

UNIVERZA V NOVI GORICI  
FAKULTETA ZA ZNANOSTI O OKOLJU

**ALFA SCINTILACIJSKE CELICE  
ZA MERJENJE RADONA V ZRAKU:  
NJIHOVA KALIBRACIJA, PREIZKUS TESNOSTI IN  
UPORABA V VINSKIH KLETEH**

DIPLOMSKO DELO

Tina VELIŠČEK

Mentorica: doc. dr. Janja Vaupotič

Nova Gorica, 2009



## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Janji Vaupotič za strokovno vodenje pri nastajanju diplomskega dela. Zahvaljujem se tudi univ. dipl. inž. geol. Petri Žvab za pomoč pri geologiji in univ. dipl. inž. geol. Asti Gregorič za pomoč pri posredovanju podatkov v času odsotnosti mentorice.

Posebej se zahvaljujem tudi vsem vinarjem, ki so me kljub naključnemu obisku prijazno sprejeli in mi omogočili meritve.

## POVZETEK

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) je zaradi svojih izjemnih lastnosti zanimiv za proučevanje. Pri tem je bistveno njegovo detektiranje, saj ga človek s svojimi čutili ne zaznava. V diplomskem delu sem ovrednotila 10 novih španskih alfa scintilacijskih celic, ki se uporabljajo za merjenje trenutne koncentracije radona. Te celice sem v laboratoriju najprej umerila s pomočjo alfa scintilacijskega števca PRM (Portable Radon Monitor) 145 ter radonske komore, v kateri sta bila referenčni števec AlphaGuard in izvor radona. Dobljeni izkoristki so v intervalu med  $0,0003735$  in  $0,0004223 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ m}^3$  in so za faktor 10 nižji od starih alfa scintilacijskih celic izdelanih na Institutu Jožef Stefan. Poskus tesnosti je pokazal, da španke celice dobro tesnijo. Do približno 10 % izgube radona je prišlo šele po 200 urah od vzorčenja. Testirani stari celici sta to izgubo dosegli že po 10 urah. Rezultati terenskih meritev radona v zraku v vinskih kletih na Krasu in v Goriških Brdih so zelo različni, saj so v veliki meri povezani z geologijo območja. Na območju Goriških Brd, ki je pretežno flišne sestave, sem izmerila zanemarljive koncentracije radona, na območju apnenčastega Krasa pa so le te znašale od 100 do  $2674 \text{ Bq m}^{-3}$ . Povišane koncentracija radona sem izmerila v 3 kletih, med njimi najvišjo v Krepljah, ki je blizu Divaškega preloma, kateremu tudi pripisujem tako visoke vrednosti.

Ključne besede: radon, alfa razpad, meritve radona, alfa scintilacijska celica, izkoristek celice, vinske kleti, geologija.

## SUMMARY

Due to its exceptional characteristics, radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) is very interesting to researches. The detection of radon is essential because people cannot feel radon with their sensory organs. In my research I evaluated characteristics of 10 new Spanish alpha scintillation cells which are used for direct air sampling and measuring instantaneous radon concentrations. First I calibrated new cells in laboratory using the alpha scintillation counter PRM (Portable Radon Monitor) 145 and radon chamber into which reference AlphaGuard continuous radon monitor and radon source were placed. Experimentally defined efficiency values between  $0.0003735$  and  $0.0004223 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ m}^3$  were calculated and are for a factor of 10 smaller than for old alpha scintillation cells manufactured at the Jožef Stefan Institute. The experiment of the air tightness of cells show good quality of Spanish cells. 10 % of radon loss started to occur after about 200 hours after sampling. Test results of 2 old cells reached the same radon loss after just 10 hours. Results from sampling of air in wineries in Goriška Brda and Kras are very different because indoor radon concentrations are strongly related to geology. Concentrations measured in Goriška Brda were negligible because of its flysh ground. Measurements in wineries in Karst, for which limestone grounds are characteristic showed values between 100 and  $2,674 \text{ Bq m}^{-3}$ . Elevated radon concentrations were found in 3 wineries. In Kreplje I measured the highest radon concentration; I presume the main reason is nearness of the Divača fault.

Key words: radon, alpha decay, radon measurement, alpha scintillation cell, cell efficiency, wine cellars, geology.

## KAZALO VSEBINE

<b>ZAHVALA</b> .....	<b>I</b>
<b>POVZETEK</b> .....	<b>II</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>II</b>
<b>KAZALO VSEBINE</b> .....	<b>III</b>
<b>1 UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Cilji diplomskega dela</b> .....	<b>1</b>
<b>2 TEORETIČNE OSNOVE</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Radioaktivnost</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2 Radon</b> .....	<b>5</b>
2.2.1 Lastnosti .....	5
2.2.2 Izvor in transport .....	5
2.2.3 Učinki na človeka .....	8
2.2.3.1 Dozimetrija.....	9
<b>2.3 Geološke značilnosti</b> .....	<b>10</b>
2.3.1 Geologija jugozahodne Slovenije .....	11
<b>2.4 Gradbene karakteristike in vstop radona v bivalno okolje</b> .....	<b>13</b>
2.4.1 Koncentracije radona v bivalnem okolju .....	13
<b>2.5 Meritve radona</b> .....	<b>13</b>
2.5.1 Priporočila in predpisi .....	13
2.5.2 Meritve v Sloveniji.....	14
2.5.3 Merilni postopki .....	14
<b>3 EKSPERIMENTALNI DEL</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1 Alfa scintilacijska merilna tehnika</b> .....	<b>16</b>
3.1.1 Alfa scintilacijske celice.....	16
3.1.1.1 Stare alfa scintilacijske celice.....	16
3.1.1.2 Nove alfa scintilacijske celice.....	17
3.1.2 Alfa scintilacijski števec.....	17
3.1.3 Izračun koncentracij radona na osnovi meritev z alfa scintilacijsko tehniko .....	18
3.1.4 Izračun izkoristka alfa scintilacijske celice.....	19
<b>3.2 Opis ostalih merilnih naprav</b> .....	<b>19</b>
3.2.1 Kontinuirni merilnik radona AlphaGuard .....	19
3.2.2 Radonska komora .....	20
3.2.3 Črpalka AlphaPump in Vacutech črpalka .....	21
<b>3.3 Potek meritev</b> .....	<b>21</b>
3.3.1 Kalibriranje alfa scintilacijskih celic v radonski komori in določitev izkoristka celic.....	21

3.3.2 Preverjanje tesnenja zamaškov novih in starih scintilacijskih celic .....	23
3.3.3 Merjenje radona v briških in kraških vinskih kletih z novimi scintilacijskimi celicami.....	23
3.3.4 Primerjalno merjenje radona v treh kraških vinskih kletih s povečano koncentracijo radona z novimi in starimi alfa scintilacijskimi celicami.....	24
<b>4 REZULTATI IN RAZPRAVA .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 Rezultati kalibriranja.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2 Preverjanje tesnenja zamaškov – razpadne krivulje.....</b>	<b>26</b>
<b>4.3 Koncentracije v kletih.....</b>	<b>29</b>
4.3.1 Efektivne doze vinarjev v vinskih kletih .....	32
<b>4.4 Izvori radona v 3 kraških kletih s prekoračeno mejno vrednostjo .....</b>	<b>33</b>
4.4.1 Vinska klet v Krepljah.....	33
4.4.2 Vinska klet v Šmarjah .....	35
4.4.3 Vinska klet v Komnu.....	36
<b>5 ZAKLJUČKI.....</b>	<b>38</b>
<b>6 VIRI.....</b>	<b>40</b>

# 1 UVOD

Element radon je radioaktiven žlahten plin, ki v naravi nastaja v uranovi ( $^{238}\text{U}$ ), torijeви ( $^{232}\text{Th}$ ) in aktinijevi ( $^{235}\text{U}$ ) razpadni verigi z radioaktivno preobrazbo radija. Z izjemo radona, ki je plin, so vsi ostali elementi v razpadnih nizih kovine.  $^{222}\text{Rn}$  ima v primerjavi z drugimi izotopi radona najdaljši razpolovni čas in ta mu omogoča, da lahko iz gradbenega materiala ali iz zemlje prehaja na površje in kontaminira zrak. Njegovo gibanje je običajno omejeno z nekaj metri ali manj in se mora zgoditi znotraj njegovih razpolovnih časov (Nero, 1988).

$^{222}\text{Rn}$  razpada dalje v 4 kratkožive trdne razpadne produkte, in sicer v dva sevalca alfa ( $^{218}\text{Po}$  in  $^{214}\text{Po}$ ) in dva sevalca beta-gama ( $^{214}\text{Pb}$  in  $^{214}\text{Bi}$ ), ki so ob nastanku prosti atomi. V zraku se hitro povežejo bodisi med sabo ali se adsorbirajo na prašnih delcih in kapljicah vlage ter tako tvorijo radioaktivne aerosole, ki se v zaprtih prostorih usedajo na površine. Le manjši delež jih ostane v prosti obliki. Radon se z dihanjem v telesu ne zadrži v pomembnejših koncentracijah, saj ga izdihamo. Potencialno zdravstveno tveganje predstavlja vdihavanje radioaktivnih aerosolov radonovih razpadnih produktov, ki se odlagajo na stene pljuč. Ker radonovi razpadni produkti običajno prej razpadejo, preden so odstranjeni iz telesa s pljučno-čistilnim mehanizmom, poškodujejo okoliško tkivo (Turner, 2007).

Koncentracije radona in njegovih razpadnih produktov v prostorih so odvisne od dostopa radona v notranjost zgradbe.  $^{222}\text{Rn}$  lahko vstopi direktno iz zemlje ali kamnine pod zgradbami in prehaja v notranji zrak, v katerem je praviloma od 4 do 5-krat bolj koncentriran kot v zunanjem zraku, kjer je večje redčenje (Turner, 2007). Radon, nastal v zemlji, lahko vstopa v notranji zrak tudi iz zunanjega zraka, gradbenega materiala ter z uporabo vode in naravnega plina. Od vseh naštetih je za povišane koncentracije radona v zgradbah najpomembnejši direktni prehod radona iz tal pod zgradbo s kombinacijo konvekcijskega in difuzijskega transporta (Nero, 1988).

Številne raziskave so pokazale, da na koncentracijo radona v nekem prostoru vplivajo tudi meteorološki parametri (Zmazek in sod., 2002; Bahtijari in sod., 2007; Zupančič, 2007), delovni režim (Vaupotič, 2002a) in bivalne navade ljudi (Šeliga, 2008).

Povišane koncentracije radona predstavljajo za človeka zdravstveno nevarnost. Ker ga človek ne zaznava, saj je brez barve, vonja in okusa, so njegove meritve nujno potrebne. Zadnjih dvajset let posvečajo v svetu veliko pozornost meritvam radona v prostorih, saj je znano, da radon skupaj s svojimi kratkoživimi razpadnimi produkti v povprečju prispeva več kot polovico k letni efektivni dozi, ki jo prejme človek od vseh naravnih virov ionizirajočih sevanj (Wasiolek in James, 2000; Arvela, 2002).

## 1.1 Cilji diplomskega dela

V moji diplomski nalogi sem se posvetila trem vidikom radona, od katerih spadata prva dva v področje merilnih tehnik, tretji pa obravnava ekološko-zdravstveni vidik. Tako je moja diplomska raziskava tematsko razdeljena v 3 sklope, in sicer zajema prvi sklop kalibracijo 10 novih alfa scintilacijskih celic za merjenje trenutne koncentracije radona v zraku, drugi sklop preizkus tesnosti alfa scintilacijskih celic in tretji sklop trenutne meritve koncentracij radona v vinskih kletih.

Alfa scintilacijska celica ima svoj izkoristek celice (b), ki ga je potrebno izmeriti. Zato sem v laboratoriju v radonski komori najprej umerila 10 novih alfa scintilacijskih celic in pri tem uporabila prenosni merilnik radona PRM 145. Kot vir radona sem uporabila staro ročno uro s primesjo  $^{226}\text{Ra}$  v barvi za številčnico in referenčni kontinuirni merilnik radona AlphaGuard.

Kakovost novih celic sem preverila s preizkusom tesnosti zamaškov, saj bi izhajanje vzorca zraka pomenilo tudi napako merjenja. Kontinuirno sem merila razpad radona več razpolovnih dob in dobljene rezultate primerjala s teoretičnimi vrednostmi. Preizkus sem opravila tudi s starimi celicami, ki imajo zamaške iz drugega materiala, in rezultate primerjala med seboj.

Nove alfa scintilacijske celice sem preizkusila tudi na terenu, kjer sem merila trenutne koncentracije radona v notranjem zraku. V ta namen sem naključno izbrala 10 briških in 10 kraških vinskih kleti. Območji sta med seboj geološko zelo različni in zato zanimivi za primerjavo. Na treh merilnih mestih, kjer je koncentracija radona presegla mejno vrednost za delovne prostore, sem poskušala najti vzroke za povišane koncentracije in poiskati izvore. Odvzela sem več vzorcev zraka z različnih koncev kleti, tako z novimi kot tudi s starimi celicami, in na koncu primerjala rezultate.

Rezultati diplomske naloge bodo prispevali k ovrednotenju lastnosti novih celic, ki jih bodo na Institutu Jožef Stefan uporabljali za svoje nadaljnje raziskave. Rezultati meritev radona v vinskih kletih bodo dopolnili dosedanje informacije o koncentraciji radona v podzemnih vinskih kletih.

## **2 TEORETIČNE OSNOVE**

V tem poglavju bom najprej opisala radioaktivnost, lastnost, zaradi katere je radon enostavno detektirati. Sledi opis ostalih lastnosti radona, njegov izvor in transport. Ker radon z vstopom v naše okolje ogroža naše zdravje, je v poglavju učinki na človeka posebej opisana tudi dozimetrija. Radon je zelo zanimiv za proučevanje tako fizikalno-kemijskih lastnosti kot tudi uporabe v različnih znanostih. Njegovo plinasto stanje mu omogoča dobro mobilnost in prenos informacij na dolge razdalje v zemeljski skorji in atmosferi kot tudi v vodi, saj se v njej raztaplja. Žlahtnost mu omogoča neoviran prehod skozi različne medije. Poleg naštetih lastnosti imajo na mobilnost radona in na njegov vstop v bivalno okolje velik vpliv tudi drugi dejavniki, predvsem geologija in gradbene karakteristike stavb, ki ju tudi podrobneje obravnavam.

Za raziskave radona so ključnega pomena meritve njegovih koncentracij v okolju. V Sloveniji potekajo tovrstne raziskave že 40 let in temu primerno je njihovo število. Meritve zajemajo celotno Slovenijo in so bile opravljene v različnih okoljih. Pri detektiranju radona in njegovih kratkoživih razpadnih produktov se poslužujemo različnih metod, ki so opisane v zadnjem podpoglavju teoretičnih osnov.

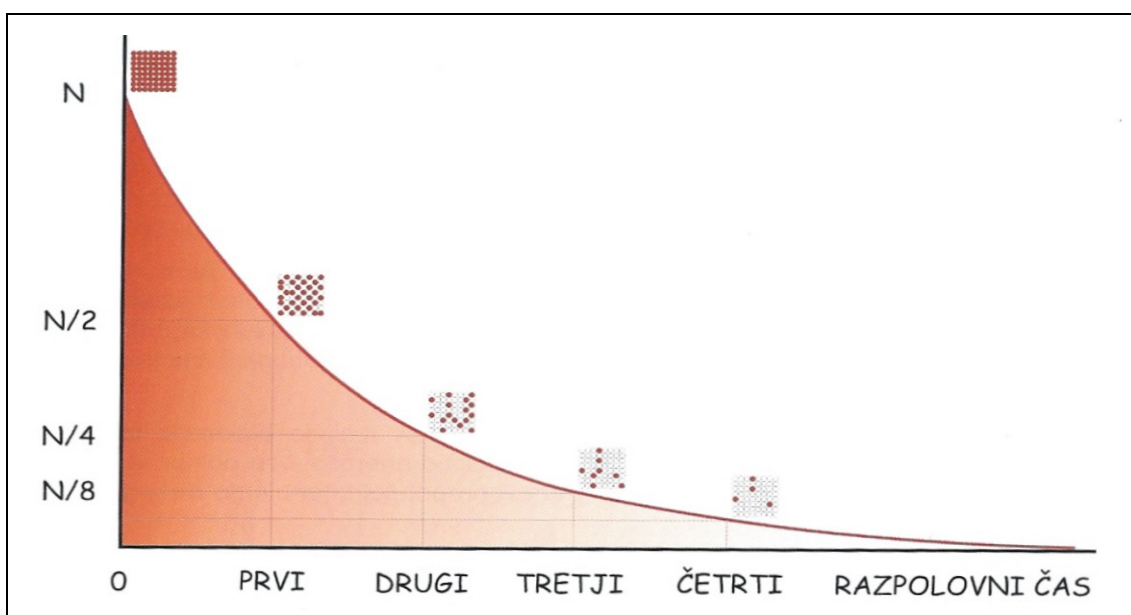
### **2.1 Radioaktivnost**

Radioaktivnost je preobrazba nestabilnih atomskih jeder in poteka neodvisno od zunanjih pogojev, temperature in tlaka. Pri preobrazbi se izseva presežek energije v



obliki valovanja ali delcev, ki ob prehodu skozi snov iz atomov izbijajo elektrone, preostanek atoma pa je ion. Tako sevanje imenujemo ionizirajoče sevanje, saj ob prehodu skozi snov za sabo pusti ionske pare, to je ione in elektrone. Tako se nestabilno jedro preobrazí v jedro drugega kemičnega elementa ali pa spremeni svojo notranjo energijo.

Jedra radioaktivnih izotopov se preobražajo naključno, neodvisno in neenakomerno, zato je radioaktivna preobrazba statističen pojav (Koželj in sod., 2006). Ker za posamezni atom ne moremo napovedati, kdaj se bo preobrazil, podamo radioaktivno preobrazbo z razpolovnim časom  $t_{1/2}$ . To je čas, v katerem se aktivnost radioaktivnega elementa zmanjša na polovico (Sliki 1). Glede na dolžino razpolovnega časa ločimo med kratko in dolgoživimi radioaktivnimi izotopi.



**Slika 1:** Radioaktivni razpad je eksponentna krivulja (Koželj in sod., 2006: 10).

Hitrost zmanjševanja števila jeder  $N$  imenujemo aktivnost  $A$ , in sicer je ena preobrazba na sekundo enako 1 Bq (becquerel). Stara enota je bila 1 Ci (Curie) in je pomenila aktivnost enega grama radija ( $^{226}\text{Ra}$ ), kar ustreza  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq.

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (1)$$

Ker je število preobrazb v časovni enoti sorazmerno številu radioaktivnih jeder  $N$ , opišemo radioaktivno preobrazbo z naslednjo diferencialno enačbo:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad (2)$$

Sorazmernostnemu koeficientu  $\lambda$  pravimo razpadna konstanta in ta je karakteristična za določen radionuklid in ima enoto recipročnega časa:  $\text{s}^{-1}$ ,  $\text{min}^{-1}$  itd.

V enačbi 2 nato uredimo količine in jo integriramo od časa  $t = 0$ , ko je  $N = N_0$ , do časa  $t = t$ , ko je  $N = N$ .

$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot t \quad (3)$$

$$\int_{N_0}^N d \ln N = -\lambda \int_{t_0}^t dt \quad (4)$$

Po antilogaritmiranju je integrirana diferencialna enačba eksponentna funkcija.

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (5)$$

$N_0$  je število jeder v času  $t = 0$ ,  $N$  pa število jeder po preteku časa  $t$ .

Če enačbo 5 pomnožimo na obeh straneh z  $\lambda$ , dobimo aktivnost  $A$  vira po preteku določenega časa  $t$  glede na prvotno aktivnost vira  $A_0$  ob času  $t = 0$ .

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (6)$$

Enačbo za aktivnost lahko preprosto preoblikujemo v enačbo za koncentracijo radona, ki jo podajamo v  $\text{Bq m}^{-3}$ , tako da obe strani delimo z  $1 \text{ m}^3$  in dobimo:

$$C = C_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (7)$$

$C_0$  je koncentracija radona ob času  $t = 0$ ,  $C$  pa koncentracija radona po preteku časa  $t$ .

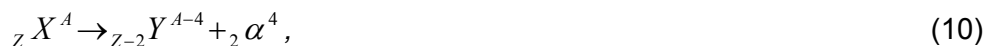
Ker opišemo razpolovni čas kot čas, v katerem pade začetna aktivnost na polovico, preoblikovano enačbo 6 zapišemo:

$$\frac{A_0}{2} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (8)$$

Po antilogaritmiranju enačbe 8 in izpostavitvi  $t_{1/2}$  dobimo izraz za razpolovni čas.

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (9)$$

Radioaktivne snovi oddajajo energijo v obliki sevanja alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) in gama ( $\gamma$ ). Pri preobrazbi alfa nastanejo helijeve jedra, pri preobrazbi beta elektroni, pri preobrazbi gama pa se sprošča elektromagnetno valovanje. Radioaktivno preobrazbo alfa simbolično zapišemo kot:



pri čemer je  $Z$  vrstno število,  $A$  masno število in  $\alpha$  helijevo jedro z nabojem  $2+$ . Delci alfa imajo energijo med 2,6 in 11,7 MeV in dosežejo med 3 in 6 % svetlobne hitrosti v vakuumu. Zaradi velike mase in visokega naboja je njihova pot v snovi praktično ravna. Ker so delci alfa monoenergetski, imajo delci tudi enak doseg, z majhnim statističnim sipanjem okoli srednje vrednosti, ki je 3,84 cm (Vaupotič in Kobal, 2007/2008).

## 2.2 Radon

### 2.2.1 Lastnosti

Element radon je leta 1900 odkril nemški kemik Friedrich Dorn, leta 1908 pa je William Ramsay element tudi izoliral in ga poimenoval niton. Ime radon se je uveljavilo v dvajsetih letih dvajsetega stoletja, ko je plin dobil ime po elementu radiju, iz katerega nastaja (Leksikon kemije, 2001).

Radon je najtežji element skupine žlahtnih plinov s simbolom Rn in vrstnim številom 86. Njegovo vrelišče je pri  $-61,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (211,2 K), tališče pa pri  $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$  (202 K). Pri normalni temperaturi (273 K) in tlaku (101,3 kPa) je radon brezbarven plin, brez vonja in okusa, z gostoto  $9,7\text{ kg m}^{-3}$  (Kemija, 2004).

Poznamo več kot dvajset radonovih izotopov, med katerimi so najbolj značilni trije, ki nastajajo v naravi v uranovi ( $^{238}\text{U}$ ), torijevi ( $^{232}\text{Th}$ ) in aktinijevi ( $^{235}\text{U}$ ) razpadni vrsti (Slika 2). V vseh razpadnih vrstah nastaja radon neposredno iz radija, in sicer dobimo v uranovi razpadni vrsti  $^{222}\text{Rn}$  (radon), v torijevi  $^{220}\text{Rn}$  (toron) in v aktinijevi  $^{219}\text{Rn}$  (aktinon) (Vaupotič in Kopal, 1997).

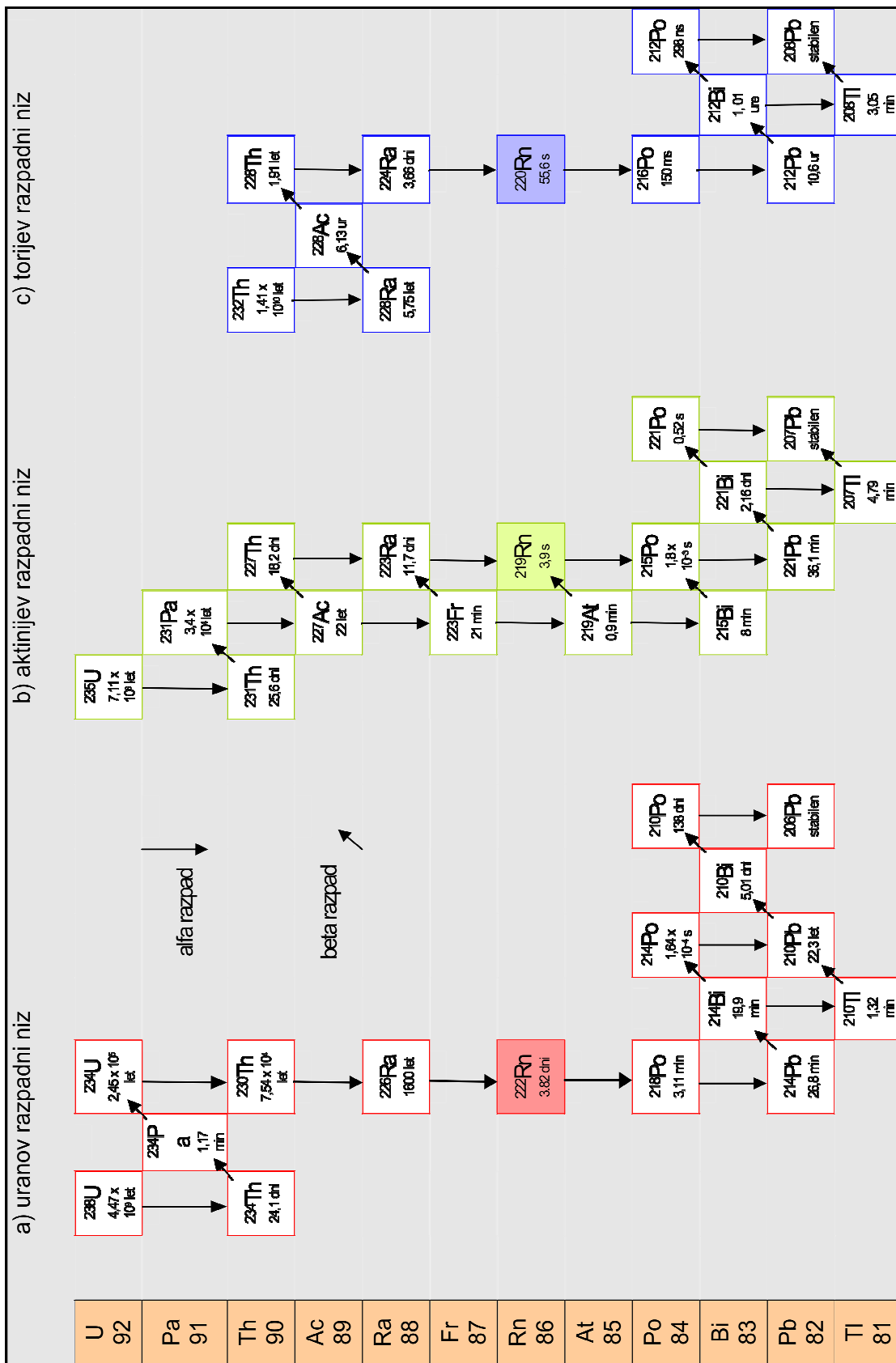
$^{222}\text{Rn}$  (v nadaljnjem besedilu radon) je najpomembnejši radonov izotop, saj ima od vseh najdaljšo razpolovno dobo, ki je 3,82 dni. Masno število tega najstabilnejšega radonovega izotopa je 222.

Z oddajanjem delcev alfa radon razpada v štiri kratkožive trdne razpadne produkte, med katerimi sta dva sevalca alfa,  $^{218}\text{Po}$  in  $^{214}\text{Po}$ , in dva sevalca beta-gama,  $^{214}\text{Pb}$  in  $^{214}\text{Bi}$ . Razpolovni čas vseh je manjši od 30 minut, in sicer ima  $^{218}\text{Po}$  razpolovni čas 3,1 minute,  $^{214}\text{Po}$   $1,6 \cdot 10^{-4}$  sekunde,  $^{214}\text{Pb}$  26,8 minute in  $^{214}\text{Bi}$  19,9 minute. V čistem in mirnem zraku se vzpostavi radioaktivno ravnotežje med radonom in njegovimi razpadnimi produkti po približno 3 urah (Slika 3), kar pomeni, da so aktivnosti vseh enake. V tem času tako dobimo iz 1 Bq prvotno prisotnega radona po 1 Bq vsakega od njegovih razpadnih produktov. Torej imamo iz prvotnega 1 Bq sevalca alfa ( $^{222}\text{Rn}$ ) skupno kar 3 Bq sevalcev alfa ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$  in  $^{214}\text{Po}$ ).

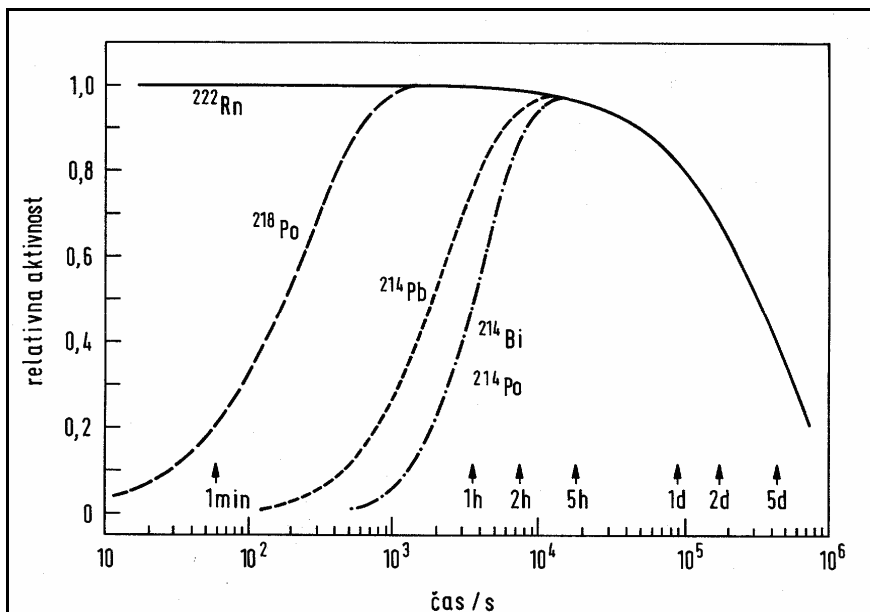
V realnih pogojih (vlažen zrak, prašni delci, preprih) se radioaktivno ravnotežje nikoli ne doseže, saj se večji del radonovih kratkoživih razpadnih produktov po nastanku veže na aerosole ali se odložijo na površinah predmetov.

### 2.2.2 Izvor in transport

Radon nastaja s preobrazbo radija ( $^{226}\text{Ra}$ ) v uranovi ( $^{238}\text{U}$ ) razpadni verigi (Slika 2). Uran naj bi nastal v eksploziji supernove, ki je sprožila jedrske vezave vseh težkih elementov. Pred 4,6 milijardami let je iz oblaka teh elementov nastala Zemlja. Radioaktivna jedra z razpolovnim časom manj kot nekaj sto milijonov let so do sedaj praktično že izginila. Ostala so stabilna jedra, ki sestavljajo večino običajnih materialov, in jedra radioaktivnih elementov z daljšim razpolovnim časom kot na primer uran ( $^{238}\text{U}$ ) skupaj s svojimi razpadnimi produkti (Bodansky, 1987).



Slika 2: Uranov, aktinijev in torijev razpadni niz (Zupančič, 2007 :Priloga A)



**Slika 3:** Hitrost rasti in razpada radonovih kratkoživih razpadnih produktov v prvotnem čistem vzorcu radona (Vaupotič, 2002b: 129)

Razpolovni čas <sup>238</sup>U je 4,5 milijarde let in do danes ga je v zemlji prisotnega še približno polovico glede na nastanek. Razpad <sup>238</sup>U je prvi korak v razpadni verigi radioaktivnega izotopa radon, ki se konča s stabilnim izotopom svinca, <sup>206</sup>Pb (Bodansky, 1987).

Uran je prisoten povsod v zemeljski skorji, dejansko v vseh oblikah kamnin in zemlje. Enako velja za njegov razpadni produkt <sup>226</sup>Ra, katerega vsebnost v zemlji je od 20 do 50 Bq kg<sup>-1</sup> (UNSCEAR, 1993). Od tod pride radon zaradi odzivne energije in v manjši meri zaradi difuzije v razpoke, pore in v prostor med delci ter tako kontaminira zrak, ki se zadržuje v zemeljski skorji in je v ravnotežju z zunanjim ozračjem. Na izhajanje radona iz zemlje v medprostor in v ozračje vpliva poleg vsebnosti radija v zemlji v veliki meri tudi položaj radona v mineralnem zrnu in smer premika atoma, saj je od tega odvisno ali bo atom radona ostal v mineralnem zrnu ali bo izšel v medzrnski prostor. Pojav imenujemo emanacija. Ob preobrazbi radija dobi jedro <sup>222</sup>Rn 86 keV kinetične energije (Nazzaroff in sod., 1988). Dolžina premika je odvisna od gostote in sestave medija, po katerem se premika novo nastali atom. Sestava in struktura tal vplivata tako na emanacijo radona, kot tudi na njegovo kopičenje v porah in transport na površino (Vaupotič in Kopal, 1997).

Transport radona v tleh poteka z difuzijo ali s konvekcijo. Difuzija je proces, ko se atomi radona spontano razvrščajo po pornih fluidih (plinu ali tekočini). Proces je pogostejši v manj propustnih tleh. V propustnejših tleh je pogostejša konvekcija, ki je pretok zraka ali tekočine v pori zaradi spremembe zračnega tlaka na površju zemlje (Nero, 1988).

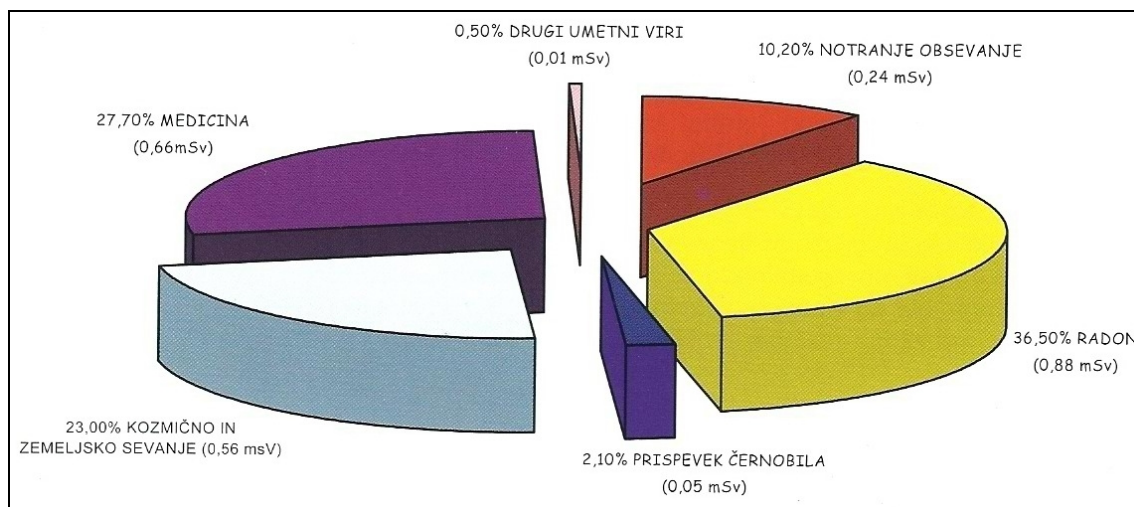
Poleg geoloških dejavnikov, ki vplivajo na transport radona, imajo vpliv nanj tudi klimatski dejavniki kot so temperatura, zračni tlak, vse oblike padavin in veter (Zupančič, 2007). Količina radona, ki izhaja iz zemlje, je odvisna tudi od globine, v kateri je formiran. Le radon, nastal blizu površine, lahko doseže ozračje, ob njegovem razpadu pa tudi njegovi razpadni produkti. Kadar se radon preobrazi, preden dospe do površja, so njegovi trdni produkti ujeti v tleh.

Radon pride v stik tudi s podtalnico, v kateri se raztaplja. Njegova topnost v vodi je  $230 \text{ cm}^3 \text{ kg}^{-1}$  pri temperaturi 293 K in tlaku 101,3 kPa. V površinskih vodah so srednje koncentracije radona okrog  $1 \text{ kBq m}^{-3}$ , v podtalnici pa okrog  $10 \text{ kBq m}^{-3}$ . V vodnjakih dosežejo vrednosti tudi do  $100 \text{ kBq m}^{-3}$  (UNSCEAR, 1993). Raziskave naravne radioaktivnosti v površinskih in podzemnih vodah v Sloveniji so pokazale nizke koncentracije radona v primerjavi z nekaterimi drugimi državami (Kobal in sod., 1990). Koncentracije radona v površinskih vodah so bile v območju med 95 in  $5379 \text{ Bq m}^{-3}$ , s povprečno vrednostjo  $800 \text{ Bq m}^{-3}$ , v podtalnici pa v območju med 50 in  $75.000 \text{ Bq m}^{-3}$ , s povprečno vrednostjo le okoli  $1 \text{ kBq m}^{-3}$ .

### 2.2.3 Učinki na človeka

Sevanje povzroča fizikalne, kemične in biološke učinke, saj pride pri prehodu skozi človeško telo do ionizacije atomov in molekul. Celični material je lahko izpostavljen ionizirajočemu sevanju neposredno, pri čemer pride do interakcije sevanja in molekule deoksiribonukleinske kisline (DNK), ali posredno preko učinkovanja prostih radikalov na celico z radiolizo vode (Koželj in sod., 2006).

Meritve koncentracij radona in njegovih učinkov na človeka so zelo pomembne, saj radon predstavlja velik delež celotne obsevnosti, naravne in umetne, ki znaša kar 36,5 %. Kot kaže slika 4 je glede na celotni delež sevanja, ki je 2,4 mSv na leto, delež radona okrog 0,88 mSv na leto (Koželj in sod., 2006).



**Slika 4:** Delež obsevanosti iz posameznih vrst virov sevanj (Koželj, 2008: 68)

Radon predstavlja za človeka zdravstveno nevarnost takoj, ko odda delce alfa. Zaradi velikosti in naboja teh delcev, ki ne morejo priti skozi kožo, nam radon zunaj telesa ne škoduje. Radon in njegovi razpadni produkti so lahko vdihani in tako alfa delci vstopajo v človeško telo. Ker je radon plin, ga skupaj z zrakom tudi izdihamo, saj v pljučih zaradi sorazmerno dolge razpolovne dobe razpade le manjše število radonovih jeder. Za človeka so bolj nevarni radonovi kratkoživi trdni razpadni produkti, saj se odfiltrirajo v pljučih in ob razpadu poškodujejo okoliško tkivo ter s tem povečujejo tveganje za nastanek pljučnega raka. Nekaj radona je lahko raztopljenega v telesni maščobi, njegovi razpadni produkti pa se lahko odlagajo v kostni mozeg. Pri starih ljudeh je lahko akumulirana doza velika in lahko povzroča povečano tveganje za levkemijo.

Radon je prav tako povezan z melanomom (kožnim rakom), ledvičnim rakom in nekaterimi rakavimi obolenji pri otrocih (Bell, 2007). The United States Environmental Protection Agency (EPA, 1994) priporoča za mejno koncentracijo radona  $4 \text{ pCi L}^{-1}$  ( $148 \text{ Bq m}^{-3}$ ). Višje koncentracije so bile ocenjene kot tveganje. Povprečne koncentracije radona v zunanjem zraku so okoli  $0,2 \text{ pCi L}^{-1}$  ( $7,4 \text{ Bq m}^{-3}$ ), notranje pa približno  $1,0 \text{ pCi L}^{-1}$  ( $37 \text{ Bq m}^{-3}$ ) (Bell, 2007). V Sloveniji so bile izmerjene nekoliko višje koncentracije, in sicer je povprečna letna koncentracija radona v zunanjem zraku  $14,9 \text{ Bq m}^{-3}$  (Vaupotič in sod., 2009), povprečna letna koncentracija radona v domovih pa  $54 \text{ Bq m}^{-3}$  (Križman in sod., 1996).

### 2.2.3.1 Dozimetrija

Dozimetrija je interdisciplinarno področje, ki obravnava spremembe v snovi pri obsevanju z ionizirajočim sevanjem. Snov dobi zaradi teh sprememb drugačne fizikalne lastnosti, živ organizem pa spremeni življenjske procese ali celo odmre (Cvelbar, 2003).

Množino energije  $dE$ , ki se absorbira pri radioaktivnem sevanju, v enoti mase  $dm$  imenujemo absorbirana doza  $D$ . Merimo jo v grayih ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ ).

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (11)$$

Ker imajo različne vrste sevanja različne učinke na snov, je Mednarodna komisija za zaščito pred sevanji ICRP (International Commission on Radiological Protection) vpeljala sevalni utežni faktor  $w_R$ . Le-ta se razlikuje glede na vrsto sevanja in je za alfa delce 20, za sevanje beta in gama pa 1. Dozo, ki upošteva različna sevanja, imenujemo enakovredna doza  $H$  in je definirana kot:

$$H = w_R \cdot D \quad (12)$$

Množina energije, ki se absorbira v snovi, pa ni odvisna le od vrste sevanja in njegove energije, ampak tudi od vrste snovi in njegove geometrije. Zato vpeljemo tako imenovano tkivno utež  $w_T$ , ki je definirana za različne celice in s tem za različna tkiva, ki so različno občutljiva na sevanje.

Za ovrednotenje celotne obsevne obremenitve človeka se pogosto uporablja efektivno dozo  $E$ , ki jo dobimo kot seštevek enakovrednih doz za posamezne organe pomnožene z utežnim faktorjem za tkivo  $w_T$ . Ker so pri dihanju radona in njegovih razpadnih produktov v glavnem izpostavljena pljuča, upoštevamo pri izračunu efektivne doze le tkivno utež za pljuča, ki je po ICRP priporočilih 0,12. Enota enakovredne in efektivne doze je Sv (sievert). Predpisana dozna omejitev pri poklicni izpostavljenosti za efektivno dozo na koledarsko leto je  $20 \text{ mSv}$  (Koželj in sod., 2006).

$$E = w_T \cdot H \quad (13)$$

Pri izračunu efektivne doze, ki jo prejmemo od radona in njegovih kratkoživih razpadnih produktov, je prispevek plina radon pravzaprav zanemarljiv, saj glavni del doze pripišemo trdnim radonovim razpadnim produktom, ki se odlagajo v pljučih. V primeru,

da merimo koncentracijo radona in ne koncentracije njegovih razpadnih produktov, slednjo dobimo tako, da koncentracijo radona pomnožimo z ravnotežnim faktorjem ( $F$ ), ki je 0,40. Obsevno izpostavljenost radonu in radonovim kratkoživim razpadnim produktom ( $E_p$ ) izražamo kot produkt koncentracije radona v zraku ( $C$ ) in časa izpostavljenosti oziroma dihanja radona ( $t$ ) in ima enoto  $\text{Bq h m}^{-3}$ .

$$E_p = C \cdot F \cdot t \quad (14)$$

Izpostavljenost se zaradi praktičnosti pogosto podaja v enotah WL (working level), kljub temu, da te enote niso v sistemu SI. Pri tem velja, da 1 WL ustreza ravnotežni koncentraciji  $3.700 \text{ Bq m}^{-3}$  oziroma koncentraciji energije alfa  $21,6 \mu\text{J m}^{-3}$  ali  $1,3 \cdot 10^5 \text{ MeV L}^{-1}$ . Pri mesečni izpostavljenosti (170 ur) govorimo o 1 WLM (working level month).

$$E_p = \frac{C}{3700} \cdot F \cdot \frac{t}{170} \quad (15)$$

Če pomnožimo izpostavljenost v enačbi 15, ki je izražena v WLM, z doznim pretvorbenim faktorjem DCF (Dose Conversion Factor), dobimo efektivno dozo. Ker nas zanima izključno radon, ki smo ga vnesli v telo z dihanjem uporabimo za radon  $\text{DCF}_{\text{INH}}$ , ki je po ICRP-65 metodologiji  $5 \text{ mSv WLM}^{-1}$  (Vaupotič in sod., 2007).

$$E = \frac{C}{3700} \cdot F \cdot \frac{t}{170} \cdot \text{DCF}_{\text{INH}} \quad (16)$$

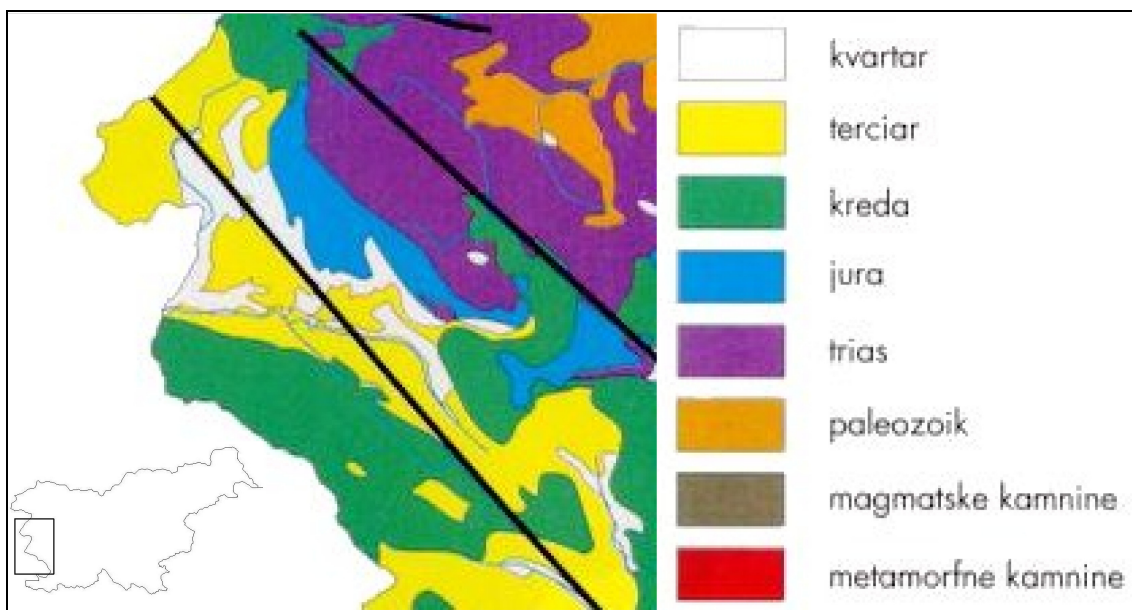
### 2.3 Geološke značilnosti

Uran je v majhnih koncentracijah, nekaj ppm (število delcev na milijon), prisoten v vseh kamninah v tleh. V nekaterih kamninah pa je prisotnost urana povečana.

S preparevanjem in tektonskim premikanjem kamnine le ta postaja propustnejša. Vzroki za povišane koncentracije radona na površini so lahko tudi strukturne nepravilnosti kot so prelomi in prelomne cone, vzdolž katerih je povečan transport radona (večje razdalje). To povzroča lokalno povišanje radona tudi na območjih, kjer je drugače nizka izpostavljenost radonu. Radon se lahko prenaša tudi preko vode, saj je topen v njej, vendar je njegovo premikanje v vodi počasnejše kot v zraku. Kljub temu je transport preko tekočin v apnencu in vzdolž prelomnic hiter (Bell, 2007).

Raziskava o vplivu geološke podlage Slovenije na koncentracije radona v bivalnih prostorih (Popit in Vaupotič, 2002) je pokazala, da lahko pričakujemo najvišje koncentracije na mezozojskih in zgornje paleozojskih kamninah. Najvišje koncentracije so bile izmerjene na krednih apnencih, ki jih najdemo tudi na območju Krasa (Slika 5).





**Slika 5:** Izrez karte geoloških dob jugozahodnega dela Slovenije (Buser in Draksler, 1989)

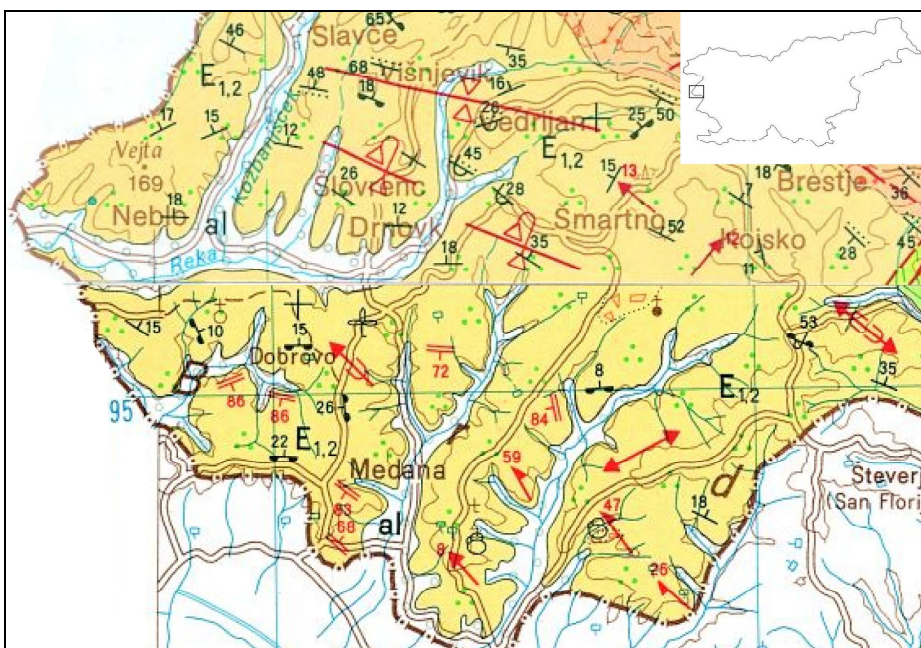
### 2.3.1 Geologija jugozahodne Slovenije

Kras in Goriška Brda ležita na jugozahodu oziroma zahodu Slovenije in geotektonsko pripadata Zunanjim Dinaridom, za katere je značilno starejše, oligocensko gubanje in narivanje proti jugu in jugozahodu ter mlajša zmična tektonska aktivnost. Najbolj značilni mladi strukturi obravnavanega območja sta dinarsko usmerjena (SZ-JV) Raški in Divaški prelom (Placer 1981, 1999, 2008).

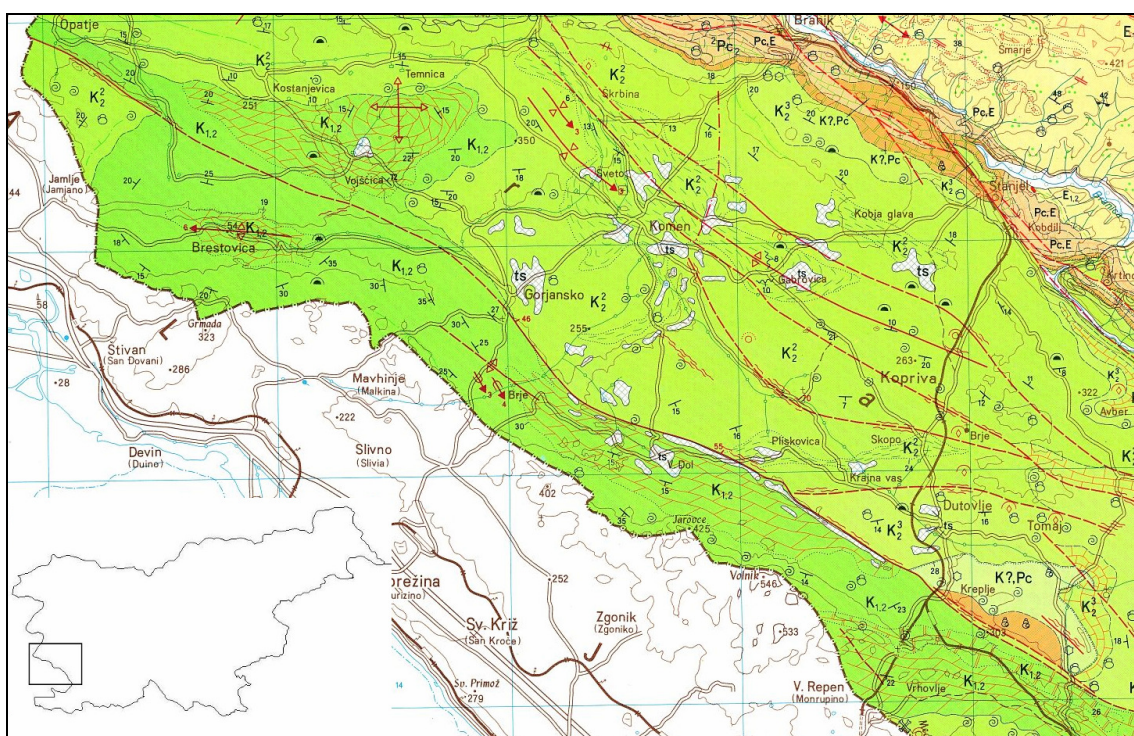
Paleogeografsko razdelitev Slovenije je v literaturo uvedel Buser (1989, 1996). Kras paleogeografsko pripada Dinarski karbonatni platformi, ki se je formirala v srednjem triasu in je obstajala do konca krede oziroma začetka kenozoika. To paleogeografsko enoto označuje plitvodna karbonatna sedimentacija. Za obdobje poznega mezozoika in začetek kenozoika je značilno tektonsko povzročeno pogrezanje severnih robov Dinarske karbonatne platforme ter posledično postopno napredovanje globjevodne sedimentacije severneje ležečega Slovenskega bazena proti jugu. Na območju Krasa tako najdemo kredne, paleocenske in spodnje eocenske karbonatne kamnine, predvsem apnenice in dolomite (Buser, 1973, 1968; Jurkovšek in sod., 1996, 2008), ki so ponekod zelo pretрте in zakrasele. Do prekinitve plitvodne sedimentacije pride v eocenu, ko se nad karbonati začnejo odlagati eocenske flišne kamnine (Otoničar, 2008). Gre za menjavo plasti laporja, glinavca in peščenjaka, ki so se sedimentirale iz gravitacijskih, večinoma turbidnih tokov v globjemorskem predgorskem bazenu.

Goriška Brda so bila na Dinarski karbonatni platformi locirana severneje od območja današnjega Krasa. Območje današnjih Goriških Brd se je ob strmih prelomih pričelo intenzivno rušiti že v kredi in posledično je te predele zajela globokomorska sedimentacija zagotovo že v spodnjem eocenu (Buser, 1986). Novejše raziskave so pokazale, da so deli flišne sekvence na tem področju tudi nekoliko starejši in sicer paleocenske starosti (Dolenc in sod., 2001). Za ta, spodnji del zaporedja, so poleg prej opisanega klasičnega flišnega zaporedja značilni tudi debeli vložki apnenčevih breč

(Buser, 1987). Flišne kamnine sestavljajo večji del površja Goriških Brd (Slika 6). Kredne karbonatne kamnine izdanzajo le v severozahodnih obronkih te vinorodne pokrajine.



**Slika 6:** Izrez Goriških Brd iz geološke karte Gorica in Tolmin (Buser, 1968, 1986)



**Slika 7:** Izrez Krasa iz geološke karte Gorice (Buser, 1986)

## 2.4 Gradbene karakteristike in vstop radona v bivalno okolje

Radon vstopa iz zemlje v zgradbe skozi razpoke in odprtine v betonski talni plošči, skozi stične robove med temeljno ploščo in stenami, skozi kanalizacijske odprtine in pri slabo tesnjenih vodovodnih napeljavah. Od tod prehaja v zgradbe zaradi podtlaka, ki je posledica razlike temperatur znotraj zgradb in okolice. Toplejši zrak v zgradbi je redkejši od atmosferskega in talnega zraka in zato pride do vdiranja v notranjost. Ker je največji prispevek radona iz tal, je razumljivo, da najvišje koncentracije radona v zraku najdemo v kletnih prostorih. Ker so ti prostori velikokrat slabše prezračevani, to še dodatno zvišuje koncentracijo radona v njih. Boljše prezračevanje je še posebej priporočljivo v zimskih mesecih, saj je radonu zaradi povečanih padavin in zmrzali onemogočeno direktno izhajanje iz zemlje v zunanje ozračje in takrat namerimo v stanovanjih najvišje koncentracije (Gundersen in sod., 1992). Ključnega pomena pri preprečevanju vdiranja radona v zgradbe je zagotovo kakovostna izdelava talne plošče in sten, ki mejijo na zemljo.

Relativno majhen prispevek radona da gradbeni material kot na primer naravni kamen, glina, opeka, mavec itd. Ta naj bi bil po ocenah Komisije evropske skupnosti (Commission of the European Communities, CEC) le v 10 do 20 % primerih glavni vzrok povišanih koncentracij radona v stanovanjskih prostorih. Ocenjujejo tudi, da gradbeni materiali nikakor ne morejo biti glavni vzrok povišanih koncentracij radona tam, kjer povprečne letne koncentracije presegajo  $400 \text{ Bq m}^{-3}$  (CEC, 1987). Kljub temu je pri gradnji priporočljiva izbira neoporečnih materialov.

Prispevek radona v zraku zaradi uporabe vode je v večini primerov zanemarljiv, saj je faktor prehoda voda–zrak  $10^{-4}$  (Vaupotič, 2002b). Radon prehaja v zrak tudi pri gorenju zemeljskega plina v plinskih štedilnikih ali pečeh. Pri nas so izmerili koncentracijo radona v naravnem plinu na območju Ljubljane le okrog  $60 \text{ Bq m}^{-3}$  (Vaupotič in Kobal, 1997), tako da naj ta prispevek pri nas ne bi predstavljal potencialne nevarnosti.

### 2.4.1 Koncentracije radona v bivalnem okolju

Na koncentracijo radona v bivalnem okolju vplivajo naravni dejavniki kot tudi človekove dejavnosti. Vaupotič in sodelavci (1994) navajajo, da na povišane koncentracije radona v bivalnih prostorih v Sloveniji najbolj vpliva lokalna geologija določenega zemljišča, kjer stoji hiša (propustnost in tip kamnine) ter kemična sestava kamnin in zemlje (vsebnost urana). Poleg navedenih spada pod naravni dejavnik tudi meteorologija območja. Med človekove dejavnosti prištevamo gradbene značilnosti in bivalne navade.

## 2.5 Meritve radona

### 2.5.1 Priporočila in predpisi

Različne mednarodne organizacije izdajajo priporočila o mejnih koncentracijah radona v različnih okoljih. Mejna koncentracija je še dopustna vrednost. ICRP priporoča za

mejno letno koncentracijo radona v bivalnem okolju med 200 in 600 Bq m<sup>-3</sup> in za delovno okolje med 500 in 1.500 Bq m<sup>-3</sup>. Pri pripravi uradnih poročil država upošteva tudi svojo lokalno geologijo in mikroklimo.

Osnovni slovenski predpis, ki ureja varstvo pred ionizirajočimi sevanji in uporabo virov sevanja pri nas, je *Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti, Uradni list RS* (Ur. l. RS, št. 102/2004). Na podlagi tega zakona je več izvršilnih predpisov, tako uredb s strani vlade kot tudi pravilnikov s strani ministrstev. Med njimi je *Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih, Uradni list RS* (Ur. l. RS, št. 49/2004). Ta uredba določa za mejno letno koncentracijo <sup>222</sup>Rn v zraku delovnega okolja 1.000 Bq m<sup>-3</sup>, v zraku bivalnega okolja pa 400 Bq m<sup>-3</sup>.

### 2.5.2 Meritve v Sloveniji

V Sloveniji potekajo meritve radona od leta 1969, ko so sodelavci Instituta Jožef Stefan začeli radiološki nadzor Rudnika urana Žirovski vrh. V ta namen so takrat na inštitutu preoblikovali obstoječo alfa scintilacijsko merilno tehniko za merjenje radona v zraku in razvili svoj merilni sistem, ki je še vedno osnova mnogih meritev.

Do danes so na Institutu Jožef Stefan izvedli številne meritve tako v zraku kraških jam, zdravilišč in premogovnikov kot tudi meritve radona v vodah. Opravili so tudi preliminarne meritve radona v bivalnem okolju na nekaterih geološko različnih in tudi ekološko zanimivih lokacijah. V obdobju od 1990 do 1994 so s sistematičnimi raziskavami radona v bivalnem in delovnem okolju, v okviru Slovenskega nacionalnega programa meritev radona, premerili koncentracije v 730 otroških vrtcih in 890 osnovnih in srednjih šolah ter v 1.000 naključno izbranih stanovanjih (Vaupotič, 2003). Najvišje koncentracije radona so našli na Krasu, kjer radon zaradi geološke sestave območja in strukture tal lažje prehaja na površje (Vaupotič in Kobal, 1997; Popit in Vaupotič, 2002).

Kasneje so na inštitutu opravili še dodatne preiskave v vrtcih in šolah ter na področjih povečanega tveganja. Do danes so izdelali že številne karte radona v okolju v Sloveniji.

Od 1996 do 2002 so potekale preiskave radona na specifičnih delovnih mestih, kot so zdravilišča, vodovodna podjetja in bolnišnice. Med izbranimi delovnimi okolji je bilo tudi 8 vinskih kleti v geološko različnih delih Slovenije. V tej raziskavi so bile izmerjene koncentracije radona v kletih med 26 in 1.045 Bq m<sup>-3</sup>. Efektivne doze vinarjev, prejete v enem dnevu, so bile med 0,50 in 19,94 μSv wd<sup>-1</sup> (working day). Z izjemo ene kleti, koncentracije radona niso presegale mejne vrednosti za delovno okolje (Vaupotič, 2008a).

### 2.5.3 Merilni postopki

Metode za merjenje radona in njegovih kratkoživih razpadnih produktov se med seboj razlikujejo glede na vrsto merjenega sevanja, načina vzorčenja in čas merjenja. Meritve temeljijo na detekciji alfa, beta ali gama žarkov, ki nastanejo pri radioaktivnih razpadih. Vzorčenje lahko poteka pasivno ali aktivno. Pri pasivnih detektorjih se vzorčenje najpogosteje odvija preko difuzije, končni rezultat pa je podan kot povprečna vrednost

za določeno merilno obdobje. Pri aktivni tehniki naprava črpa zrak preko detektorja in običajno poleg radona meri tudi druge parametre. Glede na čas trajanja delimo meritve na trenutne, kontinuirne in povprečne ali integralne. Pri trenutnih meritvah ugotavljamo koncentracijo v zraku v nekem trenutku z odvzemom enkratnega vzorca. Kontinuirne meritve dajejo časovno odvisnost koncentracij na merjenem mestu v krajših časovnih intervalih skozi daljše obdobje. Pri integralnih meritvah dobimo povprečne koncentracije radona.

Radon merimo neposredno z detekcijo njegovih žarkov alfa ali posredno z detekcijo žarkov alfa, beta ali gama njegovih razpadnih produktov. V splošnem je merjenje radona zasnovano na principu, da radon z difuzijo ali zaradi črpanja prehaja skozi filter, ki zadrži njegove razpadne produkte, radon pa prehaja v točno določeno prostornino detektorja. V detektorju nato radon razpada. Večina metod se nanaša na detekcijo sevanja alfa, ki ga oddajajo radon in novonastali kratkoživi razpadni produkti, sevalci alfa.

Za meritve trenutnih koncentracij radona se najpogosteje uporablja alfa scintilacijska merilna tehnika, ki temelji na odvzemu vzorca zraka v alfa scintilacijsko celico, v kateri se zaradi trkov delcev alfa s scintilatorjem tvorijo svetlobni signali, ki jih ojačamo in štejemo.

### **3 EKSPERIMENTALNI DEL**

V prvem delu tega poglavja je opisana alfa scintilacijska merilna tehnika in glavna instrumenta, ki sta pri tem potrebna, in sicer alfa scintilacijska celica in alfa scintilacijski števec. Sledi opis ostalih merilnih naprav, ki sem jih pri svojem delu uporabljala. To so kontinuirni merilnik radona AlphaGuard, radonska komora in črpalki.

Zadnji del poglavja zajema potek meritev, ki sem jih opravljala v okviru svojega diplomskega dela. Najprej sem v laboratoriju umerila 10 novih alfa scintilacijskih celic. Vzorce zraka sem odzemale iz komore z znano koncentracijo radona, v kateri sem kot referenčni instrument uporabljala kontinuirni merilnik radona AlphaGuard (Genitron Instruments, 1998), kot izvor radona pa ročno uro z radijevo ( $^{226}\text{Ra}$ ) številčnico. Za merjenje aktivnosti alfa v scintilacijskih celicah sem uporabljala prenosni merilnik radona PRM 145 (Ames, 2006). S štirimi ponovitvami sem vsaki celici izračunala njen izkoristek. Nato sem preizkušala tesnost zamaškov. Vzorec zraka z znano koncentracijo radona sem spremljala vsaj 5 razpolovnih dob. Ugotovljala sem, koliko je izmerjena koncentracija nižja od teoretično izračunane z upoštevanjem razpada.

Meritve trenutnih koncentracij radona v zraku sem opravljala v poletnih mesecih na območju Goriških Brd in Krasa. Za merilna mesta sem si izbrala kleti, saj se v njih akumulirajo največje količine radona. V 3 kletih, kjer sem namerila trenutno koncentracijo radona višjo od priporočljive vrednosti za delovno okolje, sem meritve ponovila v hladnejših dneh. Tokrat sem na vsakem merilnem mestu odvzela vzorec zraka z novo in staro scintilacijsko celico. Vse poteke meritev bom v nadaljevanju tudi podrobno opisala.

### 3.1 Alfa scintilacijska merilna tehnika

Alfa scintilacijska tehnika je namenjena merjenju trenutnih koncentracij radona v zraku in je hitra, preprosta in zanesljiva. Temelji na merjenju celokupne aktivnosti alfa  $^{222}\text{Rn}$  in obeh polonijevih izotopov,  $^{218}\text{Po}$  in  $^{214}\text{Po}$ . Ker scintilator ne loči energij, je potrebno, da od končanega odvzema vzorca zraka do začetka štetja impulzov potečejo vsaj 3 ure, da se v celici vzpostavi radioaktivno ravnotezje med radonom in njegovimi razpadnimi produkti. Tehniko je zasnoval Lucas (1957) in po njem se merilne celice imenujejo tudi Lucasove celice. Vanje zajamemo zrak, počakamo na vzpostavitev ravnotežja in nato v alfa scintilacijskem števcu izmerimo aktivnost vzorca in izračunamo koncentracijo radona v zraku. To je trenutna koncentracija radona v zraku.

#### 3.1.1 Alfa scintilacijske celice

Alfa scintilacijske celice (v nadaljnjem besedilu celice) so namenjene odvzemanju točno določenega volumna vzorca zraka, kateremu nato merimo alfa aktivnost. V ta namen imajo celice na notranji strani scintilator, ki ob trku alfa delcev vanj izseva svetlobo določene valovne dolžine. Scintilator je običajno cinkov sulfid, aktiviran s srebrom,  $\text{ZnS(Ag)}$ , in seva svetlobo z valovno dolžino okrog 600 nm (Vaupotič in Kobal, 1997). Celice imajo prozorno dno za stik s fotopomnoževalko, ki detektira svetlobne signale, jih ojača in spremeni v električne. Število bliskov je sorazmerno aktivnosti radona v celici. Celice imajo običajno tudi po dva ventila, namenjena izmenjavi zraka.

Oblika in velikost celice sta pomembni, saj vplivata na njeno učinkovitost, ki jo pred začetkom uporabe določimo z izkoristkom celice. Quindos-Ponceta in sod. (2003) so eksperimentalno pokazali, da je efekt zračnega tlaka na detektirano učinkovitost funkcija premera. Če Lucasovo celico, ki je umerjena na ničti nadmorski višini, uporabimo v višjih predelih, pride do napake pri merjenju. Zaradi nižjega tlaka opravijo alfa delci daljšo pot, kar povzroča več trkov ob scintilator na notranjih stenah celice. Do slabše učinkovitosti prihaja pri celicah, ki imajo velik premer, in zato pri umeritvenih pogojih večji "mrtvi volumen". To je volumen znotraj celice, kjer je izsevan alfa delec, ki zaradi premajhne energije ne doseže scintilatorja.

##### 3.1.1.1 Stare alfa scintilacijske celice

Stare scintilacijske celice so izdelali sodelavci Instituta Jožef Stefan. Celice, ki sem jih uporabljala, so valjaste oblike volumna  $0,7 \text{ dm}^3$  in imajo premer osnovne ploskve 7,5 cm. Stene celic so iz bakrene pločevine debeline 0,5 mm, ki je iz notranje strani prevlečena s scintilatorjem  $\text{ZnS(Ag)}$  v obliki tankega filma. Dno celice je iz pleksi stekla in je prozorno. Vse stene celic so fiksno spojene. Pri takih celicah predstavlja glavni problem potencialna kontaminacija notranjih sten, kadar jih uporabljamo v prostorih z zelo visoko koncentracijo radona, ki lahko poviša normalno ozadje celice. Zato je pomembno, da celice po daljši uporabi ponovno umerimo (Quindos-Ponceta in sod., 2003). Cevki, od katerih sega ena skoraj do dna celice, druga pa je le kakšen centimeter pod površino vrhnje ploskve, in ki sta namenjeni vzorčenju zraka v celico in čiščenju celice, sta zatesnjeni z gumijastima zamaškoma (Slika 8).



**Slika 8:** Stara alfa scintilacijska celica

### 3.1.1.2 Nove alfa scintilacijske celice

Nove celice so razvili in izdelali v laboratoriju španske Univerze v Cantabrii na Fakulteti za medicino in se razlikujejo od celic, izdelanih na Institutu Jožef Stefan. Scintilator ZnS(Ag) je nanešen na folijo, ki je vstavljena v celico. Tako lahko nove celice enostavno dekontaminiramo z odstranitvijo spodnje prozorne ploskve in zamenjavo scintilatorja (Quindos-Ponceta in sod., 2003).

Nove celice (Slika 9) so prav tako valjaste oblike, vendar imajo manjši volumen,  $0,314 \text{ dm}^3$  in manjši premer osnovne ploskve, ki je 5 cm. Celotna celica je izdelana iz pleksi stekla. Na vrhu imajo nove celice kovinska ventila, ki zagotavljata boljše tesnenje.

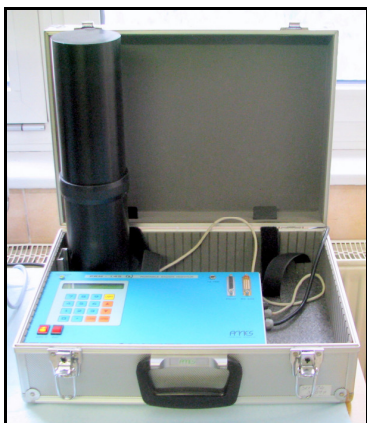


**Slika 9:** Nova alfa scintilacijska celica

### 3.1.2 Alfa scintilacijski števec

Merilnik je sestavljen iz detektorskega dela in merilnika, zložena v prenosnem kovčku (Slika 10). Prvi del, ki je cilindrične oblike, služi kot detektor impulzov ter vsebuje fotopomnoževalko, napajanje pomnoževalke, ojačevalnik impulzov in prostor za scintilacijsko celico. Drugi del vsebuje mikrokontroler, akumulator, napajalnik in

selektor impulzov. Na njem je tipkovnica, kontrolna lučka za pokrov fotopomnoževalke, stikala za vklop in dvovrstičen alfanumeričen prikazovalnik s tekočimi kristali. Napajanje scintilacijskega števca poteka z izmenično napetostjo 220–240 V in 50 W varovalko 0,3 A ali z vgrajeno baterijo (akumulatorska baterija 12 V / 7,2 A h) (Ames, 2006).



**Slika 10:** Prenosni merilnik radona PRM 145

Pokrov fotopomnoževalke odpremo in nanjo pokončno postavimo celico z vzorcem. Prozorno dno celice mora biti v optičnem stiku s fotopomnoževalko, ki nato svetlobne signale pretvori v električne, ki jih ojačamo in nato preštejemo (Vaupotič in Kobal, 1997). Števec nam da rezultate v impulzih na minuto ( $\text{imp min}^{-1}$ ) ali  $\text{Bq m}^{-3}$ .

### 3.1.3 Izračun koncentracij radona na osnovi meritev z alfa scintilacijsko tehniko

Iz števila impulzov, prešteti na števcu, izračunamo koncentracijo radona po naslednji enačbi:

$$C_{Rn} = \frac{\frac{n_s}{t_s} - \frac{n_b}{t_b}}{60 \cdot b \cdot e^{-\lambda \cdot t}} \quad , \quad (17)$$

$$C_{Rn} = \frac{\frac{n_s}{t_s} - \frac{n_b}{t_b}}{60 \cdot b \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot \Delta t}{t_{1/2}}}} \quad (18)$$

$C_{Rn}$  je koncentracija radona v vzorcu zraka ( $\text{Bq m}^{-3}$ ). Oznaki  $n_s$  in  $n_b$  predstavljata število impulzov na števcu pri merjenju vzorca (s) in ozadja (b),  $t_s$  in  $t_b$  pa sta njuna časa merjenja, podana v minutah. Izkoristek alfa scintilacijske celice označimo z  $b$  in jo merimo v enotah  $\text{s}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^3$ . Sprememba časa  $\Delta t$  nam pove časovno razliko med končanim odvzemom vzorca v alfa scintilacijsko celico in začetkom merjenja njegove aktivnosti, z upoštevanom tri urno zakasnitvijo.  $t_{1/2}$  je razpolovni čas radona in je enak 91,68 ure oziroma 3,82 dni (Ames, 2006).



### 3.1.4 Izračun izkoristka alfa scintilacijske celice

Izkoristek celice izračunamo tako, da iz enačbe za koncentracijo radona v zraku (enačba 17,18) izpostavimo  $b$  ( $s^{-1} Bq^{-1} m^3$ ). Pri tem moramo poznati začetno koncentracijo radona v vzorcu zraka. Preoblikovana enačba ima naslednjo obliko:

$$b = \frac{\frac{n_s}{t_s} - \frac{n_b}{t_b}}{C_{Rn} \cdot 60 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot \Delta t}{t_{1/2}}}} \quad (19)$$

Koncentracija radona  $C_{Rn}$  je izračunana na osnovi izmerjene koncentracije radona v radonski komori, z uporabo merilnika AlphaGuard, in ob upoštevanju korelacije volumnov. Ker v sistem povežemo 3 ali 4 scintilacijske celice, se celoten volumen sistema ( $V_0$ ) zviša za  $V \cdot 3$  ali  $V \cdot 4$ . Sorazmerno z novim volumnom se zniža koncentracija radona.

$$C_{Rn} = \frac{C_{Rn0} \cdot V_0}{V_0 + (V \cdot 3)} \quad (20)$$

Volumen cevk, ki povezujejo instrumente med vzorčenjem, v enačbi 20 ni upoštevan, saj je zanemarljiv v primerjavi z volumnom komore in celic.

## 3.2 Opis ostalih merilnih naprav

### 3.2.1 Kontinuirni merilnik radona AlphaGuard

Prenosni merilnik AlphaGuard (Slika 11) je namenjen kontinuirni detekciji radona v zraku, zemlji in vodi. Kot detektor uporablja ionizacijsko celico. V zadnjem času je vse bolj v rabi, saj ima nizko mejo detekcije, odlikujejo pa ga predvsem dobra kalibracija s strani proizvajalca, zanesljivost in dolga življenska doba. Merilnik ima kapaciteto spomina za 4320 podatkov, kar v primeru enournega merjenja pomeni, da lahko neprekinjeno meritev opravljamo 6 mesecev.

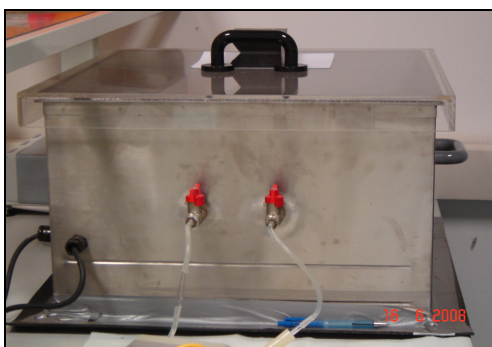


**Slika 11:** Kontinuirni merilnik AlphaGuard

Zrak, ki ga analiziramo, prehaja z difuzijo preko filtra v ionizacijsko komoro volumna  $0,56 \text{ dm}^3$ . Čez filter iz steklenih vlaken lahko prehaja le plinasti radon in ne tudi njegovi razpadni produkti. Filter hkrati preprečuje tudi kontaminacijo notranjosti s prašnimi delci. Ko je instrument priključen na električno omrežje, je med notranjo kovinsko komoro (anodo) in katodo, ki je nameščena vzdolž komore, električno polje visoke napetosti (+ 750 V). Ob razpadu alfa pride do ionizacije zraka v komori in nabiti delci nato potujejo proti elektrodi. Tok, ki ga merimo, je sorazmeren množini alfa delcev (Genitron Instruments, 1998).

### 3.2.2 Radonska komora

Radonska komora ima kovinske stene, pokrita pa je s pleksi steklom (Slika 12). Njen volumen je  $75 \text{ dm}^3$ , in sicer ima dimenzije  $5 \text{ dm} \cdot 5 \text{ dm} \cdot 3 \text{ dm}$ . Dobro tesnenje komore preprečuje mešanje zraka iz komore z zunanjim zrakom. Tesnost zagotavljajo dobro narejeni stiki plošč. Spodnji del komore je zaprt z gumo in še dodatno oblepljen z lepilnim trakom. Stranski odprtini v komori, ki služita za priklop podaljškov na vir električne energije, sta zatesnjeni s kitom. Tudi pokrov komore smo za vsak primer še dodatno obtežili. Na eni strani ima komora dva ventila, ki ju preko gumijastih cevk lahko povežemo s črpalko in scintilacijsko celico (celicami). Celico (celice) tako napolnimo z zrakom iz komore, in sicer s pomočjo črpalke, ki cirkulira zrak v zaprtem sistemu, po določen času pa scintilacijske celice odklopimo.



**Slika 12:** Radonska komora

Za poskus smo dali v komoro kot vir radona staro ročno uro, ki ima številke in kazalce premazane z radioaktivno svetilno barvo (Slika 13). Premaz vsebuje  $^{226}\text{Ra}$ , ki je že dlje časa prepovedan. Njegova aktivnost je  $4 \text{ kBq}$ . Ker stekleni pokrovček na uri ne tesni dobro, iz nje uhaja plinasti radon. V komoro smo dali tudi kontinuirni merilnik radona AlphaGard, ki je enkrat na uro izmeril v komori koncentracijo radona, temperaturo, zračni tlak in relativno vlažnost zraka ter podatke shranil.



**Slika 13:** Ročna ura kot vir radona (Šeliga, 2008: 19)

### 3.2.3 Črpalka AlphaPump in Vacutech črpalka

Črpalka AlphaPump (Slika 14) deluje na principu cirkulacije znanega volumna zraka, in sicer ima 3 stopnje pretoka (0,3, 0,5 in 1,0 dm min<sup>-1</sup>). Pri naših meritvah je bila črpalka vedno nastavljena na maksimalen pretok. Uporabljali smo jo za prepihanje komore in za odvzemanje vzorcev zraka.

Vacutech črpalka (Slika 14) ima močnejši pretok zraka od črpalke AlphaPump, vendar ga ni mogoče natančno nastaviti. Uporabljali smo jo po končanih meritvah za prepihanje celice z zunanjim zrakom.



**Slika 14:** Črpalka AlphaPump (levo) in Vacutech črpalka (desno)

## 3.3 Potek meritev

### 3.3.1 Kalibriranje alfa scintilacijskih celic v radonski komori in določitev izkoristka celic

Prvi del meritev je potekal v laboratoriju, kjer smo umerjali 10 novih španskih scintilacijskih celic. Za izračun koncentracij radona v vzorcu je namreč potrebno poznati izkoristek (b) vsake posamezne celice, saj se med seboj razlikujejo.

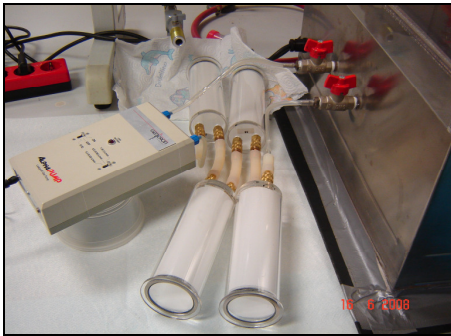
Pred vsakim vzorčenjem zraka je celicam potrebno izmeriti ozadje, kajti tudi zunanji zrak, s katerim smo jih prepihovali, vsebuje radon katerega koncentracijo je potrebno upoštevati. Z alfa scintilacijskim števcem smo vsaki celici merili ozadje 10 minut.

Radonsko komoro, v katero smo dali kontinuirni števec AlphaGuard, ki nam je zagotovil odvzem zraka z znano koncentracijo radona, in izvor radona (uro), smo nepropustno zaprli, merilnik priključili na električni tok ter počakali nekaj dni, da smo dobili maksimalno koncentracijo znotraj komore. Pred vsakim odvzemom vzorca zraka iz komore je potrebno njen notranji zrak homogenizirati. To smo izvedli s črpalko AlphaPump s pretokom 1 dm min<sup>-1</sup>, ki smo jo povezali s plastičnimi cevkami s komoro, kakor prikazuje slika 15, in jo pustili delovati 15 minut. S cirkulacijo zraka smo izenačili koncentracijo radona v celotni komori.



**Slika 15:** Prepihanje komore

Posamezen eksperiment je potekal tako, da smo več celic zaporedno zvezali s komoro in črpalko in jih 10 minut prepihovali z zrakom iz komore. Najprej smo v sistem povezali 4 celice (Slika 16), naslednji dve vzorčnji pa po 3 celice in jih enako dolgo prepihovali. Kadar vzorčimo večkrat zaporedoma, med posameznimi vzorčenji ni potrebno vedno znova homogenizirati komore.



**Slika 16:** Odvzem vzorca zraka iz komore hkrati v 4 nove scintilacijske celice, ki so zaporedno povezane s komoro in črpalko.

Po preteku vsaj treh ur smo lahko pričeli s štetjem aktivnosti na alfa scintilacijskem števcu. Vsako celico posebej smo postavili v števec in šteli impulze 3-krat po 5 minut. Postopek smo ponovili za vsako od 10 celic.

Po končanem štetju impulzov smo premerjene celice očistili tako, da smo jih po 2 minuti prepihovali na zunanjem zraku s pomočjo Vacutech črpalke. Ozadja celic smo prešteli pred naslednjo uporabo, saj takojšnje štetje po čiščenju ni priporočljivo zaradi neravnotežja. Celoten postopek kalibriranja novih celic smo ponovili 4-krat.

Iz 3 zaporednih meritev, ki smo jih opravili za vsako celico pri posameznem eksperimentu, smo izračunali povprečen izkoristek (b) vsakega kalibriranja. Pri tem smo upoštevali le tiste vrednosti, ki so odstopale za manj kot 10 % od povprečne vrednosti. Iz dobljenih izkoristkov vseh 4 umerjanj smo nato za vsako celico izračunali njen povprečen izkoristek.

Kalibriranje smo izvedli tudi za 4 stare celice, saj nas je zanimala sprememba občutljivosti zaradi poškodb celic. Spodnji deli celic, ki služijo za stik s fotopomnoževalko, so na starih celicah vidno opraskani. Vse 4 celice smo povezali s komoro in vanje hkrati odvzeli zrak (slika 17). Vsako celico smo merili 3-krat po 5 minut, brez nadaljnjih ponovitev.

Rezultate v impulzih na minuto, ki smo jih dobili pri kalibriranju na alfa scintilacijskem števcu, smo nato preračunali po enačbi 18 v koncentracije radona v vzorcih zraka. Pri tem smo upoštevali povečanje volumna sistema ob povezavi več celic (enačba 20). Dobljene koncentracije smo potrebovali pri izračunu izkoristkov celic po enačbi 19.



**Slika 17:** Odvzem vzorca zraka iz komore hkrati v 4 stare celice, ki so zaporedno povezane s komoro in črpalko.

### 3.3.2 Preverjanje tesnenja zamaškov novih in starih scintilacijskih celic

Tesnenje scintilacijskih celic je zelo pomembno, da se nam plinasti vzorec v času med odvzemom in merjenjem ne izgublja. V drugem delu eksperimenta smo zato s pomočjo radonske komore izvedli poskus tesnenja zamaškov na novih španskih in starih scintilacijskih celicah. V komoro smo, enako kot pri kalibriranju celic, dali števec AlphaGuard, kot izvor radona pa smo tokrat dali dve uri s svetilnima  $^{226}\text{Ra}$  premazoma številčnic in s tem dosegli višjo koncentracijo radona v komori. Zaradi večje začetne koncentracije dobimo lepši prikaz razpadne krivulje, saj lahko razpadanju sledimo dalj časa.

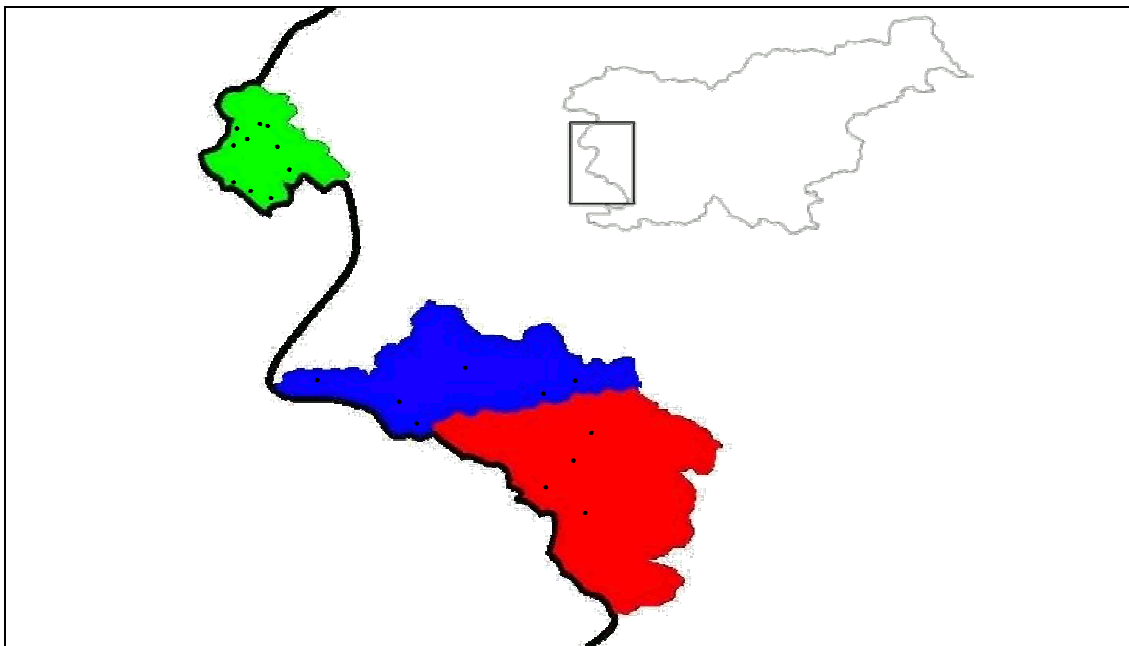
V novo celico smo odvzeli vzorec zraka iz komore na enak način kot pri kalibriranju. Nato smo celico postavili v števec in po 3 urah začeli z merjenjem. Prvih nekaj meritev smo nastavili interval štetja impulzov na 1 uro, kasneje pa smo interval povečali. Celotno meritev smo izvajali vsaj 5 razpolovnih dob, kar je približno 19 dni. Enak postopek smo ponovili tudi z dvema starima scintilacijskima celicama.

### 3.3.3 Merjenje radona v briških in kraških vinskih kleteh z novimi scintilacijskimi celicami

Po končanem laboratorijskem delu smo celice preizkusili še v kleteh. Ker Primorska velja za vinorodno deželo, smo si za merilna mesta izbrali vinske kleti v Goriških Brdih in na Krasu. Pokrajini sta med seboj geološko zelo različni in zato zanimivi za primerjavo. Raziskave so pokazale, da so koncentracije radona višje na poroznejših tleh (Popit in Vaupotič, 2002), zato smo na Krasu pričakovali višje koncentracije.

Za vzorec smo vzeli 10 briških in 10 kraških vinskih kleti (Slika 18). Izbirali smo jih naključno, vendar samo po eno v istem kraju in s tem dosegli, da so vzorci širše

razporejeni po področju. Meritve so potekale poleti v mesecu juliju in avgustu, vedno ob približno enakih meteoroloških pogojih (sončno, suho in nevetrovno vreme).



**Slika 18:** Merilna mesta v Brdih in na Krasu

Vzorčenje je potekalo z novimi celicami, ki smo jim dan prej izmerili ozadja. V vsaki kleti smo odvzeli po en vzorec zraka s pomočjo črpalke AlphaPump, tako da smo 3 minute prečrpavali zrak skozi celico s hitrostjo  $1 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ . Vzorcev nismo odvezemali zraven jaškov za vodo, ki so nameščeni v skoraj vseh vinskih kletih, niti blizu vrat in oken. S tem smo zagotovili, da je dobljena koncentracija radona tista, ki je značilna za celotni prostor. Po preteku 3 ur ali več smo na alfa scintilacijskem števcu PRM-145 merili impulze.

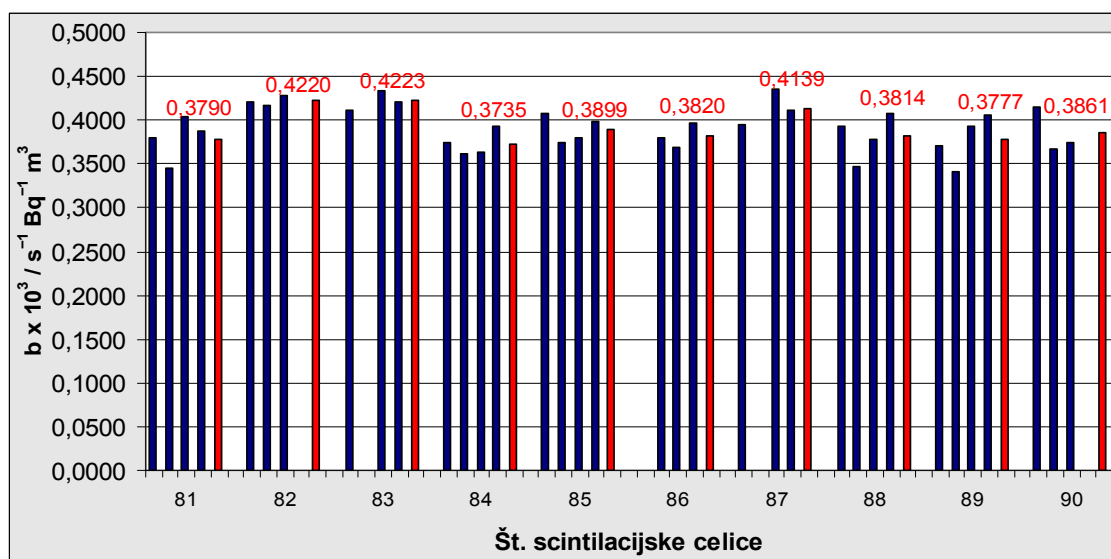
#### 3.3.4 Primerjalno merjenje radona v treh kraških vinskih kletih s povišano koncentracijo radona z novimi in starimi alfa scintilacijskimi celicami

Rezultati meritev v kletih so pokazali, da je bila koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  v zraku v 3 vinskih kletih višja od mejne vrednosti za delovno okolje v Sloveniji. V teh kletih smo meritve ponovili, saj smo želeli ugotoviti izvor radona v prostoru. Ker zimske razmere povzročajo zaradi nizkih temperatur podtlak v ogrevanih prostorih in ob večjih količinah padavin in zmrzali bolj nepropustno površje, ob takih pogojih običajno namerimo višje koncentracije radona v notranjih prostorih. Zato smo meritve ponovili v hladnejših dneh, v novembru in januarju, kajti višje koncentracije bi nam omogočile lažjo interpretacijo rezultatov. Za vzorčenje smo predvideli mesta, kjer bi radon lahko vstopal v notranjost kleti. V vsaki vinski kleti smo odvzeli vzorec zraka na vsaj dveh mestih, vsakič z novo in staro celico. Tako smo, poleg ugotavljanja izvora, izvedli tudi ponovno primerjavo med modeloma celic, da bi ponovno preverili tesnenje zamaškov.

## 4 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 4.1 Rezultati kalibriranja

Izračunani izkoristki ( $b$ ) novih alfa scintilacijskih celic so prikazani na sliki 19. Modri stolpci prikazujejo povprečne izkoristke za posamično celico, ki smo jih dobili pri vsakem od 4 ponovitev kalibriranja, rdeči stolpci pa so povprečni izkoristki za vsako kalibrirano celico.



**Slika 19:** Izkoristki ( $b$ ) za 10 novih celic (vijolična – povprečni  $b$  posamičnega kalibriranja, rdeča – povprečni  $b$  vseh 4 kalibriranj)

Pri celicah 82, 83, 86, 87 in 90 manjka rezultat ene meritve, ki smo ga zaradi prevelikega standardnega odklona izločili. Pri statistični obdelavi rezultatov posameznega kalibriranja celice (3 meritve) smo namreč upoštevali maksimalen odklon 0,1 od povprečne vrednosti. Pri večjem odklonu smo rezultat, ki je najbolj odstopal, izločili. Če je odklon še vedno presegal naše omejitve, rezultata nismo upoštevali, saj bi bil rezultat zaradi izločitve dveh podatkov od treh nezanesljiv.

**Tabela 1:** Izkoristki  $b$  ( $s^{-1} Bq^{-1} m^3$ ) 10 novih alfa scintilacijskih celic

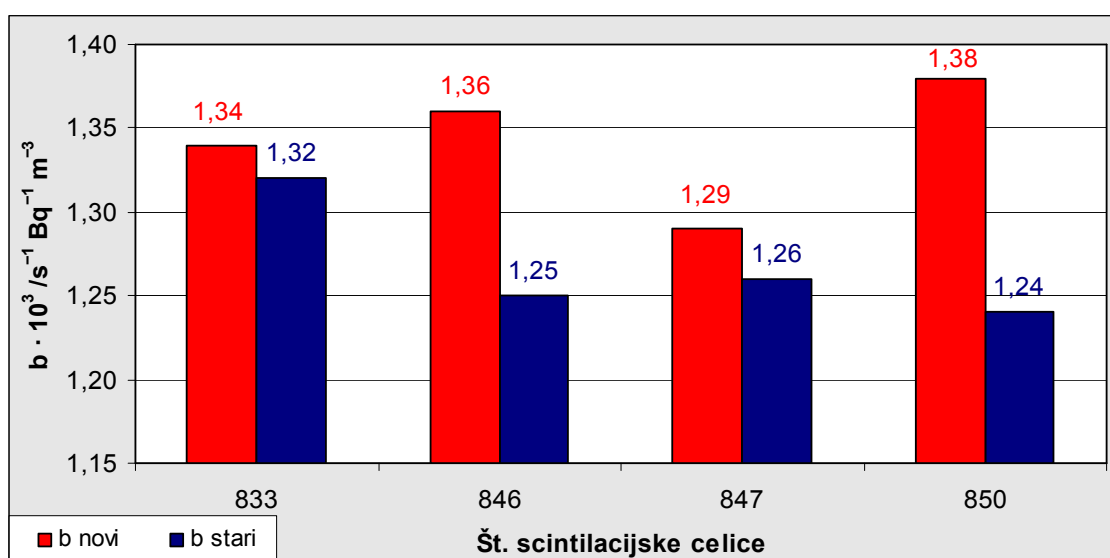
št. celice	81	82	83	84	85
$b \times 10^3$ [ $s^{-1} Bq^{-1} m^3$ ]	0,3790	0,4220	0,4223	0,3735	0,3899
št. celice	86	87	88	89	90
$b \times 10^3$ [ $s^{-1} Bq^{-1} m^3$ ]	0,3820	0,4139	0,3814	0,3777	0,3861

Izkoristki celic, ki smo jih dobili kot rezultat našega umerjanja, so v intervalu od 0,0003735 do 0,0004223  $s^{-1} Bq^{-1} m^3$ . Razlika med najnižjim in najvišjim izkoristkom je 13 %. Po izkušnjah sodelavcev Instituta Jožef Stefan so pri ročno izdelanih celicah razlike med izkoristki celic do 20 %. To potrjuje dobro kalibracijo novih celic. Eksperimentalno določene izkoristke celic (Tabela 1) smo uporabili pri vseh nadaljnjih

meritvah.

Umerjanje starih scintilacijskih celic smo izvedli le enkrat. S slike 20 je razvidno, da so novi izkoristki celic (rdeči stolpci) višji od prvotno določenih (modri stolpci). To smo tudi pričakovali, saj imajo stare celice poškodovana dna. Zaradi njihove večletne nenehne uporabe so na pleksi steklu praske, ki zmanjšajo zaznavanje svetlobe fotopomnoževalke. Poleg tega na spremembo izkoristka celic vpliva tudi staranje in s tem spreminjanje karakteristik scintilatorja znotraj celic. Zaradi večjega izkoristka dobimo pri izračunu nižje koncentracije. Dobljeni rezultati (Slika 20) kažejo na nujnost kalibriranja celic po določeni dobi uporabe, kajti neupoštevane spremembe izkoristka celice poveča napako meritve.

Poškodbe na scintilatorju ne moremo oceniti, zato razliko med novo in staro vrednostjo izkoristkov starih scintilacijskih celic pripisujemo le poškodbam dna celic. Na podlagi rezultatov naj bi bili celici 846 in 850 močnejše opraskani, česar vizualno ni bilo mogoče določiti.



**Slika 20:** Primerjava ponovno izmerjenih izkoristkov (rdeči stolpci) starih scintilacijskih celic z njihovimi prvotno določenimi izkoristki (modri stolpci).

## 4.2 Preverjanje tesnenja zamaškov – razpadne krivulje

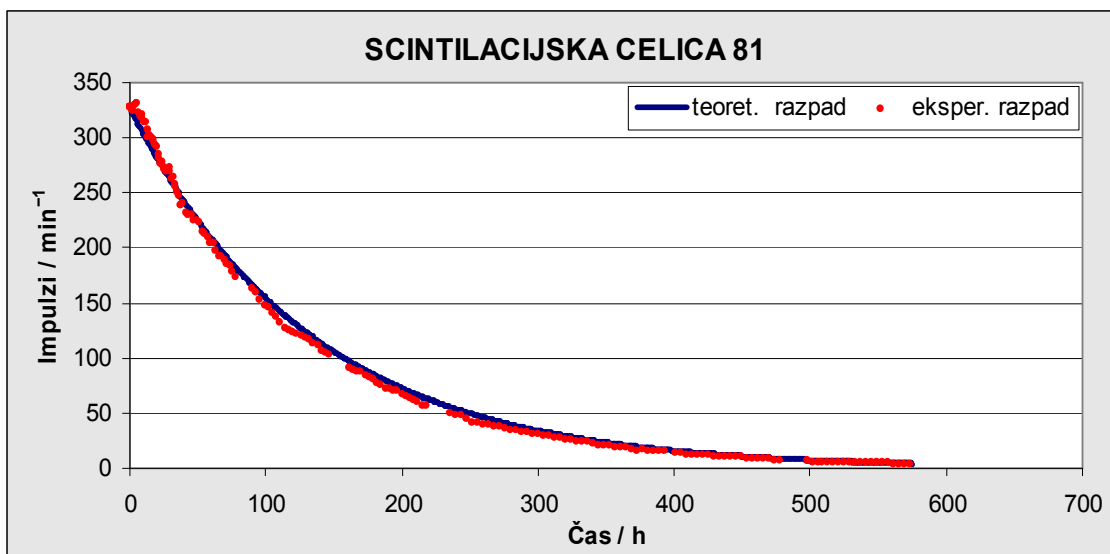
Rezultati merjenja upada aktivnosti v novi celici 81 je prikazan na sliki 21. Rdeče pike prikazujejo izmerjeno število impulzov z števcem PRM-145 preračunano na minuto. Po 3 urah od odvzema zraka v celico smo izmerili  $19.655 \text{ imp h}^{-1}$ , ali preračunano na minute,  $328 \text{ imp min}^{-1}$ . Začetna aktivnost ( $A_0$ ) eksperimentalnega razpada je hkrati tudi začetna aktivnost teoretičnega razpada, ki smo ga izračunali po enačbi 6.

S slike 21 je razvidno dokaj dobro ujemanje obeh krivulj, teoretične in eksperimentalne, kar pripisujemo dobremu tesnenju kovinskih zamaškov na novih celicah. Vendar lahko v prvih 34 urah štetja, nato pa le še v 52 uri, opazimo (slika 21, 22), da so izmerjene aktivnosti višje od teoretičnih. Te povišane vrednosti so sicer nenavadne, vendar so še vedno v območju eksperimentalne napake števca PRM-145.

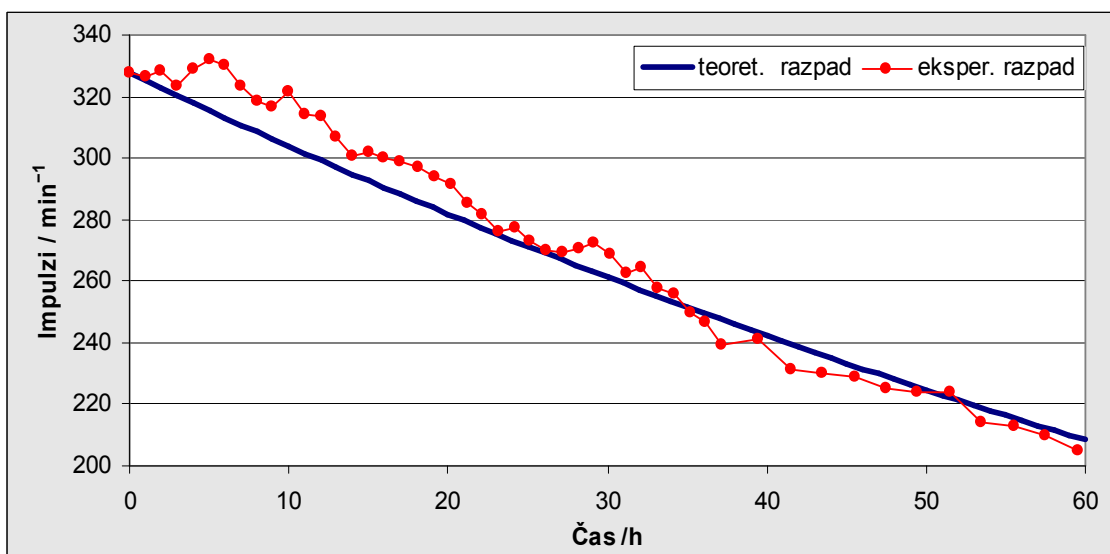


V prvem razpolovnem času radona, ki je skoraj 92 ur, imamo največje odstopanje v 10 uri štetja, ko so izmerjeni impulzi za 5,8 % višji od teoretičnih. Kljub temu je to odstopanje v okviru eksperimentalne napake štetja. To smo izračunali po Poissonovi statistiki, tako da smo korenili število impulzov v minuti. V 10. uri štetja je teoretična vrednost impulzov 304, kar je znotraj intervala eksperimentalne vrednosti impulzov  $321 \pm 18$ . Rezultati celega merjenega razpada so znotraj eksperimentalnih napak.

Napake zaradi povišanih eksperimentalnih vrednosti prav tako ne moramo pripisati števcu, saj so skrbno umerjeni in kažejo z referenčnim monitorjem in primarnim standardom odstopanje manj kot 2 %. Ker smo merili le z eno novo celico ne vemo ali je dogajanje povezano izključno s celico 81 ali je to splošen pojav novih španskih scintilacijskih celic.



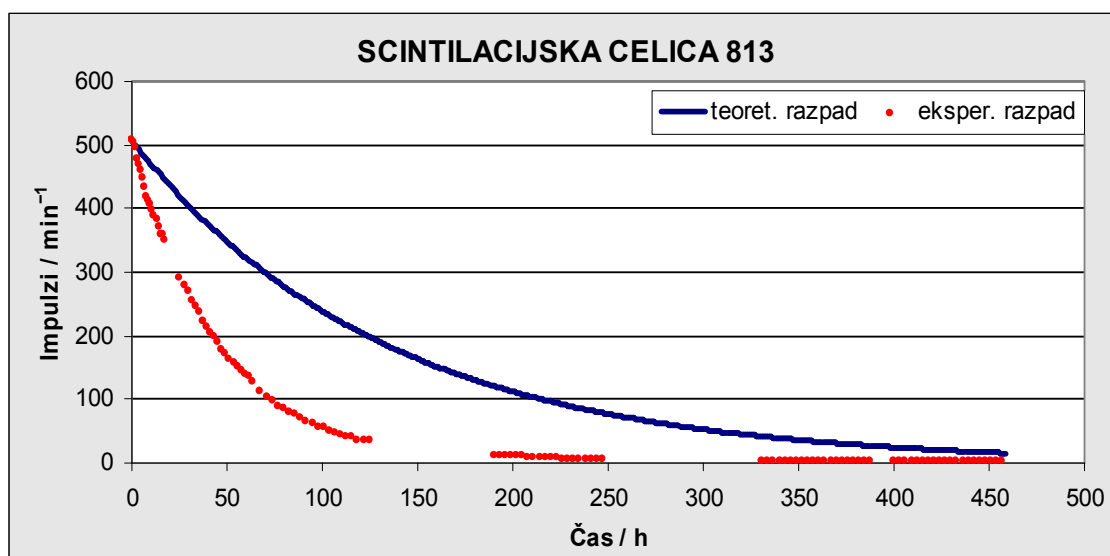
**Slika 21:** Radioaktivni razpad merjen z novo alfa scintilacijsko celico 81 (rdeča) in teoretični razpad (modra).



**Slika 22:** Povečava radioaktivnega razpada merjenega prvih 60 ur z novo alfa scintilacijsko celico 81.

Kontinuirno merjenje razpada radona s staro celico 813 nam kaže slika 23. Skupna točka je prav tako aktivnost izmerjena po 3 urah, ki je  $30.434 \text{ imp h}^{-1}$  ali  $507 \text{ imp min}^{-1}$ . Aktivnost smo spremljali skoraj pet razpolovnih dob, dobljene vrednosti pa bistveno odstopajo od teoretičnih izračunov, ki smo jih računali enako kot pri poizkusu s celico 81. Krivulji se ujemata le v začetku štetja impulzov, pri maksimalni aktivnosti po 3 urah, vsi nadaljnji rezultati pa zelo odstopajo. Merjena aktivnost pade na polovico že v 32 uri štetja, namesto po enem razpolovnem času.

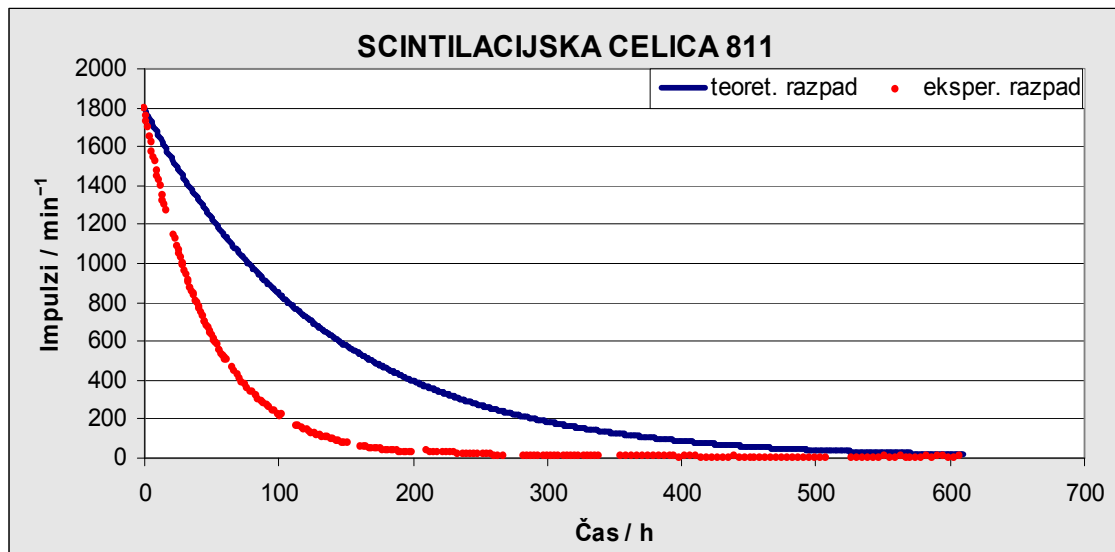
Do 10 % odstopanja eksperimentalne vrednosti od teoretične nastopi že po 7 urah merjenja, kar predstavlja približno desetino razpolovnega časa radona ( $1/10 t_{1/2}$ ). Po prvem razpolovnem času je to odstopanje že več kot 70 %.



**Slika 23:** Radioaktiven razpad merjen s staro alfa scintilacijsko celico 813 (rdeča) in teoretični razpad (modra).

Veliko odstopanje od teoretičnih izračunov kaže na slabo kakovost zamaškov na starih celicah. Hiter upad aktivnosti je posledica izgube vzorca zraka zaradi slabega tesnenja gumijastih zamaškov. Zaradi izredno slabega tesnenja je vprašljiva tudi maksimalna koncentracija, ki nastopi po 3 urah, saj je najverjetneje prenizka. Če izgubo vzorca v celici 813, ki nastane med 3 in 6 uro merjenja in znaša 3,7 %, upoštevamo v prvih treh urah, bi bila maksimalna aktivnost ob vzpostavitvi ravnotežja  $526 \text{ imp min}^{-1}$ .

Rezultati tesnenja starih celic so slabši od pričakovanih in zato smo poizkus ponovili še z drugo staro celico 811. Meritev s to celico je le potrdila slabo kakovost zamaškov, saj tudi v tem primeru eksperimentalna krivulja zelo odstopa od teoretične (Slika 24). Aktivnosti sta enačeni v ravnotežni točki, ko smo izmerili  $107.586 \text{ imp h}^{-1}$  ali  $1.793 \text{ imp min}^{-1}$ . Aktivnost pade na polovico že v 34 uri merjenja. Tudi pri poizkusu tesnosti s to celico pride po prvem razpolovnem času že do 70 % izgube vzorca.

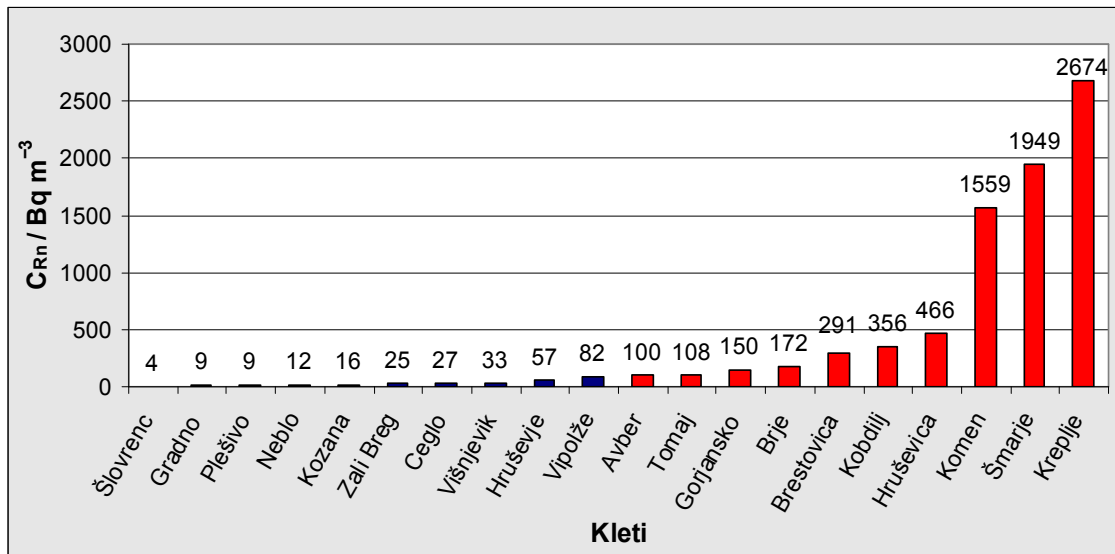


**Slika 24:** Radioaktiven razpad merjen s staro alfa scintilacijsko celico 811 (rdeča) in teoretični razpad (modra).

### 4.3 Koncentracije v kleteh

Razlika med izmerjenimi trenutnimi koncentracijami na območju Goriških Brd in Krasa je precejšnja (slika 25), kar smo zaradi različne kamninske sestave obeh območij tudi pričakovali (Popit in Vaupotič, 2002). Pri razlagi rezultatov smo poleg geologije področja upoštevali tudi lastnosti kleti kot so njena starost, vrsta materiala in tip kleti. S starostjo opredelimo kvaliteto grajenega objekta, kajti stare hiše imajo pogosteje slabše stike plošč ter vodovodno, plinsko ali kanalizacijsko napeljavo. Pomembna je tudi vrsta materiala, iz katerega so stene, ki mejijo na zemljo, saj le ta lahko prepreči vdor radona v prostor. Kvalitetna betonska konstrukcija kleti je najboljša ovira za radon, vendar niso vse kleti enako zasnovane. Nekatere imajo za tla ali steno kar zemljo ali skalo. Pri tipu kleti smo upoštevali nivo kleti, in sicer smo jih ločili na kleti pod nivojem zemlje, kleti, ki so le delno pod nivojem zemlje, in pritlične vinske kleti. Ta delitev je pomembna, saj je pri pritličnih ali delno podzemnih prostorih boljša izmenjava z zunanjim zrakom.

Zaradi slabo propustne flišne kamnine smo v vseh 10 kletih v Goriških Brdih (slika 25) izmerili nizke koncentracije. Najvišja je bila  $82 \pm 28 \text{ Bq m}^{-3}$  v vinski kleti v Vipolžah. Pri tako nizkih vrednostih je težko oceniti vpliv lastnosti kleti na koncentracijo radona, vsekakor pa jih je treba omeniti. Vse preiskane kleti v Brdih so bile zgrajene ali prenovljene po letu 1990, kar pomeni, da jih lahko štejemo med novejšje in zato izključimo dejavnike slabše gradnje in materialov. V Vipolžah, Višnjeviku, Ceglem in Gradnem so imele kleti direkten stik z matično podlago, a vseeno ima le klet iz Vipolž nekoliko povišano vrednost. Koncentracije, ki smo jih izmerili v teh kletih, so med  $9 \pm 20$  in  $82 \pm 28 \text{ Bq m}^{-3}$ .

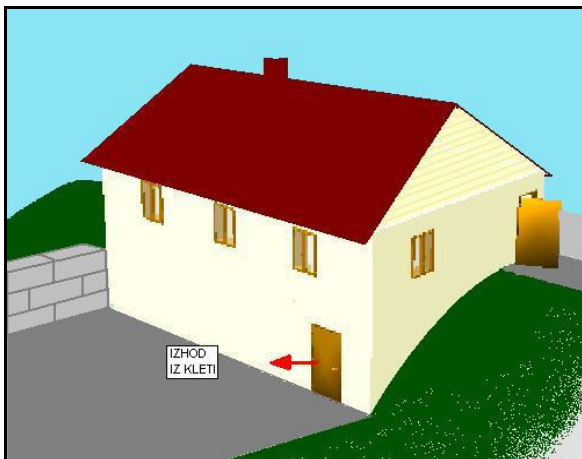


**Slika 25:** Koncentracije radona v kletih na območju Goriških Brd (modri stolpci) in Krasa (rdeči stolpci).

V našem vzorcu briških kleti jih je kar 6 le delno pod nivojem zemlje, saj imajo zaradi lege na pobočju direkten izhod na prosto (slika 26). 3 kleti so celo pritlične in zanje v tabeli 2 niso navedeni podatki o gradbenem materialu sten in stropa, saj so za nas pomembne le stene, ki mejijo na zemljo. Samo klet v Višnjevniku je popolnoma pod zemljo, a kljub temu tu nismo izmerili najvišje koncentracije. Z razliko od Goriških Brd je za kraške kleti tipično, da so popolnoma pod nivojem zemlje, saj je takih kar 9 kleti od 10. Na Krasu je le ena klet delno v zemlji.

**Tabela 2:** Koncentracije izmerjene v briških kletih in značilnosti kleti. Tip kleti: K je oznaka za podzemno vinsko klet, ½ K za delno podzemno vinsko klet in P za pritlično vinsko klet. Material: B je oznaka za beton, N pa za naravno podlago (kamen ali zemljo, čez katero je lahko pesek).

KRAJ VZORČENJA	C <sub>Rn</sub> [Bqm <sup>-3</sup> ]	LETO IZGRADNJE / PRENOVE	TIP KLETI	GRADBENI MATERIAL		
				TLA	STENE	STROP
Vipolže	82	2004	½ K	N	B	B
Hruševje	57	2008	P	B	/	/
Višnjevnik	33	2008	K	B	B	B
Ceglo	27	1999	½ K	N	B	N
Zali Breg	25	1992	½ K	B	B	B
Kozana	16	1993	½ K	B	B	B
Neblo	12	1990	P	B	/	/
Plešivo	9	2002	½ K	N	B	B
Gradno	9	1995	½ K	B	N	B
Šlovrenc	4	1996	P	B	/	/



**Slika 26:** Primer tipične delno podzemne hiše v Brdih

Pri vseh preiskavah v vinskih kleteh na Krasu smo izmerili trenutne koncentracije radona višje od  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  (Slika 25), kar so višje vrednosti kot v 10 kletih v Goriških Brdih. Dobljene koncentracije v kletih na Krasu so zelo različne. Vrednosti so med  $100 \pm 31 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $466 \pm 63 \text{ Bq m}^{-3}$ , v treh kletih pa je bila presežena mejna koncentracija določena za delovno okolje. V Komnu smo namerili  $1559 \pm 117 \text{ Bq m}^{-3}$ , v Šmarjah  $1949 \pm 124 \text{ Bq m}^{-3}$  in v Krepljah  $2674 \pm 146 \text{ Bq m}^{-3}$ . Zaradi višjih koncentracij radona in večjega razpona med njimi je vpliv lastnosti kleti na vrednost radona v njej jasnejši.

Izbrane kraške kleti se po letu izgradnje oziroma prenove med seboj zelo razlikujejo. Za starostno mejo med kletmi smo določili leto 1990, tako da med novejši kleti prištevamo le tiste, ki so mlajše od 20 let. Glede na to razvrstitev imamo v vzorcu le tri nove kleti. Kljub temu iz rezultatov ni jasno opazen vpliv starosti kleti na njeno koncentracijo radona v zraku, saj sta dve kleti od treh, v katerih je koncentracija preseгла mejno vrednost za delovno okolje, novejši. To lahko pojasnimo z gradbenim materialom, iz katerega so kletne stene, predvsem tiste, ki mejijo na zemljo. Večina kleti ima zaradi praktičnosti in hkrati lepega izgleda tla ali stene ali le del njih kar naravne (kamen ali zemlja). Pri takih kletih starost ne vpliva na višino koncentracije radona v prostoru, saj prepustnost ostalih betoniranih sten zgubi na pomembnosti. V našem primeru sta imeli samo 2 kleti vse stene iz betona.

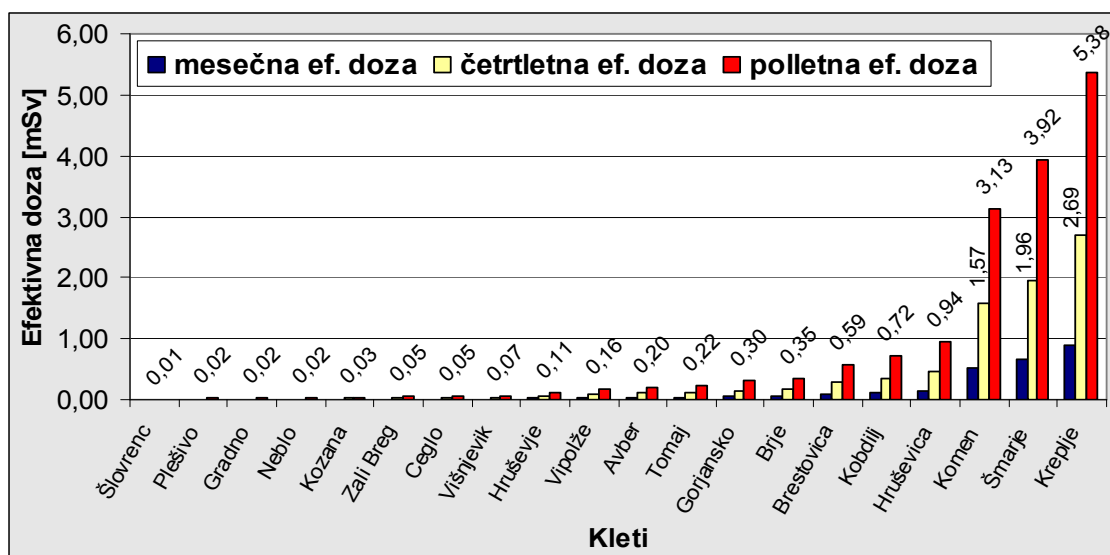
Iz tabele 3 je razvidno, da so ne glede na podobne lastnosti med kletmi (podzemne kleti in naravni material sten) med izmerjenimi koncentracijami v njih velike razlike. Razlog je geologija te pokrajine, ki je zelo razgibana. S slike 7 vidimo, da Kreplje ležijo le malo bolj severno od Divaškega preloma, južno od njega pa so Šmarje. Bližina preloma tako pripomore k boljši mobilnosti plina radona in s tem povzroča povišane koncentracije v stavbah. Čeprav Komen ni ob prelomu, smo tam izmerili visoko poletno koncentracijo radona. Ta je po vsej verjetnosti povezana z manjšo razpoko ali jamo, ki na Krasu velja za pogost pojav.

**Tabela 3:** Koncentracije izmerjene v kraških kleteh in značilnosti kleti. Tip kleti: K je oznaka za podzemno vinsko klet, ½ K za delno podzemno vinsko klet. Material: B je oznaka za beton, N pa za naravno podlago (kamen ali zemljo, čez katero je lahko pesek). Kjer sta dve črki skupaj pomeni da se pojavljata oba materiala, na primer, da so tla delno betonirana in delno ne.

KRAJ VZORČENJA	C <sub>Rn</sub> [Bqm <sup>-3</sup> ]	LETO IZGRADNJE / PRENOVE	TIP KLETI	GRADBENI MATERIAL		
				TLA	STENE	STROP
Kreplje	2674	1998	K	B	BN	BN
Šmarje	1949	1710	K	N	N	B
Komen	1559	2005	K	N	BN	B
Hruševica	466	1962	K	B	N	B
Kobdilj	356	1980	K	B	B	B
Brestovica	291	1980	K	B	N	B
Brje	172	1914	K	B	BN	B
Gorjansko	150	1972	½ K	B	B	B
Tomaj	108	1866	K	BN	BN	BN
Avber	100	1997	K	N	N	N

#### 4.3.1 Efektivne doze vinarjev v vinskih kleteh

Na osnovi trenutne koncentracije radona v zraku vinskih kleti smo po enačbi 16 izračunali efektivne doze, ki bi jih vinarji prejeli v času zadrževanja v kleti. Ker nas je zanimala mesečna efektivna doza, izhajali pa smo iz trenutne koncentracije radona, smo se poslužili naslednjega postopka. Celotno enačbo 16 smo pomnožili s faktorjem, ki podaja razmerje med trenutno in povprečno koncentracijo radona, in je 0,62 (Vaupotič in Kobal, 2006). Za filter ravnotežja smo upoštevali vrednost 0,40 kot jo priporoča ICRP-65. Po tem izračunu smo dobili mesečne efektivne doze (Slika 27).



**Slika 27:** Mesečne, četrletne in polletne efektivne doze v vinskih kletih, izračunane iz poletnih trenutnih koncentracij radona v zraku.

Za vinske kleti smo upoštevali predpise delovnega okolja, kljub temu da imajo v privatnih kletih drugačen delovni režim. Vinarji se v njih pogosteje zadržujejo spomladi in jeseni. Za izračun mesečne efektivne doze smo za zadrževalni čas upoštevali polni delovni čas, 170 ur. Dobljeni rezultati predstavljajo mesečno dozo vinarjev in so na sliki 27 prikazani z modro. Pri predpostavki, da se pogoji v kleti ne spreminjajo (koncentracija radona, ravnotežni faktor) in da vinarji preživijo v kleti enako število ur vsak mesec, smo ocenili četrletne in polletne efektivne doze.

Po *Pravilniku o pogojih in metodologiji za ocenjevanje doz pri varstvu delavcev in prebivalstva pred ionizirajočim sevanjem, Uradni list RS (Ur.l. RS, št. 115/2003)* povečanemu tveganju (letna efektivna doza je nad 6 mSv) ni izpostavljen noben vinar. Vinarji v kleti v Komnu, Šmarjah in Krepljah prejmejo nizko polletno efektivno dozo. Polletne efektivne doze v ostalih kletih so zelo nizke, saj so pod 2 mSv. Zmernemu tveganju, pri četrletni oceni efektivne doze nad 1 mSv, so izpostavljeni le vinarji iz kleti v Krepljah, Šmarjah in Komnu.

#### **4.4 Izvori radona v 3 kraških kletih s prekoračeno mejno vrednostjo**

V treh kraških vinskih kletih smo v poletnem času izmerili trenutno koncentracijo radona v zraku nad mejno vrednostjo za delovno okolje. V Krepljah smo izmerili najvišjo koncentracijo radona, in sicer  $2674 \pm 146 \text{ Bq m}^{-3}$ , v Šmarjah  $1949 \pm 124 \text{ Bq m}^{-3}$  in v Komnu  $1559 \pm 117 \text{ Bq m}^{-3}$ . Ker zimski vremenski pogoji slabšajo stanje notranjega zraka, smo merjenje v teh kletih ponovno izvedli v hladnih deževnih dneh.

##### **4.4.1 Vinska klet v Krepljah**

V Krepljah smo ponovno vzorčili zrak 26. novembra 2008. V kleti smo predvideli 3 mesta, kjer bi radon lahko prehajal v prostor. Prvo je bilo na tleh ob jašku za vodo, kjer smo zrak napolnili v scintilacijsko celico (SC) 84 in 811, drugo pri umivalniku (SC 85, 805), tretje mesto pa ob naravnem zidu iz skale (SC 81, 810). Ker je že poletna koncentracija radona za več kot 100 % preseгла mejno vrednost za delovno okolje, smo četrti vzorec zraka odvzeli iz bivalnega prostora nad kletjo, kamor bi radon lahko uhajal preko vodovodne napeljave ali slabega stika plošč (SC 82, 808).

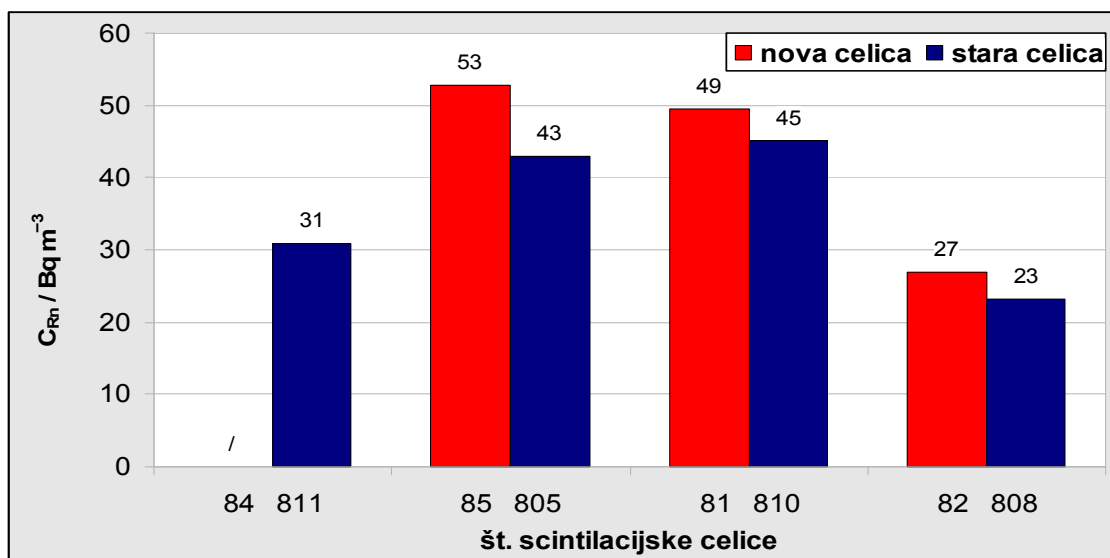
Dobljeni rezultati so bili v nasprotju s pričakovanimi, saj smo namerili izredno nizke koncentracije radona, praktično zanemarljive (Slika 28). Najvišja izmerjena koncentracija radona je bila  $53 \text{ Bq m}^{-3}$  (ob umivalniku). Rezultate lahko razložimo s pomočjo efekta dimnika, ki nastane zaradi temperaturne razlike v prostoru in zunaj njega. Efekt dimnika so opazili v jamah. Pozimi, ko je zunanja temperatura zraka nižja od temperature v jami, to povzroča naravni vlek zraka iz jame skozi vertikalne kanale v ozračje. Zato je tak prostor pozimi bolj prezračen kot poleti, ko je situacija obratna in je vlek minimalen ali ničen (Vaupotič, 2008b).

Enak pojav smo opazili tudi v tem primeru. Del stene in stropa kleti v Krepljah je vkopan v skalo brez dodatne betonske zaščite in tako je kletni prostor direktno povezan z matično kamnino, apnencem, ki zaradi svoje poroznosti omogoča radonu dober dotok v prostor. Tako pride pozimi v kleti do pojava naravnega vleka zraka iz nje. Po besedah tamkajšnjega vinarja je ob kleti tudi jama, na katero so naleteli med gradnjo.

Ta bi seveda lahko še dodatno povečala efekt, vendar tega ne moremo z gotovostjo trditi.

Klet je etažo in pol pod površjem zemlje in nima direktne povezave z zunanostjo. Preko oboka je povezana z drugim delom kleti, ki je polovico etaže višji. Od tod vodi v pritličje le en izhod po stopnišču in nato na prosto. Zaradi tipa kleti (podzemna) se v njej skozi vse leto ohranja dokaj konstantna nizka temperatura, primerna za vino, in zato prostor ni dodatno klimatiziran. V poletnih mesecih v kleti ohranjajo temperaturo tudi z ne prepogostim zračenjem in običajno odprejo klet šele ob trgatvi. V tem času se radon akumulira v prostoru in zato smo avgusta izmerili tako visoko koncentracijo radona.

Iz dobljenih rezultatov ne moremo določiti mesta izvora radona, saj so koncentracije na vseh štirih mestih dokaj podobne. Vendar je opazna razlika med vzorčenjem zraka na istem merilnem mestu z novo in staro celico. Razen pri prvi meritvi ob jašku, kjer z novo celico nismo zaznali radona, je pri ostalih treh meritvah izmerjena višja koncentracija z novo celico. Čas med vzorčenjem zraka in merjenjem radona je bil v vseh primerih med 18 in 19 urami. Rezultat našega poskusa tesnosti nove celice 81 je pokazal, da po tem času pride le do 3,3 % izgube radona. Poskusa tesnosti starih celic 811 in 813 sta pokazala, da pride po preteku 19 ur že do okoli 20 % izgube radona. Pri meritvah v tej kleti pride do primerljive napake merjenja starih celic glede na koncentracije izmerjene z novimi celicami, z upoštevanjem njihove napake. Napaka celice 805 je 21 %, celice 810 11 % in celice 808 17 %. To potrjuje naše predhodnje ugotovitve o slabem tesnenju starih celic.



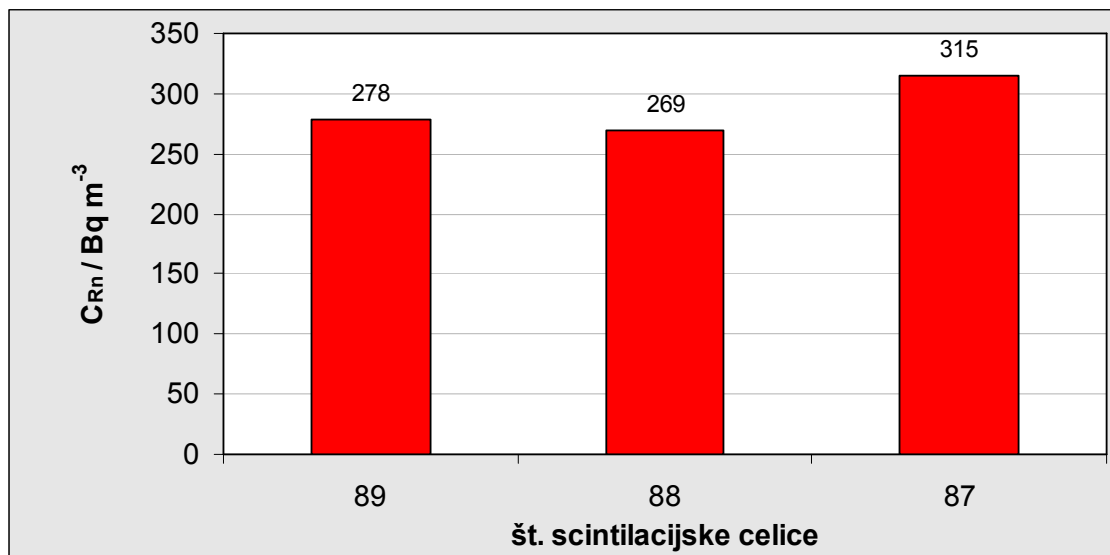
**Slika 28:** Koncentracije radona v vinski kleti v Krepljah, 26. november 2008.

Pri prvi meritvi s scintilacijsko celico 84 nismo zaznali radona, kljub temu da smo na istem merilnem mestu s staro celico 811 izmerili 31 Bq m<sup>-3</sup>. Do napake je najverjetneje prišlo zaradi slabega prepihanja in posledično premajhnega odvzema vzorca.

Ker smo želeli preveriti našo trditev o pojavu efekta dimnika, smo izvedli ponovno merjenje v toplejših dneh, ko je zunanja temperatura višja od temperature v kleti in je pojav naravnega vleka zraka iz kleti odsoten. Tokrat smo merili 6. aprila 2009, ko je zunanja dnevna temperatura že preseгла 20°C.



Tudi tokrat smo odvzeli več vzorcev zraka v istih delih kleti kot novembra 2008. Prvo vzorčevalno mesto je bilo ob jašku za vodo s celico 89, drugo pri umivalniku s celico 88 in tretje ob naravnem zidu iz skale s celico 87. Izmerjene koncentracije radona so prikazane na sliki 29.



**Slika 29:** Koncentracije radona v vinski kleti v Krepljah, 4. april 2009.

Rezultati potrjujejo našo hipotezo o pojavu efekta dimnika, saj so koncentracije radona že nekoliko višje in so v območju od 269 do 315 Bq m<sup>-3</sup>. V aprilu so noči še dokaj hladne in akumulacija radona ni tako izrazita. Poleg tega je bila dan pred vzorčenjem klet zaradi čiščenja nekaj ur odprta in zato je dobljena koncentracija po vsej verjetnosti še nekoliko nižja. Z otoplitvijo bo tudi koncentracija v kleti naraščala, zato je priporočljivo, da se jo s pogostejšim prisilnim prezračevanjem v tem času ali klimatsko napravo, ki bi cirkulirala kletni zrak, ustrezno zmanjša. Druga, dražja alternativa je seveda sanacija kleti, s katero bi preprečili vse direktne povezave kleti s kamnino.

#### 4.4.2 Vinska klet v Šmarjah

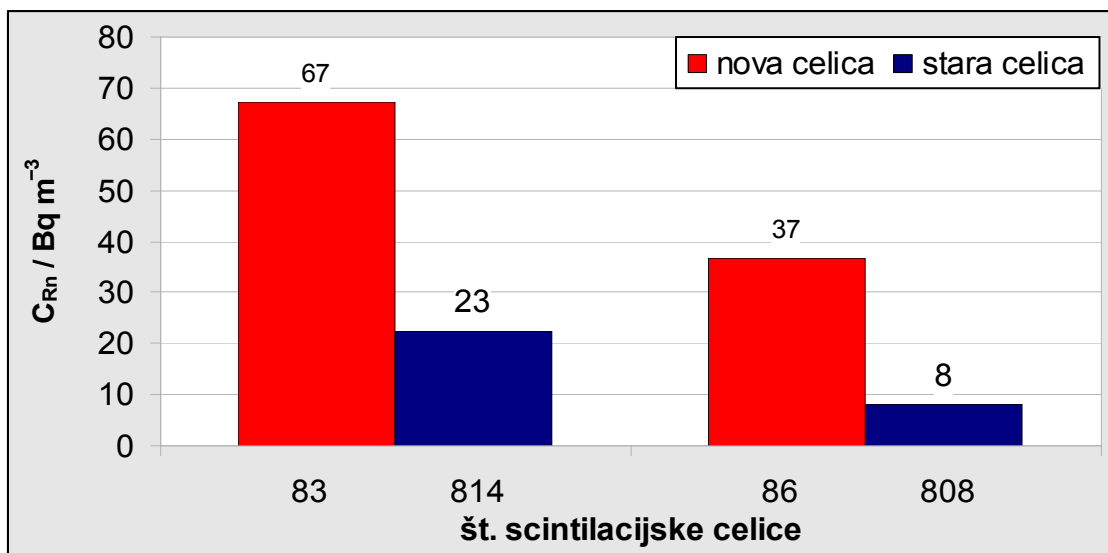
V Šmarjah, kjer smo poleti izmerili trenutno koncentracijo  $1949 \pm 124$  Bq m<sup>-3</sup>, smo ponovno merili 19. januarja 2009. Za odvzem vzorca smo si izbrali dve merilni mesti. Prvo je bilo ob jašku za vodo (SC 83, 814) in drugo ob kamnitem naravnem zidu (SC 86, 808). Rezultati meritev so tudi v tem primeru pozimi zanemarljivi v primerjavi s poletno preseženo koncentracijo. To dokazuje, da se tudi v tej kleti pojavlja efekt dimnika, ki znižuje zimske vrednosti radona v podzemnih prostorih.

Klet je popolnoma podkletena in iz nje vodijo stopnice na prosto. Tla in stene kleti so naravne in le stop je betonski. Ti podatki razložijo pojav efekta dimnika in so primerljivi s podatki iz kleti v Krepeljah.

S slike 30 je opazna razlika med koncentracijami na obeh merilnih mestih z novo in staro celico. Koncentraciji, dobljeni z novima celicama, sta večji od tistih, dobljenih s starima celicama, ki dokazano slabše tesnijo zaradi plastičnih zamaškov. Pri teh meritvah pride v času med vzorčenjem in merjenjem, ki je bil med 8 in 10 urami, do

velike napake merjenja s starima celicama v primerjavi z novima. V tem času naj bi bile, glede na predhodne meritve tesnenja nove celice 81 ter starih celic 811 in 813, meritve znotraj mej dopustnega odstopanja (relativna napaka manjša od 10 %). Na prvem merilnem mestu je napaka celice 814 kar 66 %, na drugem merilnem mestu pa je napaka celice 808 še večja, in sicer 78 %.

Na prvem merilnem mestu ob jašku smo sicer izmerili višjo koncentracijo kot na drugem merilnem mestu, vendar pa je razlika premajhna in nikakor ni dokaz izvora radona.



**Slika 30:** Koncentracije radona v vinski kleti v Šmarjah, 19. januar 2009.

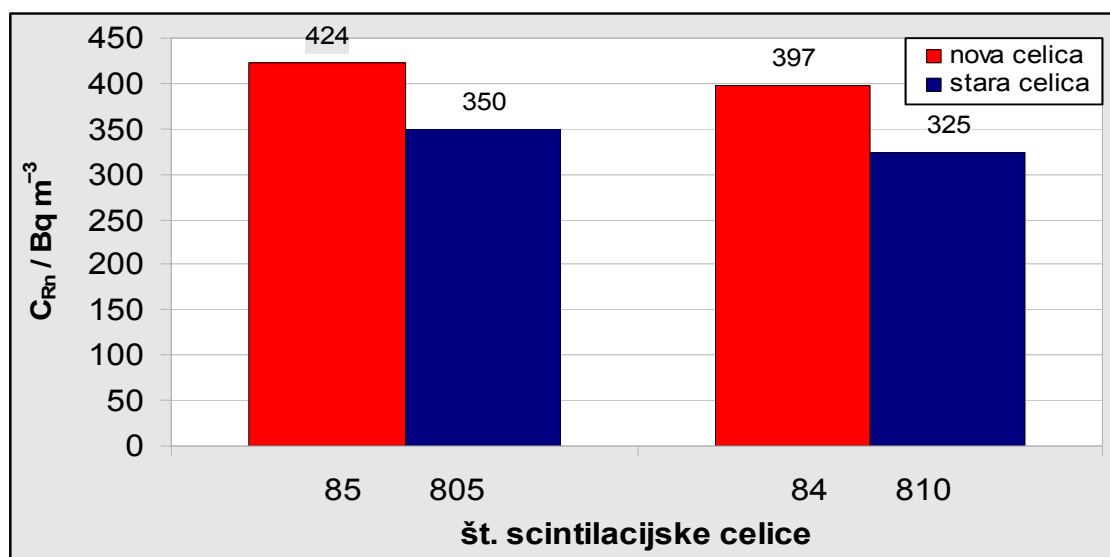
#### 4.4.3 Vinska klet v Komnu

V vinski kleti v Komnu je bila izmerjena poletna koncentracija radona  $1559 \pm 117$  Bq m<sup>-3</sup>. Pozimi, 19. januarja 2009, smo izmerili sicer nižjo koncentracijo ( $424$  Bq m<sup>-3</sup> in  $397$  Bq m<sup>-3</sup>), vendar ne zanemarljive, kakor v kletih v Krepljah in v Šmarjah. Tudi ta klet je popolnoma podkletena z direktnim izhodom preko stopnišča. Klet ima za tla in del stene naravno kamnino, ostale stene in strop pa so betonski. Klet je podolgovata in v njej ni jaška ali druge odprtine v tleh ali steni. Po vinarjevem pripovedovanju ob deževju voda teče v klet, a tudi takoj odteče. Ta pojav dokazuje propustnost apnenčaste podlage. Glede na zmanjšano koncentracijo radona v zimskem času je tudi v tej kleti prisoten efekt dimnika, le da naravni vlek ni tako močen.

Zaradi oblike kleti, materiala njenih sten, ki mejijo na zemljo, in odsotnosti kakršnihkoli odprtin, smo vzorec odvzeli iz obeh koncev kleti. Prvo vzorčenje s celicama 83 in 814 je iz levega konca kleti, drugo vzorčenje s celicama 86 in 808 pa z desnega konca. Glede na rezultate meritev (slika 31) je po vsej verjetnosti izvor radona v kleti skozi celotna tla.

Tudi v tej kleti je opazna razlika med koncentracijama radona dobljeno z novo in staro celico na istem merilnem mestu. Koncentracija radona v odvzetem vzorcu zraka z novo celico je na obeh merilnih mestih za približno 18 % večja glede na koncentracijo

radona v vzorcu zraka odvzetim s staro celico. Tudi v tem primeru smo dobili napako nekoliko večjo kot je bila predvidena iz rezultatov poiskusa tesnosti zamaškov.



**Slika 31:** Povprečna koncentracija radona na dveh merilnih mestih v vinski kleti v Komnu, 19. januar 2009.

## 5 ZAKLJUČKI

Alfa scintilacijske celice, ki služijo za direktno odvzemanje vzorcev zraka, njihovo shranjevanje do merjenja in samo merjenje, so različnih oblik in iz različnih materialov in so prevlečene z različnimi vrstami scintilatorjev. Ti jim določajo lastnosti, zaradi katerih je vsaka celica edinstvena in ima svoj izkoristek. Zaradi natančnosti meritev je le tega potrebno pred njihovim začetkom uporabe določiti.

Umerjene nove španske alfa scintilacijske celice imajo za faktor 10 manjšo konstanto učinkovitosti od starih celic izdelanih na Institutu Jožef Stefan. K temu bistveno prispeva manjši premer nove celice ter uporaba drugega scintilatorja.

Pomembna lastnost vsake alfa scintilacijske celice je zagotovo tudi njena tesnost, ki zagotavlja, da prvotnega vzorca pri prenosu do meritve in med samo meritvijo ne izgublamo in s tem izmerimo prave koncentracije radona. Na Institutu Jožef Stefan so gumijaste zamaške na njihovih celicah že večkrat menjali, saj se po določenem času uporabe raztegnejo in ne tesnijo dobro. Plastični zamaški, ki so bili na celicah v času mojega merjenja z njimi, so se izkazali za zelo slabe. Pri poskusu s celico 811 je bila 10 % izguba radona dosežena že po 8 urah, pri poskusu s celico 813 pa po 7 urah od odvzema vzorca. Po enem razpolovnem času radona, približno 92 urah, sta obe celici že presegle napako 70 %.

Veliko boljše rezultate smo dobili pri poskusu tesnosti z novo špansko scintilacijsko celico 81. Kljub odstopanju merjenega razpada od teoretičnega, je do 10 % napake prišlo šele v 212 uri od odvzema vzorca zraka. Ta rezultat je zadovoljiv, saj naj bi meritve opravili znotraj prvega razpolovnega časa za radon.

Alfa scintilacijska merilna tehnika nam da trenutne koncentracije radona v zraku, kar je treba upoštevati tudi pri interpretaciji rezultatov. Kadar dobimo rezultat blizu mejne vrednosti radona za določeno okolje, je priporočljivo meritve ponoviti z drugim merilnim sistemom. Tega načela se držijo tudi na Institutu Jožef Stefan, kar se je glede na rezultate starih celic izkazalo kot dobra praksa.

Naknadna primerjava novih in starih celic na terenu je potrdila laboratorijske meritve razpadov radona v obeh tipih celic. Na osnovi dobljenih rezultatov so v Centru za radon na Institutu Jožef Stefan, že zamenjali zamaške. Tokrat so se odločili za kovinske zamaške, ki imajo na notranji strani gumo in se tako tesno prilegajo ventilom.

Terenske meritve v vinskih kletih na območju Goriških Brd in Krasa so potrdile vpliv geološke podlage na koncentracijo radona v kletnih prostorih. Na območju Goriških Brd, kjer prevladuje slabo propustna flišna kamnina, tudi v neprezračeni kletnih prostorih ni nevarnosti za radon. Celo direktni stiki matične kamnine v kletih ne povzročajo povišanih koncentracij radona.

Nasprotno velja za Kras, kjer bi morala biti dobra kletna konstrukcija pravilo. Veliko kraških vinskih kleti ni v celoti betoniranih, saj zaradi skalnate podlage to niti ni bilo potrebno. Ker je bilo takih večina vzorčenih kleti, je vpliv geološke podlage (apnenčasta kamnina) opazen. Bližina Divaškega preloma je bila odločilna za visoke koncentracije radona v bližnjih krajih. V Krepljah je poletna koncentracija za več kot 100 % preseгла mejno dovoljeno vrednost za delovno okolje ( $1.000 \text{ Bq m}^{-3}$ ), v Šmarjah pa je znašala  $1963 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Vendar je Kras prerazgibana pokrajina, da bi v tako majhnem obsegu meritev prišli do natančnejših zaključkov. Zato bi bilo v prihodnje zanimivo premeriti večje število kraških vinskih kleti in natančneje preučiti geološki vpliv na zrak v kletnih prostorih v povezavi z meteorološkimi parametri. Efekt dimnika bi bil lahko zelo pogost pojav v kraških kletih. Zanimiva bi bila tudi raziskava učinkovitosti prisilnega prezračevanja v tipični kraški kleti z enim samim vhodom, ki je ponavadi tudi edina odprtina v kleti poleg jaškov za vodo.

## 6 VIRI

- Ames (Avtomatski merilni sistem za okolje). 2006. PRM 145 Portable radon monitor. Ljubljana
- Arvela H. 2002. Population distribution of doses from natural radiation in Finland. Int. Congress Ser. 1225, 9–14
- Bahtijari M., Stegnar P., Shemisidini Z., Ajazaj H., Halimi Y., Vaupotič J., Kobal I. 2007. Seasonal variation of indoor air radon concentration in schools in Kosovo. Radiat. Meas. 42, 286–289
- Bell F.G. 2007. Basic environmental and engineering geology. Caithness, Whittles Publishing Limited: 342 str.
- Bodansky D. 1987. Overview of the Indoor Radon Problem. V: Indoor radon and its hazards. Bodansky D., Robkin P. A., Stadler D. R. (eds.). Seattle and London, University of Washington Press: 3–16 str.
- Buser S. 1968. Osnovna geološka karta SFRJ, list Gorica, 1:100.000. Beograd, Zvezni geološki zavod
- Buser S. 1973. Tolmač lista Gorica. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Beograd, Zvezni geološki zavod, L 33–78, 50 str.
- Buser S. 1986. Osnovna geološka karta SFRJ, list Tolmin, 1:100.000. Beograd, Zvezni geološki zavod
- Buser S. 1987. Tolmač listov Tolmin in Videm (Udine). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Beograd, Zvezni geološki zavod, L 33–78, 50 str.
- Buser S. 1989. Development of the Dinaric and Julian carbonate platforms and the intermediate Slovenian basin (NW-Yugoslavia). V: Evolution of the Karstic carbonate platform: relation with other periadriatic carbonate platforms. Carulli G.B., Cucchi F., Radrizzani C.P. (ur.). Roma, Mem. Soc. Geol. Ital., 40, 313–320, Roma
- Buser S. 1996. Geology of western Slovenia and its paleogeographic evolution. V: The role of Impact Processes in the Geological and Biological Evolution of Planet Earth. Drobne K., Goričan Š., Kotnik B. (ur.). Ljubljana, International workshop, ZRC SAZU, 111–123
- Buser S., Draksler V. 2004. Geološka karta Slovenije 1: 500.000. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije. Založba mladinska knjiga
- CEC (Commission of the European Communities). 1987. Exposure to Natural radiation in Dwellings of the European Communities. Luxembourg, Working Party Report of the Commission of the European Communities
- Cvelbar F. 2003. Merjenje ionizirajočega sevanja. Ljubljana, DMFA založništvo: 171 str.

Dolenec T., Pavšič J., Lojen S. 2001. Ir anomalies and other elemental markers near the Paleocene-Eocene boundary in a flysch sequence from the Western Tethys (Slovenia). *TERRA nova* (Print). 12, 199–204

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1994. A citizen's guide to radon. The guide to protecting yourself and your family from radon

Genitron Instrumensts GmbH. Germany. 1998. User Manual. Portable Radon Monitor "AlphaGUARD". 38 str.

Gundersen L.C.S., Shumman R.R., Otton J.K., Dubiel R.F., Owen D.E., Dickinson K.A. 1992. Geology of radon in the United States. V: Geologic Controls of Radon. Gates A.E., Gundersen L.C.S. (ur). Geological Society of America, Inc. Special paper 271: 1–16

ICRP (International Commission in Radiological Protection). 1994. Protection against radon at home at work. Publication 65

Jurkovšek B. 2008. Geološka karta severnega dela Tržaško-komenske planote 1:25 000. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije

Jurkovšek B., Toman M., Ogorelec B., Šribar L., Drobne K., Poljak M., Šribar L. 1996 Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-komenske planote, Kredne in paleogenke karbonatne kamnine, 1:50.000. Ljubljana, Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko: 143 str.

Kemija. Zbirka: Tematski leksikon. 2004. Tržič, Učila International: 442 str.

Kobal I., Vaupotič J., Mitić D., Ančik M., Jerančič S., Škofljanec M. 1990. Natural radioactivity of fresh waters in Slovenia, Yugoslavia. *Environ. Int.* 16, 141–154

Koželj M., Erman R., Istenič R., Radež Č. M. 2006. Delo z viri sevanj. 1. izdaja. Ljubljana, Ministerstvo za okolje in prostor, Uprava RS za jedrsko varnost: 96 str.

Križman M., Ilić R., Škvarč J., Jeran Z. 1996. A survey of indoor radon concentrations in dwellings in Slovenia. V: Proceedings of Symposium on Radiation Protection in Neighbouring Countries in Central Europe - 1995, Denis Glavič-Cindro (ur.). Ljubljana, J. Stefan Institute. 66–70

Leksikon kemije. 2001. Ljubljana, Založba Mladinska knjiga: 245 str.

Lucas H. F. 1957. Improved low-level alpha-scintillation counter for radon. *Rev. Sci. Instrum.* 28:680-684

Nazaroff W.W., Moed B.A., Sextro R.G. 1988. Soil as a Source of Indoor Radon: Generation, Migration, and Entry. V: Radon and its decay products in indoor air. Nazaroff W.W., Nero A.V. (ur). John Wiley and Sons: 57–112

Nero Jr. A.V. 1988. Radon and Its Decay Product in Indoor Air: An Overview. V: Radon and its decay product in indoor air. Nazaroff W. W., Nero A. V. (ur.). New York, John Wiley and Sons: 1–53

Otoničar B. 2007. Upper Cretaceous to Paleogene forbulge unconformity associated with foreland basin evolution (Kras, Matarsko podolje and Istria; SW Slovenia and NW Croatia) = Zakrasela periferna izboklina povezana z razvojem zgornjekredno-paleogenskega predgorskega bazena; Kras, Matarsko podolje in Istra (JZ Slovenija in SZ Hrvaška). *Acta carsol.*, 36/1, 101–120

Placer L. 1981. Geološka zgradba jugozahodne Slovenije. Ljubljana, *Geologija* 24/1, 27–60

Placer L. 1999. Contribution to the macrotectonic subdivision of the border region between Southern Alps and External Dinarides. Ljubljana, *Geologija* 41, 223–225

Placer L. 2008. Principles of the tectonic subdivision of Slovenia = Osnove tektonske razčlenitve Slovenije. Ljubljana, *Geologija* 51/2, 205–217

Popit A., Vaupotič J. 2002. Indoor radon concentrations in relation to geology in Slovenia. *Environ. Geol.* 42: 330–337

Pravilnik o pogojih in metodologiji za ocenjevanje doz pri varstvu delavcev in prebivalstva pred ionizirajočimi sevanji, Uradni list RS (Ur.l. RS, št. 115/2003)

Quindos-Poncela L. S., Fernandez P. C., Sainz C., Arteché J., Arozamena J. G., George A. C. 2003. An improved scintillation cell for radon measurements. *Nucl. Instrum. Meth. A* 512, 606–609

Šeliga Š. 2008. Stopnja radioaktivnega ravnotežja med radonom in njegovimi kratkoživimi razpadnimi produkti. Diplomsko delo. Nova Gorica, Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju

Turner J. E. 2007. *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. 3rd edition. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GbmH & Co. KGaA: 97 str.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 1993. *Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation*. UNSCEAR Publication, E.94.IX.2, United Nations, New York

Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih, Uradni list RS (Ur. l. RS, št. 49/2004)

Vaupotič J. 2002a. Do long-term average radon concentrations in schools and kindergartens differ from the average during working hours?. *Health Phys.* 83, 237–242

Vaupotič J. 2002b. Radon. V: Navodila in priročnik za vaje iz higiene. Čakš T. (ur.). Ljubljana, Medicinska fakulteta, Institut za higieno: 124–131

Vaupotič J. 2008a. Comparison of various methods of estimating radon dose at underground workplaces in wineries. *Radiat. Environ. Biophys.*, 4/47: 527–534

Vaupotič J. 2008b. Nano size radon short-lived decay product in the air of the Postojna Cave. *Sci. Total Environ.* 393, 27–38



Vaupotič J., Kobal I. 1997. Radon v naravi in našem okolju. V: Kemizacija okolja in življenja – Do katere meje? Lah A. (ur.). Ljubljana, Slovensko ekološko gibanje: 124–144

Vaupotič J., Kobal I. 2006. Radon survey and exposure assessment in hospitals. *Radiat. Prot. Dosim.*, 121: 158–167

Vaupotič J., Kobal I. 2007/08. Radioaktivnost in zaščita pred sevanji, poglavje 7b: študijsko leto 2007/08. Študijsko gradivo. Dodiplomski študijski program Fakultete za znanosti o okolju. Ljubljana, IJS

Vaupotič J., Kobal I., Križman M. 2009. Background outdoor radon levels in Slovenia. V: Book of Abstracts of International Conference "Radon in Environment". Zakopane, Poland, 31 str.

Vaupotič J., Križman M., Planinić J., Pezdič J., Adamič K., Stegnar P., Kobal I. 1994. Systematic indoor radon and gamma measurements in kindergartens and play schools in Slovenia. *Health Phys.* 66/5: 550–556

Vaupotič J., Žvab P., Smrekar N., Gregorič A., Dujmovič P., Kobal I. 2007. Sistematično pregledovanje delovnega in bivalnega okolja 2007. Delovno poročilo. Ljubljana, IJS-DP-9648: 57 str.

Wasiolok P.T., James A.C. 2000. Unattached fraction measuring technique and radon lung dose. *J. Environ. Radioact.*, 51, 137–151

Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti, Uradni list RS (uradno prečiščeno besedilo, Ur. list RS, št. 102/2004 z dne 21. 9. 2004)

Zmazek B., Živčič M., Vaupotič J., Bidovec M., Poljak M., Kobal I. 2002. Soil radon monitoring in the Krško Basin. *Appl. Radiat. Isot.* 56, 649–657

Zupančič M. 2007. Vpliv geoloških in klimatskih dejavnikov na koncentracijo radona v zraku. Diplomsko delo. Nova Gorica, Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju