlagosan minden második hétvégét barlangászattal töltenek, napi 6-8 óra időtartamban. Emellett évente átlagosan két kutatótáborban vesznek részt, amelyek

általában 10 naposak, szintén napi 6-8 óra lenn tartózkodással. Ez átlagosan évi 470 órát jelent. Illetve az egyik aktív tag 10 évre visszamenően kiszámolta, hogy 5000 órát töltött barlangokban. Ezt figyelembe véve készült a 31. táblázat, ahol egy tájékoztató jellegű dózisbecslés látható a Függelék 7. adatai alapján. Ebben az esetben a rosszabb helyzetet feltételezve 0,6-nak vettem az egyensúlyi faktort.

31. táblázat. Bakonyi barlangászok várható sugárterhelése feltételezett barlanglátogatástól függően

Barlang megnevezése	Átlagos radon-koncentráció [Bq/m ³]	Átlagos lenn tartózkodási idő [h/év]	Becsült sugárterhelés [mSv/év]
Szentgáli-Kőlik	6996	60 (kutató tábor, napi 6 óra)	2,0
Csatárhegyi-barlang	3076	60 (kutató tábor, napi 6 óra)	0,9
Ménesakolárki 1-es számú víznyelő barlang	11896	112 (8 hétvége, napi 7 óra)	6,3
Bándi -rókalik	9539	140 (10 hétvége, napi 7 óra)	6,3
Zsófia pusztai víznyelő	8989	98 (7 hétvége, napi 7 óra)	4,2
Összesen		470	19,7

Látva a dózisbecslés eredményeit elképzelhető, hogy egyes barlangászok öt évre vonatkozó sugárterhelése több mint 100 mSv. Emiatt mindenképpen szükség van a becslés pontosítására és további vizsgálatok elvégzésére.

Dózis becslések eredményeinek összegzése

A különböző területen végzett vizsgálatok eredményeiből becslott dózisok összefoglalása a 32. táblázatban láthatók.

A magyar végrehajtási rendeletben megfogalmazott 1000 Bq/m³-es cselekvési szint évi 2000 óra munkaidő és 0,4 egyensúlyi faktor, és az ICRP által ajánlott dóziskonverziós faktor figyelembe vételével évi 6,3 mSv sugárterhelést jelent. A cselekvési szint túllépése a vizsgált munkahelyeken két esetben is előfordul, a 6,3 mSv sugárterhelés mégis csak egy esetben figyelhető meg, ami a jelentős expozíciót eredményező térben való tartózkodás rövidebb idejének (idegenforgalmi barlangok), köszönhető. Ezzel szemben a bakonyi barlangokban való 470 órás lenn tartózkodás is soknak tekinthető.

Jelenlegi magyar jogszabályi megfogalmazás szerint amennyiben a teljes év átlag meghaladja a cselekvési szintet (éves átlag vitatható megfogalmazású) beavatkozási lépések szükségesek, amely a sugárterhelés csökkentését kell, hogy eredményezze, vagyis a 6,3 mSv alá kell juttatni a munkavégzők sugárterhelését. Mielőtt a beavatkozás megtörténik, érdemes becsülni a munkavállaló expozíciós területen való tartózkodásának idejét, illetve meghatározni az egyensúlyi faktort, vagyis becsülni kell ezen adatok függvényében a munkavégző sugárterhelését.

32. táblázat. A vizsgált területek összefoglaló eredményei

Vizsgált terület	Mért teljes évi átlagos radon koncentráció [Bq/m ³]	Dózis becslés során alkalmazott egyensúlyi faktor	Expozíciós idő [h/év]	Várható éves sugárterhelés [mSv/év]	
				F=0,4 esetén	Mért F esetén
Úrkúti mangánbánya	817	0,57	2000	2,1-3,3	3-4,8
Tapolcai Kórház- barlang	4292	0,58	2000	32,0	46,4
Egri Török Fürdő	493	0,4	2000	1,1-1,6	-
Idegenforgalmi barlangok	540-5480	0,4	33-682	0,3-5,9	-
Bakonyi túra barlangok	10000*	0,6*	470	13,1	19,7

*becsült érték

Beavatkozni csak ez után szabad, a felesleges kiadások és tevékenységek elkerülése végett. Ebből a szempontból érdekes a belga, német és svéd szabályozás, ahol a munkaórával súlyozottan hozták meg a cselekvési szintet (magyar értelemben viszont ez nem cselekvési szint, mivel az csak aktivitás koncentrációt, vagy dózisteljesítményt jelenthet), tehát a munkaórák száma szabja meg a megengedhető radon-koncentrációt. Alacsonyabb esetben több lehet, magas esetben kevesebb a radon megengedhető szintje.

Másik megkerülő megoldás a lengyel és a román példa, ahol cselekvési szint dózisteljesítményben van megadva, így nincs probléma munkaidővel, radon-koncentrációval, a sugárterhelés becsléséhez szükséges korrekt adatokon van a hangsúly.

3. Összefoglalás

Munkám során két földalatti bányauzemben, egy gyógybarlangban, egy gyógyfürdőben, hat idegenforgalmi barlangban és hét bakonyi barlangban végeztem sugárvédelmi, illetve tájékozódó jellegű radon és leányelem vizsgálatokat.

Mérési eredményeim birtokában elemeztem az éves átlagos radon-koncentráció meghatározását befolyásoló tényezőket, úgymint a mérési időt, és a mérési pontok elhelyezkedését.

A dózisbecsléshez kapcsolódóan vizsgáltam az egyensúlyi faktor eltérését az ajánlott értékhez képest, és összevettem a munkaidő alatti és az azon kívül eső radon-koncentrációk viszonyát.

Személyi radon doziméterek (nyomdetektor) és a helyszíni radon és leányelem mérések eredményei alapján, a radon által veszélyeztetett területen való tartózkodás időtartamát figyelembe véve becsültem a munkavégzők, és szabadidős tevékenységet végzők sugárterhelését.

Különböző hatások és paraméterek következtében a vizsgálati területeken a radon koncentrációjának igen széles spektrumú ($100\text{--}25000\text{ Bq/m}^3$) változásait tapasztaltam. Földalatti munkaterületek esetén a természetes légcseré hatással van a kialakuló radon-koncentrációra, ami évszakosan váltakozhat, egyes hónapok eredményei között akár 70-szeres eltéréseket is létrehozva. A változás jellemzőit mérés nélkül előre megmondani nem lehet. Az 1-3-6 havi mérések eredményeit összevetve a teljes év mérési eredményével, még mindig jelentős, akár hússzoros eltérések is előfordulhatnak. A mérési idő növelésével ezek az eltérések csökkennek. Hathónapos mérés esetén a legnagyobb eltérés a mangánbányában 1,4-szeres, az Egri Török Fürdőben 1,2-szeres, a Tapolcai Kórház-barlangban 2,9-szeres, az idegenforgalmi barlangokban 4,2-szeres.

Rövidebb idejű mérésekből megbízhatóan következtetni földalatti munkahelyek esetén a teljes év átlagára nem lehetséges, végig kell mérni a teljes évet. Az Egri Török Fürdő esetében hat havi mérés már megbízható eredményt adott, de mivel más fürdőben nem végeztem vizsgálatokat, nem tudok következtetést levonni, további vizsgálatokat javaslok.

A radon forrásának egyenetlen elhelyezkedése, valamint a munkaterületre jellemző légmozgás tulajdonságok miatt eltérő radon-koncentrációjú terek kialakulására van lehetőség adott munkahelyen. Egyes mérési pontok éves átlaga között többszörös eltérések lehetnek. A mangánbányában a legnagyobb eltérés 1,7-szeres, az Egri Török Fürdőben 16-szoros, a Tapolcai Kórház-barlangban 2,7-szeres, az idegenforgalmi barlangokban 2,1-szeres volt. Ezért

egy munkahely éves átlagos radon-koncentrációjának meghatározásához több helyen végrehajtott mérés szükséges. A mérési pontok helyét (számát) általános érvényűen előre megadni nem lehet. Tanulmányozni kell minden egyes munkahelyen a várható légmozgást, a radon forrásának elhelyezkedését, a munkavégzők tartózkodási területeit. Ezen adatok birtokában kell kijelölni a mérési pontok helyét.

Az ilyen jellegű radon mérés legegyszerűbb és legcélszerűbb módszere a havi cserével alkalmazott nyomdetektor.

Legtöbb munkahelyen a munkaidőre eső radon-koncentráció többszörösen eltér a teljes idő eredményeihez képest. A mangánbányában és az Egri Török Fürdőben a munkaidő alatti átlagos radon-koncentráció kétszer kisebb volt a teljes átlaghoz képest. Ugyanez idegenforgalmi barlangok esetében ötször kisebb is lehet. Az eltérés köszönhető a munkaidő alatti mesterséges szellőztető rendszer alkalmazásának, bányák és fürdők esetében, illetve a természetes légcserének barlangok esetében. Ezt folyamatos működésű radon mérő eszközökkel tudtam jól nyomon követni. Ilyen esetben az évi átlagos radon-koncentráció értéket nem használhatjuk dózisbecsléshez, mivel ez magában foglalja a munkaidőn kívüli időszakok értékeit is. Törekedni kell a munkaidőre eső radon-koncentráció meghatározására. Ehhez a legmegbízhatóbb módszernek a nyomdetektorok személyi doziméterként való alkalmazását találtam, amennyiben az ellenőrzött személy kellő odafigyeléssel és fegyellemmel hajtja végre az ezzel járó feladatokat.

Külön ki kell emelni az olyan munkaterületek, ahol a munkavégzők nem tartózkodnak folyamatosan a radon által veszélyeztetett területen (idegenforgalmi barlangok). Itt célszerű a munkavégzővel tartózkodási naplót vezetetni.

A dózis becslés során egy másik igen fontos tényező, az egyensúlyi faktor, amely szintén széles skálán mozoghat az adott munkahely levegőminőségi paramétereitől függően. Nem elfogadható a 0,4-es átlagérték alkalmazása. A mangánbányában és a Tapolcai Kórház-barlangban méréseim során ez az átlagérték 0,57 és 0,58-nak adódott. Az ajkai Ármin szénbányában viszont alacsonyabb 0,21 és 0,33-as átlag értékek voltak jellemzők a méréseim során. Ez rámutat arra, hogy földalatti munkahelyek esetén mindig törekedni kell ezen adat meghatározására, a minél pontosabb dózisbecslés érdekében.

Az úrkúti mangánbánya munkavégzőinek radontól származó éves sugárterhelése ajánlott és mért egyensúlyi faktor figyelembe vétele esetén 2 és 4,7 mSv között változott. A Tapolcai Kórház-barlang liftkezelőjének radontól származó éves sugárterhelése ajánlott és mért egyensúlyi faktor figyelembe vétele esetén 8,3 illetve 12 mSv. A Tapolcai Kórház-barlangban esetlegesen végzett karbantartó munkánál a radontól származó éves sugárterhelése ajánlott és

mért egyensúlyi faktor figyelembe vétele esetén 32 illetve 46,4 mSv lehet. Az Egri Török Fürdő munkavégzőinek radontól származó éves sugárterhelése ajánlott egyensúlyi faktor figyelembe vétele esetén 1,1 és 1,6 mSv között változott. A bakonyi barlangokban 470 órát eltöltő személyek várható radontól származó éves sugárterhelése 0,6-os egyensúlyi faktor esetében 19,7 mSv.

A vizsgált területek közül a Tapolcai Kórház-barlangban és bakonyi barlangokban megforduló személyek sugárterhelése jelentős lehet, ami további intézkedések és vizsgálatok végrehajtását igényli.

4. Irodalomjegyzék

1. Marx Gy.: Atommag közelben, Mozaik Oktatási Stúdió, Szeged, 1996
2. Szatmáry Z., Aszódi A.: Csernobil, Typotex kiadó, Budapest, 2005
3. Az egészségügyi miniszter 16/2000. (VI.8.) EüM rendelete, az Atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról. Magyar Közlöny 55. szám, Budapest, 2000
4. Balázs L.: A kémia története I—II. kötet, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1996
5. Kanyár B., Somlai J., Szabó D. L.: Környezeti sugárzások, radioökológia, Veszprémi Egyetem, Radiokémia Tanszék, Veszprém, 1996
6. Köteles Gy.: A sugárhatás késői következményei, Sugársérülések megelőzése és gyógykezelése, Zrínyi Kiadó, Budapest, 1989
7. Somlai J., Tarján S., Kanyár B.: Radioaktív sugárzások és környezetünk, Energia Klub Környezetvédelmi Egyesület, Budapest, 2000
8. Z. Jaworowski: A dózis-kockázat arányosság paradigmájának felemelkedése és bukása, Fizikai szemle, XLIX. Évf. 11, 317-321, 1999
9. Köteles Gy., Tóth E.: Gondolatok az ionizáló sugárzás kis dózisainak hatásáról, Fizikai Szemle, XLIX. Évf. 11, 394-400, 1999
10. Gy. Köteles: The low dose dilemma, Central European Journal of Occupational and Environmental Medicine 4, 103-113, 1998
11. B. L. Cohen: A test of the linear no threshold theory of radiation carcinogenesis, Environmental Research 53, 193-200, 1990
12. BEIR I.: The effects of populations of exposures to low levels of ionizing radiation, (Biological Effects of Ionizing Radiation) National Academy of Science Press, Washington, D.C., 1972
13. E. Tóth, I. Lázár, D. Selmeczi, Gy. Marx: Lower Cancer Risk in Medium High Radon, Pathology Oncology Research, 4/2, 1998
14. J. Uzan-Elbez, L. Rodríguez-Rodrigo, M. T. Porfiri, N. Taylor, C. Gordon, P. Garin, J. P. Girard, EISS Team: Alara applied to ITER design and operation, Fusion Engineering and Design, 75-79, 1085-1089, 2005
15. S. Kondo: Health Effects of Low-Level Radiation, Kinki University Press Osaka, Japan and Medical Physics Publishing, Madison, WI USA, 1993
16. H. Adam: Scientific Principles of the Health Treatments in Badgastein and Bad Hofgastein, Cure and Tourism Administration, Badgastein, 1991
17. F. Scheminzy: Der Thermalstollen von Badgastein-Bockstein, seine Geschichte, Erforschung und Heilkraft, University of Innsbruck, Innsbruck, 1965
18. H. Thaler: Gasteiner Kur- und Heilstollen-Buch, Verlag D. Fisher & Co., Munch, 1981
19. R. W. Hormung, J. A. Deddens, R. J. Roscoe: Modifiers of lung cancer risk in uranium miners from the Colorado Plateau. Health Physics 71, 12-21, 1998
20. B. L. Cohen: The cancer risk from Low Level radiation, Radiation Research 149, 525-526, 1998

21. B. L. Cohen: Lung Cancer Rate Vs. Mean Radon Level in U.S. Counties of Various Characteristics, *Health Physics* 72(1), 114-119, 1997
22. A. Auvinen, I. Makelainen, M. Hakama, O. Castren, E. Pukkala, H. Reisbacka, T. Rytomaa: Indoor radon exposure and risk of lung cancer: a nested case-control study in Finland, *Journal of the National Cancer Institute* 88, 966-972, 1996
23. F. E. Pisa, F. Barbone, A. Betta, M. Bonomi, B. Alessandrini, M. Bovenzi: Residential radon and risk of lung cancer in an Italian alpine area, *Archives of Environmental Health* 56, 208-215, 2001
24. H. Baysson, M. Tirmarche, G. Tymen, S. Gouva, D. Caillaud, J. C. Artus, A. Vergnenegre, F. Ducloy, D. Laurier: Indoor radon exposure and lung cancer risk. Results of an epidemiological study carried out in France, *Revue Des Maladies Respiratoires*, 22(4), 587-594, 2005
25. I. V. Iarmoshenko, I. A. Kirdin, M. V. Zhukovski, The relative biological effectiveness of alpha-radiation during human lung exposure to irradiation, *Radiatsionnaia Biologiya, Radioecologiya, Rossiiskaia Akademiia Nauk*, 45(4) 422-432, 2005
26. M. C. R. Alavanja, J. H. Lubin, J. A. Mahaffey, R. C. Brownson: Residential radon exposure and risk of lung cancer in Missouri, *American Journal of Public Health* 89, 1042-1048, 1999
27. J. M. Barros-Dios, M. A. Barreiro, A. Ruano-Ravina, A. Figueiras: Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: a population-based case-control study, *American Journal of Epidemiology*, 156, 548-555, 2002
28. L. Tomásek, T. Müller, E. Kunz, A. Heribanová, J. Matzner, V. Placek, I. Burian, J. Holecek: Study of lung cancer and residential radon in the Czech Republic, *Central European Journal of Public Health* 3, 150-153, 2001
29. Z. Wang, J. H. Lubin, L. Wang, S. Zhang, Jr. J. D. Boice, H. Cui, S. Zhang, S. Conrath, Y. Xia, B. Shang, A. Brenner, S. Lei, C. Metayer, J. Cao, K. W. Chen, S. Lei, R. A. Kleinerman: Residential radon and lung cancer risk in a high-exposure area of Gansu province, China, *American Journal of Epidemiology* 155, 554-564, 2002
30. B. L. Cohen: Problems in the radon vs. Lung cancer test of the linear no threshold theory and a procedure for resolving them. *Health Physics* 72, 623-628, 1997
31. H. E. Wichmann, A. Schaffrath Rosario, I. M. Heid, M. Kreuzer, J. Heinrich and L. Kreienbrock: Lung cancer risk due to radon in dwellings—evaluation of the epidemiological knowledge, *International Congress Series*, 1276, 54-57, 2005
32. J. H. Lubin and J. D. Boice, Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies, *Journal of the National Cancer Institute* 89, 49-57, 1997
33. Virág E., Zöld E.: Radioaktív szennyeződések hatása a környezetre, *Budapesti Műszaki Egyetem Mérnöki Továbbképző Intézete*, Budapest, 1980
34. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations, New York, 1993
35. Balogh K., Csige I., Haki J., Hertelendi E., Hunyadi I., Koltay E., Kovács Á., Rajta I.: Fejezetek a környezetfizikából, *Kézirat KLTE-ATOMKI Közös Fizikai Tanszék*, Debrecen, 1994
36. Nagy L. Gy.: Radiokémia és izotóptechnika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1989
37. C. R. Cothorn, Jr. J. E. Smith: Environmental Radon, Environmental Science Research, Plenum Press, New York and London, 1987
38. J. Falbe, M. Regitz: *Römpp Chemie Lexikon*, Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York, 2001

39. Kanyár B., Béres Cs., Somlai J., Szabó S. A.: Radioökológia és környezeti sugárvédelem, Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 2000
40. Steiner F., Várhegyi A.: Radiometria, Tankönyvkiadó, Budapest, 1991
41. BEIR IV. Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters. National Academy Press, Washington, D. C., 1988
42. ICRP-47. Radiation Protection of Workers in Mines. Annuals of the ICRP 16 Pergamon Press, 1986
43. A. Cavallo: The Radon Equilibrium Factor and Comparative Dosimetry in Homes and Mines, Radiation Protection Dosimetry, 92, 295-298, 2000
44. UNSCEAR Report, 2000. Sources and effects of ionizing radiation, UN, New York; Optimization of Radiation Protection in the Control of Occupational Exposure. IAEA SRS No. 21. Vienna, 2000
45. G. Gallelli, D. Panatto, P. Lai, P. Orlando and D. Risso: Relevance of main factors affecting radon concentration in multi-story buildings in Liguria (Northern Italy), Journal of Environmental Radioactivity 39, 117-128, 1998
46. G. S. Islam, S. C. Mazumdar, M. A. Ashraf: Influence of various room parameters upon radon daughter equilibrium indoors, Radiation Measurements 26, 193-201, 1996
47. Dezső Z., Papp Z., Daróczy S.: Hőerőművi eredetű radioaktív szennyezés és lakossági sugárterhelés Ajkán, Fizikai Szemle, XLVII. Évf. 8, 244-247, 1997
48. Várhegyi A., Hakl J.: A hazai geológiai viszonyok sajátosságai és az ebből eredő radon-expozíció lehetőségei, Környezeti ártalmak és a légzőrendszer, 252-265, Hévíz 1999
49. Kiss J.: Ércteleptan II., Tankönyvkiadó, Budapest, 1982
50. Somlai J., Kanyár B., Lendvai Z., Németh Cs., Bodnár R.: Az Ajka környékén építőanyagként felhasznált szénbányameddő és szénsalak radiológiai minősítése, Magyar Kémiai Folyóirat, 103. évf. 2, 53-61, 1997
51. European Commission Radiation Protection 112, Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials Directorate-General Environment, 1999
52. Ormai P.: Nemzetközi és hazai törekvések a radioaktív hulladékok biztonságos kezelésére és elhelyezésére, Radioaktív hulladékokat Kezelő Közhasznú Társaság, Budapest, 2003
53. P. Szerbin: Radon and exposure levels in Hungarian Caves, Health Physics, 71, 363-369, 1996
54. ICRP65, International Commission on Radiological Protection, Protection against ^{222}Rn at Home and at Work, Oxford, Pergamon Press, ICRP Publication No.65; 1994
55. EC, 1996. Council Directive 96/29/Euroatom of 13 May 1996 laying down the basic safety standards for the protection of health of workers and the general public against the dangers of ionizing radiation. Official Journal of the European Commission 1996 39 L159 1-114, 1996
56. EC, 1997. Recommendations for the implementation of Title VII of the European Basic Safety Standards concerning significant increases in exposure due to natural radiation sources. Radiation Protection 88. European Commission, Office for Official Publications of the European Commission. Radiation Protection Series, 1997
57. EC, 1990. Commission recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon. (90/143/Euroatom). Official Journal of the European Commission 1996 39 L80 26-27, 1990
58. International Basic Safety Standards, Safety Series 115-I, Vienna: IAEA, 1996

59. H. Synnott, D. Fenton: An Evaluation of Radon Reference Levels and Radon Measurement Techniques and Protocols in Europe Countries, European Radon Research and Industry Collaboration Concerted Action, European Commission Contract N^o: FIRI-CT-2001-20142, 2005
60. R. Lindsay, R. J. de Meijer, A. D. Joseph, T. G. K. Motlhabane, R. T. Newman, S. A. Tsela, W. J. Speelman: Measurement of radon exhalation from a gold-mine tailings dam by γ -ray mapping, *Radiation Physics and Chemistry*, 71(3-4), 797-798, 2004
61. J. P. Grattan, G. K. Gillmore, D. D. Gilbertson, F. B. Pyatt, C. O. Hunt, S. J. McLaren, P. S. Phillips, A. Denman: Radon and 'King Solomon's Miners': Faynan Orefield, Jordanian Desert, *Science of The Total Environment*, 319(1-3), 99-11, 2004
62. A. E. Khater, M. A. Hussein, M. I. Hussein: Occupational exposure of phosphate mine workers: airborne radioactivity measurements and dose assessment, *Journal of Environmental Radioactivity*, 75(1), 47-57, 2004
63. R. Kumar, D. Sengupta, R. Prasad: Natural radioactivity and radon exhalation studies of rock samples from Surda Copper deposits in Singhbhum shear zone, *Radiation Measurements*, 36, 551-553, 2003
64. G. K. Gillmore, P. Phillips, A. Denman, M. Sperrin and G. Pearce: Radon Levels in Abandoned Metalliferous Mines, Devon, Southwest England, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 49(3), 281-292, 2001
65. Környezetvédelmi Lexikon I. A-K, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1993
66. N. Kávási, T. Kovács, Cs. Németh, T. Szabó, Z. Gorjánác, A. Várhegyi, J. Hakl, J. Somlai: Difficulties in radon measurements at workplaces, *Radiation Measurements*, 41 (2), 229-234, 2006
67. Polgári M. Szabó Z. Szederkényi T.: Mangánércsek Magyarországon, MTA Szegedi Akadémiai Bizottsága, Szeged, 2000
68. N. Kávási, J. Somlai, T. Kovács, T. Vigh: Investigation of the radon concentration and its change in the manganese-mine of Úrkút (Hungary), 4th European Conference on Protection against Radon at Home and at Work, Prague, Czech Republic, June 28-June 23, 2004
69. Kozma K.: Az Ajkai szénbányászat története, Veszprém, 1991
70. A. A. Qureshi, D. M. Kakar, M. Akram, N. U. Khattak, M. Tufail, K. Mehmood, K. Jamil and H. A. Khan: Radon concentrations in coal mines of Baluchistan, Pakistan, *Journal of Environmental Radioactivity*, 48(2), 203-209, 2000
71. M. Tufail, S. M. Mirza, A. Mahmood, A. A. Qureshi, Y. Arfat and H. A. Khan: Application of a "closed-can" technique for measuring radon exhalation from mine samples of Punjab, Pakistan, *Journal of Environmental Radioactivity*, 50(3), 267-275, 2000
72. K. Jamil S. Ali: Estimation of radon concentrations in coal mines using a hybrid technique calibration curve, *Journal of Environmental Radioactivity*, 54(3), 415-422, 2001
73. D. Bódizs, L. Gáspár, G. Keömléi: Radioactive Emission from Coal Fired Power Plants, *Periodica Polytechnica Serial Physics* 1, 87-99, 1993
74. G. Song, B. Zhang, X. Wang, J. Gong, D. Chan, J. Bennett, S.C. Lee: Indoor radon levels in selected hot spring hotels in Guangdong, China, *Science of The Total Environment*, 339(1-3), 63-70, 2005
75. E. Vogiannis, M. Niaounakis, C. P. Halvadakis: Contribution of ²²²Rn-bearing water to the occupational exposure in thermal, *Environment International*, 30(5), 621-629, 2004
76. E. Vogiannis, D. Nikolopoulos, A. Louizi, C. P. Halvadakis: Radon variations during treatment in thermal spas of Lesbos Island (Greece), *Journal of Environmental Radioactivity*, 75(2), 159-170, 2004

77. P. Szerbin: Natural radioactivity of certain spas and caves in Hungary, *Environment International*, 22, 389-398, 1996
78. Agyagási D., Cornides I., Kleb B., Papp K., Péczely Gy., Scheuel Gy., Suba J., Sugár I.: Eger gyógyvizei és fürdői, Eger Város Tanácsa V. B. Műszaki Osztálya és a Heves megyei Idegenforgalmi Hivatal kiadása, Eger, 1983
79. E. Baradács, I. Hunyadi, Z. Dezső, I. Csige and P. Szerbin: ^{226}Ra in geothermal and bottled mineral waters of Hungary, *Radiation Measurements*, 34(1-6), 385-390, 2001
80. T. Tsvetkova, T. A. Przylibski, I. Nevinsky, V. Nevinsky: Measurement of radon in the East Europe under the ground, *Radiation Measurements*, 40(1), 98-105, 2005
81. J. Hakl, I. Hunyadi, I. Csige, G. Géczy, L. Lénárt, A. Várhegyi: Radon transport phenomena studied in Karst caves-international experiences on radon levels and exposures, *Radiation Measurements*, 28(1-6), 675-684, 1997
82. C. Dueñas, M. C. Fernández and S. Cañete: ^{222}Rn concentrations and the radiation exposure levels in the Nerja Cave, *Radiation Measurements*, 40(2-6), 630-632, 2005
83. H. Al-Mustafa, M. I. Al-Jarallah, F. Ur-Rehman, F. Abu-Jarad: Radon concentration measurements in the desert caves of Saudi Arabia, *Radiation Measurements*, 40(2-6), 707-710, 2005
84. C. Papastefanou, M. Manolopoulou, S. Stoulos, A. Ioannidou, E. Gerasopoulos: Elevated radon concentrations in a Pleistocene cave operating as a show cave, *International Congress Series*, 1276, 204-205, 2005
85. Dezső Z., Hakl J., Molnár L.: Barlangi közetek radon exhalációja, III. Karsztfeljlődés konferencia, Szombathely, 2001. április 6-7
86. Kolláth J.: A tapolcai és Tapolca környéki barlangok bemutatása különös tekintettel a hasznosítási lehetőségekre, *Környezeti ártalmak és a légzőrendszer*, 71-85, Hévíz, 1999
87. Géczy G., Hunyadi I., Hakl J., Csige I.: Barlang terápia lehetőségei Magyarországon, *Környezeti ártalmak és a légzőrendszer*, 45-55, 1996
88. N. Kávási, J. Somlai, T. Kovács, T. Szabó, A. Várhegyi, J. Hakl: Occupational and patient doses in the therapeutic cave Tapolca (Hungary), *Radiation Protection Dosimetry* 106, 263-266, 2003
89. http://www.barlang.hu/pages/tvtanf/Mo_barlangjai.htm
90. Jakucs L., Kessler H.: A barlangok világa (Barlangjárók zsebkönyve), Sport kiadó, Budapest, 1962
91. Bakonyi Barlangkutató Egyesületek Szövetsége: Bakonyi Barlangkutató Egyesületek Szövetsége Évkönyve 2003, Veszprém, 2004
92. T. Limoto, S. Tokonami, Y. Morishita T. Kosako: Application of activated charcoal radon collectors in high humidity environments, *Journal of Environmental Radioactivity*, 78(1), 69-76, 2004
93. G. Gervino, R. Bonetti, C. Cigolini, C. Marino, P. Prati, L. Pruiti: Environmental radon monitoring: comparing drawbacks and performances of charcoal canisters, alpha-track and E-PERM detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 518(1-2), 452-455, 2004
94. F. Bochicchio, S. Risica: Active radon and radon daughter monitors, *Proceedings of the International Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental Radioactivity and Earth Sciences*, ICTP, Trieste, Italy, April 3-14, 1989
95. Ádám L.: Radioizotópok a bányászatban, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1966

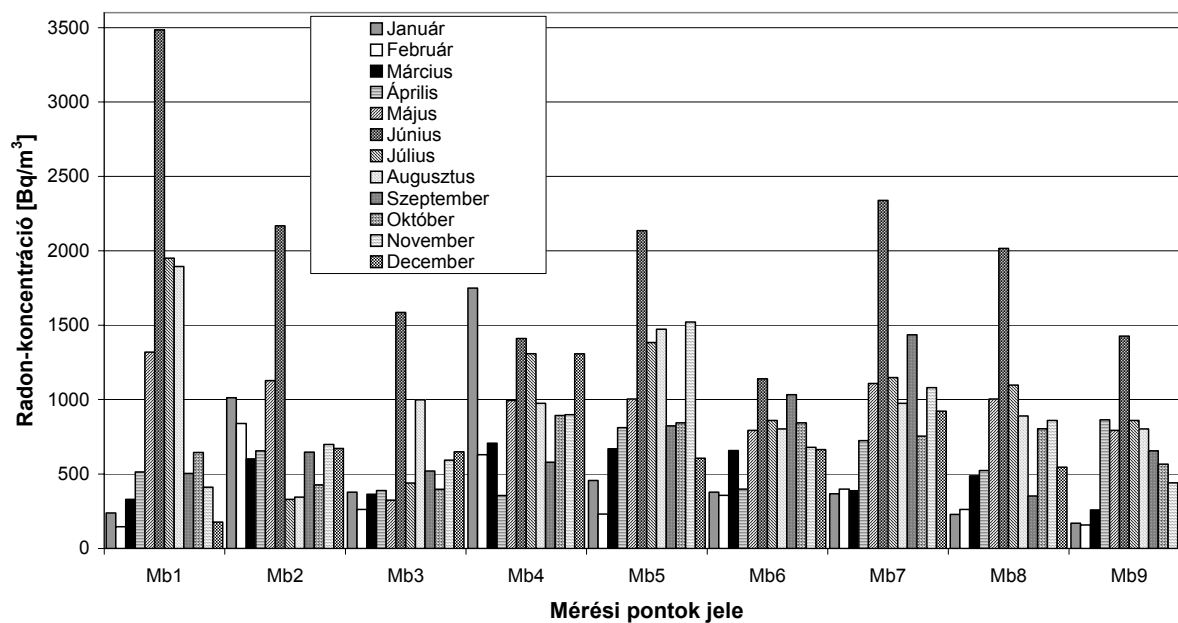
96. Németh Z.: Radiokémiai és izotóptechnikai alapismeretek, Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém; 1996
97. T. Sutej, R. Ilic, M. Najzer: Response of track-etch dosimeters to environmental radon, Nuclear Tracks Radiation Measurement; 15, 547-550, 1988
98. R. J. A. Kappel, G. Keller, R. M. Nickels, U. Leiner: Monte Carlo computation for ^{222}Rn nuclear track detectors; Radiation Protection Dosimetry; 71, 261-268, 1997
99. J. Paradaens, H. Vanmarcke: The usability of wood as a volume trap for the purpose of retrospective radon exposure assessment, Health Physics. 76, 657-663, 1999
100. S. Oberstedt, H. Vanmarcke: Volume traps-a new retrospective radon monitor, Health Physics. 70, 222-226, 1996
101. C. Samuelsson: Radon retrospective measurements, International Congress Series, 1276, 66-71, 2005
102. T. Martínez, J. Lartigue, M. Navarrete, L. Cabrera, P. González, A. Ramírez, V. Elizarraras: Long term and equilibrium factor indoor radon measurements, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 236, 231-237, 1998
103. Pylon Electronics Inc.: Model WLx Working Level Measurement System Instruction Manual, Ottawa, Canada, 1995
104. N. Nyeszmejanov, V. I. Baranov, K. B. Zaborenko, N. P. Rugyenko, J. A. Priszekov: Radiokémiai Praktikum, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1959
105. Eberline Thermo Instrument Systems Inc.: RGM-3 Radon Gas Monitor Technical Manual, Santa Fe, New Mexico, 1993
106. Pylon Electronics Inc.: PYLON Model AB-5 Portable Radiation Monitor Instruction Manual, Ottawa, Canada, 1993
107. J. Plch: Radon Monitor RADIM 5-WP Instruction Manual, Prague, 2002
108. Genitron Instruments GmbH: Portable Radon Monitor „Alpha Guard”, User Manual, Frankfurt, Germany, 1998
109. R. J. A. Kappel, G. Keller, R. M. Nickels, U. Leiner: Monte Carlo computation for ^{222}Rn nuclear track detectors, Radiation Protection Dosimetry; 71, 261-268, 1997
110. J. Plch: Radon Monitor RADIM 3-WR Instruction Manual, Prague, 1997

5. Függelék

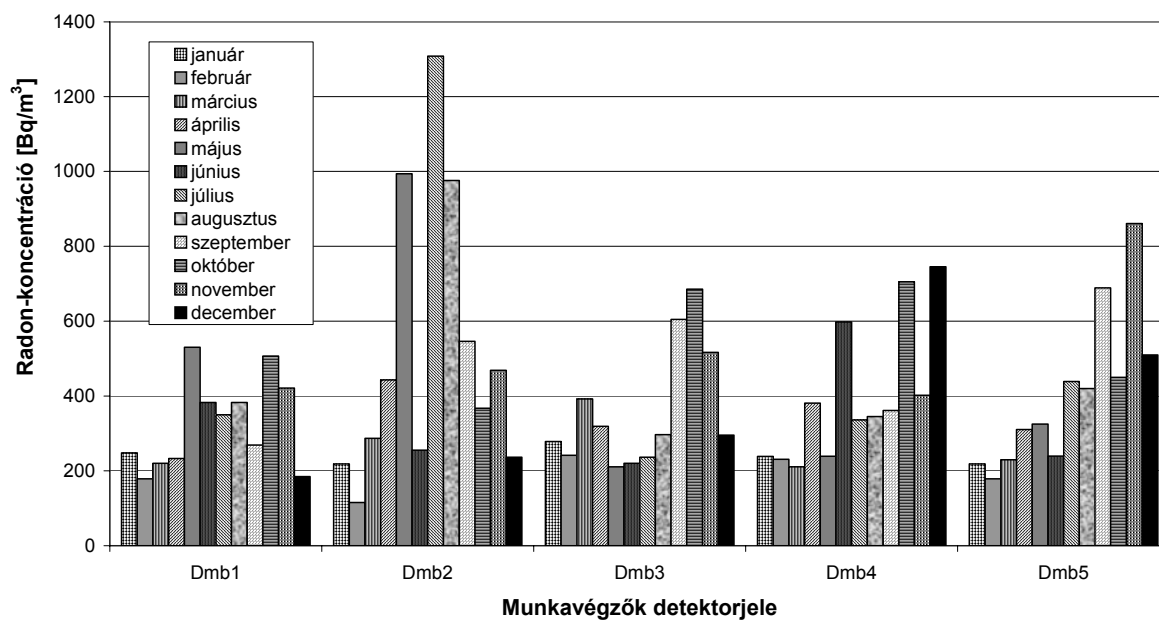
Függelék 1. ^{238}U bomlási sora és jellemzői

Izotóp	Felezési idő	Sugárzás	Energia (MeV)
^{238}U	$4,49 \cdot 10^9$ a	alfa 1 alfa 2	4,149 4,196
$^{234\text{m}}\text{Th}$	24,1 d	béta 1 béta 2 béta 3	0,100 0,101 0,193
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1,17 min	béta	2,29
^{234}U	$2,48 \cdot 10^5$ a	alfa 1 alfa 2	4,722 4,774
^{230}Th	$7,71 \cdot 10^4$ a	alfa 1 alfa 2	4,621 4,688
^{226}Ra	1620 a	alfa	4,785
^{222}Rn	3,82 d	alfa	5,490
^{218}Po	3,05 min	alfa	6,003
^{214}Pb	26,8 min	béta 1 béta 2 gamma 1 gamma2	0,69 0,75 0,295 0,325
^{214}Bi	19,8 min	béta 1 béta 2 béta 3 gamma 1 gamma 2 gamma 3	1,51 1,55 3,28 0,6094 1,1204 1,7647
^{214}Po	162 μs	alfa	7,6871
^{210}Pb	21,3 a	béta 1 béta 2	0,017 0,061
^{210}Bi	5,01 d	béta	1,1610
^{210}Po	138,4 d	alfa	5,3045
^{206}Tl	4,2 min	béta	1,7
^{206}PB	stabil	-	-

Függelék 2. Mangánbányában végzett mérések eredményei



Függelék 2.1. Havi bontásban, egy éven keresztül végzett nyomdetektoros mérések eredményei a mangánbányában



Függelék 2.2. A mangánbánya munkavégzői által viselt nyomdetektorok eredményei havi bontásban

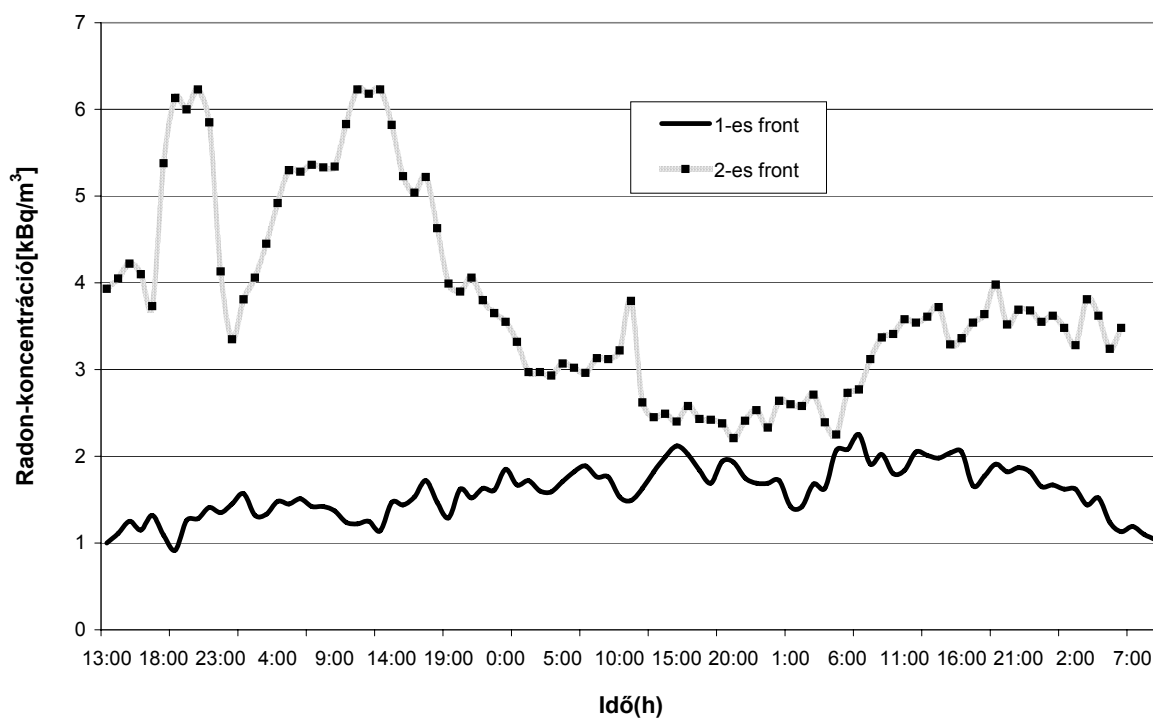
Függelék 2.3. A mangánbánya munkavégzők által munkaidőben hordott nyomdetektorok éves átlaga, minimum, maximum értéke

Mérés helye	Radon-koncentráció [Bq/m ³]		
	Éves átlag	Havi minimum	Havi maximum
Szivattyúkamra Dmb1	326	179	531
Dmb2	518	116	1308
Átlag	422		
Fejtési frontok Dmb3	358	211	685
Dmb4	399	211	746
Dmb5	406	179	861
Átlag	388		

Függelék 3. Az Ármin szénbányában végzett mérések eredményei

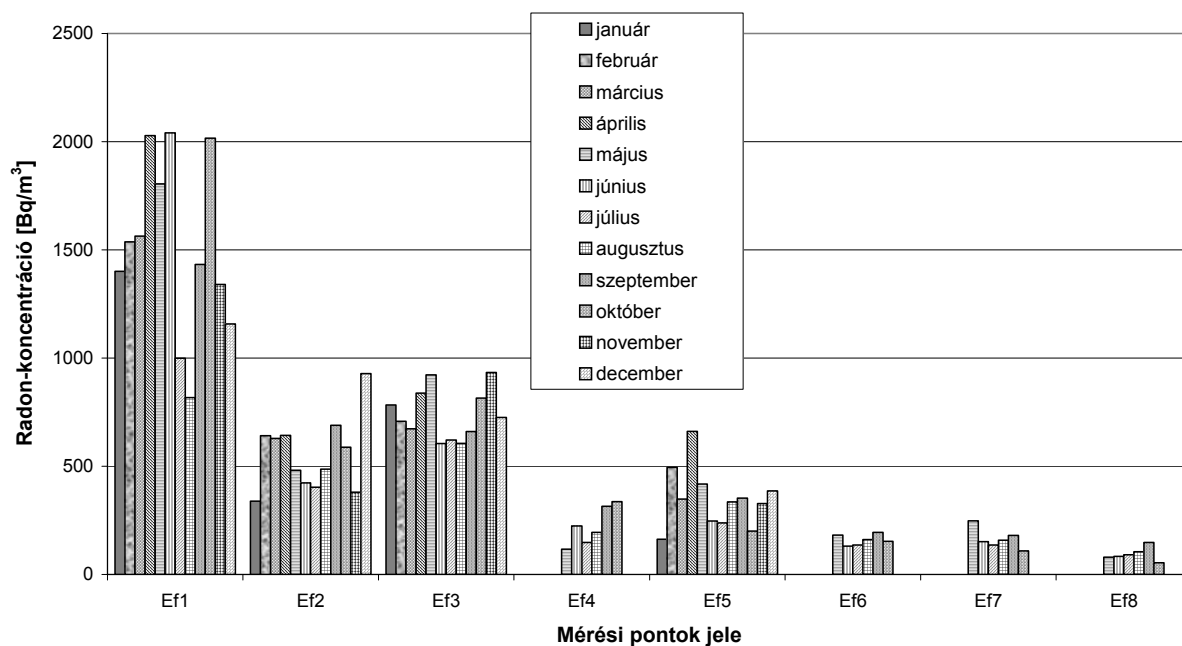
Függelék 3.1. Mintavételes radon mérések eredményei az Ármin szénbányában, március hónapban

Mintavétel helye	Radon-koncentráció [Bq/m ³]
1. Szivattyúkamra 1 m-en	328
2. Szivattyúkamra támfal felett	463
3. Bunkerfej (áthúzó levegő)	74
4. K pont	1131
5. 52-es front 57. egység	1981
6. 52-es front 19. egység	547
7. Keresztvágat	1089
8. Vízvágat	1052
Átlag:	833



Függelék 3.2. Folyamatos radon mérések eredményei az Ármin szénbányában október (1-es front) és február (2-es front) hónapokban

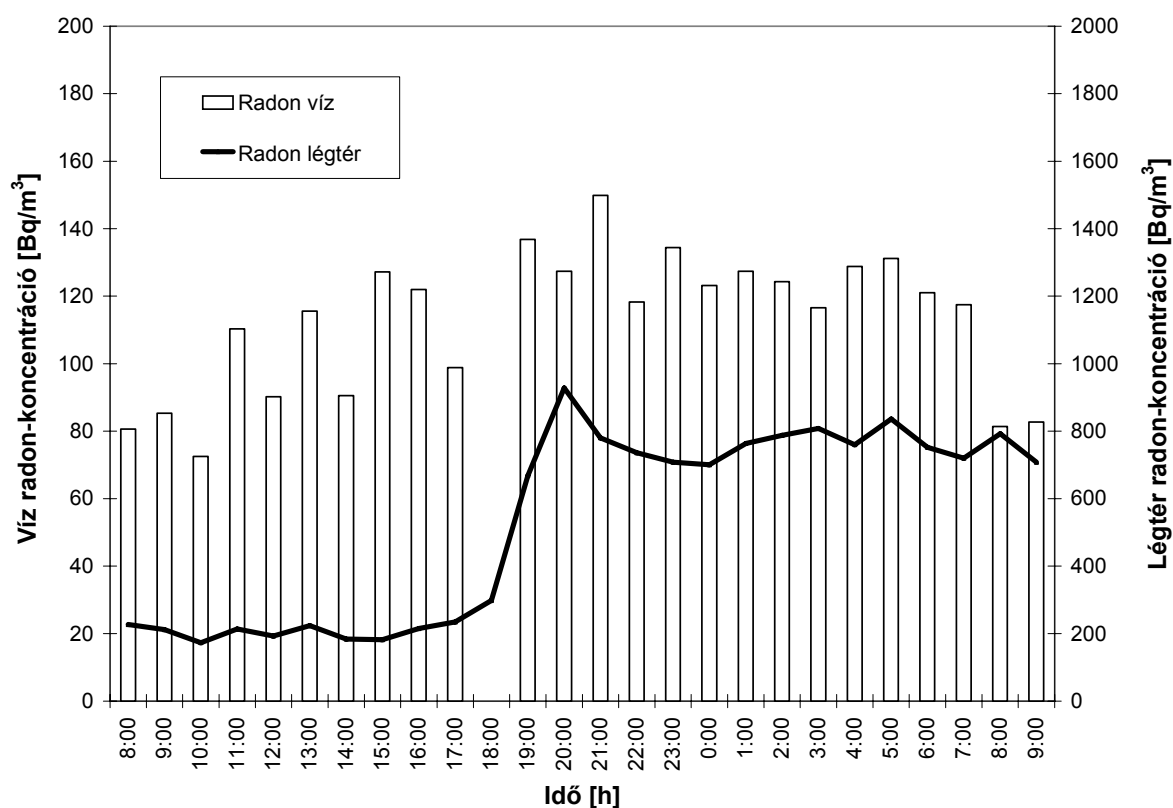
Függelék 4. Az Egri Török Fürdőben végzett mérések eredményei



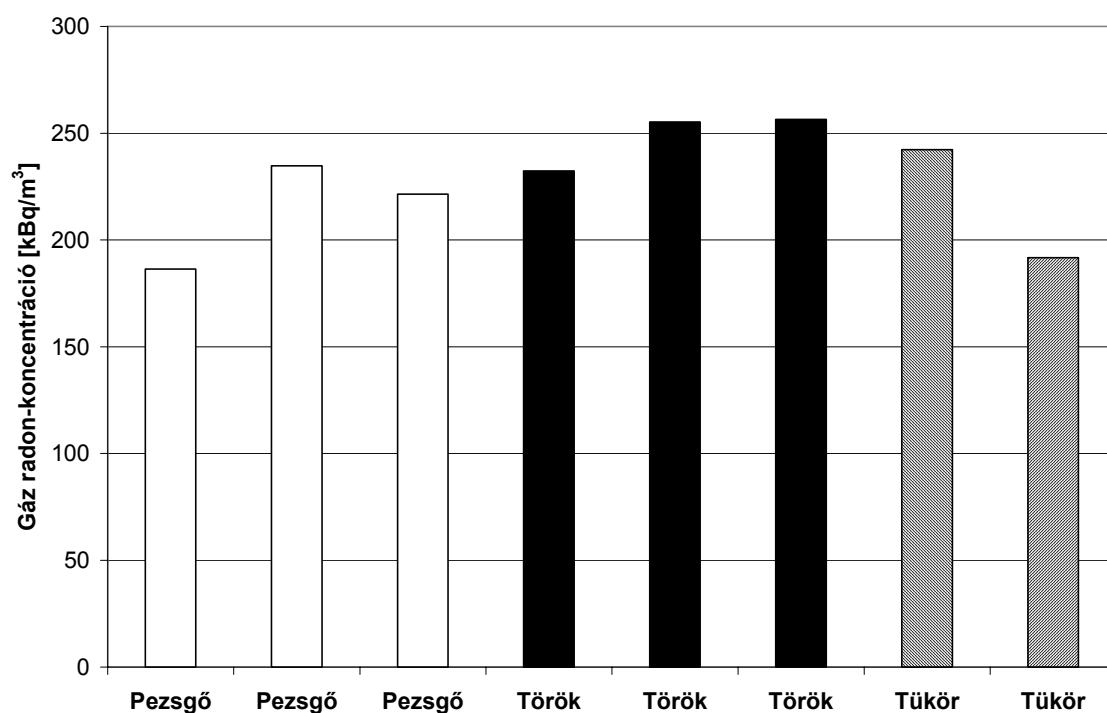
Függelék 4.1. Az Egri Török Fürdőben végzett nyomdetektoros mérések eredményei havi bontásban

Függelék 4.2. Az Egri Török Fürdő területén és környezetében vett vízminták radon-koncentrációja

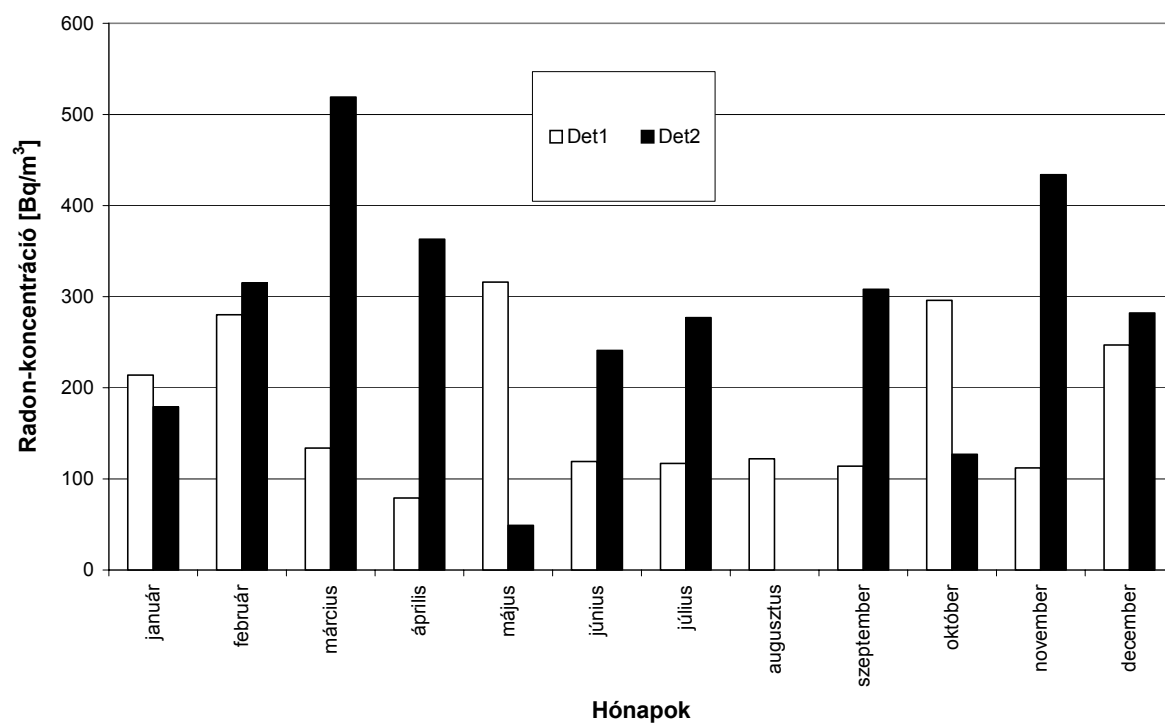
Mintavétel helye	Átlagos radon-koncentráció [Bq/dm ³]	Min-Max értékek [Bq/dm ³]
Pezsgő-medence	96,3	81,6-107,9
Tükör-medence	110,6	87,7-134,6
Török-medence	104,1	82,5-126,1
Súly-medence	19,4	17,6-21,3
Meleg-medence	7,1	7,1-7,2
Kénes-medence	16,3	14,9-19
Egri csapvíz	29,4	23,9-39,2
Úszómedence vize	86,7	65,3-108
József-forrás	91,1	90,3-92



Függelék 4.3. A Török-medence vizének óránkénti radon-koncentráció változása és a légtér radon-koncentrációja



Függelék 4.4. A Pezsgő, Török és Tükör medence feltörő gáz buborékainak radon-koncentrációja

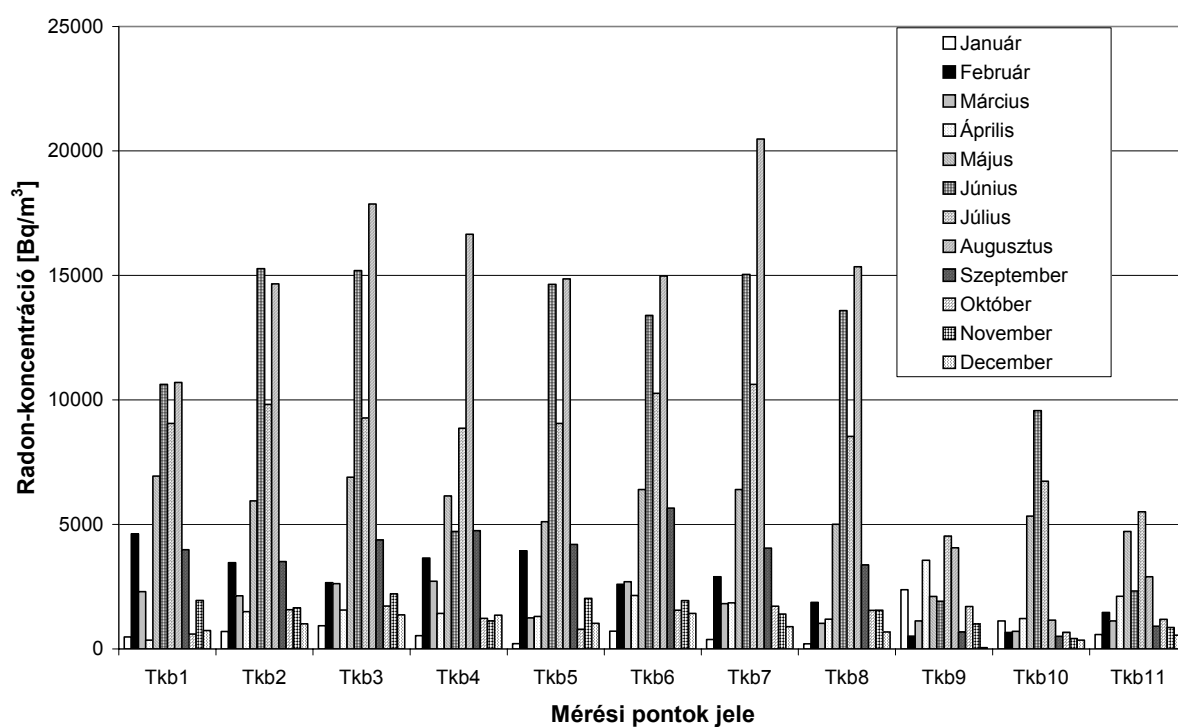


Függelék 4.5. Az Egri Török Fürdőben, munkaidőben végzett nyomdetektoros mérések eredményei havi bontásban

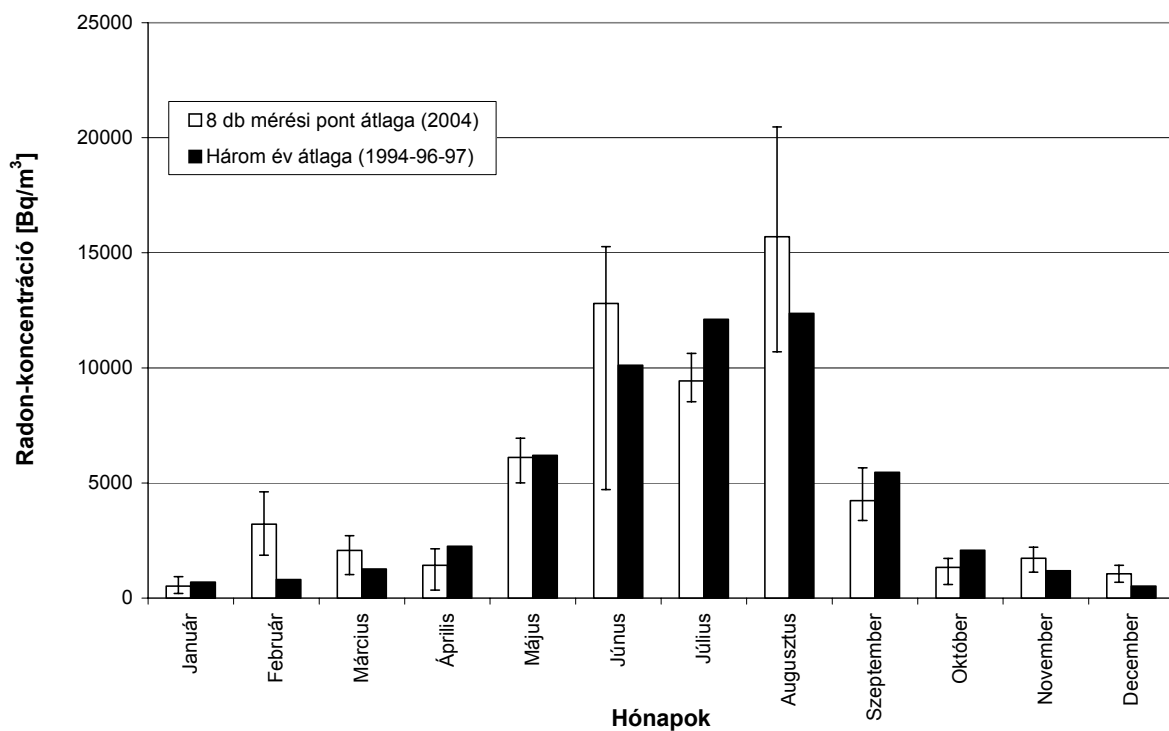
Függelék 4.6. Az Egri Török Fürdő munkavégzői által viselt nyomdetektorok éves átlag, és minimum-maximum eredményei

Mérési pont	Munkaidő alatti éves átlagos radon koncentráció [Bq/m ³]	Min-max. radon koncentráció [Bq/m ³]
Det1	179	79-316
Det2	281	49-519
Éves átlag	230	179-281

Függelék 5. A Tapolcai Kórház-barlangban végzett mérések eredményei

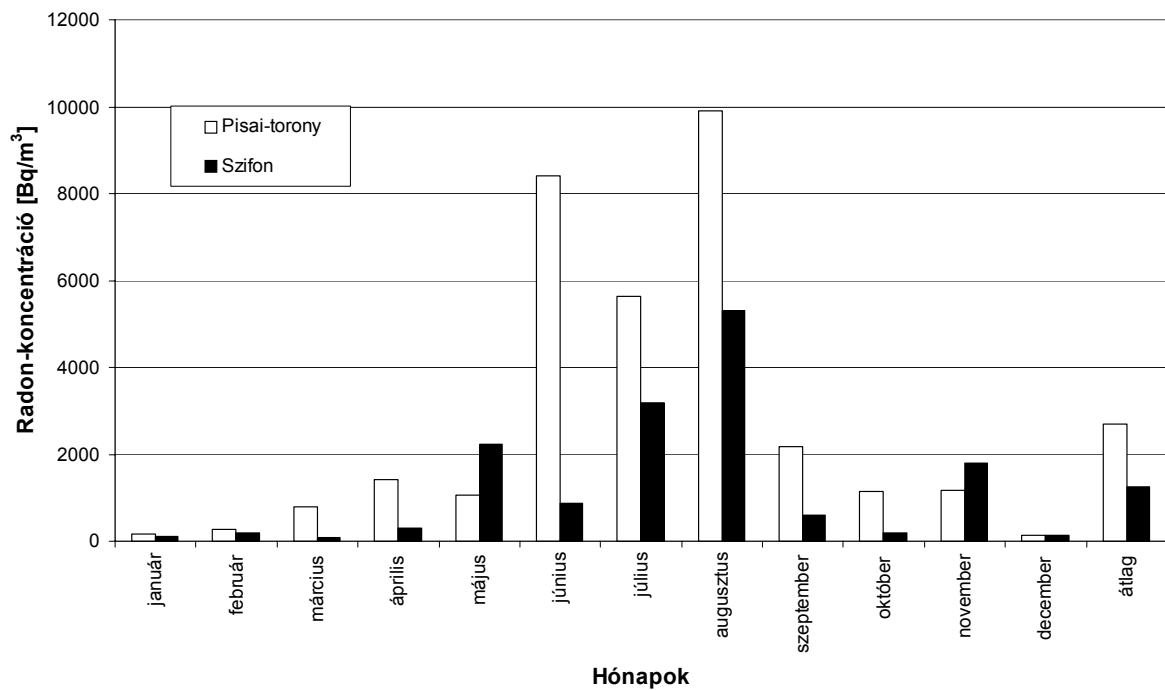


Függelék 5.1. Évi átlagos radon-koncentráció változása a Tapolcai Kórház-barlang 11 különböző pontján, havi bontásban.

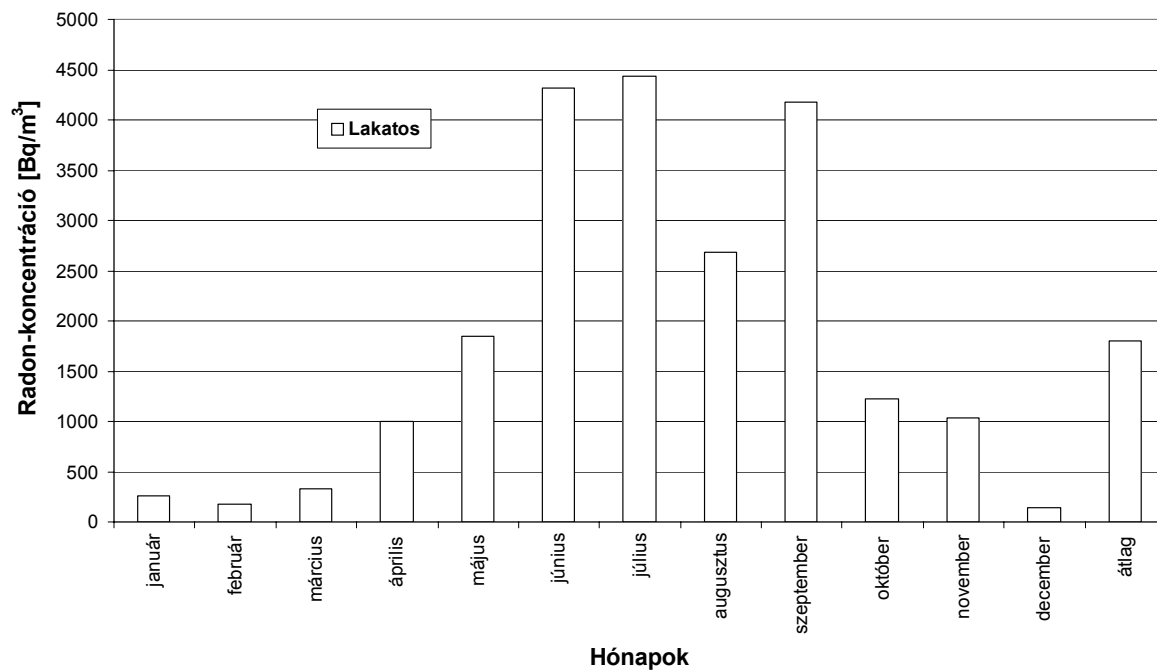


Függelék 5.2. A kezelő helységekből mért radon-koncentrációk átlaga havi bontásban (minimum, maximum értékekkel), és a korábbi 3 éves mérések eredményei a nagyteremben.

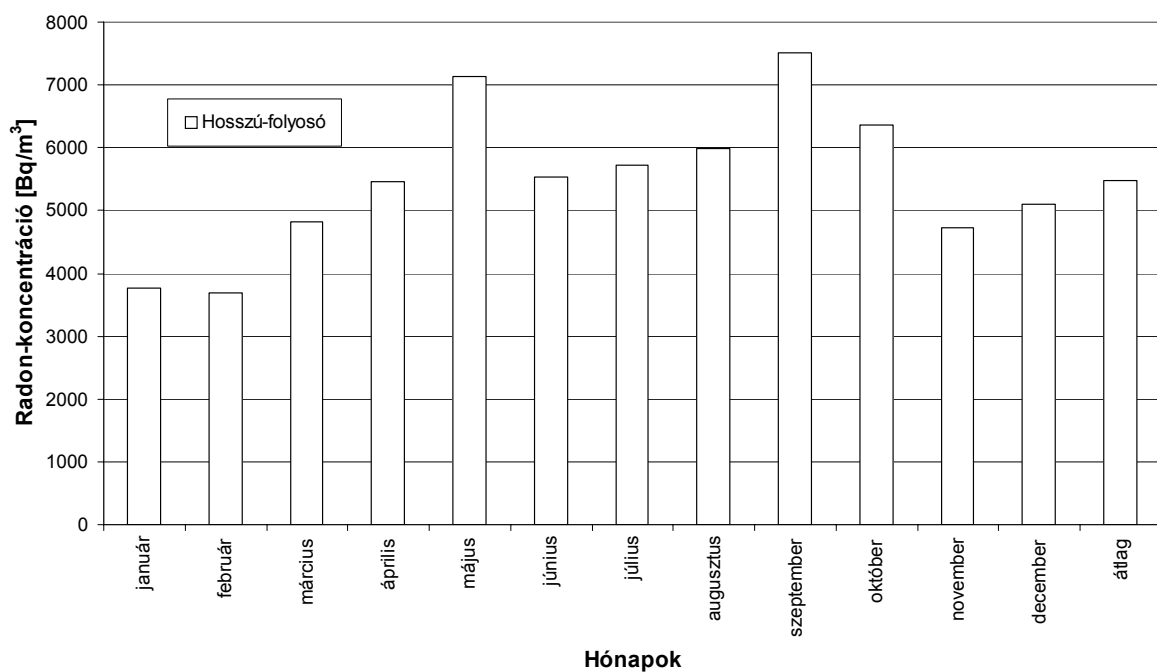
Függelék 6. Idegenforgalmi barlangokban végzett mérések eredményei



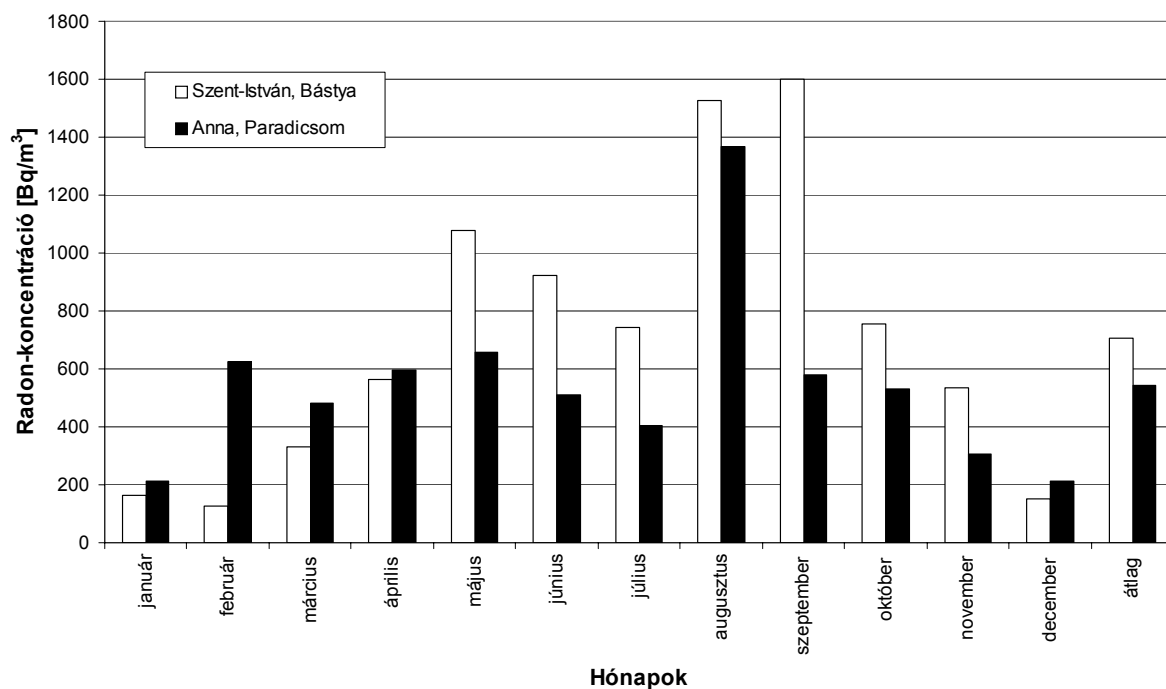
Függelék 6.1. Éves átlagos radon-koncentráció változása havi bontásban az Abaligeti-barlangban, a Pisai-toronymnál, és a Szifonnál



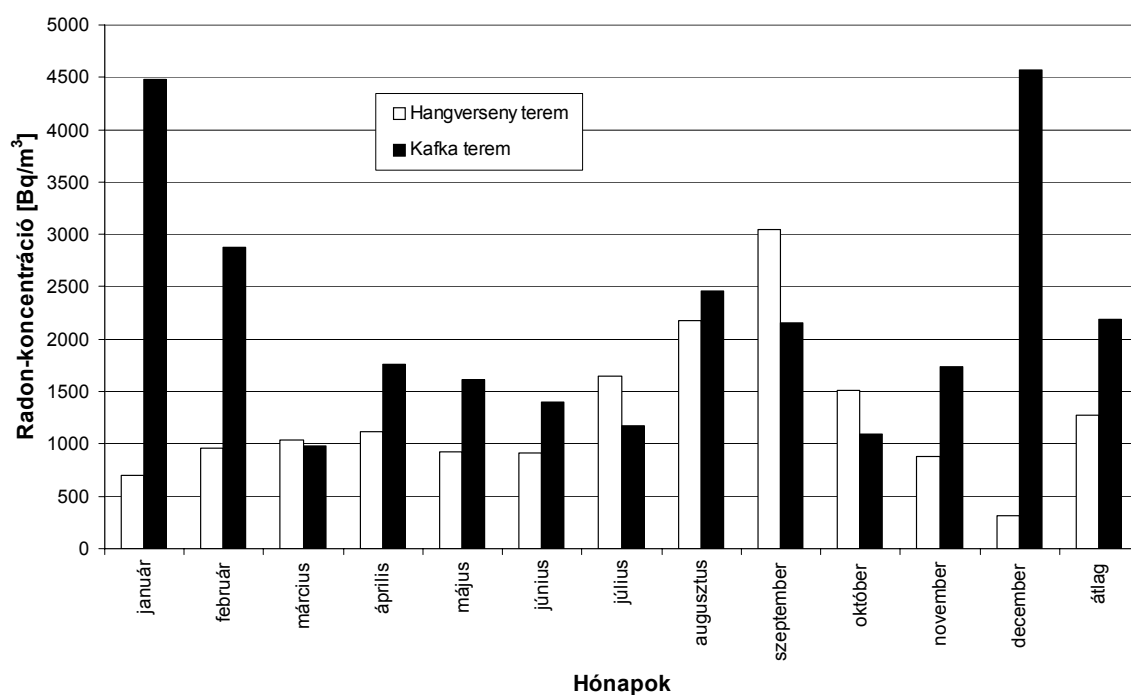
Függelék 6.2. Éves átlagos radon-koncentráció változása havi bontásban a Pálvölgyi-barlangban



Függelék 6.3. Éves átlagos radon-koncentráció változása havi bontásban a Szemlőhegyi-barlangban



Függelék 6.4. Éves átlagos radon-koncentráció változása havi bontásban a Szent István-barlangban, és az Anna-barlangban



Függelék 6.5. Éves átlagos radon-koncentráció változása havi bontásban a Baradla-barlang Hangverseny és Kafka teremében

Függelék 7. Bakonyi-barlangokban végzett radon mérések összefoglalása

Barlang megnevezése	Összes mérési idő [nap]	Átlagos radon-koncentráció [Bq/m ³]	Folyamatos mérések hónapja	Folyamatos mérés időtartama [nap]	Átlagos radon-koncentráció [Bq/m ³]
Szentgáli-Kőlik	49	10478	Május-Június	8	6996
			December	7	19291
			Október-November	34	9553
Csatár-hegyi-barlang	8*	3076	-	-	-
Ménesakolárki 1-es számú víznyelő barlang	15	11896	Augusztus	7	23712
			Február	8	80
Bándi -rókalik	20	9539	Szeptember	20	9539
Zsófia pusztai víznyelő	23	8989	Szeptember	23	8989
Som-hegyi Rókalyuk	11	233	Január	6	46
			Augusztus	5	419
Kab-hegyi Baglyas-barlang	15	7704	Március	8	4282
			November	7	11126

*[hónap]

6. Tézisek

- 1. Bányákban és barlangokban az éves átlagos radon-koncentráció meghatározása egy teljes év vizsgálatát követeli meg, mivel nemzetközi gyakorlatban elterjed, rövidebb idejű (1-3 hónap) mérésekből származó értékekből az éves átlagot megbízhatóan becsülni nem lehet**
- 2. Bányákban, barlangokban és gyógyfürdőben a különböző (munkafolyamatú) területeken jelentősen eltérő radon-koncentrációk alakulnak ki - minden területet vizsgálni kell, ahol a munkavégzők huzamosabb ideig tartózkodnak munkaidejük alatt. A mérési helyeket általánosan kijelölni nem lehet, minden eset egyedi elbírálást igényel.**
- 3. Munkaidőben a mesterséges és a természetes szellőzésnek köszönhetően jelentősen (akár kétszeres mértékben) eltér a radon éves átlagos koncentrációja a teljes év átlagához képest. Emiatt a dózisbecsléshez a munkaidő alatt mért radon-koncentráció értéket kell felhasználni**
- 4. Különböző munkaterületeken az egyensúlyi faktor az ajánlott értékhez képest (0,4) jelentősen eltér (0,21-0,71), ezért földalatti munkaterületek esetén mindenképpen törekedni kell a meghatározására.**

7. Theses

- 1. A year-long survey is required to determine the annual average radon concentration in mines and caves, as the annual average value cannot be assessed from values originating from shorter period (1-3 months) measurements. This spread conforms to international practice.**
- 2. Significantly different radon concentrations are generated in different areas (with different work processes) in mines, caves and medicinal baths – where workers spend longer periods during working hours, all areas should be examined. Points of measurement cannot be generally located and each individual case needs a specific assessment.**
- 3. Due to the artificial and natural airflow during working hours, the annual average radon concentration significantly differs from the average value for the whole year. Therefore, the values of radon concentration measured during working hours should be used for dose assessment.**
- 4. In different workplaces, the equilibrium ratio significantly differs (0.21-0.71) from the recommended value (0.4). Therefore, in the case of underground workplaces the calculation of these should be aimed at.**

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni a Pannon Egyetem Radiokémia Tanszék minden dolgozójának, hogy erejükhez mérten támogatták és segítették munkámat.

Ezen túlmenően külön köszönetet szeretnék mondani *Dr. Somlai János* egyetemi docens úrnak a témavezetésben és a szabad kutatói gondolkodásban nyújtott nélkülözhetetlen segítségért, és *Dr. Kovács Tibor* egyetemi adjunktus úrnak a mindig biztató és mindig új tüzeket felélesztő hozzáállásért.

Köszönet illeti a Pannon Egyetem Környezettudományi doktori iskolájának minden tagját, akik folyamatos figyelemmel kísérik minden hallgatójuk fejlődését.

Köszönet *Dr. Hakl Józsefnek* az MTA Atommagkutató Intézet, Elektronspektroszkópai Osztály tudományos főmunkatársának a kutatómunkámban nyújtott segítségért és a dolgozat kritikus átolvasásáért.

Köszönet *Dr. Dezső Zoltánnak* a DE-ATOMKI Közös Környezetfizikai Tanszék tudományos munkatársának a kutatómunkámban nyújtott támogatásért.

Köszönet *Gorjánácz Zoránnak* a MECSEKÉRC ZRT. Radiometriai Laboratórium vezetőjének a műszeres segítségért.

Köszönet *Dr. Nagy Katalinnak*, a Heves Megyei Markhot Ferenc Reumaosztály Főorvosának a rendületlen kitartásért, és bizalomért.

Köszönet *Dr. Szabó Tibornak* a Tapolca Kórház Barlang Therápiás Osztály volt főorvosának a biztató együttműködésért.

Köszönet *Vigh Tamásnak* a Mangán Kft. Felelős műszaki vezetőjének a gyümölcsöző és remélhetőleg minél tovább tartó együttműködésért.

Köszönet *Schäfer István Zsoltnak* a Bakonyi Barlangász Szövetség elnökének és a szövetség minden tagjának a támogatásért és az együttműködésért.

Köszönet *édesanyámnak* a hitért és a fényért.

Köszönet *édesapámnak* a kitartásért.

Köszönet a Békés megyeieknek.

Köszönet *Kocsis Márta* középiskolai osztályfőnökömnek, aki nélkül soha nem mentem volna egyetemre.

Köszönet *Vesztergom János* főiskolai adjunktus úrnak a biztatásért.

Köszönet *Pásztor István* okleveles környezetmérnök úrnak az együtt küzdött egyetemi éveikért.

Köszönet *Szabó Balázs* okleveles környezetmérnök úrnak, amiért összes vadhajtasú gondolatomnál velem volt, he kellett hóban, kötélhez fagyott ujjakkal, és ha kellett akár a víz alatt.

Köszönet *György Adrienn* középiskolai némettanárnőnek biztató támogatásáért.