

ZVD Delovno poročilo

ZVD-DP-1002/98

**Koncentracije aktivnosti radona in
radonovih potomcev v termalnih
zdraviliščih v R Sloveniji**

Ljubljana, januar 1997

Zavod R Slovenije za varstvo pri delu, Ljubljana

Ljubljana, 24.3.1998

**Koncentracije aktivnosti radona in radonovih potomcev v
termalnih zdraviliščih v R Sloveniji**

Naročnik: Ministrstvo za okolje in prostor
Uprava RS za jedrsko varnost
Pogodba št. 2513/96-000013 , z dne 29.10.1996

Izvajalec: Zavod RS za varstvo pri delu, Ljubljana

Nosilec naloge na ZVD: mag. Miran Kanduč, dipl. ing.

**Ovrednotenje meritev in
urejanje poročila:** Peter Jovanovič, ing. fiz.

Povzetek

Med delovnimi mesti je mnogo takih, kjer so možne povišane specifične aktivnosti ali koncentracije aktivnosti naravnih radioaktivnih izotopov, med katerimi je najpomembnejši radon. Pričujoča študija obravnava radon v zdraviliščih s termalnimi vrelni. Meritve so bile opravljene v 10 zdraviliščih in 2 termalnih kopališčih (tabela 1).

Meritve koncentracije radona in njegovih potomcev v zdraviliščih s termalnimi kopelmi so prikazane v tabeli 4. Povprečne mesečne vrednosti so se gibale med 20 - 170 Bq/m³, trenutne vrednosti, merjene z merilnimi instrumenti za kontinuirno merjenje pa med 25 Bq/m³ in 250 Bq/m³. Ravnovesne ekvivalentne koncentracije potomcev so se gibale med 4 Bq/m³ in 110 Bq/m³. Najvišje vrednosti so bile izmerjene v bazenu za terapijo v Zdravilišču Dobrna in v prostoru s Hubbardovo kopeljo v Zdravilišču Laško. Koncentracije nevezanih potomcev radona so se gibale med $f_p = 0.02$ in $f_p = 0.16$, povprečna vrednost $f_p = 0.06$. Faktor ravnovesja se je gibal med 0.09 in 0.89, povprečni za vsa zdravilišča je bil 0.38.

Pri oceni doz predpostavili, da so povprečne letne vrednosti koncentracij radona in potomcev enake izmerjenim in da opravijo zaposleni (medicinsko osebje) na delovnem mestu 1700 ur na leto. Obenem smo predpostavili, da se povprečna koncentracija nevezanih potomcev giblje med $f_p = 0.05$ in $f_p = 0.1$. Prejete doze za zaposlene so prikazane v tabeli 3.

V Zdravilišču Dobrna je ocenjena doza v območju med 2 - 5.3 mSv, v Zdravilišču Laško pa med 1 - 2.5 mSv, odvisno od modela. V vseh ostalih zdraviliščih so prejete doze nižje od 1 mSv/leto.

Smatramo, da bi bilo smotrno nadaljevati meritve v Zdravilišču Dobrna in Zdravilišču Laško (mogoče kvartalno) za obdobje enega leta in obenem ugotoviti realni čas zadrževanja zdravstvenega osebja v prostorih s povišanimi koncentracijami radona/potomcev. V vseh ostalih zgoraj omenjenih termalnih zdraviliščih niso potrebne niti kontrolne meritve niti osebna dozimetrija.

Predlagamo, da se občasno opravijo meritve koncentracije radona v tistih zdraviliščih, kjer se uporabljajo mineralne vode za pitje (Rogaška, Atomske Toplice...).

1. Uvod

Med delovnimi mesti je mnogo takih, kjer so možne povišane specifične aktivnosti ali koncentracije aktivnosti naravnih radioaktivnih izotopov, med katerimi je najpomembnejši radon. To so rudniki, turistične jame, zdravilišča s termalnimi vrely, posamezni obrati pri pridobivanju nafte ali zemeljskega plina, polnilnice pitnih in mineralnih vod in drugi. V tej raziskavi bomo obravnavali radon v zdraviliščih s termalnimi vrely.

V Sloveniji imamo več kot 20 zdravilišč in kopališč s termalnimi ali mineralnimi vrely, katerih temperature se gibljejo od 20 °C do preko 60 °C. Večina vrelcev in zdravilišč leži na geoloških prelomnicah, kjer je termalna voda lažje pridrla na površje. Kjer to ni bilo mogoče, so si pomagali z vrtinami, ki segajo do globine nekaj 100 m, nekatere pa tudi preko 1000 m. Termalne in mineralne vode v zdraviliščih se uporabljajo predvsem za rehabilitacijo po težjih boleznih ali telesnih poškodbah, v zadnjem času pa vse bolj tudi kot osvežilne kopeli.

V evropskih državah (Italiji, Avstriji, Franciji, Nemčiji, Rusiji, Bolgariji,...), pa tudi v ZDA in na Japonskem je mnogo zdravilišč s termalnimi vrely. V nekaterih izmed njih izvajajo balneoterapijo, to je terapija, pri kateri z namakanjem, vdihavanjem ali pitjem vode vnašajo v telo velike količine radona. Na tak način najpogosteje blažijo revmatske bolečine, ker se radon zbira v obolelih sklepkih in pri razpadu greje okolno tkivo. Imenujejo jih tudi »radon spa - radonske toplice« (1, 2, 3, 4, 5, 6,7). Koncentracije aktivnosti radona v radonskih toplicah segajo od nekaj 10 kBq/m³ do nekaj 100 kBq/m³, na Japonskem so izmerili celo 437 kBq/m³.

Zaposleni v zdraviliščih s termalnimi vrely so zaradi visokih koncentracij aktivnosti radona in potomcev, ki jih pri dihanju vnašajo v organizem, izpostavljeni sevanju.

Prejete doze za zaposlene v radonskih toplicah zaradi inhalacije radona so bile ocenjene na 10 mSv do preko 100 mSv na leto (5), za paciente pa od 0.1 mSv do 2 mSv (letna prejeta doza zaradi naravnega sevanja je 2.4 mSv). V skladu s priporočili v ICRP 57 (8,9,) in osnovnimi standardi za varstvo pred sevanji v državah Evropske skupnosti (10) se morajo v teh zdraviliščih izvajati meritve in ocenjevati sevalna obremenjenost zaposlenih, predvsem medicinskega osebja, ki sodeluje pri terapiji. Po teh priporočilih je zgornja letna meja za zaposlene (4 WLM), kjer pa

se pričakuje, da bodo presežene 3/10 letne dovoljene doze, je potrebno uvesti sistem osebne dozimetrije.

V Sloveniji je Institut Jožef Stefan izvajal prve meritve koncentracije aktivnosti radona v vodi v 23 zdraviliščih s termalnimi in mineralnimi vreli v letih od 1972-75 (11), nato pa še posebej leta 1984 v Atomskih Toplicah v Podčetrtku (12) in leta 1987 v zdravilišču Radenci (13), kjer so bile izmerjene tudi koncentracije aktivnosti radona v zraku v prostorih, namenjenih terapiji. Koncentracije aktivnosti radona v vodah so se gibale od nekaj kBq/m³ do 70 kBq/m³, v zraku pa od 10 Bq/m³ do 200 Bq/m³. Koncentracije aktivnosti radona v zraku tik nad vodo v kopelih za terapijo so dosegale tudi nekaj kBq/m³, vendar le v času točenja vode, potem pa so se koncentracije aktivnosti radona močno znižale, saj se je radon razpršil v prostor in okolico (13).

2. Cilji raziskave

Osnovni cilj pričujoče raziskave je bil posnetek stanja koncentracije aktivnosti radona v termalni vodi, namenjeni terapiji ter koncentracije aktivnosti radona in njegovih razpadnih produktov v zraku v prostorih, ki se uporabljajo v zdravstvene namene v termalnih zdraviliščih. Na podlagi pridobljenih podatkov smo ocenili sevalne obremenitve zaposlenih zaradi inhalacije radona in njegovih potomcev (14).

3. Metodologija vzorčevanja in metode merjenja

3.1. Metodologija vzorčevanja

V večini zdravilišč s termalnimi in mineralnimi bazeni in kopelmi črpajo vodo iz enega ali več vrelov v skupni zbiralnik. Kjer je potrebno, se voda v zbiralnih bazenih filtrira, odvaja ogljikov dioksid ali dovaja klor (Zdravilišče Laško, Terme Zreče). Odtod vodijo vodo v kopalne bazene in kadi, namenjene zdravstveni uporabi. V nekaterih zdraviliščih voda izvira v zdravilišču samem (Zdravilišče Dobrna) ali pa jo vodijo do kopalnih bazenov in kadi po ceveh direktno iz vrelov.

Predvideli smo kontinuirno merjenje koncentracije aktivnosti radona v zraku v zbiralnih bazenih, kopelih in kopalnih bazenih. Meritve koncentracije aktivnosti radonovih potomcev v zraku smo predvideli v enem izmed prostorov, namenjenih terapiji. To so bile Hubbardove kopeli, mineralne kopeli, termalne kopeli ali biserne kopeli, odvisno od zdravilišča.

Termalne vode za določanje koncentracije aktivnosti radona v vodi smo vzorčili iz kadi, kjer se izvaja terapija in iz zbiralnega bazena, kjer je bilo to mogoče. Vodo smo vzorčili v 0.5 L posode iz polietilenske plastike, jih dobro zatesnili in prenesli v merilni laboratorij. Detektor GPGe smo na to geometrijo umerili s pomočjo standardne raztopine (Amersham) ^{226}Ra .

Glede na naravo dela v zdraviliščih in tehnične možnosti smo izvajali meritve na lokacijah, kjer to ni preveč motilo zaposlenih oziroma obiskovalcev. Problem so predstavljali predvsem bazeni za kopanje oziroma terapevtski bazeni, kjer ni bilo električne napeljave, niti možnosti postavitve instrumentov. V nekaterih zdraviliščih so se detektorji za merjenje koncentracije aktivnosti radona izgubili, meritev pa nismo ponavljali. Meritve so bile opravljene v 10 zdraviliščih in 2 termalnih kopališčih, predstavljenih v tabeli 1.

Tabela 1. Seznam zdravilišč in termalnih kopališč, kjer so bile opravljene meritve

1. Zdravilišče Radenska Radenci
2. Zdravilišče Atomske Toplice
3. Terme Čatež
4. Zdravilišče Moravske Toplice
5. Toplice Dobrna - Termalno zdravilišče
6. Zdravilišče Laško
7. Zdravilišče Šmarješke Toplice
8. Zdravilišče Dolenjske Toplice
9. Terme Zreče
10. Zdravilišče Rogaška
11. Termalno kopališče - Terme Snovik v Tuhunjski dolini
12. Termalno kopališče - Forum Terma Rimske Toplice

3.2. Metode merjenja

3.2.1. Meritve koncentracije aktivnosti radona in radonovih potomcev v zraku

Za integralne meritve koncentracije aktivnosti radona v zraku (v nadaljnjem koncentracije) smo uporabljali dve pasivni metodi, (i) metodo z ogljenimi adsorberji, s katerimi smo izmerili dvo- ali tridnevne povprečne koncentracije radona in (ii) metodo z detektorje sledi, s katerimi smo izmerili povprečno koncentracijo radona za obdobje nekaj tednov.

Meritve časovnega poteka koncentracij radona za obdobje več dni smo izvajali z merilnimi instrumenti za kontinuirno merjenje, EQF-3020 in RTM-2010, SARAD, Nemčija. Prvi merilni instrument je podajal rezultate meritev na vsaki 2 uri, drugi pa vsako uro.

Meritve radonovih potomcev v zraku smo določali z merilnima instrumentoma za kontinuirno merjenje WLM-30, Scintrex, Kanada (48 meritev dnevno) in EQF-3020, SARAD, Nemčija (12 meritev dnevno), in sicer smo določali časovni potek koncentracije aktivnosti radonovih razpadnih produktov (v nadaljnjem koncentracije potomcev) v zraku.

Ogljeni adsorberji so okrogle 3 cm visoke kovinske posodice s premerom 10 cm, napolnjene z aktivnim ogljem, na katerega površino se adsorbirajo atomi radona. Ko posodico zapremo, razpada radon v kratkožive radioaktivne izotope in po 3 urah je doseženo radioaktivno ravnovesje med radonom in njegovimi potomci. Z visokoločljivo spektrometrijo gama določimo intenziteto energijskih črt gama sevanja in odtod izračunamo koncentracijo radona v zraku.

Detektorji sledi so okrogle ali kvadratne plastične folije, velike približno 3 cm (običajno CR-39 ali LR-115), vstavljene v ustrezno ohišje s papirnatim filtrom (difuzijska celica). Ker je radon inertni plin, njegovi atomi lahko difundirajo v ohišje skozi filter, medtem ko radonovi potomci - običajno pozitivno nabiti - ostanejo na filteru. Difundirani radon v celici razpada na potomce, pri čemer oddajo delce alfa, ki v foliji naredijo mikronsko sled. Po končani kemijski obdelavi (jedkanju) se pod mikroskopom prešteje število sledi na mm^2 , ki je premosorazmerno integralni koncentraciji radona v zraku.

Merilna instrumenta za radon EQF-3020 in RTM-2010 imata vgrajeno celico s polprevodniškim detektorjem sevanja alfa (15,16). Črpalka s kontroliranim pretokom črpa zrak v celico skozi filter, ki preprečuje, da bi radonovi potomci vstopali v celico. V celici radon razpada, delci alfa, ki pri razpadu odletijo iz jedra, pa se zaradi elektrostatičnega potenciala (1500 V) zbirajo na površini detektorja, ki jih zaganava in šteje. Odtod se s pomočjo mikroprocesorja izračunava koncentracija radona.

Merilni instrument EQF-3020 ima poleg celice za merjenje koncentracije radona vgrajen še en detektor sevanja alfa za merjenje koncentracije radonovih potomcev. Črpalka s kontroliranim pretokom 6 minut črpa zrak skozi filter. Radonovi potomci, ki se na filtru ujamejo, oddajajo pri razpadu delce alfa s specifično energijo, ki jo detektor zazna. Na osnovi modificirane metode Markova se izračuna skupna koncentracija radonovih potomcev (^{218}Po in ^{214}Po) in ekvivalentna ravnovesna koncentracija radonovih potomcev (PAEC).

Merilni instrument WLM-30 se uporablja za kontinuirno merjenje koncentracije radonovih potomcev. Ima vgrajen detektor sevanja alfa. Črpalka s kontroliranim pretokom 1 L/min črpa zrak skozi filter. Radonovi potomci, ki se na filtru ujamejo, oddajajo pri razpadu delce alfa s specifično energijo, ki jo detektor zazna. Instrument ima 256 kanalni analizator, ki sicer loči energije posameznih potomcev, vendar je metoda merjenja in izračuna taka, da so rezultati meritev podani z ekvivalentno ravnovesno koncentracijo radonovih potomcev (v WL, ki je stara enota za PAEC).

3.2.2. Meritve koncentracije aktivnosti radona v vodi

Koncentracijo radona v vodi smo merili na dva načina, (i) z metodo visokoločljive spektrometrije gama in (ii) z merilnikom sevanja alfa RTM-2010.

Pri razpadu radona nastajajo poleg kratkoživih sevalcev alfa tudi kratkoživi sevalci sevanja gama. To sta izotopa svinca in bizmuta z energijami 295.4 keV, 352 keV in 609.4 keV, katerih intenzitete določimo s spektrometrom, podobno kot pri ogljenih adsorberjih. Ob poznanih izkoristkih detektorja za vodo izračunamo koncentracijo radona.

Pri drugem načinu merjenja smo z merilnim instrumentom, ki je bil umerjen s strani proizvajalca, določali količino radona v vzorcu vode z metodo difuzije (17,18). V plastično posodo z volumnom 2 L, v kateri je navita cevka iz propilena (4 m dolga, zunanji premer 7.5 mm), smo nalili termalno vodo. Cevka je tvorila zaprti krog z merilno celico. Radon, ki je difundiral iz vode v cevko, smo črpali skozi merilno celico, kjer je razpadal, kar smo zaznavali z detektorjem sevanja alfa in odtod izračunali koncentracijo radona v vodi.

4. Rezultati meritev

4.1. Meritve koncentracije aktivnosti radona in potomcev v zraku

4.1.1. Zdravilišče Atomske Toplice, Podčetrtek

V zdravilišču uporabljajo termalno vodo, ki priteka na površje ob geološki prelomnici. Ta izvir ima temperaturo 30-37 °C. V 50. letih tega stoletja so izdatnost izvirov povečali z dvema novima izvirova na globini 300 m in 500 m s temperaturo 41 °C in 43 °C. Termalno vodo črpajo iz 800 m oddaljenega zbiralnega bazena, v katerem se zbirajo vode vseh treh vrelecev. Vodo uporabljajo tudi za pitje.

Meritve smo izvajali od 21.-24.1.1997. Koncentracijo radona smo merili v prostorih, v katerih se izvaja hidroterapija. Kasete z aktivnim ogljem (oglene adsorberje) smo postavili v tri prostore, hidro I, hidro II in hidro V. Povprečne tridnevne koncentracije radona so bile 50 Bq/m³, 20 Bq/m³ in 45 Bq/m³, zapovrstjo. Povprečna koncentracija radona v prostoru Hidroterapija I, merjena z detektorji sledi v obdobju od 21.1.1997 do 25.2.1997, je bila 40 Bq/m³.

Časovni potek koncentracije radona in radonovih potomcev smo spremljali v prostoru Hidroterapija I (slika 1.a in 1.b). Najvišje koncentracije radona so bile izmerjene v dopoldanskem času, ko se je izvajala terapija in so menjali vodo v kadeh. Gibale so se v območju od 20 Bq/m³ do 170 Bq/m³. Povprečna vrednost v času merjenja je bila 43 Bq/m³, povprečni faktor ravnovesja pa 0.35. Iz slike se lepo vidi, da se pri točenju vode v kadi zelo povečajo koncentracije radona v zraku in se po zaprtju hitro približajo začetnim vrednostim (1-2 uri).

Koncentracije radonovih potomcev so se gibale od 4 - 22 Bq/m³ EEC-Rn (20 nJ/m³ do 130 nJ/m³). Povprečna vrednost ekvivalentne ravnovesne koncentracije radonovih potomcev v času merjenja je bila 14 Bq/m³.

Merili smo tudi relativno vlažnost in temperaturo v prostoru Hidroterapija I. Temperatura se je gibala v območju od 23 °C do 29 °C, relativna vlažnost pa se je ob izvajanju terapije (točenju vode) povišala do 82%, po prenehanju pa padla na 40 %.

4.1.2. Zdravilišče Radenska Radenci

To je eno najbogatejših in najkakovostnejših slatinskih območij v Sloveniji. Na avstrijski in slovenski strani so doslej zajeli 22 mineralnih vrečev. Naravna osnova vrečev so bližina magme in številne razpoke v zemeljski skorji, skozi katere izparevajo prozi površju vodne pare in ogljikov dioksid. Pod površjem se kondenzirajo in mešajo s podtalnico. Zdravilišče Radenci ponuja veliko naravnih zdravilnih sredstev, kislo ogljikovo mineralno vodo, termalno vodo in žveplov peloid.

Meritve smo izvajali v času od 15.-17.1.1997. Koncentracije radona v zraku smo merili v sobah z mineralno kopaljo št. 1 in 2 in v pokritem bazenu za kopanje. Povprečna dvodnevna koncentracija v sobah z mineralno kopaljo je bila 20 Bq/m³ in 25 Bq/m³, v kopalniškem prostoru pa 50 Bq/m³. Povprečne koncentracije radona, merjene z detektorji sledi v obdobju od 15.1.1997 12.3.1997, so bile 28 Bq/m³ in 28 Bq/m³ v prostorih z mineralno kopaljo 1 in 2, ter 70 Bq/m³ v kopalnem bazenu.

Časovni potek koncentracij radona v prostoru z mineralno kopaljo 1 je prikazan na sliki 2.a. Vrednosti so se gibale od 20 Bq/m³ do 55 Bq/m³. Najvišje vrednosti so bile izmerjene zjutraj ob 5. uri in med 13. In 17. uro popoldan. V tem času se terapije niso izvajale, zato gre pripisati povišanje vremenskim spremembam. Povprečna vrednost koncentracije v času merjenja je bila 24 Bq/m³. Edini porast koncentracije radona med izvajanjem terapije smo izmerili 17.1.97 ob 9. uri zjutraj, in sicer od 30 Bq/m³ na 45 Bq/m³.

Koncentracijo radonovih potomcev smo merili v prostoru z mineralno kopaljo št. 1. (slika 2.b).

Gibale so se v območju od 5 Bq/m^3 do 18.5 Bq/m^3 EEC-Rn (20 nJ/m^3 do 100 nJ/m^3). Povprečna vrednost ekvivalentne ravnovesne koncentracije radonovih potomcev je bila 11 Bq/m^3 , povprečni ravnovesni faktor pa 0.45.

Temperatura v času merjenja se je gibala med $27 - 31 \text{ }^\circ\text{C}$, relativna vlažnost pa med 50 - 75 %.

4.1.3. Terme Čatež

Terme ležijo na aluvialni terasi ob sotočju Krke in Save, kjer prihajajo na dan topli izviri. Topli vreli s temperaturo $42-62 \text{ }^\circ\text{C}$ spadajo med akrotohipertermalne in so med najtoplejšimi v Sloveniji. Pri zdravljenju uporabljajo poleg drugih metod tudi balneo- in termoterapijo.

Meritve v zdravilišču smo izvajali v času od 23.-25.6.1997. Koncentracijo radona smo merili v prostoru s Hubbardovo kopeljo in prostoru s podvodno masažo. Povprečne dvodnevne koncentracije so bile 30 Bq/m^3 in 25 Bq/m^3 , zapovrstjo. Povprečna koncentracija radona, merjena z detektorji sledi v obdobju od 23.6.1997 do 6.8.1997 je bila v prostoru s Hubbardovo kopeljo 45 Bq/m^3 , v prostoru s podvodno masažo pa 40 Bq/m^3 .

Časovni potek koncentracij radona in potomcev smo merili v prostoru s Hubbardovo kopeljo (slika 3.a in 3.b). Koncentracije radona so se gibale od 10 Bq/m^3 do 80 Bq/m^3 , povprečna vrednost v času merjenja je bila 28 Bq/m^3 . Močno povišanje koncentracije je bilo izmerjeno 24.6.97 med 5. in 9. uro dopoldan, ko je koncentracija radona narasla od 25 Bq/m^3 do 80 Bq/m^3 . V tem času se je povišala tudi koncentracija radonovih potomcev od 8 Bq/m^3 do 15 Bq/m^3 EEC-Rn (45 nJ/m^3 na 80 nJ/m^3). Koncentracija potomcev v času merjenja se je gibala od 15 nJ/m^3 do 80 nJ/m^3 , povprečna ekvivalentna ravnovesna koncentracija pa je bila 6 Bq/m^3 . Povprečni faktor ravnovesja je bil 0.30, temperatura je bila dokaj konstantne, gibala se je med $25 - 28 \text{ }^\circ\text{C}$, relativna vlažnost pa med 48 - 69 %.

4.1.4. Zdravilišče Dolenjske Toplice

V zdravilišču uporabljajo dve zajetji termalne vode s temperaturo 32-38 °C, ki ju zbirajo v zbiralnem bazenu, od koder vodijo vodo v bazene in kadi.

Meritve smo izvajali v času od 26.-28.6.1997. Koncentracijo radona smo merili v prostoru s Hubbardovo kopeljo in prostoru z bisernimi kopelmi. Povprečne dvodnevne koncentracije so bile 50 Bq/m³ in 75 Bq/m³, zapovrstjo. Povprečna koncentracija, merjena z detektorji sledi v obdobju od 26.6.1997 do 6.8.1997, je bila v prostoru s Hubbardovo kopeljo 65 Bq/m³, v prostoru z bisernimi kopelmi pa 100 Bq/m³.

Časovni potek koncentracij radona in potomcev smo merili v prostoru s Hubbardovo kopeljo (slika 4.a in 4.b). Koncentracije radona so se gibale od 10 Bq/m³ do 120 Bq/m³, povprečna vrednost v času merjenja je bila 75 Bq/m³.

Iz slike razvidno povišanje koncentracije radona med izvajanjem terapije, kot tudi sledenje dnevne ritmu spreminjanja koncentracij radona. Koncentracije radonovih potomcev so se gibale v območju od od 5 Bq/m³ do 65 Bq/m³ EE-Rn (20 nJ/m³ do 360 nJ/m³). Povišale so se med izvajanjem terapije, med 10. in 14. uro od 10 Bq/m³ na 25 Bq/m³ in med 6. in 10. uro od 5 Bq/m³ do 22 Bq/m³. Prav tako kot pri radonu je opazno sledenje dnevne ritmu. Povprečni faktor ravnovesja je bil 0.49.

Temperatura in relativna vlažnost v času merjenja sta se gibali med 25 - 28 °C in 50 - 75 %, zapovrstjo.

4.1.5. Zdravilišče Šmarješke Toplice

V zdravilišču uporabljajo hipertermalno vodo s temperaturo 32 °C, ko jo iz zbiralnega bazena vodijo v kadi in bazene za kopanje.

Meritve smo izvajali v času med 24.-26.6.1997. Koncentracijo radona smo merili v prostoru s Hubbardovo kopeljo in v zbiralnem bazenu. Povprečna dvodnevna koncentracija v Hubbardovi kopeli je bila 45 Bq/m³. Povprečna koncentracija radona, merjena z detektorji sledi v obdobju od 24.6.1997 do 6.8.1997, je bila v prostoru s Hubbardovo kopeljo 66 Bq/m³, v zbiralnem bazenu pa 3500 Bq/m³.

Časovni potek koncentracije radona in potomcev smo merili v prostoru s Hubbardovo kopeljo (slika 5.a in 5.b). Koncentracije radona so se gibale od 25 Bq/m³ do 60 Bq/m³, povprečna vrednost v času merjenja je bila 40 Bq/m³.

Koncentracije radonovih potomcev so se gibale od 3 Bq/m³ do 15 Bq/m³ EEC-Rn (15 nJ/m³ do 80 nJ/m³). Ekvivalentne ravnovesne koncentracije so se povišale med izvajanjem terapije in sicer med 9. in 12. uro od 4 Bq/m³ na 10 Bq/m³. Prav tako kot pri radonu je opazno sledenje dnevni ritmu spreminjanja koncentracij. Povprečni faktor ravnovesja je bil 0.25.

Temperatura v času merjenja se je gibala med 27 - 28 °C, relativna vlažnost pa med 51 - 76 %.

4.1.6. Toplice Dobrna - Termalno zdravilišče

V zdravilišču sta dva vrelca, prvi izvira v zdravilišču, drugi pa 300 m nižje v parku, iz katerega vodijo termalno vodo v hotel, kjer prav tako izvajajo zdravstvene terapije. Oba vrelca imata temperaturo 36.5 °C.

Meritve smo izvajali od 17.-19.6.1997. Koncentracije radona smo merili v zbiralnem bazenu, v kopalnem bazenu in prostoru s termalno kopeljo. Povprečne dvodnevne koncentracije v termalni kopeli in v bazenu so bile 60 Bq/m³ in 150 Bq/m³, zapovrstjo. Povprečna koncentracija radona, merjena z detektorji sledi v času od 17.6.1997 do 6.8.1997, je bila v prostoru s termalno kopeljo 80 Bq/m³, v bazenu 120 Bq/m³ in v zbiralnem bazenu 3300 Bq/m³.

Časovni potek koncentracije radona v terapijskem bazenu je prikazan na sliki 6.a. Vrednosti koncentracije so se gibale med 100 Bq/m³ in 250 Bq/m³. Povprečni faktor ravnovesja je bil 0.44.

Relativna vlažnost se je gibala med 85% in 94%, kar je najvišja izmerjena vrednost v vseh zdraviliščih. Temperatura je nihala v območju od 27 - 32 °C.

Časovni potek koncentracije radonovih potomcev prikazuje slika 6.b. Vrednosti ekvivalentnih ravnovesnih koncentracij so se gibale med 40 Bq/m³ in 110 Bq/m³ (200-600 nJ/m³), povprečna vrednost je bila 75 Bq/m³.

4.1.7. Zdravilišče Laško

Termalno vodo s temperaturo 37.5 °C črpajo iz štirih vrelcev iz globine 116 m v zbiralni bazen. Od tod se po ceveh vodi v prostore za terapije in v kopalni bazen.

Meritve smo izvajali v času od 4.-6.2.1997. Koncentracijo radona smo merili v prostoru s Hubbardovo kopeljo, v kopalnem bazenu in v zbiralnem bazenu. Povprečne dvodnevne koncentracije radona so bile 90 Bq/m³, 100 Bq/m³ in 3300 Bq/m³, zapovrstjo. Povprečne vrednosti koncentracij radona, izmerjene z detektorji sledi, v času od 4.2.1997 do 12.3.1997, so bile 110 Bq/m³, 120 Bq/m³ in 4100 Bq/m³.

Časovni potek koncentracij radona smo merili v prostoru s Hubbardovo kopeljo (slika 7.a). Vrednosti so se gibale od 60 Bq/m³ do 180 Bq/m³, pri čemer ni opaziti povišanih koncentracij med izvajanjem terapije. Povprečni faktor ravnovesja je bil 0.52.

Koncentracije radonovih potomcev so se gibale med 20 - 70 Bq/m³ EEC-Rn (100 nJ/m³ in 400 nJ/m³). Povprečna vrednost ekvivalentne ravnovesne koncentracije radona v času izvajanja meritev je bila 45 Bq/m³ (slika 7.b).

V času merjenja se je gibala temperatura v območju med 20 - 25 °C, relativna vlažnost pa je nihala med 47 - 77 %.

4.1.8. Zdravilišče Moravske Toplice

Termalno vodo črpajo iz 5-7 vrtin iz globine do 1417 m. Temperatura vode se giblje do 72 °C. V kadi je voda napeljana direktno iz vrelecev, termalno vodo, namenjeno kopanju pa mešajo s pitno vodo, da jo ohladijo na željeno temperaturo.

Meritve smo izvajali v času od 11.-13.6.1997. Koncentracijo radona smo merili v kadnih kopelih številka 3, 6 in 19, v kopalnem bazenu in v vročem kopalnem bazenu. Povprečne dvodnevne koncentracije radona smo merili samo v kadnih kopelih. Vrednosti so bile 25 Bq/m³, 30 Bq/m³, 30 Bq/m³, zapovrstjo. Povprečne vrednosti koncentracij radona, izmerjene z detektorji sledi, v času od 11.6.1997 do 6.8.1997, so bile 35 Bq/m³, 25 Bq/m³ in 20 Bq/m³ v kadnih kopelih številka 3, 6 in 9, zapovrstjo. V kopalnem bazenu smo izmerili 20 Bq/m³ in v vročem kopalnem bazenu 15 Bq/m³.

Časovni potek koncentracij radona in radonovih potomcev smo spremljali v prostoru s kadno kopeljo številka 6 (slika 8.a in 8.b). Koncentracije radona so se gibale med 25 Bq/m³ in 45 Bq/m³. Povprečna vrednost je bila 33 Bq/m³. Povprečni faktor ravnovesja je bil 0.44.

Koncentracija radonovih potomcev se je gibala med 5 - 30 Bq/m³ EEC-Rn (30 nJ/m³ in 170 nJ/m³). Najvišja vrednost je bila izmerjena 12.6.1997 med 3. in 5. uro zjutraj. Ker v tem času v kadeh ni bilo vode, smatramo, da se je v vrtini sprostila večja količina zraka, bogatega z radonom, ki je našel pot na prosto po ceveh, ki vodijo do kadi in bazenov.

Temperatura je med meritvijo nihala med 26 - 31 °C, relativna vlažnost pa med 42 - 62 %.

4.1.9. Terme Zreče

Termalno vodo iz akrototermalnih izvirov s temperaturo 35 °C črpajo v zbiralni bazen, kjer jo prečistijo in klorirajo. Iz zbiralnega bazena jo vodijo v terapevtski bazen, kopalni bazen in kadi za zdravstvene terapije.

Meritve smo izvajali od 3.-6.10.1997. Koncentracije radona smo merili v kopalnem bazenu in terapevtskem bazenu. Povprečne dnevne koncentracije so bile 25 Bq/m³ in 20 Bq/m³, zapovrstjo. Povprečne vrednosti koncentracij radona, izmerjene z detektorji sledi, v času od 3.10.1997 do 27.11.1997, so bile 10 Bq/m³ in 15 Bq/m³ v kopalnem bazenu in terapevtskem bazenu, zapovrstjo.

Časovni potek koncentracije radona in radonovih potomcev smo spremljali v kopalnem bazenu, ker ni bilo možnosti za izvajanje meritev v terapevtskem bazenu. Vrednosti koncentracij radona so se gibale od 15 Bq/m³ do 60 Bq/m³, povprečna vrednost je bila 28 Bq/m³. Koncentracije radonovih potomcev so se gibale v območju od 2 - 10 Bq/m³ EEC-Rn (10 nJ/m³ do 50 nJ/m³). Povprečna vrednost v času merjenja je bila 5 Bq/m³ EEC-Rn (30 nJ/m³). Povprečni faktor ravnovesja je bil 0.21.

Temperatura v bazenu se je v času merjenja gibala od 25 - 32 °C, območje relativne vlažnosti pa se je gibalo v širšem območju, med 47 - 72 %.

4.1.10 Zdravilišče Rogaška

Termalno vodo s temperaturo 55 °C črpajo v zbiralni bazen, kjer jo filtrirajo. Iz zbiralnega bazena jo vodijo v kadi za zdravstvene terapije.

Meritve smo izvajali od 13.-15.1.1998. Koncentracije radona smo merili v prostoru s termalno kopeljo. Povprečna dvodnevna koncentracija je bila 40 Bq/m³ (slika 10.a). Povprečne vrednosti koncentracij radona, izmerjene z detektorji sledi, v času od 15.1.1998 do 18.2.1998, so bile 60 Bq/m³ in 25 Bq/m³ v termalni kopeli številka 15 in mineralni kopeli številak 11, zapovrstjo.

Časovni potek koncentracije radona in radonovih potomcev smo spremljali v prostoru s termalno kopeljo (slika 10.b). Vrednosti koncentracij radona so se gibale od 15 Bq/m³ do 90 Bq/m³, povprečna vrednost je bila 50 Bq/m³. Koncentracije radonovih potomcev v zraku so se gibale v območju od 5 - 30 Bq/m³ EEC-Rn (20 nJ/m³ do 150 nJ/m³). Povprečna vrednost v času merjenja je bila 11 Bq/m³ EEC-Rn (60 nJ/m³). Povprečni faktor ravnovesja je bil 0.36.

Temperatura v prostoru s termalno kopeljo se je v času merjenja gibala med 20 - 26 °C, relativna vlažnost pa območju med 31 - 53 %.

4.2. Meritve koncentracije aktivnosti radona v termalni vodi

V vseh zdraviliših in obeh termalnih kopališčih smo izvajali meritve koncentracije radona v termalni vodi. Vzorci so bili vzeti iz pipe, namenjene točenju vode v kopeli oziroma iz zbiralnega bazena (tabela 2). Izmerjene vrednosti so podobne vrednostim, ki so bile izmerjene že leta 1979 (11).

Tabela 2. Koncentracije radona v termalnih vodah (v Bq/m³)

Zdravilišče	Vzorec vode	Bq/m ³
1. Zdravilišče Radenci	terapija	4500 ± 900
2. Zdravilišče Atomske Toplice	zbiralni bazen	35000 ± 6000
	terapija	9000 ± 1000
3. Zdravilišče Čateške Toplice	terapija	9000 ± 1500
4. Zdravilišče Moravske Toplice	terapija	8000 ± 1500
5. Zdravilišče Dobrna	terapija	10000 ± 2000
6. Zdravilišče Laško	terapija	5000 ± 1000
7. Zdravilišče Šmarješke Toplice	terapija	15000 ± 2500
8. Zdravilišče Dolenjske Toplice	terapija	60000 ± 8000
9. Terme Zreče	terapija	5000 ± 1000
10. Zdravilišče Rogaška	terapija	25000 ± 3000
11. Termalno kopališče		
Terme Snovik v Tuhunjski dolini	na prostem	7500 ± 1500
12. Termalno kopališče		
Forum Terma Rimske Toplice	na prostem	9000 ± 1500

Najvišje vrednosti koncentracij radona so bile izmerjene v vzorcih vode iz Dolenjskih Toplic (60 kBq/m³) in Atomskih Toplic (35 kBq/m³). Kljub visoki vrednosti v vodi koncentracije radona v zraku v prostorih s kopelmi niso presegle 100 Bq/m³. V Šmarjeških Toplicah smo v vodi izmerili 15000 Bq/m³, v zraku v zbiralnem bazenu 3500 Bq/m³, v zdravilišču v prostoru s kopeljo pa samo 45 Bq/m³. V Laškem smo izmerili v vodi 6000 Bq/m³, v zraku v zbiralnem bazenu 3300 Bq/m³, v prostoru za hidroterapijo pa 110 Bq/m³.

Razmerje med koncentracijo radona, ki izhaja iz vode v zrak in koncentracijo radona v vodi je velikostnega reda $0.5-1.3 \times 10^{-4}$ (19). Zgornje meritve kažejo povprečno nekaj 10 kBq/m^3 radona v termalnih vodah zdravilišč. Odtod sledi, da je prispevek radona, ki izhaja iz termalne vode, k koncentraciji radona v zraku v prostorih s termalnimi ali mineralnimi kopelmi zelo majhen, nekaj Bq/m^3 , odvisno od trajanja in količine uporabljene vode. Drugače je v bazenih za terapevtske namene (Zdravilišče Dobrna), v katerih je večja količina vode, ki se izmenjuje in omogoča stalno izhajanje radona iz vode v zrak.

5. Ocena prejetih doz

Pejete doze zaradi zunanjega in notranjega obsevanja z različnimi vrstami sevanj se po metodologiji ICRP (Mednarodna komisija za varstvo pred sevanji) računajo z dozimetričnimi modeli (20). Modeli združujejo fizikalne lastnosti radioaktivnih sevanj na eni strani z biološkimi učinki in zdravstvenimi posledicami na organizem na drugi strani.

Sevanje alfa zahteva zaradi svojega specifičnega biološkega učinka posebno pozornost. Pri prehajanju skozi celice tkiva delec alfa oddaja energijo, biološka škoda, ki jo pri tem povzroči, pa se spreminja s kinetično energijo delca in je od 2 krat do preko 30 krat večja kot pri sevanju gama z isto energijo (21). Strokovnjaki mednarodne komisije za varstvo pred sevanji so predlagali za sevanje alfa utežni faktor sevanja 20. Tako dosedaj veljavni dozimetrični modeli (22, 23, 24) uporabljajo to vrednost.

Z epidemiološkimi študijami učinkov sevanja alfa (radon s svojimi potomci) na organizem so dobili 2-3 krat nižje število pljučnih obolenj kot jih predvideva dozimetrični model (25, 26). Zato so strokovnjaki v publikaciji ICRP 65 (27) kot tudi v osnovnih standardih za sevanje BSS-115 (28) predlagali, naj se v primeru obsevanja z radonom in potomci upoštevajo rezultati epidemioloških študij in ne dozimetrični modeli.

Dozna konvencija v ICRP 65 je uvedena na podlagi specifičnih delovnih pogojev in aerosolnih karakteristik zraka v uranovih rudnikih. Pri oceni prejete doze v delovnem in bivalnem okolju z dozno konvencijo torej predpostavljamo enake velikostne porazdelitve aktivnih aerosolov kot tudi koncentracije prosto lebdečih radonovih potomcev kot v uranovih rudnikih. V nekaterih

delovnih in bivalnih okoljih so te vrednosti popolnoma drugačne (29) od zgoraj omenjenih, kar lahko privede do napačne ocene doze. Razhajanje med dozimetričnimi modeli in epidemiološkimi študijami je posledica bodisi napačno ocenjega življenjskega rizika za obolevanje zaradi sevanja bodisi previsokega utežnega faktorja sevanja za sevanje alfa (30).

Glede na zgoraj zapisano in glede na to, da pri naš še ni dokončno določena metodologija ocenjevanja doz zaradi inhalacije radona in potomcev, smo se odločili, da ocenimo prejete doze za zaposlene na podlagi dozimetričnih modelov in dozne konvencije. Prejete doze smo ocenili po metodologiji ICRP50, kjer se predpostavlja povprečna velikost delcev $AMD=0.15 \mu m$ in delež prostih potomcev radona $f_p = 0.03$. V tem modelu so zajeti rezultati modelov Jacobi-Eisfeld (J-E) in James-Birchal (J-B), ki posebej obravnavata vpliv različnih velikosti aerosolov in prostih potomcev v zraku na oceno prejete doze. Za primerjavo z vsemi zgoraj opisanimi dozimetričnimi modeli smo ocenili doze tudi po modelu ICRP65, ki zajema podatke epidemioloških študij.

Pri oceni doze smo upoštevali izmerjene vrednosti koncentracije radonovih potomcev v zraku in čas zadrževanja zaposlenih na dotičnem delovnem mestu. Ker je delovni režim v zdraviliščih zelo različen (v nekaterih zdraviliščih delajo v dopoldanski in popoldanski izmeni, drugje deljeno preko celega dne ali pa 2 dni po cel dan, 1 dan prosto in podobno), je težko oceniti prejeto dozo v enem delovnem dnevu oziroma mesecu, če ni točnih podatkov o opravljenem številu ur.

Osebjem, ki skrbi za izvajanje terapije v termalnih kopelih, se zadržuje v prostoru s kopeljo v času polnjenja ter praznjenja oziroma čiščenja kopeli. Za to opravilo je potrebno od 15-30 minut, odvisno od števila kopeli, medtem ko terapija traja 30 min. Odtod vidimo, da lahko največ polovico delovnega časa pripišemo delovnemu okolju z močno povišano koncentracijo radona oziroma njegovih potomcev.

V termalnih kopelih ali bazenih, ki se uporabljajo za fizioterapijo, je zdravstveno osebje prisotno ves čas terapije. Čas zadrževanja osebja v prostoru z močno povišano koncentracijo radona in potomcev je v tem primeru lahko dosti daljši od polovice delovnega časa.

Glede na zgoraj omenjeno smo pri oceni doz predpostavili, da so povprečne letne vrednosti

koncentracij radona in potomcev enake izmerjenim in da opravijo zaposleni (medicinsko osebje) na delovnem mestu 1700 ur na leto. Koncentracije nevezanih potomcev radona so se gibale med $f_p = 0.02$ in $f_p = 0.16$, povprečna vrednost $f_p = 0.06$. Pri oceni z dozimetričnimi modeli smo predpostavili, da se povprečna koncentracija nevezanih potomcev giblje med $f_p = 0.05$ in $f_p = 0.1$.

Ocenjene doze so prikazane v tabeli 3. V Zdravilišču Dobrna je ocenjena doza v območju med 2 - 5.3 mSv, v Zdravilišču Laško pa med 1 - 2.5 mSv, odvisno od modela. V vseh ostalih zdraviliščih so prejete doze nižje od 1 mSv/leto.

Tabela 3. Ocenjene letne prejete doze zaradi inhalacije radona / potomcev za zaposlene v termalnih zdraviliščih v Sloveniji

Zdravilišče	ICRP50 $f_p=0.05$		J-E* 1.2 m3/h		J-B** 1.2 m3/h		ICRP65*** $f_p=0.03$
	0.75 m3/h	1.2 m3/h	$f_p=0.05$	$f_p=0.10$	$f_p=0.05$	$f_p=0.10$	
	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	
Atomske Toplice	0,24	0,33	0,29	0,35	0,35	0,55	0,16
Zdravilišče Radenci	0,27	0,36	0,32	0,39	0,40	0,62	0,18
Terme Catež	0,14	0,19	0,16	0,19	0,20	0,31	0,09
Dolenjske Toplice	0,45	0,61	0,54	0,65	0,66	1,03	0,30
Šmarješke Toplice	0,14	0,19	0,17	0,21	0,21	0,32	0,09
Zdravilišče Dobrna	1,98	2,67	2,36	2,87	2,92	4,54	1,30
Zdravilišče Laško	0,94	1,27	1,11	1,35	1,38	2,14	0,61
Moravske Toplice	0,31	0,41	0,37	0,45	0,46	0,71	0,20
Zdravilišče Rogaška	0,22	0,30	0,27	0,33	0,34	0,52	0,15
Terme Zrece	0,12	0,17	0,14	0,17	0,17	0,27	0,08

* Dozimetricni model Jacobi - Eisfeld

** Dozimetricni model James - Birchall

*** Epidemiološki model

6. Zaključki

Meritve koncentracije radona in njegovih potomcev v zdraviliščih s termalnimi kopelmi niso pokazale povišanih vrednosti (tabela 4). Povprečne mesečne vrednosti so se gibale med 20 - 170 Bq/m³, trenutne vrednosti, merjene z merilnimi instrumenti za kontinuirno merjenje pa med 25 Bq/m³ in 250 Bq/m³. Ravnovesne ekvivalentne koncentracije potomcev so se gibale med 4 Bq/m³ in 110 Bq/m³. Najvišje vrednosti so bile izmerjene v bazenu za terapijo v Zdravilišču Dobrna in v prostoru s Hubbardovo kopeljo v Zdravilišču Laško. Koncentracije nevezanih potomcev radona so se gibale med $f_p = 0.02$ in $f_p = 0.16$, povprečna vrednost $f_p = 0.06$. Faktor ravnovesja se je gibal med 0.09 in 0.89, povprečni za vsa zdravilišča je bil 0.38.

V večini primerov so koncentracije sledile dnevnomu nihanju in so dosegle najvišje vrednosti čez noč oziroma v zgodnjih jutranjih urah. Med izvajanjem terapije nismo zasledili povišanih koncentracij radona in potomcev v zraku, ki bi jih lahko pripisali izhajanju radona iz termalnih kopeli. Vzrok za to gre pripisati načinu merjenja (merski rezultat vsaki dve uri) in nizkim koncentracijam oziroma prezračevanju prostorov.

Ocena doz za zaposlene ne temelji samo na povišanih vrednostih koncentracij radona in potomcev med izvajanjem terapije, pač pa zajema ves radon v prostoru; radon, ki izhaja iz tal in gradbenega materiala in radon, ki izhaja iz termalne vode, zato so doze preценjene.

Zaradi metodologije merjenja, katere namen je bil predvsem ocena stanja, torej določanje koncentracije radona in potomcev, ne pa ocena prejete doze za zaposlene, z meritvami nismo uspeli pokazati dodatnega doprinosa radona iz termalnih vod k letni dozi.

Smatramo, da bi bilo smotno nadaljevati meritve vsaj v Zdravilišču Dobrna in Zdravilišču Laško (mogoče kvartalno) za obdobje enega leta in obenem ugotoviti realni čas zadrževanja zdravstvenega osebja v prostorih s povišanimi koncentracijami radona/potomcev.

V vseh ostalih zgoraj omenjenih termalnih zdraviliščih meritve niso pokazale povišanih vrednosti koncentracij radona in potomcev, zato smatramo, da tam niso potrebne niti kontrolne meritve niti osebna dozimetrija.

Glede na prihajajočo evropsko zakonodajo s področja varstva pred sevanji, ki predvideva tudi merjenje koncentracije radona v pitni vodi, predlagamo, da se opravijo meritve koncentracije radona v vodi v tistih zdraviliščih, kjer se uporabljajo mineralne vode za pitje (Rogaška, Atomske Toplice...).

7. Literatura

1. I. Uzunov, R. Steinhäusler, and E. Pohl: Carcinogenic risk of exposure to radon daughters associated with radon spas, *Health Phys.* 41, 807-813 (1981);
2. W. Chruschiewski, T. Domanski, and W. Orzechowski: Concentrations of radon daughters and its progeny in the rooms of Polish spas, *Health Phys.* 45, 421-424 (1983);
3. H. Morinaga, M. Mifune and K. Furuno: Radioactivity of water and air in Misasa Spa, Japan, *Rad. Prot. Dos. Vol. 7, No. 1-4*, pp. 295-297, *Nuc. Tech. Publ.* (1984)
4. S. V. Andrejev: Balneologische, strahlenhygienische und dosimetrische Aspekte der Radontherapie in der UdSSR, *Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim.* (Sonderheft 1913, (1984), S. 32-39 ;
5. F. Steinhäusler: Radon spas: Source term, doses and risk assesment, *Rad. Prot. Dos. Vol 24, No 1/4* pp. 257-259 (1988), *Nuc. Tech. Publ.*;
6. Prof. Dr. B. Sansoni: Special Issue to the International symposium Radon in Health Resot Medicine, Lacco Ameno D'Ischia, Italy, April 5-10, 1994, *International Environment Consulting Newsletter*;
7. J. Schmitz, R. Fritsche: Radon Exposure at Workplaces, Final Report of a Survey in German Balneotherapy, *Proc. of the Symp. Austrian-Italian-Hungarian Radiation Protection Symposium, Radiation Protection in Neighbouring Countries in Central Europe, Obergurgl, 28-30 April 1993*;

8. ICRP (1989): Radiological Protection of the Worker in Medicine and Dentistry, ICRP Publication 57, Annals of the ICRP (20), 1989, Pergamon Press;
9. ICRP (1982): Protection Against Ionizing Radiation from External Sources Used in Medicine, ICRP Publication 33, Annals of the ICRP (9), Pergamon press;
10. EURATOM, COUNCIL DIRECTIVE: The Basic Safety Standards for the Protection of the Health of Workers and the General public Against the Dangers arising from Ionizing Radiation, Official Journal of the European Communities, Brussels, 29.6.1996;
11. I. Kobal & all: Radioactivity of Thermal and Mineral Springs in Slovenia, Health, Phys. Vol. 37, pp. 239-242, Pergamon Press (1979);
12. I.Kobal and A. Renier: Radioactivity of the Atomic Spa at Pod_etrtek, Slovenia, Yugoslavia, Health. Phys. Vol. 53, No. 4, pp. 307-310, (1987), Perg. Press;
13. I. Kobal and Š. Fedina: Radiation doses at the Radenci Health Resort, Rad. Prot. Dos. Vol. 20, No. 4, pp. 257-259 (1987), Nuc. Tech. Publ.;
14. Pravilnik o mejah, ki jih ne sme presegati sevanje, kateremu so izpostavljeni prebivalstvo in tisti, ki delajo z viri ionizirajočih sevanj, o merjenju stopnje izpostavljenosti ionizirajočim sevanjem oseb, ki delajo z viri teh sevanj in o preskušanju kontaminacije delovnega okolja, Uradni list SFRJ 31/89;
15. T. Streil et all: Microsystems for dosimetry and radiation protection in first applications for radon- and progeny monitoring, Annales de l' Association belge de Radioprotection, Vol. 19, no 4, 1994;
16. T. Streil et all: New alpha radiation detection systems for environmental surveys, Sensors and Actuators A, 41-42, pp. 85-87, 1994;
17. V. Lebed, A. Rannou, G. Tymen: Study of ^{222}Rn permeation through polymer membranes: Application to continuous measurement of ^{222}Rn in water, Health Physics,

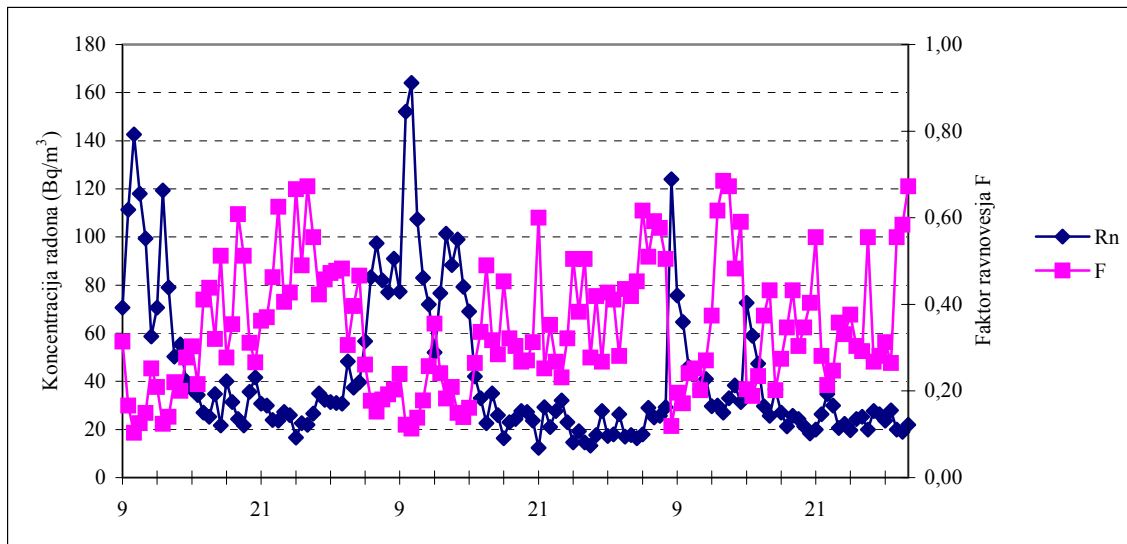
vol, 63 No. 2, 1992;

18. H. Schurbeck: A radon in water monitor based on fast gas transfer membranes, Proc. Of the int. Conf. Technologically enhanced natural radioactivity (TENR) caused by non-uranium mining, Oct. 16-19, 1996, Szczyrk, Poland;
19. C. T. Hess: Radon in Houses Due to Radon in Potable Water, in P. Hopke: Radon and Its decay products, Occurrence, Properties, and Health Effects, American Chemical Society, Washington, DC 1987;
20. Annals of the ICRP, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publications 30, Pergamon Press, Oxford, 1979;
21. O. G. Raabe: Internal Radiation Dosimetry, pp. 161-180, Med. Phy. Pub. 1994;
22. ICRP (1987), Lung Cancer Risk from Environmental Exposures to Radon Daughters, Report of a Task Group, ICRP Publication 50, Ann. of ICRP, 17 (1);
23. OECD 83: Dosimetry Aspects of Exposure to Radon and Thoron Daughter Products, NEA, OECD, 1983;
24. ICRP: Radiation Protection in Mines, ICRP Publication 47, Pergamon Press;
25. BEIR IV: Health Risks of Radon and other Internally Deposited Alpha-Emitters, Nat. Academy Press, Wa. 1988;
26. Jay. H. Lubin et all: Radon and Lung Cancer Risk: A Joint Analysis of 11 Underground Mines Studies, National Institutes of Health, 1994;
27. ICRP, Protection against Radon-222 at Home and at Work, Oxford, Pergamon press, ICRP Publication 65, Ann. of ICRP 23(2),1994;
28. Safety Series 115: International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing

Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA, Vienna 1996;

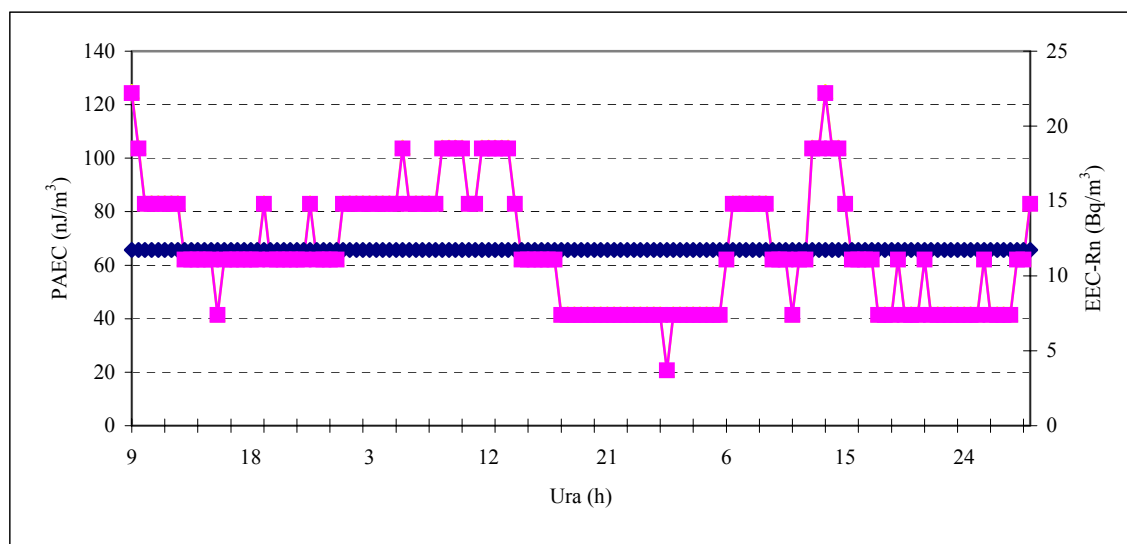
29. A. Reineking et al: Measurements of the unattached fractions of radon daughters in houses, *The Science of the Total Environment*, Vol. 45, pp. 261-270, Elsevier Science Publishers, 1985;
30. A. Birchall and A. C. James: Uncertainty analysis of the effective dose per unit exposure from radon progeny and implications for ICRP risk-weighting factors, *Rad. Prot. Dos.* Vol. 53, Nos 1-4, pp. 133-140, *Nuc. Tech. Pub.* (1990).

Slika 1.a. Zdravilišče Atomske Toplice Podcetrtek
 Koncentracija radona v prostoru s podvodnimi kopelmi - Hidroterapija I
 Datum merjenja: 21 - 24.1.1997



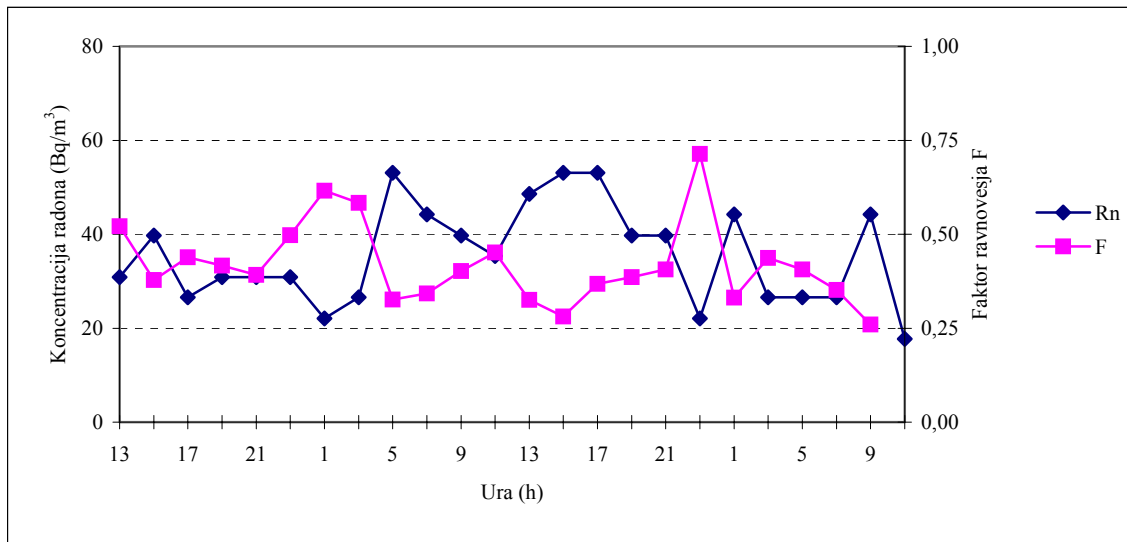
Povprečna temperatura	$T' = 27.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	Območje vrednosti	23 - 24 $^\circ\text{C}$
Povprečna rel. vlažnost	$r = 51 \text{ } \%$	Območje vrednosti	41 - 79 $\%$
Povprečna konc. radona	43 Bq/m^3	Območje vrednosti	12 - 164 Bq/m^3
Povprečni faktor ravnovesja	$F = 0.35$	Območje vrednosti	0.10 - 0.69

Slika 1.b. Zdravilišče Atomske Toplice Podcetrtek
 Koncentracija radonovih potomcev v prostoru s podvodnimi kopelmi - Hidro I
 Datum merjenja: 21 - 24.1.1997



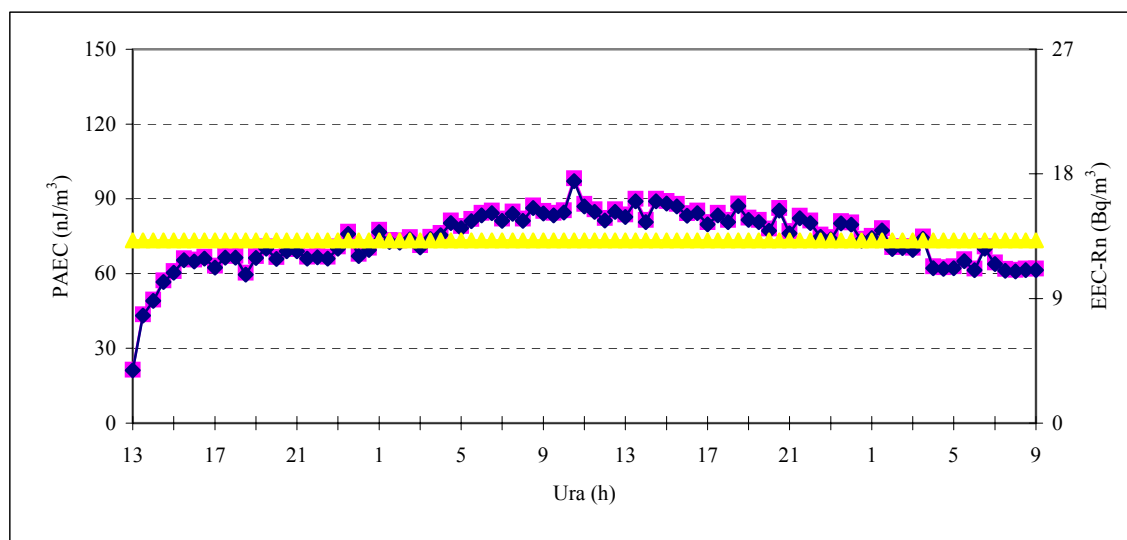
PAEC - povprečna	66 nJ/m^3	Območje vrednosti	21 - 125 nJ/m^3
EEC-Rn - povprečna	12 Bq/m^3	Območje vrednosti	3.7 - 22 Bq/m^3

Slika 2.a. Zdravilišče Radenska Radenci
 Koncentracija radona v prostoru z mineralno kopeljo
 Datum merjenja: 15 - 17.1.1997



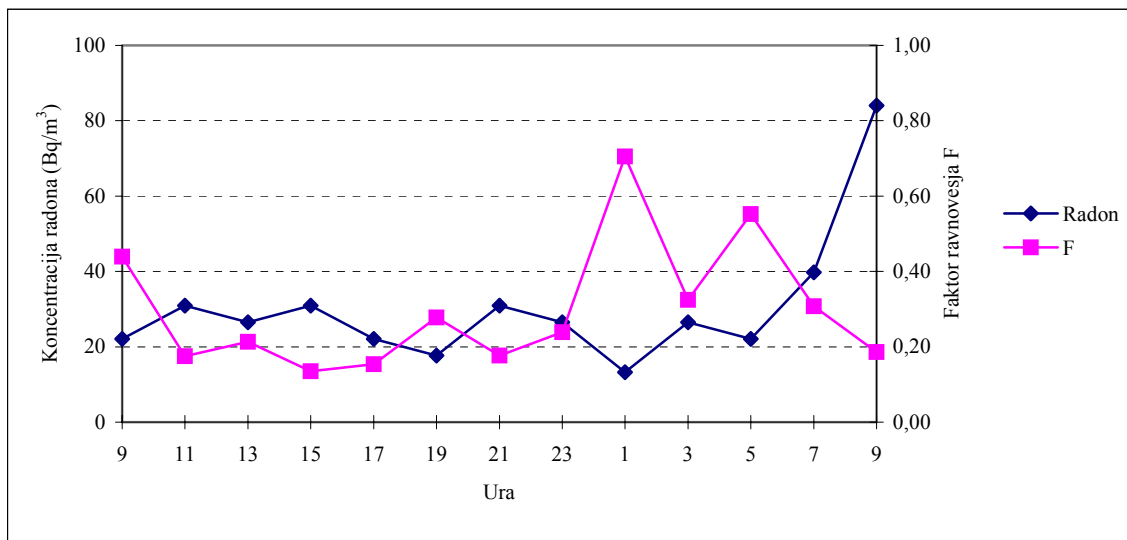
Povprečna temperatura	$T' = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$	Območje vrednosti	27 - 31 $^\circ\text{C}$
Povprečna rel. vlažnost	$r = 61 \text{ } \%$	Območje vrednosti	50 - 75 $\%$
Povprečna konc. radona	35 Bq/m^3	Območje vrednosti	18 - 53 Bq/m^3
Povprečni faktor ravnovesja	$F = 0.45$	Območje vrednosti	0.26 - 0.71

Slika 2.b Zdravilišče Radenska Radenci
 Koncentracija razpadnih produktov radona v prostoru z mineralno kopeljo
 Datum merjenja: 15 - 17.1.1997



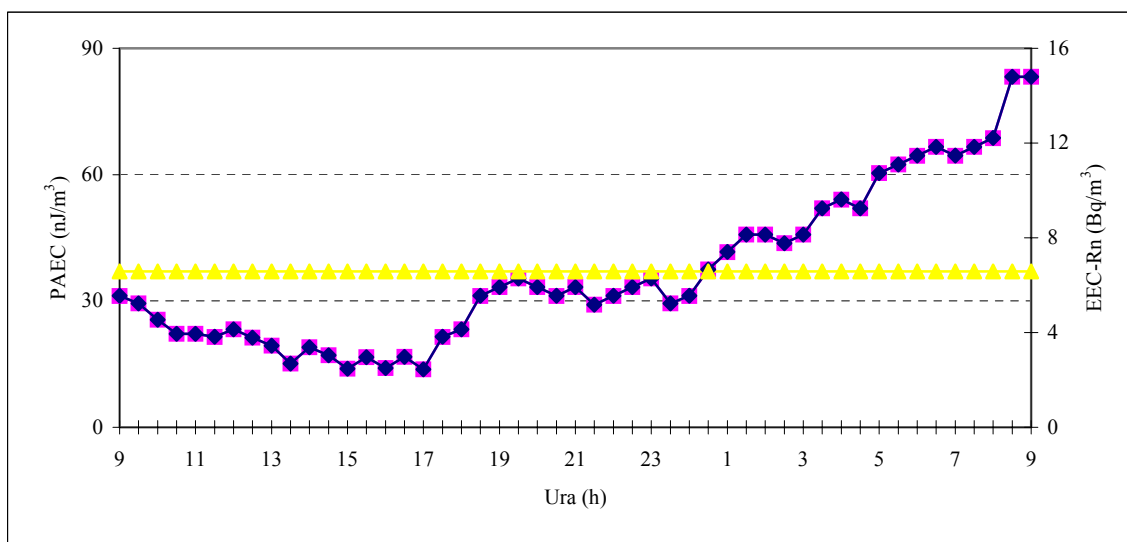
PAEC - povprečna	74 nJ/m^3	Območje vrednosti	21 - 98 nJ/m^3
EEC-Rn - povprečna	13 Bq/m^3	Območje vrednosti	4 - 17 Bq/m^3
fp - povprečni	0,05	Območje vrednosti	0.03 - 0.14

Slika 3.a. Terme Catež
 Koncentracija radona v prostoru s Hubbardovo kopeljo
 Datum merjenja: 23 - 24.6.1997



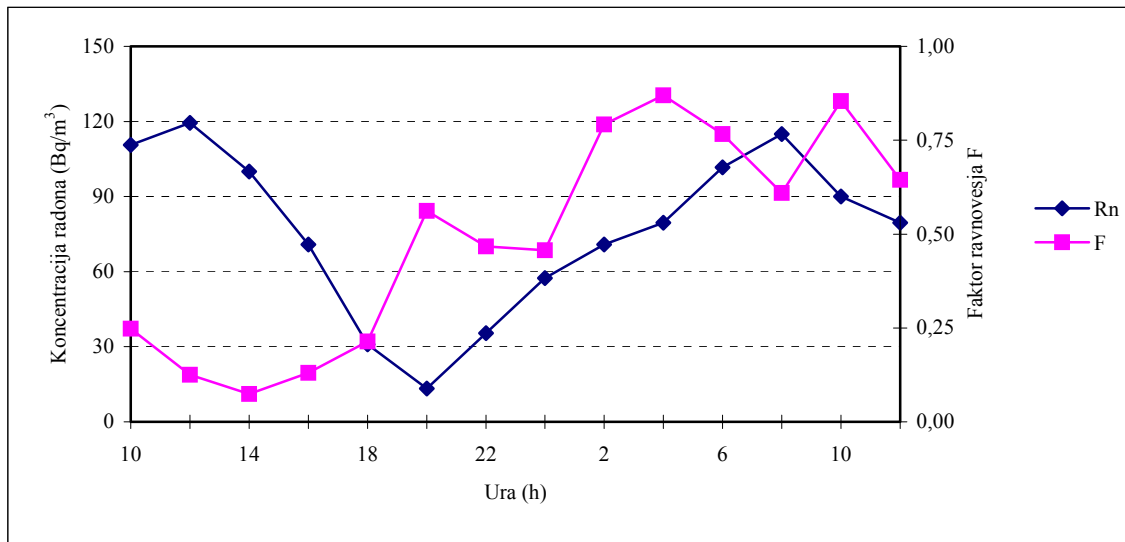
Povprečna temperatura	$T' = 26.5$ °C	Območje vrednosti	25 - 28 °C
Povprečna rel. vlažnost	$r = 57$ %	Območje vrednosti	48 - 69 %
Povprečna konc. radona	30 Bq/m ³	Območje vrednosti	13 - 84 Bq/m ³
Povprečni faktor ravnovesja	$F = 0.30$	Območje vrednosti	0.14 - 0.71

Slika 3.b. Terme Catež
 Koncentracija razpadnih produktov radona v prostoru s Hubbardovo kopeljo
 Datum merjenja: 23 - 24.6.1997



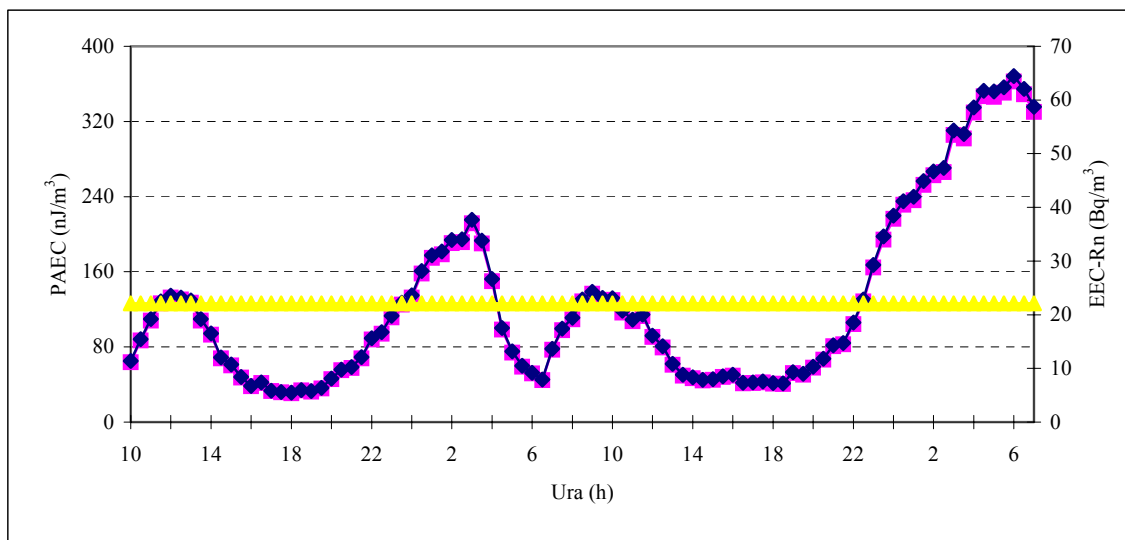
PAEC - povprečna	37 nJ/m ³	Območje vrednosti	14 - 83 nJ/m ³
EEC-Rn - povprečna	7 Bq/m ³	Območje vrednosti	2.4 - 14.8 Bq/m ³
fp - povprečni	0,05	Območje vrednosti od	0.01 - 0.14

Slika 4.a. Zdravilišče Dolenjske Toplice
 Koncentracija radona v prostoru s podvodno kopeljo
 Datum merjenja: 26 - 28.6.1997



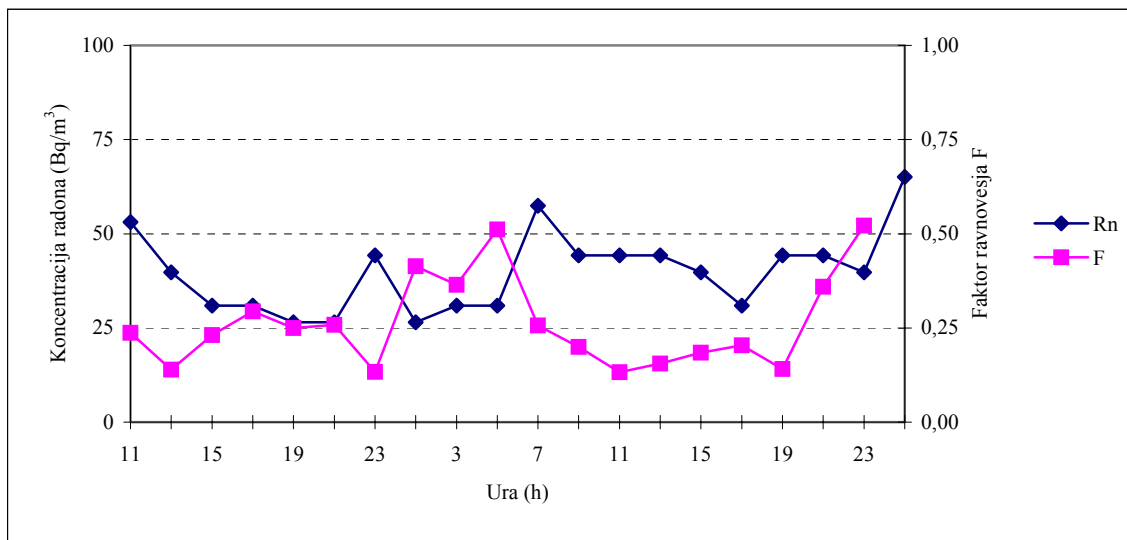
Povprečna temperatura	$T' = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$	Območje vrednosti	25 - 28 $^\circ\text{C}$
Povprečna rel. vlažnost	$r = 61 \text{ } \%$	Območje vrednosti	50 - 75 $\%$
Povprečna konc. radona	77 Bq/m^3	Območje vrednosti	13 - 119 Bq/m^3
Povprečni faktor ravnovesja	$F = 0.49$	Območje vrednosti	0.07 - 0.87

Slika 4.b. Zdravilišče Dolenjske Toplice
 Koncentracija razpadnih produktov radona v prostoru s podvodno kopeljo
 Datum merjenja: 26 - 28.6.1997



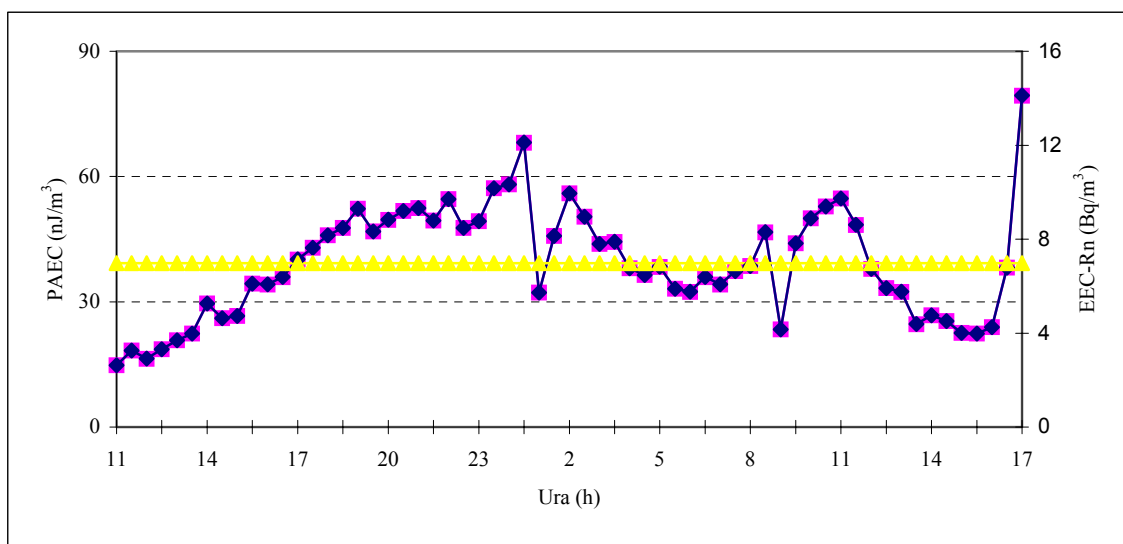
PAEC - povprečna	124 nJ/m^3	Območje vrednosti	31 - 363 nJ/m^3
EEC-Rn - povprečna	22 Bq/m^3	Območje vrednosti	5.5 - 64 Bq/m^3
fp - povprečni	0,06	Območje vrednosti	0.02 - 0.15

Slika 5.a. Zdravilišče Šmarješke Toplice
 Koncentracija radona v prostoru s Hubbardovo kopeljo
 Datum merjenja: 24 - 26.6.1997



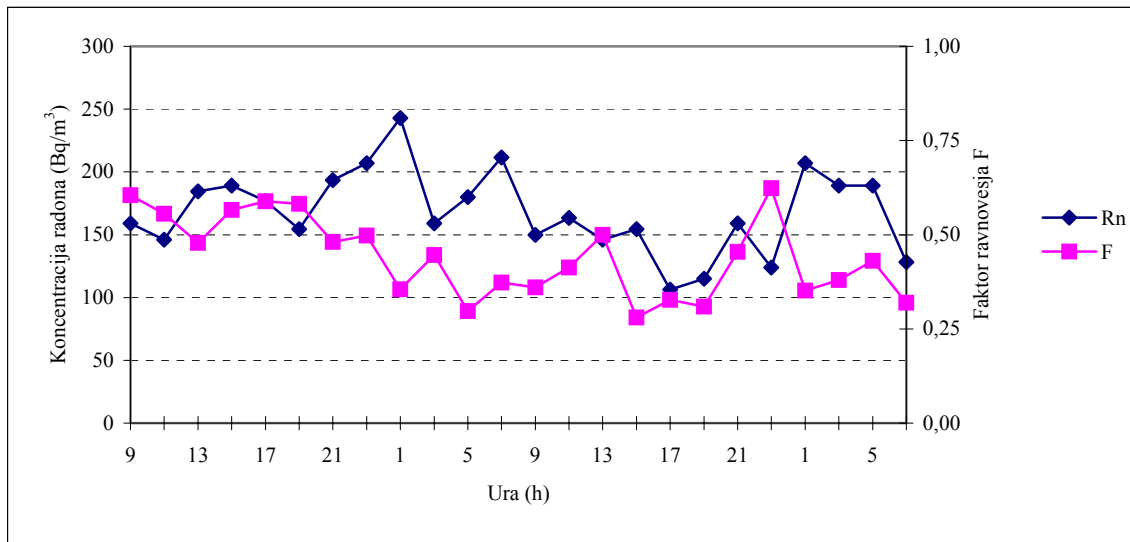
Povprečna temperatura	$T' = 27.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	Območje vrednosti	27 - 28 $^\circ\text{C}$
Povprečna rel. vlažnost	$r = 58 \text{ } \%$	Območje vrednosti	51 - 76 $\%$
Povprečna konc. radona	40 Bq/m^3	Območje vrednosti	27 - 65 Bq/m^3
Povprečni faktor ravnovesja	$F = 0.25$	Območje vrednosti	0.13 - 0.52

Slika 5.b. Zdravilišče Šmarješke Toplice
 Koncentracija razpadnih produktov radona v prostoru s Hubbardovo kopeljo
 Datum merjenja: 24 - 26.6.1997



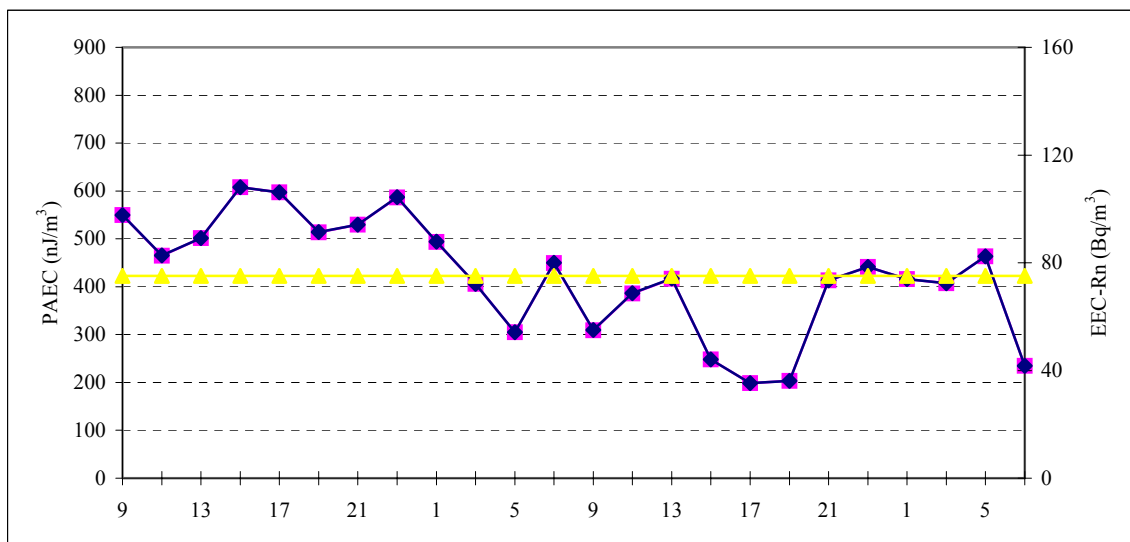
PAEC - povprečna	39 nJ/m^3	Območje vrednosti	14.7 - 79.3 nJ/m^3
EEC-Rn - povprečna	7 Bq/m^3	Območje vrednosti	2.6 - 14.7 Bq/m^3
fp - povprečni	0,08	Območje vrednosti	0.02 - 0.16

Slika 6.a. TopliceDobrna - Termalno zdravilišče
 Koncentracija radona v bazenu
 Datum merjenja: 17 - 19.6.1997



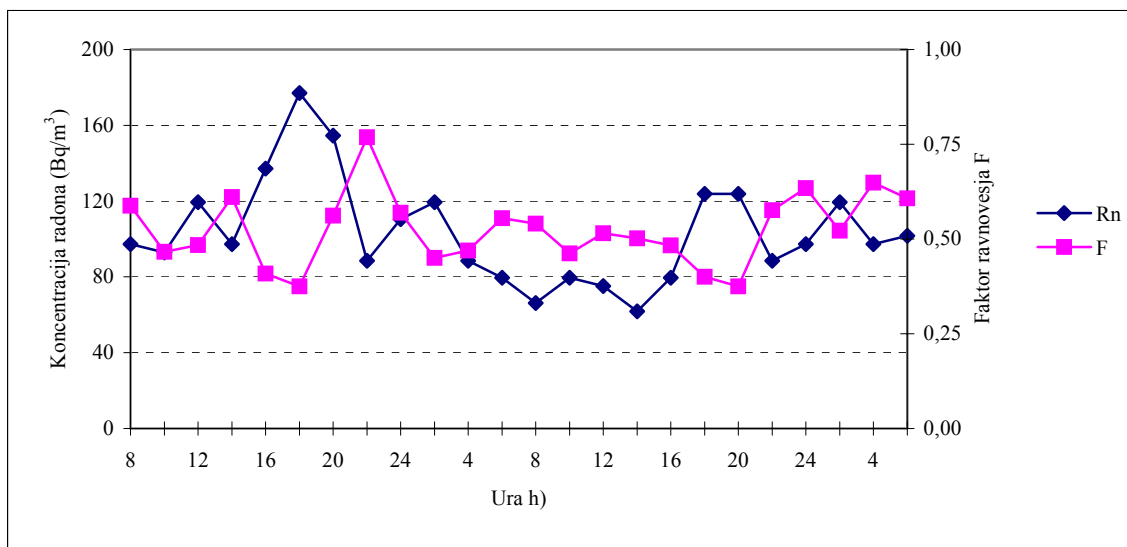
Povprečna temperatura	$T' = 29.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	Območje vrednosti	27 - 32 $^\circ\text{C}$
Povprečna rel. vlažnost	$r = 90 \text{ } \%$	Območje vrednosti	85 - 94 $\%$
Povprečna konc. radona	168 Bq/m^3	Območje vrednosti	106 - 243 Bq/m^3
Povprečni faktor ravnovesja	$F = 0.44$	Območje vrednosti	0.28 - 0.62

Slika 6.b. TopliceDobrna - Termalno zdravilišče
 Koncentracija razpadnih produktov radona v kopališkem prostoru
 Datum merjenja: 17 - 19.6.1997



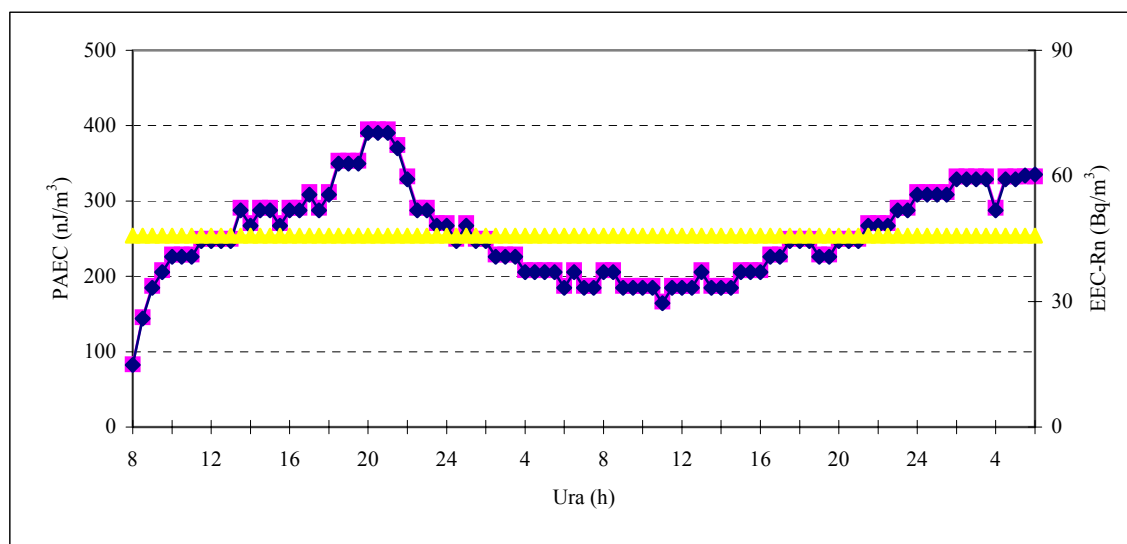
PAEC - povprečna	545 nJ/m^3	Območje vrednosti	199 - 608 nJ/m^3
EEC-Rn - povprečna	97 Bq/m^3	Območje vrednosti	35.3 - 108 Bq/m^3
fp - povprečni	0,07	Območje vrednosti	0.02 - 0.14

Slika 7.a. Zdravilišče Laško
 Koncentracija radona v prostoru s Hubbardovo kopeljo
 Datum merjenja: 4 - 6.2.1997



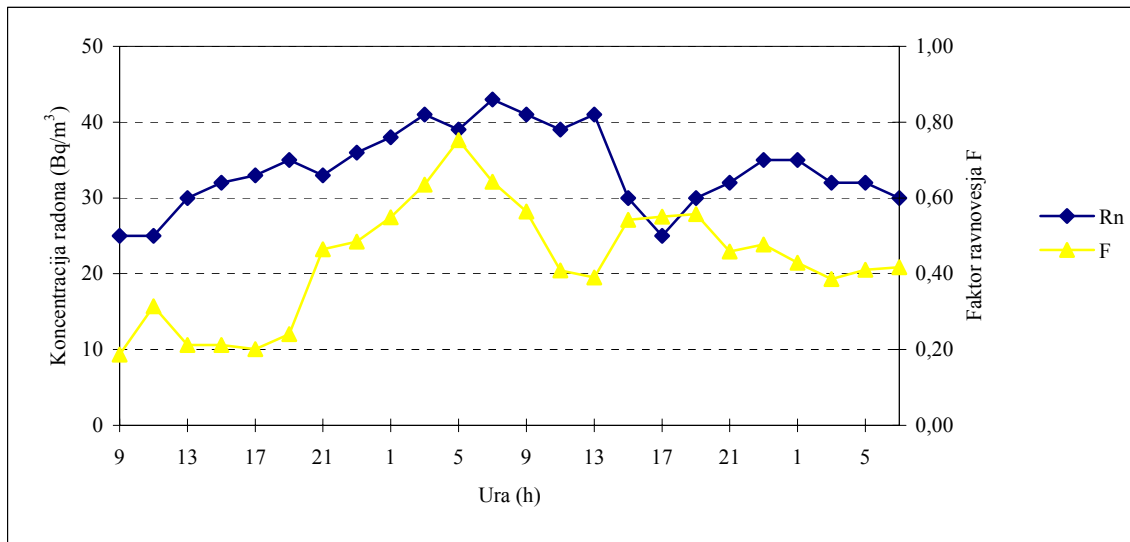
Povprečna temperatura	$T' = 24.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	Območje vrednosti	20 - 25 $^\circ\text{C}$
Povprečna rel. vlažnost	$r = 62 \text{ } \%$	Območje vrednosti	47 - 77 $\%$
Povprečna konc. radona	103 Bq/m^3	Območje vrednosti	61.8 - 177 Bq/m^3
Povprečni faktor ravnovesja	$F = 0.52$	Območje vrednosti	0.37 - 0.76

Slika 7.b. Zdravilišče Laško
 Koncentracija razpadnih produktov radona v prostoru s Hubbardovo kopeljo
 Datum merjenja: 4 - 6.2.1997



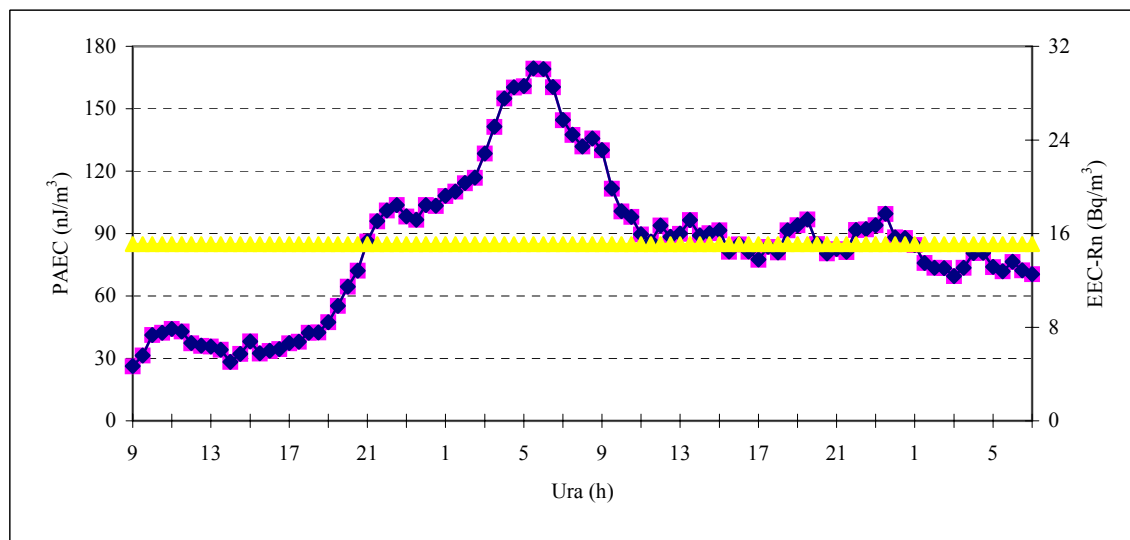
PAEC - povprečna	257 nJ/m^3	Območje vrednosti	83 - 395 nJ/m^3
EEC-Rn - povprečna	46 Bq/m^3	Območje vrednosti	14 - 70 Bq/m^3
f_p - povprečni	0,03	Območje vrednosti	0.01 - 0.05

Slika 8.a. Zdravilišče Moravske Toplice
 Koncentracija radona v prostoru s podvodno kopeljo
 Datum merjenja: 11 - 13.6.1997



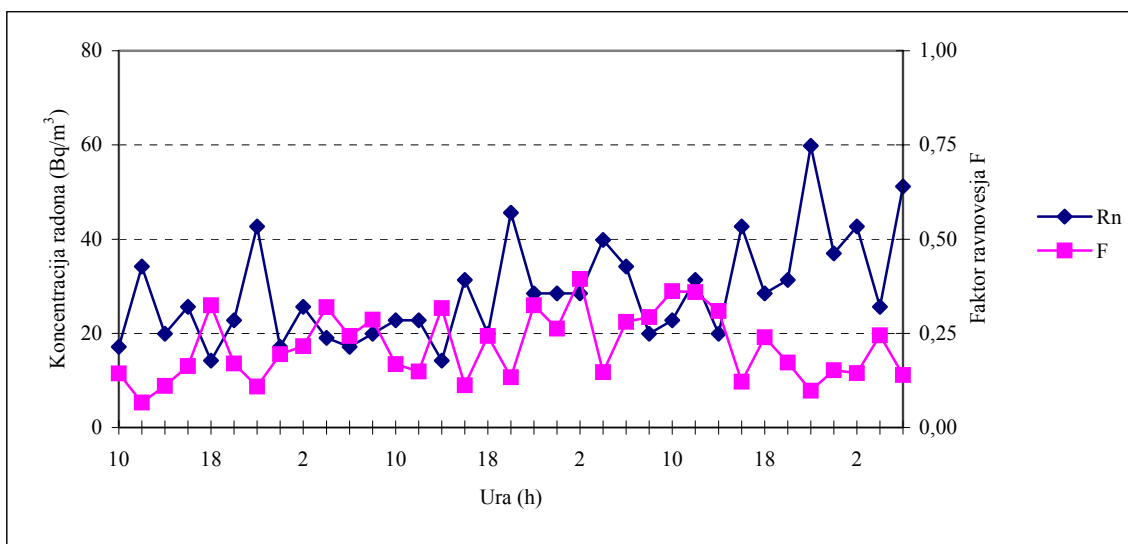
Povprečna temperatura	$T' = 27.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	Območje vrednosti	26 - 31 $^\circ\text{C}$
Povprečna rel. vlažnost	$r = 54 \text{ } \%$	Območje vrednosti	42 - 62 $\%$
Povprečna konc. radona	34 Bq/m^3	Območje vrednosti	25 - 41 Bq/m^3
Povprečni faktor ravnovesja	$F = 0.44$	Območje vrednosti	0.19 - 0.79

Slika 8.b. Zdravilišče Moravske Toplice
 Koncentracija razpadnih produktov radona v prostoru s podvodno kopeljo
 Datum merjenja: 11 - 13.6.1997



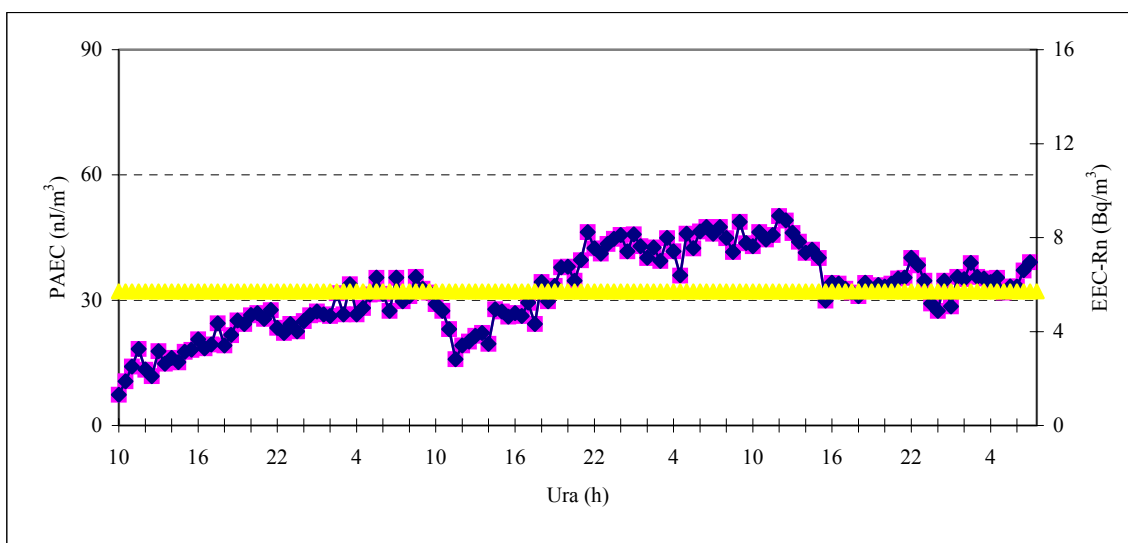
PAEC - povprečna	85 nJ/m^3	Območje vrednosti	26 - 169 nJ/m^3
EEC-Rn - povprečna	15 Bq/m^3	Območje vrednosti	4.7 - 30 Bq/m^3

Slika 9.a. Terme Zrece
 Koncentracija radona v bazenu
 Datum merjenja: 3 - 6.10.1997



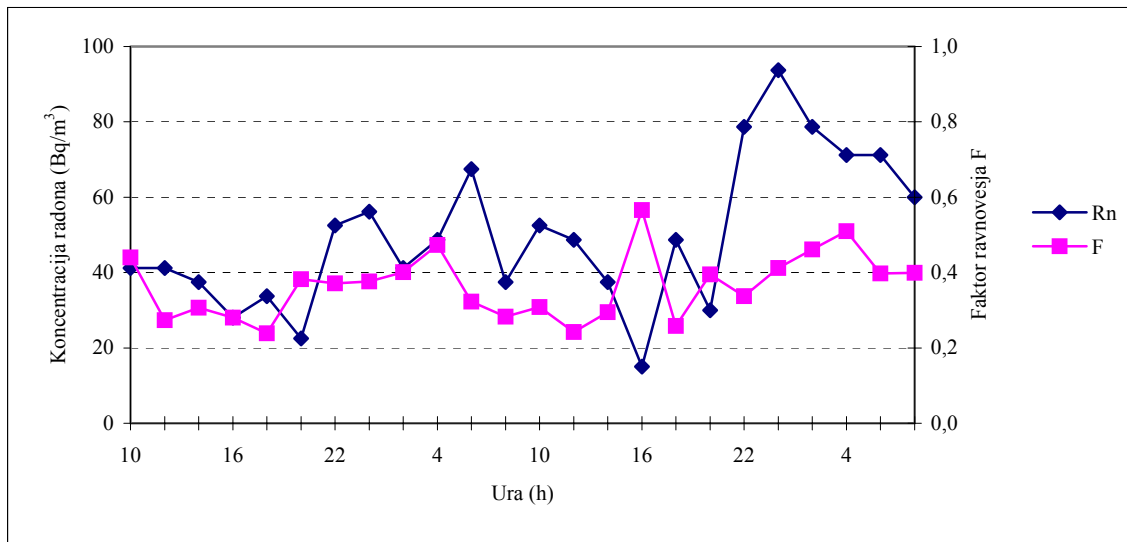
Povprečna temperatura	$T^1 = 31$	$^{\circ}C$	Območje vrednosti	25 - 32	$^{\circ}C$
Povprečna rel. vlažnost	$r = 51$	%	Območje vrednosti	47 - 72	%
Povprečna konc. radona	29	Bq/m^3	Območje vrednosti	14 - 60	Bq/m^3
Povprečni faktor ravnovesja	$F = 0.22$		Območje vrednosti	0.06 - 0.39	

Slika 9.b. Terme Zrece
 Koncentracija razpadnih produktov radona v bazenu
 Datum merjenja: 3 - 6.10.1997



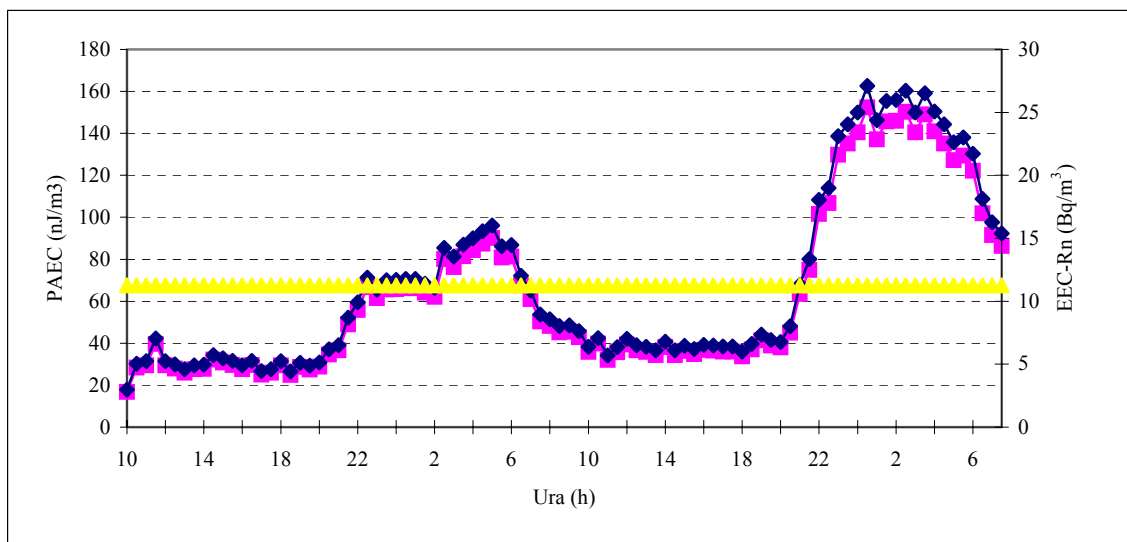
PAEC - povprečna	32	nJ/m^3	Območje vrednosti	7 - 50	nJ/m^3
EEC-Rn - povprečna	6	Bq/m^3	Območje vrednosti	1 - 9	Bq/m^3

Slika 10.a. Zdravilišče Rogaška
 Koncentracija radona v prostoru s termalno kopeljo
 Datum merjenja: 13 - 5.1.1998



Povprečna temperatura	$T' = 25$	$^{\circ}\text{C}$	Območje vrednosti	20 - 26	$^{\circ}\text{C}$
Povprečna rel. vlažnost	38	%	Območje vrednosti	31 - 53	%
Povprečna konc. radona	50	Bq/m^3	Območje vrednosti	15 - 94	Bq/m^3
Povprečni faktor ravnovesja	$F = 0.36$		Območje vrednosti	0.24 - 0.57	

Slika 10.b. Zdravilišče Rogaška
 Koncentracija razpadnih produktov radona v prostoru s termalno kopeljo
 Datum merjenja: 13 - 5.1.1998



PAEC - povprečna	63	nJ/m^3	Območje vrednosti	17 - 152	nJ/m^3
EEC-Rn - povprečna	11	Bq/m^3	Območje vrednosti	3 - 27	Bq/m^3
fp - povprečni	0,06		Območje vrednosti	0.02 - 0.11	

Tabela 4. Preglednica izmerjenih vrednosti koncentracij radona in potomcev v zraku in vodi v termalnih zdraviliščih in kopalniščih v R Sloveniji

Zdravilišče	Lokacija	Koncentracija radona v zraku (Bq/m ³)						Konc. pot. (Bq/m ³)			Radon v vodi (Bq/m ³)	
		povp. 2-3 dni	mesечно povprečje	min	povp	max	min	povp	max	VLG*	Difuzija	
Terme Catež	Hubbardova kopel	30 ± 6	71 ± 15	13	30	84	2,4	7	14,8	8500 ± 800	10500 ± 1000	
	Podvodna masaža		42 ± 4									
Radenci	Mineralna kopel 1	25 ± 8	28 ± 9	18	35	53	4	13	17	3600 ± 600	4500 ± 900	
	Mineralna kopel 2	20 ± 7	27 ± 8							4000 ± 800	4500 ± 900	
	Kopalni bazen		40 ± 10									
Dolenjske Toplice	Hubbardova kopel	50 ± 10	83 ± 12	13	77	119	5,5	22	64	50000 ± 7000	60000 ± 8000	
	Biserni bazeni		140 ± 15									
Smarješke Toplice	Hubbardova kopel	45 ± 10	66 ± 12	27	40	65	2,6	7	14,7	12000 ± 1500	15000 ± 2500	
	Zbiralni bazen	70 ± 15	3500 ± 140									
Atomske Toplice	Hidroterapija I	50 ± 15	40 ± 15	12	43	164	3,7	12	22			
	Hidroterapija II	20 ± 6										
	Hidroterapija V	30 ± 10										
	Zbiralni bazen									30000 ± 3500	35000 ± 3000	
	Termalna voda									9000 ± 1000	10000 ± 1500	
Zdravilišče Dobrna	Kopel št. 1	70 ± 15	119 ± 20	106	168	243	35,3	97	108	9400 ± 1000	10500 ± 1000	
	Kopalni bazen	120 ± 10	169 ± 20									
	Zbiralni bazen		3500 ± 200									
Terme Laško	Zbiralni bazen	3300 ± 300	4000 ± 140	62	103	177	14	46	70	4100 ± 500	6000 ± 700	
	Kopalni bazen	70 ± 20	100 ± 40									
	Hidroterapija 21	50 ± 20	90 ± 20									
Moravske Toplice	Kadna kopel št. 19	30 ± 10	22 ± 7	25	34	41	4,7	15	30	8000 ± 1000	7500 ± 900	
	Kadna kopel št. 3	25 ± 10	40 ± 8									
	Kadna kopel št. 6		23 ± 6									
	Kopalni bazen		19 ± 6									
	Kopalni bazen-vroci		15 ± 5									
Terme Zrece	Kopalni bazen	25 ± 10	10 ± 5	14	29	60	1	6	9	5000 ± 700	4500 ± 500	
	Terapevtski bazen	20 ± 7	15 ± 5									
Rogaška	Termalna kopel	30 ± 8	60 ± 10	15	50	94	3	11	27	20000 ± 2500	30000 ± 3000	
	Mineralna kopel		25 ± 10									
Terme Snovik	Kopalni bazen									6500 ± 700	7500 ± 800	
Rimske Toplice	Kopalni bazen									8000 ± 900	9000 ± 900	

* visokoločljiva spektrometrija gama