



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ,  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	18. СЕП. 2007.
ОРГАНИЗ.ЈЕД.	БРОЈ
0603	9 / 892

## RADON

glavni radioaktivni kontaminant čovekove okoline

(diplomski rad)

Mentor

docent dr Nataša Todorović

Kandidat

Gordana Majević

Novi Sad, 2007.

## Sadržaj

1.	Uvod.....	2
2.	Osobine radona .....	3
3.	Uticaj radona na zdravlje.....	5
4.	Rasprostranjenost radona.....	9
4.1	Radon u zemljištu.....	10
4.2	Radon u vodi.....	10
4.3	Radon u vazduhu.....	11
5.	Merenje koncentracije radona.....	14
5.1	Merenje koncentracije radona u zemljištu .....	14
5.2	Merenje koncentracije radona u vodi .....	16
5.3	Merenje koncentracije radona u vazduhu .....	20
6.	Zaštita od uticaja radona.....	26
7.	Zaključak.....	33
Prilog	Definicije .....	34
	Literatura.....	35
	Kratka biografija .....	36
	Ključna dokumentacijska informacija .....	37



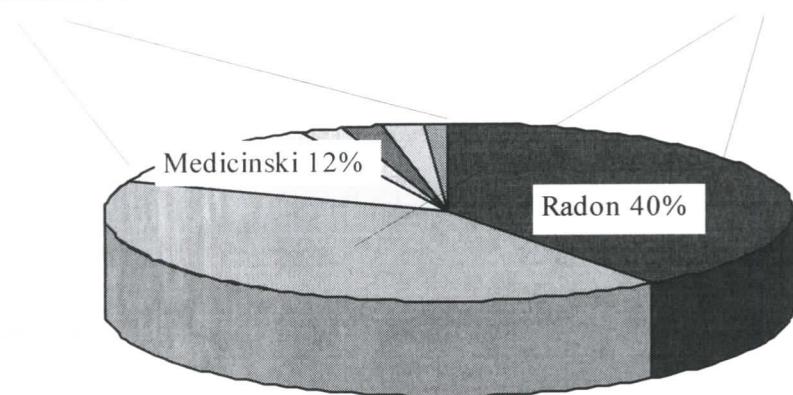
## 1. Uvod

Radon je radiaktivni gas bez boje, ukusa i mirisa. Nastaje raspadanjem  $^{238}\text{U}$ . Postoji više izotopa radona, ali za zdravlje je najopasniji  $^{222}\text{Rn}$ . Nivo radona u prirodi obično je mali, ali u zatvorenom prostoru može dostići veliku koncentraciju. Takođe voda za piće iz dubokih izvora može imati radon. U površinskoj vodi ga ima malo jer se radon lako oslobađa iz vode prelaskom u atmosferu.

Radon utiče na zdravlje ljudi pre svega preko emisije α čestica kao produkta raspadanja radona, posebno  $^{218}\text{Po}$  i  $^{214}\text{Po}$ . Emitovane α čestice se lako zaustavljaju već nakon nekoliko centimetara vazduha i ne mogu se uvući u kožu. Ali zaštita kao što je koža ne postoji u plućima gde α čestice dolaze zajedno sa nekim elementima raspadanja i dovoljno su jaki za prodiranje u epitel pluća gde razaraju sloj osetljivih bazalnih epitelnih ćelija. Ovo razaranje može izazvati rak pluća.

Proizvedeni izvori radioaktivnosti 20-40%

Prirodni izvori radioaktivnosti 60-80%



sl. 1.1. Uticaj prirodnih izvora radioaktivnosti u ozračivanju stanovništva [13]

Savremena istraživanja su pokazala da 40% (sl. 1.1) od ukupne doze zračenja, koje primi prosečno stanovništvo, uslovljeno je udisanjem prirodnog radiaktivnog gasa  $^{222}\text{Rn}$ . Na osnovu ovoga možemo reći da takav radon predstavlja jedan od najvećih zdravstvenih rizika za stanovništvo [13].

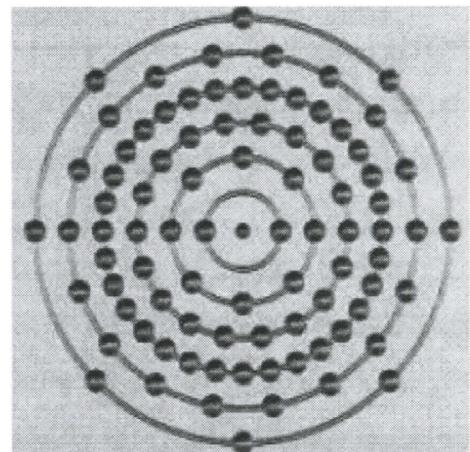
Zato je pitanje preventivnog ponašanja u cilju smanjenja koncentracije radona u zgradama od prvorazrednog značaja.

## 2. Osobine radona

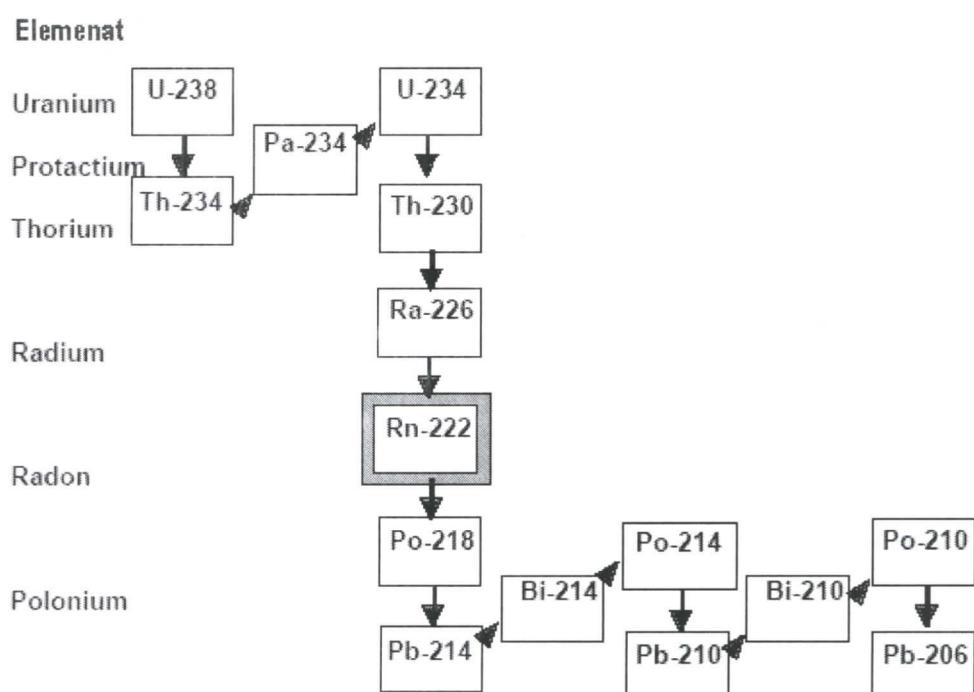
Radon je otkrio Fridrih Dorn (Fredrich Ernst Dorn) 1898. godine (prema nekim izvorima 1900. godine) i nazvao ga je emanacija radija. Tek 1908. godine Viljem Remzi (William Ramsay) i Robert Vitlow – Grej (Robert Whytlaw – Gray) izolovali su ga, odredili mu gustinu i nazvali ga niton (od latinske reči nitens koja znači blistav, svetao; simbol Nt). Naziv radon nastaje 1923. godine i znači posle radija. [17]

Radon je hemijski element sa simbolom Rn i atomskim brojem 86. Predstavlja radioaktivni inertan gas nastao raspadanjem radijuma. Prikaz rasporeda elektrona po putanjama dat je na sl. 2.1. Jedan je od najtežih gasova, bez boje i ukusa, sledećih karakteristika [17]:

- Grupa, perioda, blok – 18, 6, p
- Standardna atomska masa – 222 g/mol
- Broj elektrona po putanji – 2, 8, 18, 32, 18, 8
- Gustina na 0 °C i 101.325 kPa – 9,73 g/L
- Rastvorljiv u vodi



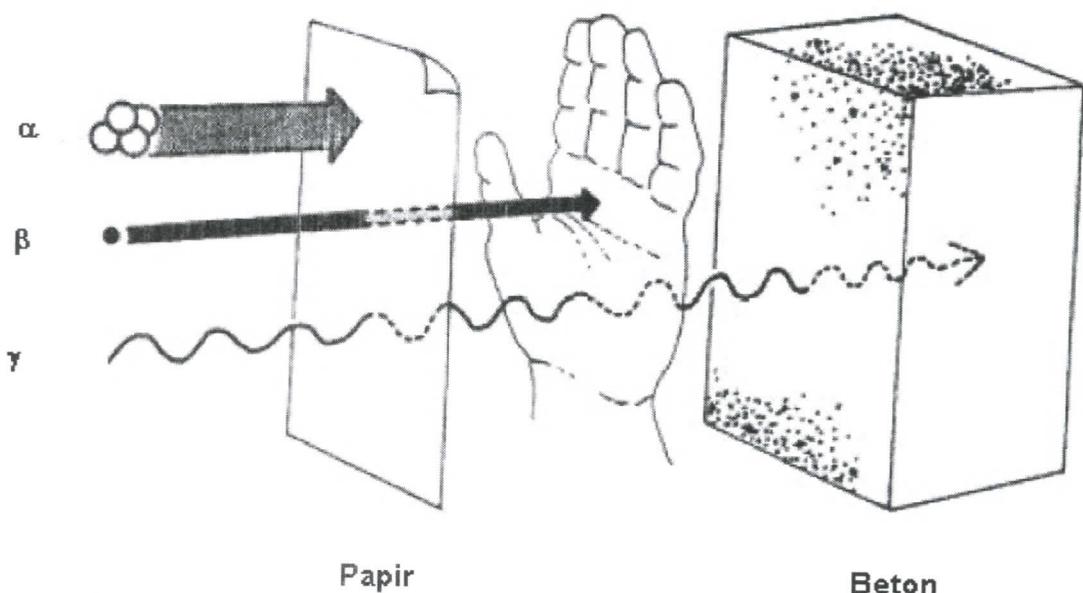
sl. 2.1 Raspored elektrona po putanjama [16]



sl. 2.2. Radioaktivni niz  $^{238}\text{U}$  [3]

- Magnetičnost – nije magnetičan
- Izotopi i vreme poluraspađa –  $^{211}\text{Rn}$ , 14,6 h;  $^{218}\text{Rn}$ , 35 ms;  $^{219}\text{Rn}$ , 4 s;  $^{220}\text{Rn}$ , 56 s;  $^{221}\text{Rn}$ , 25 min;  $^{222}\text{Rn}$ , 3,824 dan;  $^{223}\text{Rn}$ , 23 min.
- Emisija  $\alpha$  čestice energije 5.5 MeV.

Glavni izvori prirodne radijacije su  $^{238}\text{U}$  (sl. 2.2) i  $^{232}\text{Th}$  sa vremenima poluraspađa 4,5 biliona godina i 14 biliona godina, a nalaze se u sedimentnim stenama. Raspadanjem  $^{232}\text{Th}$  nastaje  $^{220}\text{Rn}$  koji se naziva toron, a raspadanjem  $^{238}\text{U}$  nastaje  $^{222}\text{Rn}$  koji se naziva radon. Zbog većeg vremena poluraspađa  $^{222}\text{Rn}$  može difuzijom da se pojavi iz stena gde se stvara, dok se ostali izotopi radona raspadnu pre pojavljivanja u čovekovoj okolini. Pri tome  $^{222}\text{Rn}$  formira  $\alpha$  čestice koji su relativno većih dimenzija i predstavljaju najveće radiaktivno zagađenje čovekove okoline, iako se lako zaustavljaju listom papira ili na koži (sl. 2.3) [3].

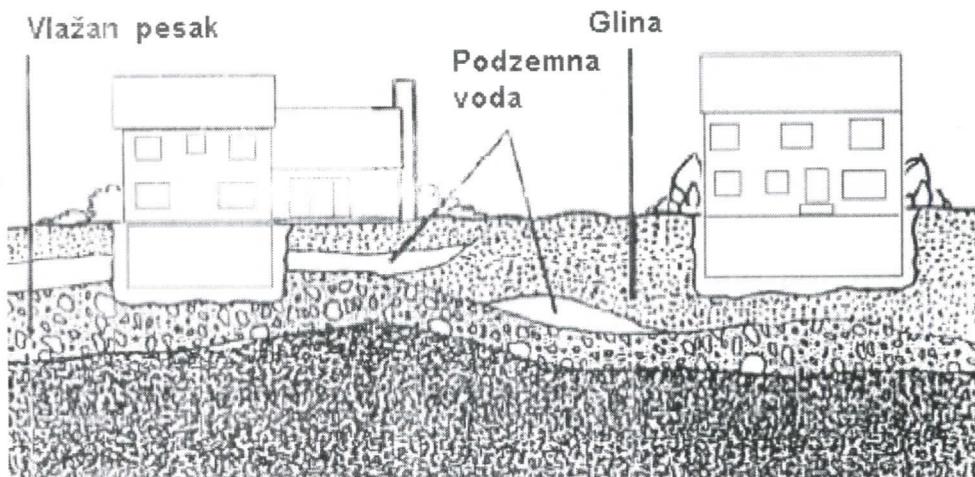


sl. 2.3. Prodiranje radijacije [3]

### 3. Uticaj na zdravlje

Do pedesetih godina XX veka nije uočena mogućnost štetnog uticaja radona na ljudе kao izazivačа raka plućа. To je primećeno tek kod rudara u rudnicima uranijuma, jer radon nastaje raspadanjem urana i ima ga u rudnicima u velikim koncentracijama. Opasnost od radona prisutnog u čovekovoј okolini dokazana je 1984. kod jednog radnika nuklearne elektrane, jer je utvrđeno da je više ozračen kući nego na poslu. Naime utvrđeno je da u podrumu njegove kuće prisutan radon u količini od oko  $100\,000 \text{ Bq/m}^3$ . Rizik za zdravlje pri življenju u takvoj kući odgovara riziku usled pušenja 135 kutija cigareta svakodnevno. [17]

Radon ulazi u zgrade pre svega kroz otvore i pukotine u temelju i zidovima. Najveću koncentraciju ima u podrumima. Šta više, nivo radona ne samo da varira od oblasti do oblasti, već i među zgradama u susedstvu, u zavisnosti od terena na kome se nalazi zgrada (sl 3.1) [7].



sl. 3.1. Različiti geološki sastav u susedstvu [7]

Koncentracija na otvorenom prostoru je mala, ali u zatvorenom prostoru može dostići značajne vrednosti. Problem sa radonom nastaje kada se veže sa aerosolom pa formira radioaktivni aerosol.

Radioaktivni aerosoli се дјаметарима у интервалу од 0,1 до 10 nm најбоље се талоže у људским плућима. Aerosoli већих димензија се задржавају у носу и усној дуплији не допируји до осетљивог респираторног епитела бронхијалног стабла. [9]

Iako imaju мали дomet  $\alpha$ -честице радонових потомака депонованих у плућима су изузетно опасне zbog velike моћи jonizacije.  $\alpha$ -честице које прођу у базални и секреторни слој епитела бронхија tokom desetbilionitog dela sekunde izazivaju jonizaciju atoma tkiva. Jonizovan atom tokom sledećег desetomilijarditog dela sekunde formира слободне радикале који за milioniti deo sekunde reaguju sa biološки značajним молекулима i izazivaju

posledice u vidu mutacija, hromozomskih aberacija, ćelijske smrti ili onkogenih transformacija. Promene na ćelijskom i molekularnom nivou izazvane ionizujućim zračenjem znatno su izraženije u ranim životnim fazama, što ukazuje na poseban zdravstveni rizik kod dece. [9]

Istraživanja vršena poslednje decenije pokazuju da u normalnim uslovima preko 70% ukupne godišnje doze koju prima stanovništvo potiče od prirodnih izvora ionizujućih zračenja, pri čemu je 40% uslovljeno udisanjem prirodnog radioaktivnog gasa, radona  $^{222}\text{Rn}$ , odnosno njegovih potomaka. Kao hemijski inertan gas, radon lako napušta mesto formiranja (tlo, građevinski materijal, vodu) i prelazi (emanira) u atmosferu. Na taj način je vazduh, kako na otvorenom prostoru tako i u zatvorenim prostorijama, stalno kontaminiran radonom.[9] Radon u vazduhu dominantno potiče od prisustva članova prirodnih radioaktivnih nizova u zemljištu i vodi.

EPA (Environmental Protection Agency) procenjuje da u Americi oko 20 000 ljudi umre godišnje od raka pluća prouzrokovanim radonom. Pošto nije poznata granica bezbedne koncentracije radona EPA preporučuje da nivo radona bude u granicama od 2 do 4 pCi/L. Srednja koncentracija u kućama u Americi je 1,3 pCi/L. [15]

Pušači imaju veću šansu za dobijanje raka pluća usled zajedničkog delovanja duvanskog dima i radona. Kod te populacije oko 62 osobe od 1000 umreće od raka pluća u poređenju sa 7,3 kod nepušača. Ili posmatrajući na drugi način, nepušač izložen koncentraciji 1,3 pCi/L ima šansu 2 od 1000 osoba za rak pluća, dok pušač ima šansu 20. Pregled rizika je dat u sledećim tabelama T-3.1 i T-3.2. [15]

T-3.1. Rizik pušača od radona [15]

Nivo radona pCi/L	Broj obolelih od raka pluća na 1000 osoba	Odnos rizika raka pluća kao posledice uticaja radona u odnosu na drugu opasnost
20	oko 260	250 puta veći rizik od davljenja
10	oko 150	200 puta veći rizik od smrti usled vatre u kući
8	oko 120	30 puta veći rizik od smrti usled pada
4	oko 62	5 puta veći rizik od smrti u automobilskoj nesreći

Nivo radona pCi/L	Broj obolelih od raka pluća na 1000 osoba	Odnos rizika raka pluća kao posledice uticaja radona u odnosu na drugu opasnost
2	oko 32	6 puta veći rizik od smrti usled trovanja
1,3	oko 20	(srednja koncentracija u prostorijama)
0,4	oko 3	(srednja koncentracija u prirodi)

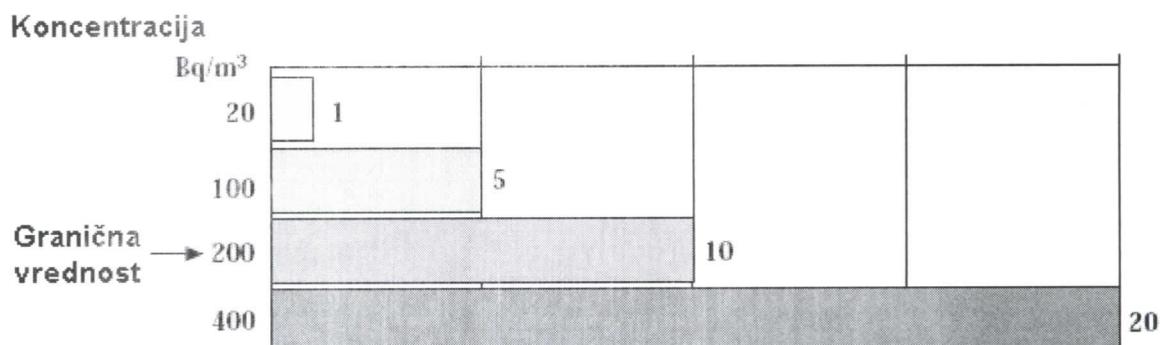
T-3.2 Rizik nepušača od radona [15]

Nivo radona pCi/L	Broj obolelih od raka pluća na 1000 osoba	Odnos rizika raka pluća kao posledice uticaja radona u odnosu na drugu opasnost
20	oko 36	35 puta veći rizik od davljenja
10	oko 18	20 puta veći rizik od smrti usled vatre u kući
8	oko 15	4 puta veći rizik od smrti usled pada
4	oko 7	kao rizik od smrti u automobilskoj nesreći
2	oko 4	kao rizik od smrti usled trovanja
1,3	oko 2	(srednja koncentracija u prostorijama)
0,4		(srednja koncentracija u prirodi)

Iz prethodnih tabela se vidi da rak pluća može nastati pod uticajem radona pri koncentraciji kao u prirodi, ali je evidentno da se sa povećanjem koncentracije povećava i broj slučajeva oboljenja.

Prethodne tabele su izvor EPA, a na slici 3.2 [6] prikazan je dijagram rizika od raka pluća nepušača na 1000 osoba, u zavisnosti od koncentracije radona. Izvor podataka je Environmental and Heritage Service agencija u sastavu Department of the Environment for Northern Ireland. Podaci EPA i Environmental and Heritage Service se razlikuju u broju

slučajeva oboljenja ali nedvosmisleno su saglasni da se povećanjem koncentracije radona povećava i rizik.



sl. 3.2. Rizik od raka pluća pod uticajem radona na 1000 osoba (ne pušači) [6]

U današnjim uslovima mnoge ljudske aktivnosti (smanjenje prirodne ventilacije u cilju uštede toplotne energije, korišćenje prefabrikovanih otpadnih materijala u građevinske svrhe i opšta tendencija da čovek sve veći deo svog vremena provodi u zatvorenim prostorijama) dovode do povećanog ozračivanja čoveka radonom i njegovim kratkoživecim potomcima. [9]

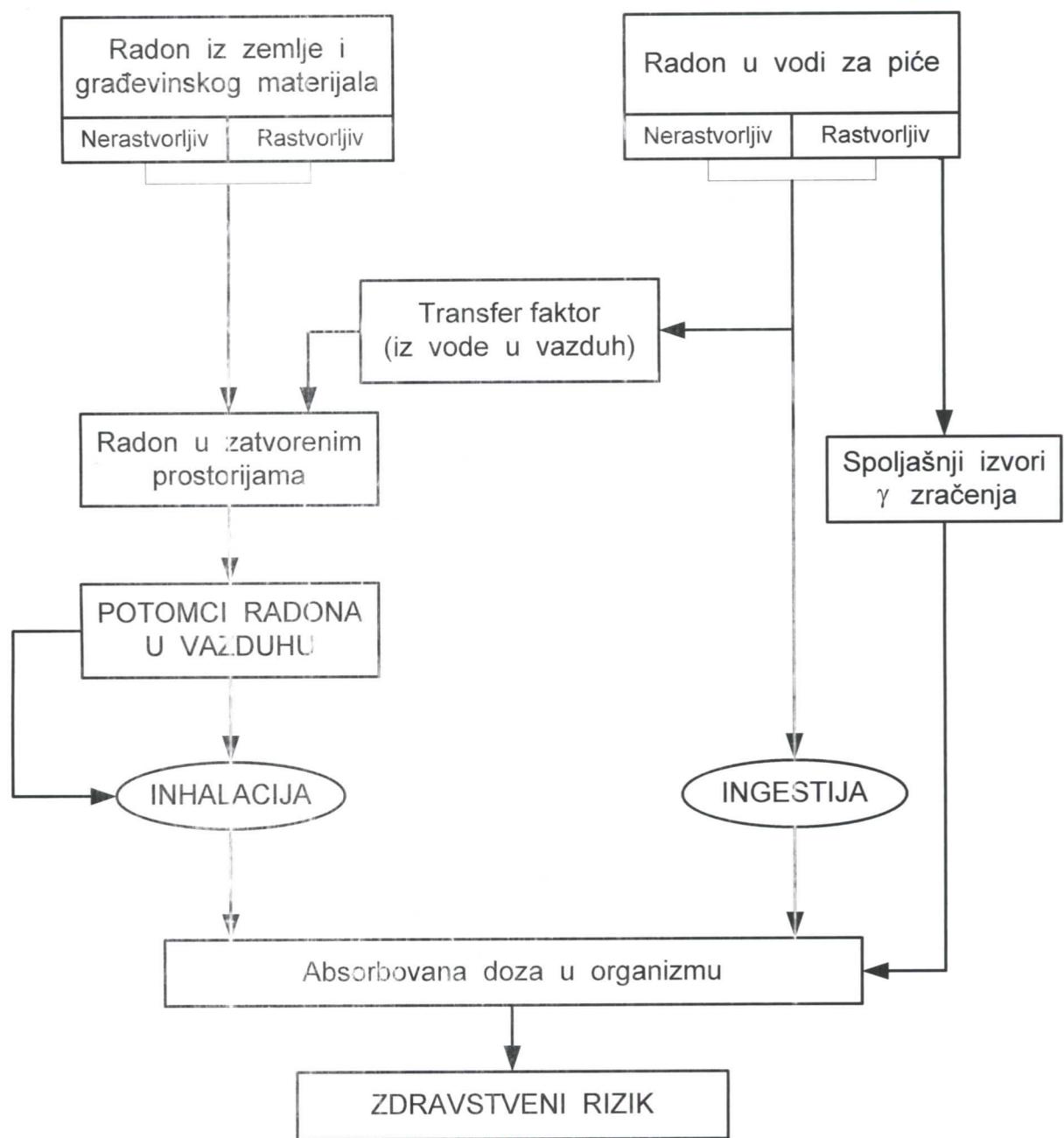
Na osnovu istraživanja, EPA je iznala zaključak o riziku od dobijanja kancera udisanjem radona iz vazduha (sa ili bez uračunavanja radona koji potiče iz vode) i rizika od dobijanja kancera pijenjem vode koja sadrži rastvoreni radon. Godine 1998. u Sjedinjenim Američkim Državama bilo je ukupno 160 000 smrtnih slučaja od kancera pluća, najvećim delom izazvanih pušenjem. Od tog broja procenjeno je da 19 hiljada smrtnih slučajeva potiče od udisanja radona iz vazduha, a od tog broja 160 se pripisuje inhalaciji radona koji se emituje iz vode koja se koristi u domaćinstvu. Rizik od kancera želuca prouzrokovanih pijenjem vode koja sadrži rastvoreni radon iznosi oko 20 smrtnih slučajeva godišnje. [15]

Preporuka EPA za gornju granicu koncentracije radona u vodi za piće iznosi 300 pCi/l, što preračunato iznosi 11.1 Bq/m<sup>3</sup>.

Radon je klasifikovan kao klasa A kancerogena (poznato je da izaziva rak kod ljudi). U klasu A kancerogena spadaju: arsen, azbest, benzol. [1]

#### 4. Rasprostranjenost radona

Radon kao produkt raspadanja urana nalazi se u prirodi u većoj količini nego kao posledica rada nuklearnih postrojenja. Utvrđeno je da 40% ukupne doze zračenja koju primi stanovništvo posledica  $^{222}\text{Rn}$ , odnosno njegovih potomaka. U prirodi  $^{222}\text{Rn}$  se nalazi u zemljištu, vodi i vazduhu. Na slici 4.1, šematski je prikazana rasprostranjenost radona i njegov uticaj na organizam [4].



sl. 4.1. Rizik od radona u vazduhu i u vodi [4]

#### 4.1. Radon u zemljištu

Radon u zemljištu potiče od raspadanja urana. Uran je prisutan u stenama: granit, škriljci, fosfati i ruda urana. Primenom ovih materijala u građevinarstvu i poljoprivredi dolazi do pojave radona u zgradama i hrani. Iz zemljišta radon lako prelazi u atmosferu i vodu i predstavlja opasnost za okolinu.

Eksplotacija uglja i njegovo sagorevanje u termoelektranama predstavlja u našim uslovima potencijalno najznačajniji proces za stvaranje tehnološki povišenih nivoa radona. Otvaranje velikih površinskih kopova omogućava ubrzenu emanaciju iz dubljih slojeva zemljine kore. Sagorevanjem uglja u atmosferu se izbacuju velike količine prirodnih radionukleida koje se talože na velikim površinama. Pepelišta na koja se odlažu ostaci sagorevanja uglja predstavljaju takođe lokalitete sa primetno povećanom koncentracijom prirodnih radionukleida. [14]

#### 4.2. Radon u vodi

Delimično torijum, a naročito uran prelaze u hidrotermalne rastvore i mogu da obrazuju hidrotermalne rudne koncentracije u i oko granitoidnih masa. Usled interakcije podzemnih voda sa stenama i rudama dolazi do prevodenja određenih radionuklida u mobilnu fazu i samim tim i do razdvajanja radionuklida zbog razlike u geohemiskim osobinama. Na taj način se uranovi potomci (radijum i radon) razdvajaju od urana i posebno lokalno koncentrišu u mineralnim i termalnim vodama i zemljištu. [13]

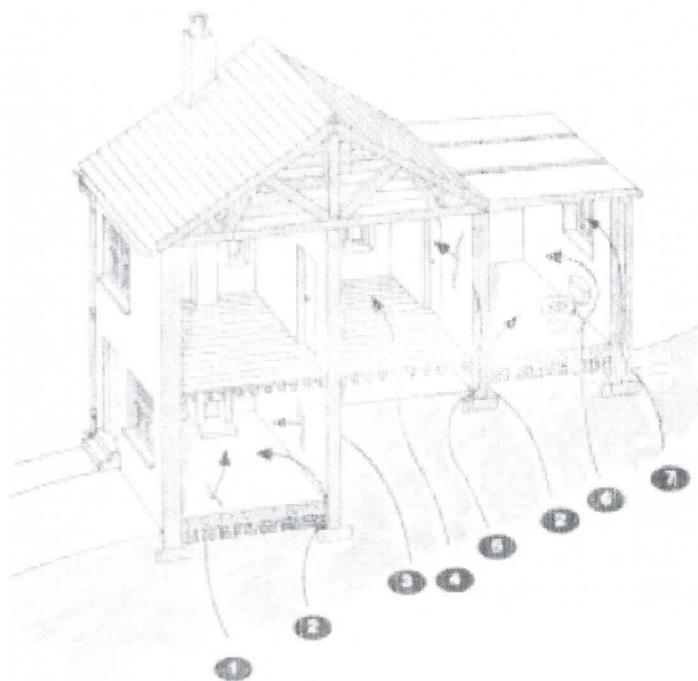
Kako u našoj zemlji ne postoji zakonske regulative ili preporuke o dozvoljenim nivoima koncentracije aktivnosti radona u pijaćim vodama, za poređenje sa dobijenim rezultatima korišćeni su američki standardi. Zbog veoma visokog zdravstvenog rizika, nivo radona i njegovih kratkoživećih potomaka u pijaćoj vodi reguliše se od strane Agencije za zaštitu životne sredine EPA (Environmental Protection Agency) i Akta o sigurnosti vode za piće SDWA (Safe Drinking Water Act). [4]

Prema ovim preporukama iz 1991. godine maksimalni nivo kontaminacije MCL (Maximum Contaminant Level) radona u pijaćim vodama iznosi 11 Bq/L (oko 300 pCi/L). Godine 2000. EPA je postavila novu granicu AMCL (Alternative Maximum Contaminant Level) koja se definiše kao koncentracija radona u vodi koji bi dovela do povećanja koncentracije radona u zatvorenim prostorijama, a koja ne prelazi koncentraciju radona na otvorenom prostoru. Određivanje rizika po stanovništvo, samo od radona koji je prisutan u

vodi, nemoguće je odrediti zbog toga što radon uvek prirodno postoji u vazduhu. Pomoću AMCL EPA određuje granicu kontaminacije vode radonom koja ne daje zdravstveni rizik veći od radona koji postoji u vazduhu. [4]

#### 4.3. Radon u vazduhu

Kao hemijski inertni gas, radon lako napušta mesto formiranja (tlo, građevinski materijal, vodu) i emanira u atmosferu. Jer oko 80% novoformiranih potomaka je pozitivno nanelektrisano i hemijski su veoma aktivni. Oni interaguju sa negativnim jonima prisutnim u atmosferi pripajajući se za prirodne aerosole. Prvi potomak  $^{218}\text{Po}$  pod normalnim spoljašnjim uslovima postoji samo 20 s kao samostalan mobilan jon ili atom, a nakon toga se pripaja molekulima vodene pare, kiseonika i drugih gasova, česticama i čvrstim površinama. Na taj način je vazduh, kako na otvorenom prostoru tako i u zatvorenim prostorijama, stalno kontaminiran radonom. Radon u vazduhu dominantno potiče od prisustva članova prirodnih radioaktivnih nizova u zemljištu i vodi. Disanjem radon ulazi u pluća i predstavlja zdravstvenu opasnost. Vreme polueliminacije iz pluća je 30 min, a iz ostalih tkiva 15 min. [13]



1. Kroz pukotine u podu
2. Kroz spojeve
3. Kroz pukotine u zidu ispod nivoa zemlje
4. Kroz otvore u visećem podu
5. Kroz pukotine u zidu
6. Kroz otvore oko cevi
7. Kroz šupljine u zidu

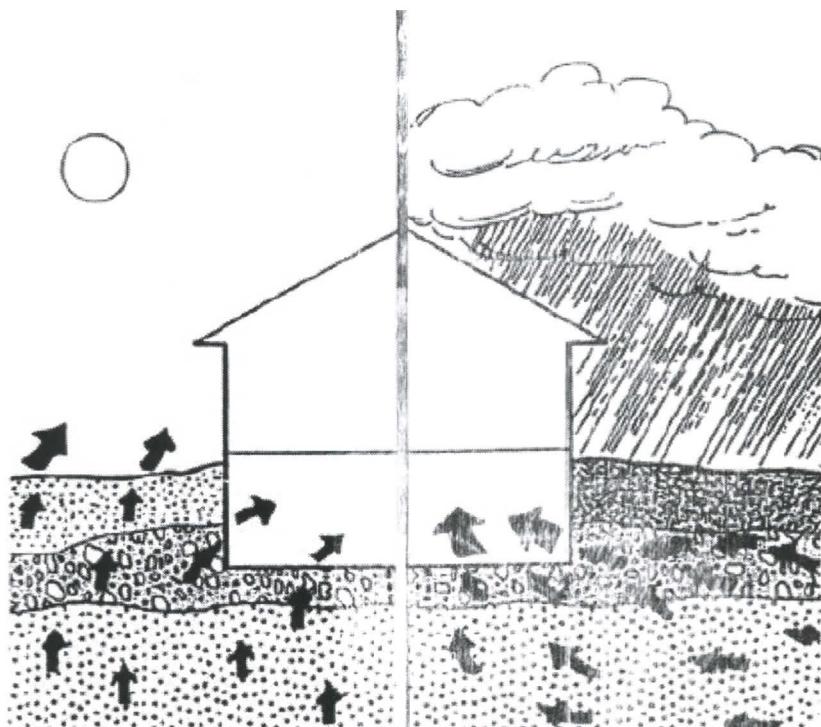
sl. 4.2. putevi prelaska radona iz zemljišta u zgrade [5]

Direktni putevi prelaska radona iz zemljišta u zgrade su otvor i pukotine u betonskim pločama i blokovima, loše veze između zidova i ploča, odvodne cevi, podni

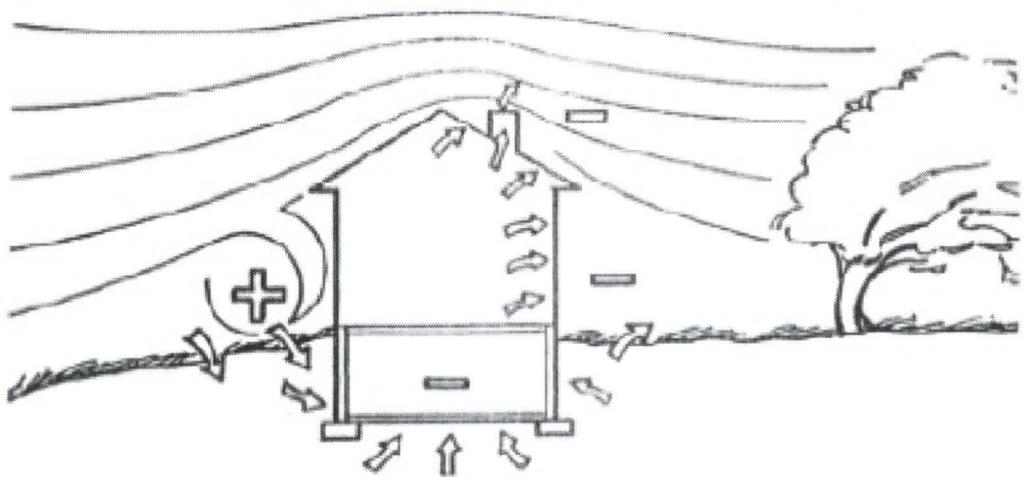
slivnici pokriveni perforiranim poklopcima i slično (sl. 4.2) [4]. Naime, razlika u pritiscima pokreće vazduh, a sa njim i radon iz okolnog zemljišta do ispod građevina, odakle radon prodire u kuće kroz gore pomenute otvore. Jačina ekshalacije  $J$ , odnosno fluks radona iz tla, aktivnost je radona koja u jedinici vremena prođe kroz jediničnu površinu zemljišta. Opseg vrednosti za fluks radona iz tla iznosi od  $0,0002$  do  $0,053 \text{ Bq}/(\text{m}^2\text{s})$  pri čemu je srednja vrednost  $0,016 \text{ Bq}/(\text{m}^2\text{s})$ . Ekshalacija radona iz zemljišta zavisi od više faktora:

- koncentracije radijuma  $^{226}\text{Ra}$  u zemljištu,
- permeabilnosti (propustljivosti) zemljišta,
- vlažnosti zemljišta,
- stanja vegetacionog pokrivača i
- meteoroloških prilika. [13]

Tokom sunčanih dana smanjuje se ekshalacija radona u zgrade, a povećava u okolinu, a za vreme nepogode povećava se ekshalacija u zgrade a smanjuje u okolinu [7] (sl. 4.3). Takođe, i vetar ima uticaja na količinu radona. Smanjuje se koncentracija radona u delovima zgrade okrenutih vetrui, a povećava u suprotnom delu (sl. 4.4) [7]. Pri normalnim meteorološkim uslovima koncentracija Rn u prirodi je  $0,4 \text{ pCi/L}$ , a u zgradama je  $1,3 \text{ pCi/L}$ , pri čemu koncentracija nije ista u svim prostorijama.

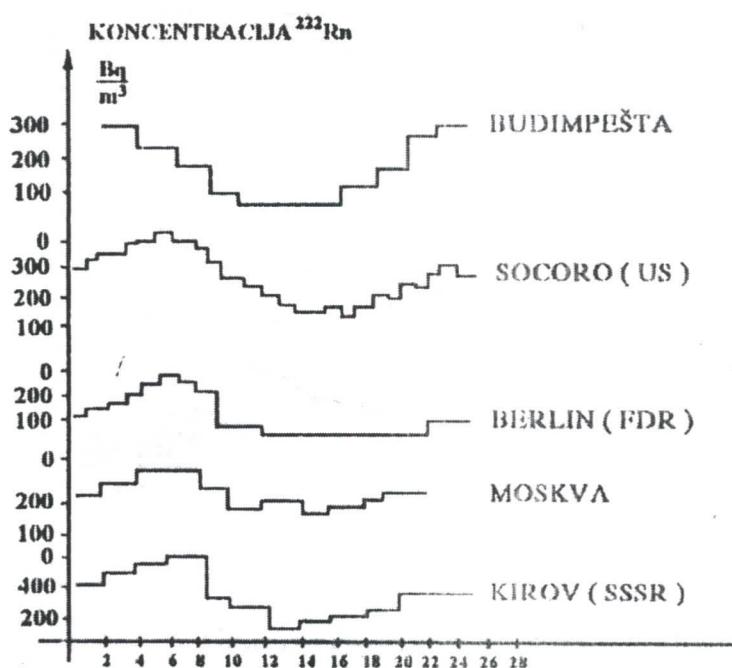


sl. 4.3. Uticaj nepogode na ekshalaciju radona [7]



sl. 4.4. Koncentracija radona u zavisnosti od veta [7]

Dnevne varijacije koncentracije radona takođe su pripisane promenama stabilnosti atmosfere. Rano ujutro imamo maksimum koncentracije radona zbog temperaturske inverzije koja sprečava vertikalno vazdušno strujanje što dovodi do ekstremno stabilne atmosfere. Posle izlaska sunca, počinje zagrevanje tla i prizemnih slojeva atmosfere, nestaje temperaturska inverzija i uspostavljuju se vertikalne vazdušne struje. Usled ovoga koncentracija radona u prizemnom sloju atmosfere opada. Kasno popodne raste stabilnost atmosfere što dovodi do porasta koncentracije radona. Na slici 4.5 data je promena koncentracije radona na otvorenom prostoru u toku jednog dana na više lokacija [13].



sl. 4.5. Koncentracija radona tokom jednog dana na više lokacija [13]

## 5. Merenje koncentracije radona

Merenje intenziteta radon je veoma važno pošto čovek ne može osetiti njegovo prisustvo (gas bez ukusa, boje i mirisa). Metode merenja količine ili koncentracije radona mogu se podeliti u dve osnovne vrste:

- metode vezane za identifikaciju i brojanje samih nuklida,
- metode vezane za brojanje i identifikaciju nuklearnih događaja. [14]

U prvu grupu spadaju sve radiohemiske mikroanalitičke metode. Druga grupa – metode brojanja i identifikacije nuklearnih događaja, zasnivaju se na detekciji i registraciji efekata interakcije nanelektrisanih α čestica ili zračenja ( $\gamma$ , x), koje nastaju kao posledica radioaktivnog raspada jezgra radona sa materijalom detektora. Pored brojanja pojedinačnih akata raspada moguće je i određivanje vrste emitovanja čestica, njihove energije. [14]

Primenom brojčano-spektrometrijskih metoda kod uzorka koje treba sušiti zbog velikog prisustva vode dolazi do poremećaja sadržaja radona. Ti problemi nastaju i ako uzorak treba mrviti, praviti prah ili mešati. [14]

### 5.1. Merenje koncentracije radona u zemljištu

Na Departmanu za fiziku Univerziteta u Novom Sadu razvijena je merna tehnika za merenje radona u zemljištu. Uzorci zemljišta se uzimaju sa specijalno konstruisanom cevi prečnika 13 cm sa dubine od 60 cm. Uzorci se suše do konstantne mase na 105 °C i posle homogenizacije se prenose u posude za merenje. Emanacija radona iz zemljišta je određena metodom ugljenih kanistara. Ugljeni kanistri su postavljeni u unutrašnjost cevi koja ima zatvoren gornji kraj, dok donji kraj ostaje u zemlji na dubini od 60 cm. Vreme izlaganja kanistara je iznosilo dva dana. [9]

Gama-spektrometrijska merenja se vrše pomoću visokorezolucionog HPGe  $\gamma$ -spektrometra proizvođača ORTEC. Nominalna efikasnost detektora je veća od 36 %, dok je moć razlaganja manja od 1,9 keV-a. Detektor ima proširen energetski opseg merenja (tip: GMX) tako da može da registruje i niskoenergetsко  $\gamma$ - i x-zračenje. Metalne komponente detektora izrađene su od materijala testirane visoke radiočistoće. Detektor je smešten u specijalnu niskofonsku zaštitnu komoru sa gvozdenim zidovima debljine 25 cm.

Komora je izrađena od gvožđa livenog pre II svetskog rata, tako da ne sadrži primese veštačke radioaktivnosti i snižava nivo zračenja za oko 1000 puta. [9]

Spektri su preko lanca predpojačavača i pojačavača tipa CANBERRA dovedeni u višekanalni analizator CANBERRA Ser. 35+ sa dva analogno-digitalna konvertora i ukupne memorije od 8192 kanala. Višekanalni analizator je direktno povezan sa PC računarom u kojem su obrađivani i storirani izmereni spektri. Za obradu spektara korišćena je modifikovana verzija programa MICRO-SAMPO koja osim identifikovanih  $\gamma$ -linija uvek iskazuje spektralne intenzitete i za više od 20 izabranih izotopa. Uzorci su mereni u cilindričnoj geometriji u mernim posudama prečnika  $\phi = 67$  mm i visine od 62 mm. Efikasnost detekcije za ovu geometriju određena je pomoću tačkastih primarnih kalibracionih izvora AMESHAM, sekundarnih voluminoznih etalona proizvođača NBS i OHM, kao i kalibriranog etalona fosfata. Konzistentnost kalibracionih tehnika proverena je pomoću računarskog koda "SOLANG". Tipično vreme merenja uzorka iznosilo je 80 ks. Greške rezultata merenja su iskazane sa nivoom tačnosti od 95 %, što znači da je verovatnoća da se pri ponovljenom merenju istog uzorka dobije rezultat izvan granica iskazane greške manja od 5 %. U Tabeli 5.1 prikazani su preuzeti rezultati iz [9] merenja koncentracije radona u zemljištu izvršenih u Laboratoriji za niskofonsku gama-spektrometriju Departmana za fiziku u Novom Sadu. [9]

Tabela 5.1. Koncentracija radona u zemljištu na više lokacija [9]

naziv lokacije	A [Bq/m <sup>3</sup> ]	naziv lokacije	A [Bq/m <sup>3</sup> ]	naziv lokacije	A [Bq/m <sup>3</sup> ]
Šangaj1	696±17	Bistrica3	650±12	Adice1	1108±15
Šangaj2	947±20	Bistrica4	173±7	Adice2	465±10
Šangaj3	1670±27	Telep1	1637±18	Adice3	1929±20
Šangaj4	742±18	Telep2	315±9	Adice4	691±12
Petrovaradin1	3146±26	Telep3	553±11	Liman1	1544±18
Petrovaradin2	2525±23	Telep4	763±13	Liman2	1615±18
Petrovaradin3	1750±19	Klisa1	163±7	Liman3	953±14
Petrovaradin4	1435±18	Klisa2	613±12	Liman4	735±13
Bistrica1	832±13	Klisa3	521±11	Šstrand1	856±14
Bistrica2	411±10	Klisa4	866±14	Šstrand2	791±13

Koncentracija aktivnosti radona emaniranog iz zemljišta kretala se u granicama od 163 – 3146 Bq/m<sup>3</sup>. Na lokaciji u Petrovaradinu, na svim mernim tačkama, zabeležena je intenzivnija emanacija radona tako da je srednja koncentracija emaniranog radona  $2214 \pm 387$  Bq/m<sup>3</sup>.[9]

Posebno razvijena merna tehnika u laboratoriji u Novom Sadu omogućava da se koncentracija aktivnosti  $^{238}\text{U}$  odredi iz  $\gamma$ -linija prvog potomka ovog radionuklida iz linija  $^{234}\text{Th}$ . Osim koncentracije aktivnosti  $^{238}\text{U}$  određenog na ovaj način i koncentracije aktivnosti člana uranovog niza  $^{226}\text{Ra}$ . Upoređenje ova dva izmerena podatka je veoma bitno za detekciju prisustva osiromašenog urana. Naime, u materijalima zagađenim osiromašenim uranom ravnotežni odnos urana i radijuma bitno je poremećen. [9]

## 5.2. Merenje koncentracije radona u vodi

Iz literature je poznato da neke mineralne vode sadrže povećane koncentracije radionuklida. Radon kao specifičan plemeniti gas iz izvorišta može da se „rastvorí“ u vodi tako da koncentracija radona u zatvorenim bocama ne mora da potiče samo od urana u datom uzorku vode. [4]

Merenja koncentracije radona u vodama za piće rade se na Departmanu za fiziku Univerziteta u Novom Sadu kalibriranim alfa spektrometrom DURRIDGE RAD 7 (sl. 5.1) koji ima posebne dodatke za merenje koncentracije radona u vodi. Detektor konvertuje alfa zračenje direktno u električni signal i ima sposobnost da elektronski odredi energiju svake alfa čestice, što omogućava da se odredi koji se izotop ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ) proizvede radijacijom, tako da se trenutno može razlikovati stari od novog radona, radon od torona i signal od šuma. [4]

**RAD-H<sub>2</sub>O** sistem je zatvoren sistem u kome su zapremina vazduha i vode konstantni i nezavisni od brzine protoka. Vazduh cirkuliše kroz vodu i kontinualno izdvaja radon sve do stanja u kome se uspostavlja ravnoteža. **RAD-H<sub>2</sub>O** sistem dostiže stanje ravnoteže u roku od 5 minuta, posle kojih više nema radona koji bi se mogao izdvojiti iz vode. [4]



sl. 5.1. [4]

Efikasnost izdvajanja, odnosno procenat radona koji se uklanja iz vode u toku jednog ciklusa, veoma visoka je i iznosi oko 99 % za uzorak zapremine za 40ml i oko 94% za uzorak zapremine 250ml. Tačna vrednost efikasnosti izdvajanja radona zavisi i od temperature okoline, ali je gotovo uvek veća od 90%. [4]

U toku rada sa **RAD-H<sub>2</sub>O** detektorom neophodno je konstantno proveravati relativnu vlažnost i snižavati je do ispod 10%. Ukoliko je vlažnost veća od pomenute rezultati merenja nisu realni, pa se **RAD7** mora očistiti kako bi se relativna vlažnost smanjila do prihvatljivog nivoa. [4]

**RAD7** detektor ima sposobnost da razlikuje „nove“ radonske potomke od „starih“ potomaka radona koji su ostali u sistemu a potiču od prethodnih merenja. Na taj način merenja uzorka koji sadrže veliku koncentraciju radona mogu da utiču na aktivnost radonskih potomaka u narednim merenjima. [4]

Nakon merenja uzorka sa velikom koncentracijom radona njegovi produkti raspada ostaju u sistemu sve dok se ne raspadnu. Izotop polonijuma-218 ima period polu-raspada od 3min. Čišćenjem **RAD7** u periodu od 30min, <sup>218</sup>Po se raspada i njegova aktivnost se smanjuje na hiljaditi deo njegove početne aktivnosti. Takođe, **RAD7** je osetljiv i na polonijum-214, koji je aktivan i posle nekoliko sati od trenutka uklanjanja radona iz uzorka. **RAD7** koristi energijski diskriminator kojim se odbacuje odbroj koji potiče od <sup>214</sup>Po u toku merenja, međutim, veoma mali procentat ovog izotopa prolazi kroz diskriminator što povećava fon i doprinosi povećanju koncentracije radona u uzorku. Aktivnost radonovih

potomaka se smanjuje sa vremenom, pa se preporučuje da se sačeka da se oni raspadnu, ukoliko su njihove aktivnosti visoke, i tada započne sa merenjem. [4]

Ukoliko se uzorak vode ne meri odmah po uzorkovanju (odnosu u trenutku punjenja), koncentracija radona se smanjuje (period poluraspada  $^{222}\text{Rn}$  iznosi 3,825 dana, odnosno 132,4 časa), i potrebno je izvršiti korekciju na raspad. Ukoliko je uzorak pravilno zatvoren i uskladišten, i meren u roku od 24 časa, nije potrebno vršiti korekciju na raspad. Korekcija na raspad je jednostavna eksponencijalna funkcija sa vremenskom konstantom od 132,4 časa, pa se korekcija vrši tako što se dobijena aktivnost pomnoži sa faktorom DCF (Decay Correction Factor),  $\text{DCF} = 2^{(T/132,4)}$ , gde je T vreme proteklo od trenutka punjenja. [4]

U tabeli 5.2 prikazani su preuzeti rezultati iz [4] merenja koncentracije radona u pijaćim vodama izvršenih u Laboratoriji za niskofonsku gama-spektrometriju Departmana za fiziku u Novom Sadu.

Tabela 5.2 . Koncentracija radona u pijaćim vodama [4]

R. br.	NAZIV VODE	DATUM PUNjENJA	DATUM MERENJA	KONCENTRA- CIJA AKTIVNOST [Bq/l]	KORIGOVANA KONCENTRACIJA AKTIVNOST [Bq/l]
1	KNJAZ MILOŠ 1,5l gazirana	12.8.2004.	16.8.2004.	<0,26	
2	KNJAZ MILOŠ 1,5l gazirana	19.7.2004.	23.8.2004.	<0,15	
3	VODA VRNJCI 1,5l gazirana	3.8.2004.	23.8.2004.	<0,11	
4	AQUA VIVA 1,5l negazirana	14.7.2004.	23.8.2004.	<0,11	
5	VODA VODA 0,5l negazirana	8.7.2004.	24.8.2004.	<0,16	
6	ROSA 0,5l negazirana	27.7.2004.	24.8.2004.	<0,48	
7	Voda iz novosadskog vodovoda		24.8.2004.	$3,9 \pm 0,5$	$3,9 \pm 0,5$
8	VODA VRNJCI 0,5l gazirana	21.7.2004.	25.8.2004.	<0,31	
9	KNJAZ MILOŠ 0,5l gazirana	7.8.2004.	25.8.2004.	<0,36	
10	PI-VODA 1,5l prečišćena voda za piće	25.8.2004.	26.8.2004.	$2,1 \pm 0,7$	$2,5 \pm 0,8$
11	DUBOKA 0,5l prirodna mineralna	22.6.2004.	26.8.2004.	<0,5	
12	BIVODA 1,5l gazirana	31.5.2004.	26.8.2004.	<0,11	
13	KARAĐORĐE 1,5l negazirana	29.6.2004.	26.8.2004.	<0,15	
14	MIVELA 2l gazirana	19.7.2004.	26.8.2004.	<0,35	

R. br.	NAZIV VODE	DATUM PUNjENjA	DATUM MERENJA	KONCENTRA- CIJA AKTIVNOST [Bq/l]	KORIGOVANA KONCENTRACIJA AKTIVNOST [Bq/l]
15	EVIAN 1,5l negazirana	19.5.2004.	26.8.2004.	<0,5	
16	PROLOM VODA 1,5l negazirana	18.8.2004.	27.8.2004.	2,8±0,7	14,3±3,5
17	EKO VODA 1,5l negazirana	12.6.2004.	27.8.2004.	<0,41	
18	VODA VODOVOD		27.8.2004.	3,9±1,1	3,9±1,1
19	AQUA BIANCA		11.11.2004.	<0,16	
20	ACQUA PANNA SANPELLEGRINO 0,25l, gazirana		6.12.2004.	0,15±0,07	
21	S. PELLEGRINO prirodna mineralna voda 0,25l		6.12.2004.	<0,16	
22	EVIAN prirodna mineralna voda	4.12.2003.	6.12.2004.	<0,11	
23	AQUA VIVA 0,5l negazirana	3.11.2004.	6.12.2004.	3,7±0,8	1463±316
24	ROSA 0,5l negazirana	27.11.2004.	6.12.2004.	3,6±2,3	18,3±11,7
25	Voda vodovod Bački Petrovac		8.12.2004.	0,75±0,08	0,75±0,08
26	DUBOKA 0,33l gazirana	14.6.2004.	8.12.2004.	<0,11	
27	VODA VODA 0,5l negazirana	1.10.2004.	8.12.2004.	<0,11	
28	MIVELA 2l gazirana	29.9.2004.	17.12.2004.	<0,25	
29	PROLOM VODA 2l gazirana	13.11.2004.	17.12.2004.	0,15±0,07	71±33
30	AQUA VIVA 1,5l negazirana	9.12.2004.	20.12.2004.	<0,18	
31	VLASINSKA ROSA 0,5l negazirana	30.10.2004.	20.12.2004.	<0,33	
32	MINAQUA 0,5l gazirana	25.10.2004.	20.12.2004.	<0,11	
33	KNJAZ MILOŠ 1,5l gazirana	10.12.2004.	20.12.2004.	0,26±0,07	1,59±0,4
34	PROHOR 5l slabo gazirana	9.9.2004.	22.12.2004.	<0,15	
35	FAST WATER 1,5l gazirana	23.1.2004.	22.12.2004.	<0,11	
36	AQUA BELLA 0,33l gazirana	9.9.2004.	22.12.2004.	<0,1	
37	MINAQUA 2l gazirana	5.8.2004.	16.8.2004.	<0,1	
38	AQUA HEBA 1,5l gazirana	30.7.2004.	16.8.2004.	<0,1	
39	VODA VRNJCI 1,5l slabo gazirana	8.6.2004.	23.8.2004.	<0,1	
40	SKADARLIJSKA 1,5l gazirana	4.6.2004.	27.8.2004.	<0,1	

Iz dobijenih rezultata se može zaključiti da je većina flaširanih pijačih voda bezbedna za upotrebu sa stanovišta koncentracije radona u njima (ako bi se usvojile preporuke EPA o dozvoljenoj koncentraciji radona u vodama za piće od 11.1 Bq/l). Najveća koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  izmerena je u negaziranoj vodi »AQUA VIVA« punjenoj 3.11.2004. i iznosi  $1463 \pm 316$  Bq/l, što značajno prevaziđa preporučeni nivo. Pri ovome treba imati na umu da je korigovana aktivnost jednaka aktivnosti prisutnog radona u trenutku punjenja, a da se flaširana voda koristi bar nekoliko dana kasnije. To znači da se na svakih 3,825 dana koncentracija aktivnosti smanji dva puta. Treba napomenuti da su i u različitim punjenjima iste vode u nekim merenjima dobijene različite koncentracije aktivnosti radona, što je verovatno posledica različite istorije vode. U gaziranim flaširanim vodama koncentracija radona je zanemarljiva, što možda može da se objasni time da u toku dodavanja CO<sub>2</sub> radon napušta vodu. [4]

### 5.3. Merenje koncentracije radona u vazduhu

Koncentracija radona u vazduhu može se odrediti merenjem [14]:

- samog radona,
- radona zajedno sa svojim kratkoživećim potomcima,
- samih potomaka.

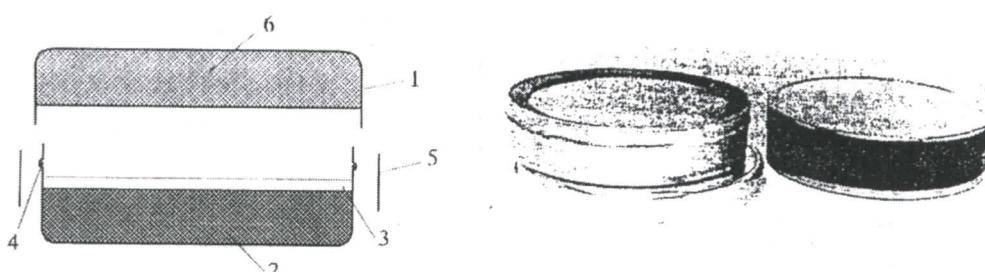
Meriti se može direktno (obično zajedno sa potomcima) pomoću scintilacionih ZnS celija. Trenutne vrednosti mogu se meriti tako što se prethodno evakuisana komora napuni ispitivanim vazduhom ili se komora isplahne tim vazduhom. Komore se takođe mogu koristiti za kontinuirano praćenje radona. Produkti raspada daju vreme odziva od oko 30 min. Brži odziv se može postići korišćenjem veće komore sa negativno nanelektrisanom šipkom u sredini komore koja privlači pozitivno nanelektrisane atome  $^{218}\text{Po}$  kada se formiraju. Ako je rastojanje šipke do sloja ZnS veće od dometa α čestica, produkti raspada praktično ne doprinose brzini brojanja, pa merena brzina brojanja potiče samo od radona. [14]

Obično je koncentracija radona toliko mala da ili radon ili njegovi produkti raspada moraju biti sakupljeni iz velike zapremine vazduha. Sakupljanje se može vršiti pumpanjem vazduha kroz filter papir ili elektrodepozicijom na metalnu površinu, što se manje koristi. [14]

Radon se u praktično neograničenim količinama može adsorbovati na aktivnom uglju na temperaturi suvog leda (-78,5 °C), a zatim se radi merenja izdvoji protokom gasa kroz ugrejani trap. Ali, ovaj metod zahteva mnogo vremena, pa se zato koristi samo za merenje vrlo malih koncentracija. [14]

Merenje radona pomoću adsorpcije na aktivnom uglju je pasivna, integraciona tehnika kao i trag detektori. Prednosti ove metode u odnosu na trag detektore su pre svega: kraće vreme integracije potrebno za dobijanje informacije, nema hemijskog razvijanja niti dugotrajnog očitavanja tragova, uzorci se mogu koristiti više puta posle odgovarajućeg temperaturnog tretmana i analiza podataka može biti automatizovana (primenom postojećih softverskih programa) tako da zahteva minimum ljudskog napora. [13]

Aktivni ugalj se nalazi u kanistru, slika 5.2., koji se prilikom merenja otvara i postavlja na željenu lokaciju. Radon iz vazduha difuzijom dospeva u kanister i adsorbuje se na aktivnom uglju, koji ima visok afinitet prema nekoliko gasova i para, uključujući i  $^{222}\text{Rn}$ . Radon adsorbovan u granulama aktivnog uglja raspada se na kratkoživeće potomke:  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$  i  $^{210}\text{Pb}$ . Radonovi potomci  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  emituju gama zračenje, što omogućava određivanje koncentracije radona gama spektrometrijski preko navedenih prelaza, jer se već nakon tri časa uspostavi ravnoteža radona i potomaka u uglju. [13]



Slika 5.2.Kanister sa aktivnim ugljem [13]

1. metalna kutija sa poklopcom
2. zrna aktivnog uglja
3. metalna rešetka
4. unutrašnji šireći prsten
5. vinil traka
6. mehani umetak (stiropor) pričvršćen za unutrašnju površinu poklopca

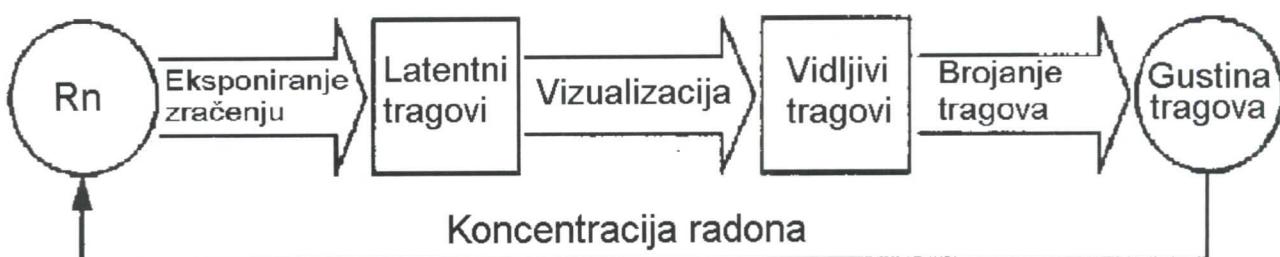
Na kraju izlaganja (ekspozicije), koje traje ne kraće od 48 časova, aktivni ugalj se prekriva stiroporom i kanistar zatvara za to predviđenim poklopcom i polivinil trakom.

Sačeka se najmanje tri sata da se uspostavi ravnoteža između radona i potomaka u uglju, pa se gama-spektrometrijskom metodom, pomoću scintilacionog ili poluprovodničkog detektora, analizira gama zračenje koje emituju radonovi potomci. [13]

Aktivni ugalj se može ponovo upotrebiti nakon grejanja na temperaturi od 100 °C do 120 °C tokom nekoliko sati da bi se radon potpuno odstranio. [14]

Najznačajnija dugovremenska (integraciona) pasivna metoda za merenje koncentracije radona u vazduhu, su trag detektori u čvrstom stanju (SSNTD-Solid State Nuclear Track Detectors). Princip rada ovih detektora je prikazan na slici 5.3 , gde se uočavaju sledeće faze [13]:

1. Detektor se eksponira zračenju koje potiče od radona
2. Usled dejstva tog zračenja na detektor dobijamo latentne trage
3. Hemijskim nagrizanjem ti tragovi se fiksiraju i postaju vidljivi
4. Brojanjem vidljivih tragova određujemo njihovu gustinu i nazad kao povratnu informaciju dobijamo koncentraciju aktivnosti radona

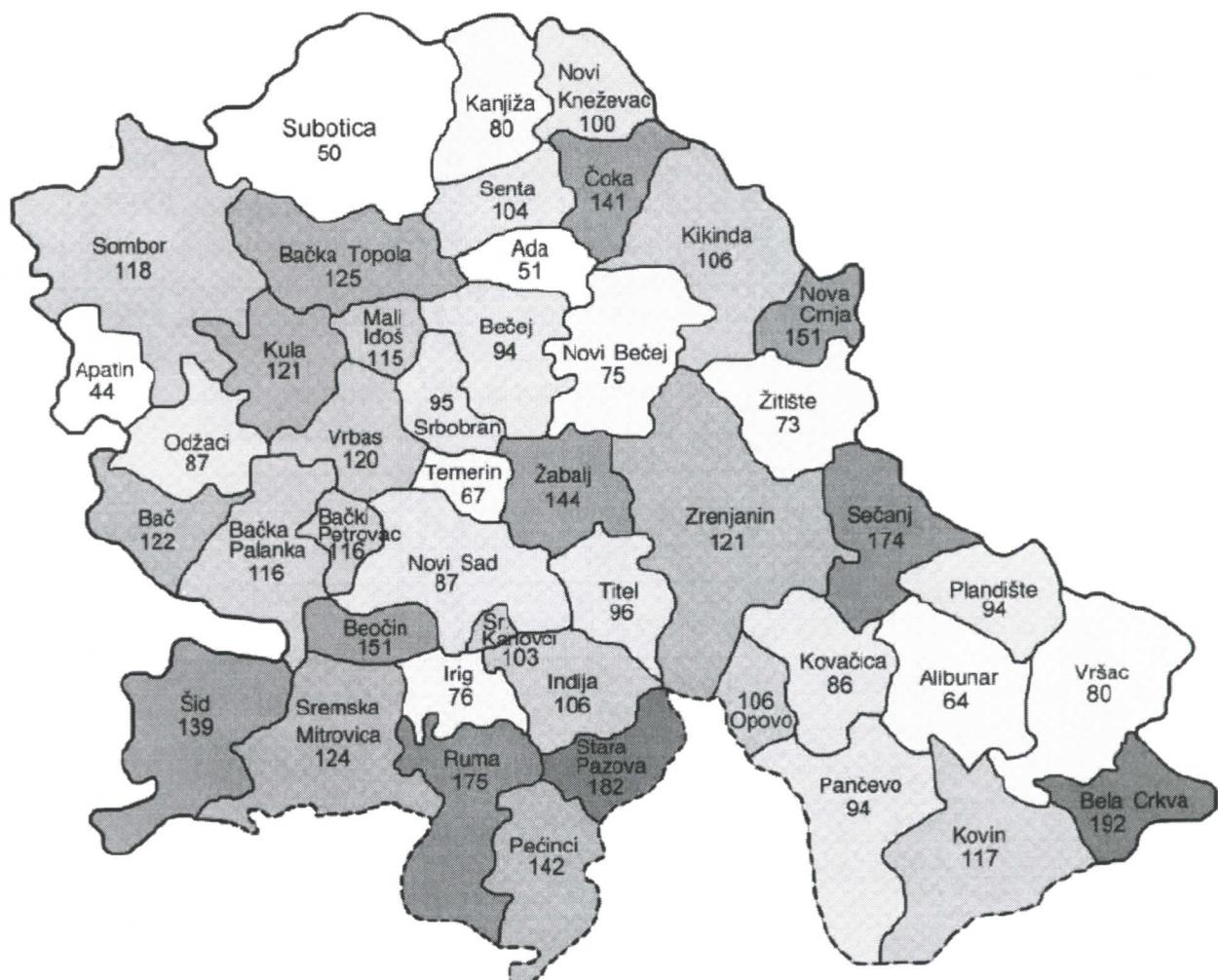


Slika 5.3. Princip rada trag detektori u čvrstom stanju [13]

Svaka alfa čestica, koja prođe kroz radnu zapreminu detektora ostavlja trag oštećenja , usled jonizacije, što posle hemijske obrade postaje uvećano do veličine uskog kanala koji je vidljiv pod mikroskopom. Prednost ove metode je što je selektivna za alfa čestice i nije osetljiva na spoljašnje uslove kao što su: vlažnost vazduha, niske temperature, zagrevanje i svetlost. Ovi detektori mogu da se koriste na dva načina: kao "nepokriveni!" detektori pri čemu tragovi nastaju od alfa čestica emitovanih od radona i potomaka koji se nalaze u atmosferi u blizini detektora; i kao detektori sa posebnom geometrijom i konstrukcijom koja obezbeđuje da potomci radona ne prodiru u komoru. Trag detektori u čvrstom stanju se izrađuju od plastičnih materijala, malih su dimenzija (1 cm x 1 cm), od 100 do 500 µm debljine, jednostavnii su za upotrebu (ne zahtevaju dodatnu elektroniku), jeftini su i jednostavno se obrađuju uz upotrebu termostatiranog kupatila, hemijskih reagenasa i optičkog mikroskopa. Zbog toga su plastični trag detektori

često korišćena integralna tehnika kojom dobijamo srednju vrednost koncentracije radona u toku dužeg vremenskog perioda (90 dana i duže). [13]

U opština u Vojvodini izvršena su merenja koncentracije radona pomoću detektora traga CR39 u prizemnim prostorijama, u dnevnoj ili spavaćoj sobi, na visini od jednog metra u odnosu na pod, daleko od vode ili izvora grejanja. [11] Vreme eksponiranja detektora je 90 dana, u periodu decembar 2002 – mart 2003, čime su izbegnute dnevne oscilacije koncentracije aktivnosti radona na tim lokacijama. Na slici 5.3 prikazana je radonska mapa Vojvodine sa ispisanim koncentracijama u  $\text{Bq}/\text{m}^3$  preuzeti iz [11] prema merenjima izvršenim u Laboratoriji za niskofonsku gama-spektrometriju Departmana za fiziku u Novom Sadu, a u tabeli 5.3 dati su rezultati preuzeti iz [10] za merenja izvršena u Laboratoriji za niskofonsku gama-spektrometriju Departmana za fiziku u Novom Sadu. Tabela 5.3 sadrži srednje vrednosti koncentracije aktivnosti radona ( $\text{Asr}$ ) sa standardnom devijacijom ( $\sigma$ ), broj merenja za svaku opštinu, kao i minimalna i maksimalna koncentracija radona za



sl. 5.3. Radonska mapa Vojvodine [11]

Tabela 5.3. Koncentracija radona u vazduhu [10]

R. br.	Opština	A <sub>sr</sub> [Bq/m <sup>3</sup> ]	σ [Bq/m <sup>3</sup> ]	n	Amin [Bq/m <sup>3</sup> ]	Amax [Bq/m <sup>3</sup> ]
1.	Novi Sad	133	115	86	10	445
2.	Pančevo	119	103	50	26	668
3.	Sombor	157	129	48	37	726
4.	Subotica	71	72	49	11	449
5.	Zrenjanin	160	140	53	24	893
6.	Sremska Mitrovica	164	118	40	19	463
7.	Vršac	98	68	33	15	385
8.	Bačka Palanka	147	91	32	17	378
9.	Indija	173	183	29	18	792
10.	Kikinda	138	99	32	20	306
11.	Ruma	218	140	28	26	566
12.	Stara Pazova	239	182	29	16	707
13.	Kula	152	111	24	47	437
14.	Vrbas	155	100	27	15	377
15.	Alibunar	104	136	22	15	627
16.	Bačka Topola	139	71	18	54	319
17.	Bećej	116	74	30	24	309
18.	Kanjiža	99	70	20	30	286
19.	Kovin	173	154	20	28	622
20.	Nova Crnja	168	78	16	49	364
21.	Novi Bećej	102	93	10	31	323
22.	Odžaci	108	72	24	30	305
23.	Senta	124	68	20	17	303
24.	Sečanj	203	105	21	30	415
25.	Šid	192	144	20	16	438
26.	Titel	116	72	13	21	281
27.	Žabalj	181	172	10	53	658
28.	Žitište	100	90	10	20	323
29.	Ada	103	119	10	2	402
30.	Apatin	67	73	3	19	151
31.	Bač	152	99	9	23	372
32.	Bački Petrovac	160	118	15	28	380
33.	Bela Crkva	258	205	9	58	408
34.	Beočin	200	157	9	45	454
35.	Čoka	154	65	10	73	264
36.	Irig	114	147	10	33	521
37.	Kovačica	105	66	5	26	198
38.	Mali Iđoš	166	188	10	41	234
39.	Novi Kneževac	117	60	9	26	202
40.	Opovo	125	87	8	57	317
41.	Pećinci	163	84	11	46	338
42.	Plandište	111	65	7	43	212
43.	Srbobran	150	91	10	43	303
44.	Sremski Karlovci	149	136	8	30	453
45.	Temerin	94	98	11	14	372

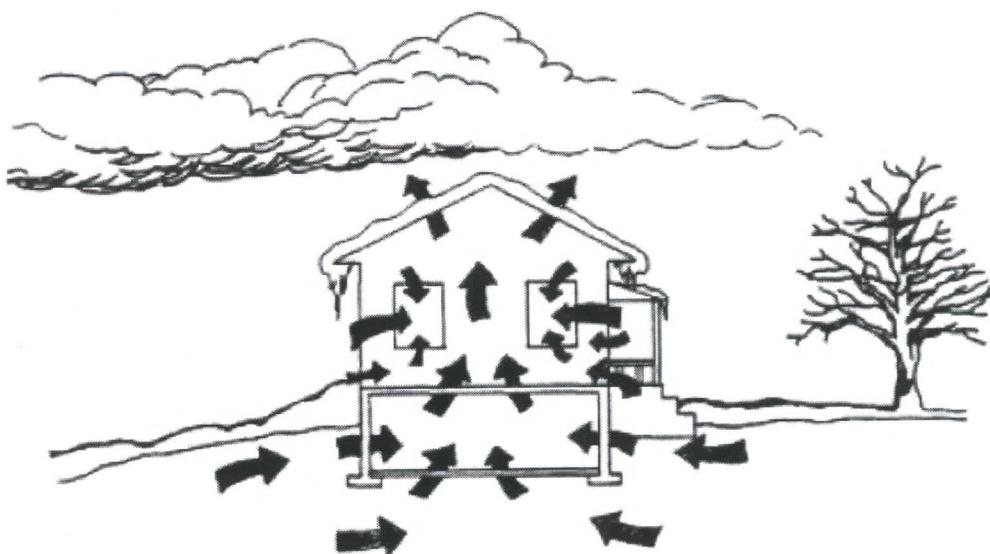
Merenje koncentracije radona izvršena su u Laboratoriji za niskofonsku gama-spektrometriju Departmana za fiziku u Novom Sadu na raznim spratovima u zgradama u Novom Sadu, 2000. godine u leto i u zimu. Izmerene vrednosti preuzete iz [8] date su u tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Koncentracija radona u zgradama na raznim spratovima [8]

R. br.	Sprat - nivo	Koncentracija leti [Bq/m <sup>3</sup> ]	Koncentracija zimi [Bq/m <sup>3</sup> ]
1.	Prizemlje	8 ± 2	43 ± 4
2.	5. sprat	5 ± 2	12 ± 3
3.	3. sprat	23 ± 3	19 ± 3
4.	Prizemlje	14 ± 2	32 ± 4
5.	7. sprat	24 ± 3	34 ± 4
6.	Prizemlje	< 2	38 ± 4
7.	Prizemlje	84 ± 4	391 ± 8
8.	1. sprat	19 ± 3	32 ± 4
9.	1. sprat	< 2	26 ± 3
10.	visoki parter	21 ± 3	25 ± 4
11.	podrum	6 ± 2	25 ± 4
12.	1. sprat	14 ± 2	23 ± 3
13.	Prizemlje	31 ± 3	13 ± 3
14.	Prizemlje	41 ± 3	36 ± 4
15.	Prizemlje	4 ± 2	14 ± 3
16.	iznad podruma	10 ± 2	19 ± 4
17.	Prizemlje	77 ± 4	114 ± 5
18.	3. sprat	5.3 ± 1.7	8 ± 3
19.	Prizemlje	14 ± 2	27 ± 4
20.	Prizemlje	7 ± 2	13 ± 4

## 6. Zaštita od uticaja radona

Zbog veoma štetnog uticaja radona postavlja se kao važan zadatak preventivno postupanje radi zaštite. Najveći uticaj na stanovništvo radon ima u zgradama (sl. 6.1). Tim pre što u današnjim uslovima mnoge ljudske aktivnosti: smanjenje prirodne ventilacije u cilju uštade toplotne energije, korišćenje prefabrikovanih otpadnih materijala u građevinske svrhe i opšta tendencija da čovek sve veći deo svog vremena provodi u zatvorenim prostorijama, dovode do povećanog ozračivanja čoveka radonom i njegovim kratkoživećim potomcima. Dozvoljeni nivo radona u zgradama je  $400 \text{ Bq/m}^3$  za stare zgrade, a  $200 \text{ Bq/m}^3$  za nove zgrade. [2]

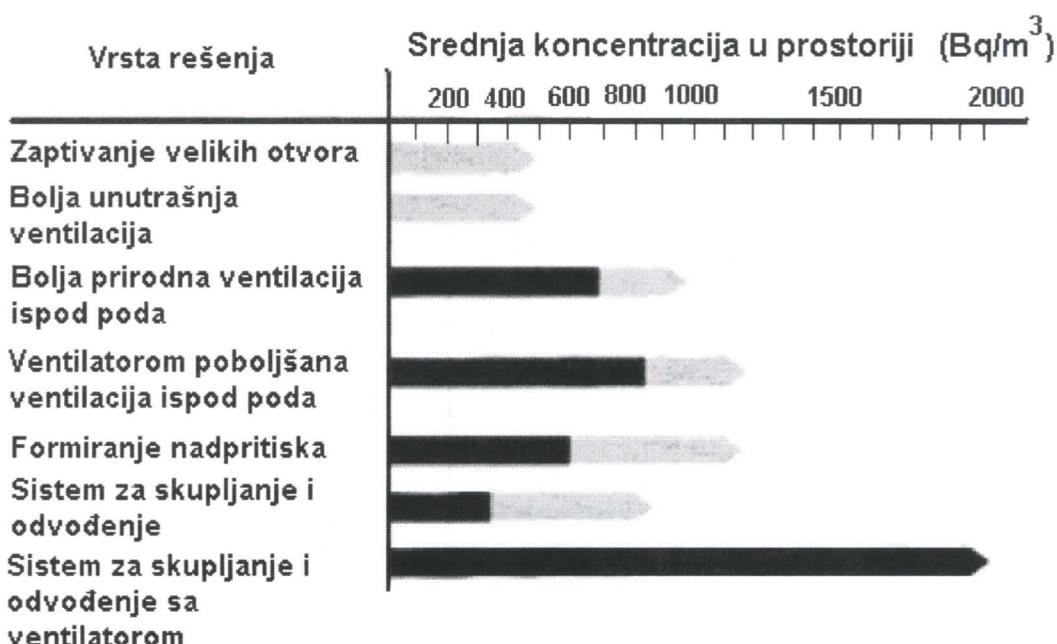


sl. 6.1. Prodiranje radona u zgradu [2]

Preventivni postupci zaštite su postupci smanjenja koncentracije na prihvatljiv nivo, i mogu biti:

- sistem za skupljanje i odvođenje radona,
- poboljšana ventilacija ispod poda,
- formiranje nadpritiska u zgradi,
- zatvaranje otvora i pukotina,
- poboljšana ventilacija u zgradi. [5]

Pre izvođenja radova potrebno je merenjem utvrditi koncentraciju radona, a nakon izvršenih radova sačekati 3 meseca i merenjem proveriti koncentraciju. Na slici 6.2 prikazana je koji metod se primenjuje u zavisnosti od koncentracije. Crne površine označavaju veliku verovatnoću uspeha, a sive površine da će se postići izvestan uspeh.[6]



sl. 6.2. Postupci zaštite u zavisnosti od koncentracije [6]

Ako je potrebno izvršiti smanjenje velike koncentracije radona, pri čemu zgrada ima betonske ploče, postupak skupljanja i odvođenja radona smanjuje koncentraciju i do 90%.

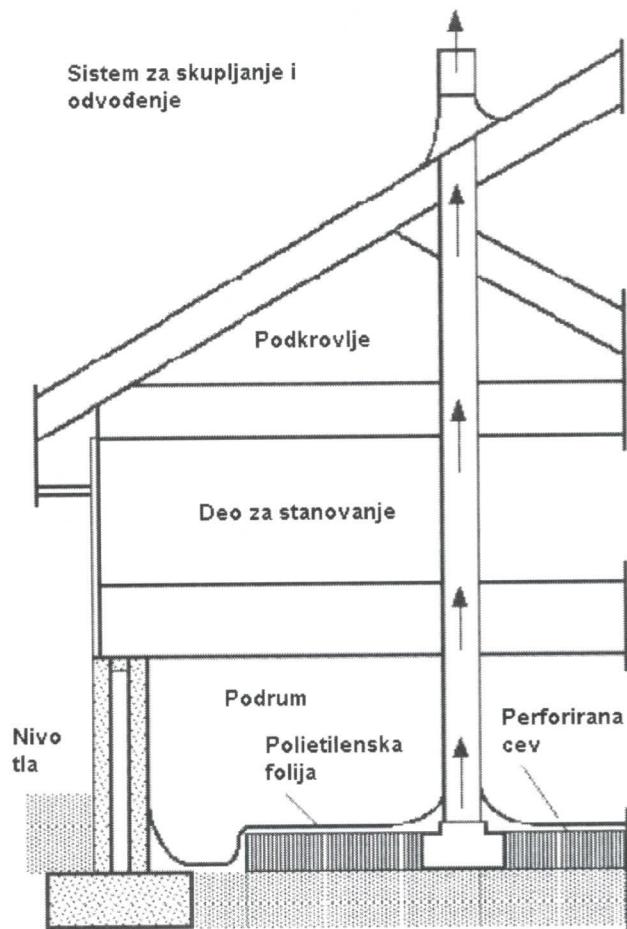
Odvođenje radona iz zgrada postiže se primenom sledećih postupaka [1]:

- izrada ploče kao membrane za deo sa smanjenim pritiskom (svrha ovog sistema je formiranje vakuum oblasti ispod temelja, tu se skuplja radon i cevima odvodi napolje na sigurno mesto)
- korišćenje mehaničkih prepreka za ulazak gasova (plastične folije i zaptivanje temelja i pukotina zaustavlja ulazak radona)
- ugradnja sistema distribucije vazduha tako da se zagađeni vazduh ne koristi.

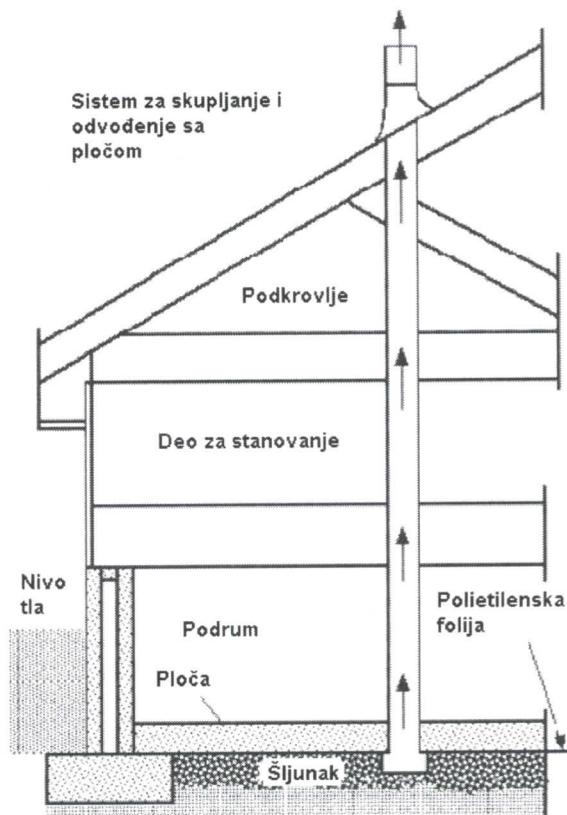
Zatvaranje i zaptivanje velikih pukotina i otvora važno je kada se gradi zgrada, kako u donjim delovim zgrade da bi se smanjio ulazak radona, tako i u gornjim delovima zgrade da bi se smanjio uticaj usisavanja. Merenja pokazuju da je zatvaranje svih otvora u podu nepraktično i neefikasno. Mali otvori i pukotine su suviše mali da bi se mogli uočiti i efikasno zaptivati. Čak i kada bi se svi otvori zatvorili samo sleganje zgrade će stvoriti nove pukotine. Na osnovu toga zaptivanje velikih pukotina ili otvora je važna komponenta smanjenja ulaska radona, ali ne i jedini postupak koji treba uraditi. [1]

Odvođenje zagađenih gasova van zgrade vrši se cevima. Pri čemu se odvodna cev može voditi po spoljašnjem zidu zgrade ili kroz otvore unutar zgrade. U većini porodičnih zgrada dovoljna je jedna odvodna cev. Ako je veća kuća ili je pod propustljiv može biti potrebno postaviti više odvodnih cevi. Pri tome postoje dva sistema: [1]

- pasivni sistem podpritiska (sl. 6.3 i 6.4)

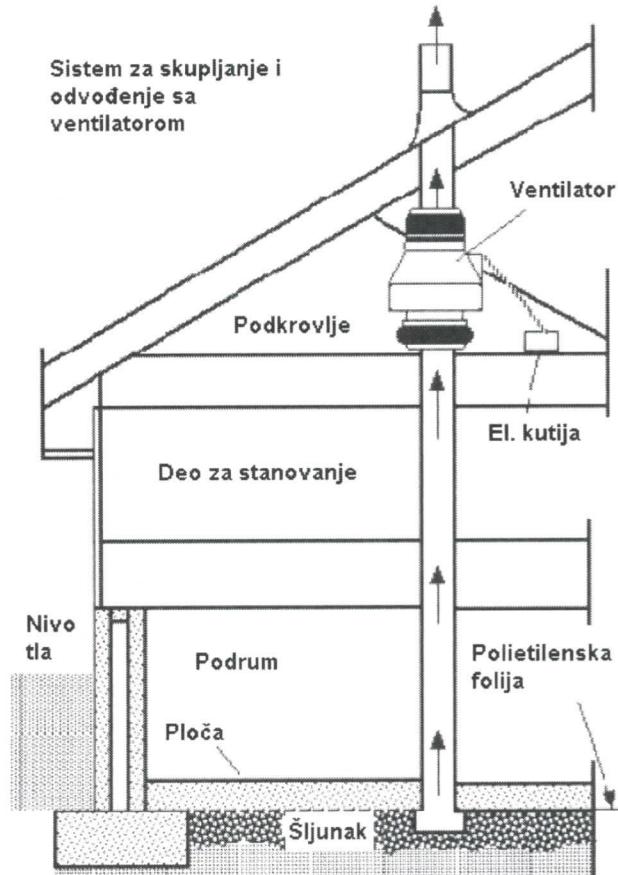


sl. 6.3. Pasivni sistem podpritiska sa perforiranom cevi [1]

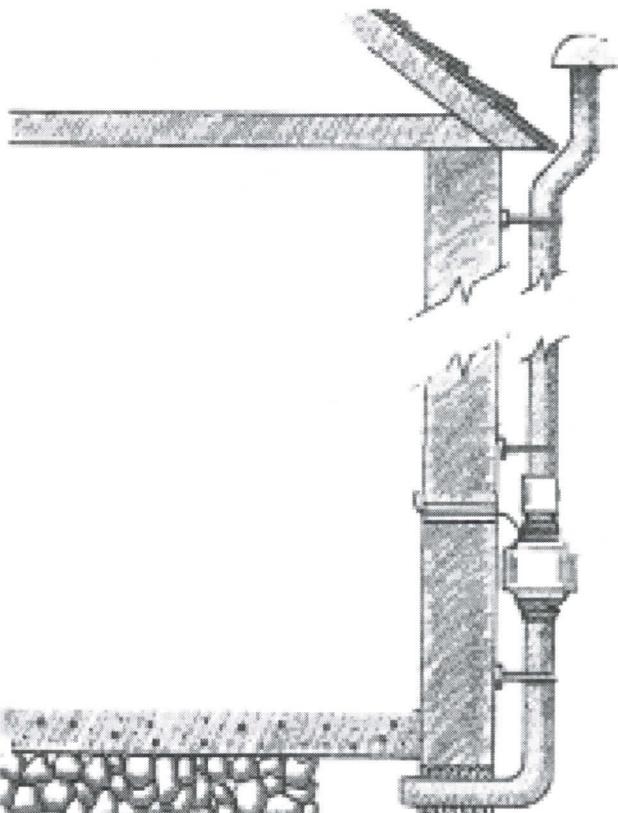


sl. 6.4. Pasivni sitem podpritiska sa šljunkom [1]

- aktivni sistem podpritiska. (sl. 6.5 i 6.6)



sl. 6.5. Aktivni sistem podpritiska sa unutrašnjim postavljanjem odvodne cevi [1]

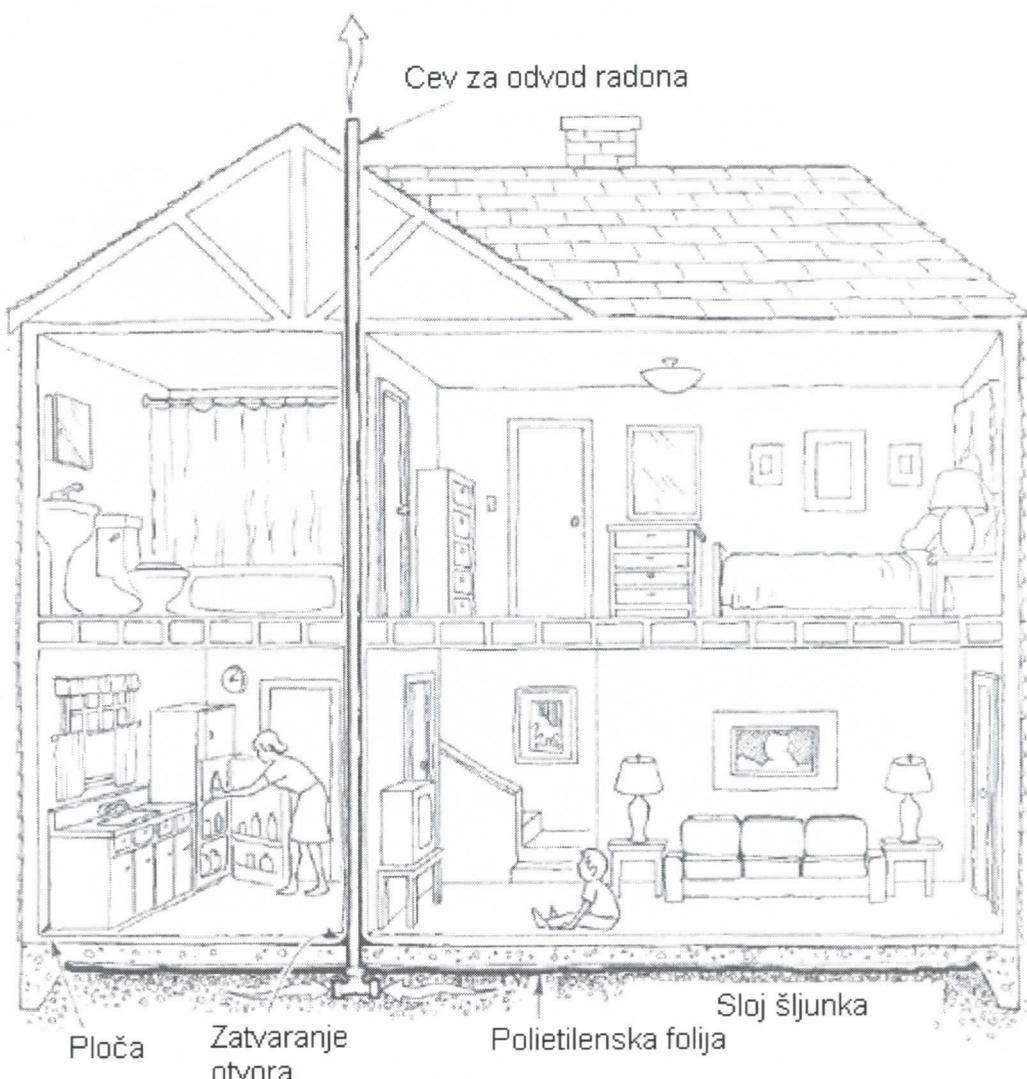


sl. 6.6. Aktivni sistem podpritiska sa spoljašnjim postavljanjem odvodne cevi [5]

Kada se cev vodi kroz topao prostor zagrevanje u cevi formira efekat dimnjaka i prirodno kretanje gasa u cevi. Pošto se ne koristi dodatni pribor za formiranje podpritiska, ovaj postupak se naziva pasivni sistem podpritiska. Važno je obezbediti nivo radona ispod 4 pCi/L. Ako se prethodnim postupkom ne može postići zadovoljavajući nivo radona ugrađuje se ventilator u cev za prinudnu cirkulaciju gasova. Taj postupak se naziva aktivni sistem podpritiska. Položaj kraja cevi za izlazak gasova određen je zahtevom da se spreči ponovni ulazak gasova u zgradu i iznosi: [5]

- najmanje 30cm iznad krova,
- najmanje 3m od prozora ili bilo kog otvora na zgradi,
- najmanje 3m od prozora ili otvora na susednoj zgradi.

Ako se koristi prostor dimnjaka od peći za postavljanje cevi za odvod gasova neophodno je da otvor cevi bude barem 3m udaljen od otvora dimnjaka. Pri čemu radi smanjenja trenja cev treba da ide pod nagibom najmanje  $45^\circ$  [15].

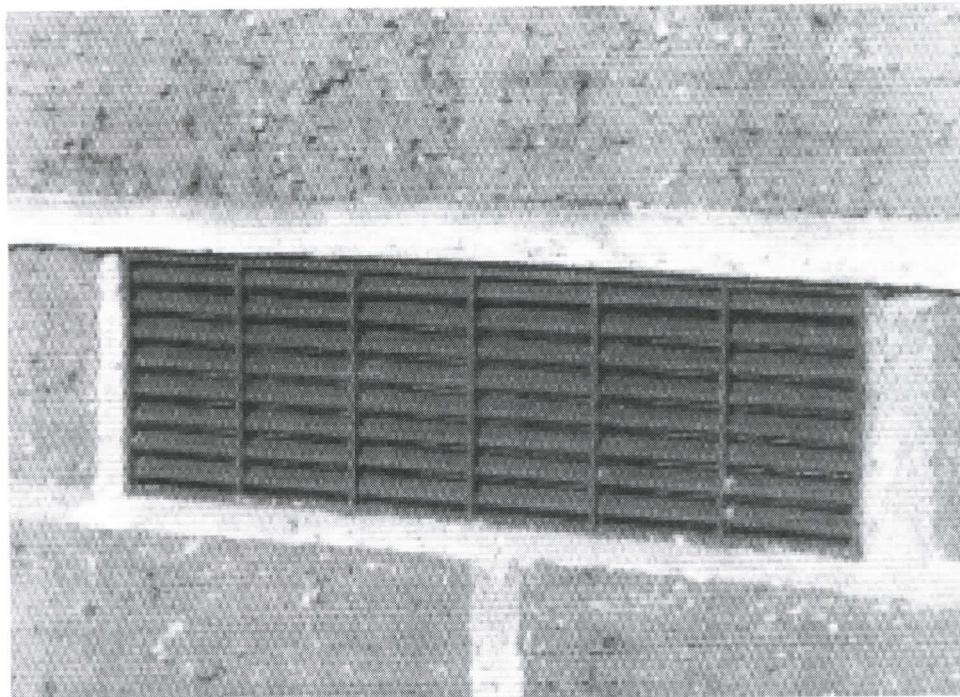


sl. 6.7. Opšti slučaj rešavanja odvođenja radona [1]

Na slici 6.7 prikazano je kako se rešava odvođenje radona. Tu su primjenjeni sledeći postupci [1]:

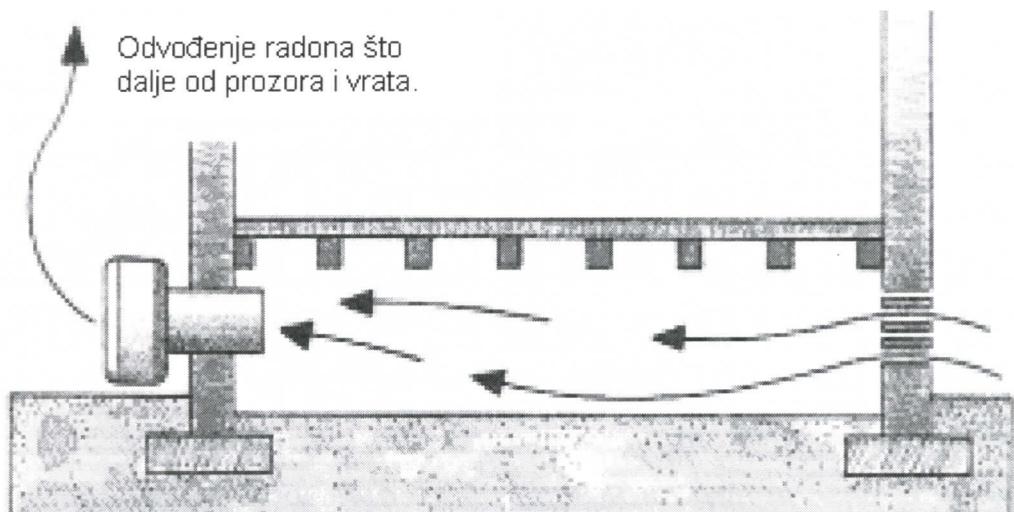
- **Gasno propustljiv sloj** (Sloj obično debeo 10 cm od čistog, grubog šljunka se postavlja ispod ploče da bi se dozvolilo gasu da slobodno ulazi u zgradu. Druge mogućnosti su da se ugradi cev sa otvorima ili skupljač gasa.)
- **Plastična folija** (Polietilenska folija se postavlja iznad gasno propustljivog sloja da bi se sprečio ulazak gasa u zgradu. Folija takođe štiti beton og začepljivanja gasno propustljivog sloja kada je ploča loša.)
- **Ventilaciona cev** (PVC cev prečnika 8 do 10cm služi za bezbedno odstranjuvanje gasova iz gasno propustljivog sloja kroz zgradu do krova. Za pasivne sisteme upotrebljavaju se cevi većeg prečnika.)
- **Zaptivanje i zatvaranje pukotina** (Svi otvori na betonskoj donjoj ploči se zatvaraju da bi se sprečio ulazak gasa u zgradu. Takođe zaptivanje i zatvaranje pukotina u ostavlim spoljnim delovim zgrade smanjuje efekat usisavanja u zgradu.) [1]

Povećanje cirkulacije vazduha ispod podova, kada zgrada ima slobodan prostor ispod prizemlja, dovodi do razblažavanja radona. To se postiže ugradnjom rešetki u zidu (sl. 6.8), i koristi se u kućama sa relativno malom koncentracijom radona. [5]



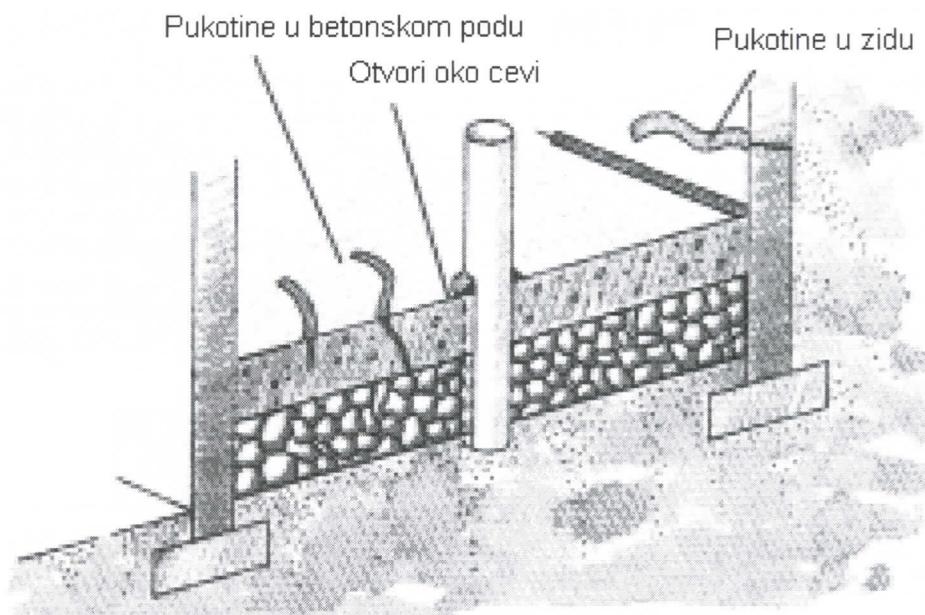
sl. 6.8. Rešetka za povećanu cirkulaciju vazduha [5]

Zbog višeg nivoana kome se postavlja rešetka poželjno je ugraditi ventilator za izvlačenje vazduha na suprotni zid (sl.6.9) [5]



sl. 6.9. Izvlačenje vazduha ventilatorom [5]

U slučaju dobro zaptivenih zgrada za ulazak vazduha mogu se koristiti ventilatori za uduvavanje spoljnog vazduha i formirnje nadpritiska. Time se sprečava ulazak radona. [5]



sl. 6.10. Zaptivanje otvora i pukotina [5]

Zaptivanje otvora i pukotina (sl. 6.10) primenjuje se u zgradama sa relativno povećanom koncentracijom radona. Postupak je nemoguće u potpunosti ostvariti jer se uvek prave nove sitne pukotine sleganjem zgrade. [5]

Poboljšanje ventilacije zgrade najmanje je efikasan postupak za smanjenje koncentracije jer se povećavnjema promaje u prostorijama postiže odvođenje radona van zgrade. Povećana promaja može biti pasivna nastala otvaranjem dodatnih otvora na prozorima ili aktivna ugradnjom ventilatora za izbacivanje vazduha. [5]

## 7. Zaključak

U radu je analiziran problem radona kao kontaminanta čovekove okoline. U ovom kontekstu pod nazivom radon razmatra se izotop radona 222 jer ima značajno vreme poluraspada i pri tom procesu dolazi sa svojim izotopima u dodiru sa prirodnim aerosolima do formiranja radioaktivnih aerosola koji izazivaju rak pluća. Smatra se da 40 % slučajeva ovog oboljenja nastaje pod uticajem radona. Zato je radon svrstan u grupu A kancerogena zajedno sa arsenom, azbestom i benzolom. Za teritoriju Vojvodine u Laboratoriji za niskofonsku gama-spektrometriju Departmana za fiziku u Novom Sadu urađena je mapa koncentracije radona [10] koja je od prvorazrednog značaja jer prikazuje stvarno stanje zagađenosti čovekove okoline. Tako da skoro 20 % merenja prelazi graničnu vrednost od  $200 \text{ Bq/m}^3$ , 4 % merenja pokazuje izuzetno povećanu koncentraciju radona, dok je 46 % merenja ispod  $100 \text{ Bq/m}^3$ .

Koncentracija radona je najveća u rudnicima i podrumskim delovima zgrada gde ulazi pre svega kroz otvore i pukotine. Poseban problem predstavlja nemogućnost čoveka da oseti radon, pa se u radu prikazani postupci njegovog merenja u zemljištu, vodi i vazduhu.

Na osnovu rezultata merenja koncentracije u zgradama preduzima se odgovarajući opisani postupak odstranjivanja radona. Pri tome najuspešniji je postupak skupljanja i odvođenja. Po dovršenim radovima za poboljšanje stanja u zgradi treba sačekati tri meseca i ponovo izvršiti merenje da bi se odredila uspešnost izvršenih radova.

## Prilog: Definicije

- Jedinice za radioaktivnost koja se emituje su kiri (Ci) i bekerel (Bq). Jedan kiri je jednak 37 milijardi radioaktivnih raspada tokom jedne sekunde. Jedan bekerel je SI jedinica i iznosi 1 raspad u sekundi. Odnos bekerela i kirija iznosi  $1 \text{ Ci} = 37 * 10^9 \text{ Bq}$ . Pri merenju radioaktivnosti radona koristi se pCi.
- Koncentracija je radioaktivnost u jedinici zapremine. Izražava se u pCi/L ili Bq/m<sup>3</sup>.
- Jačina ekshalacije, odnosno fluks, je radioaktivnost koja u jedinici vremena prođe kroz jediničnu površinu. Jedinica ekshalacije je Bq/(m<sup>2</sup>s).
- Korekcioni faktor raspadanja, DCF – Decay Correction Factor, jeste koeficijent kojim se množe dobijene vrednosti radioaktivnosti i za radon iznosi  $2^{(T/132,4)}$ , gde je T vreme u časovima proteklo od trenutka uzimanja uzorka do trenutka merenja.

## Literatura

- [1] „Building Radon Out, A Step-by-Step Guide On How To Build Radon-Resistant Homes”, United States Environmental Protection Agency, EPA/402-K-01-002, 2001
- [2] „How Does Radon Get Into Your Home”, Junior High School, New Jersey
- [3] „III. Background Information on Radon”, Junior High School, New Jersey
- [4] „Ispitivanje koncentracije radona u flaširanim pijačim vodama”
- [5] „Radon, a Guide to Reducing Levels in Your Home”, Environment and Heritage Service, 2002
- [6] „Radon”, Fact sheet 39, Environment and Heritage Service, 2000
- [7] „Reducing Radon in Structures: A Manual”, USEPA Office of Radiation, 1988/89
- [8] Bikit I., M. Vesović, M. Krmar, J. Slivka, Lj. Čonkić, S. Ćurčić, N. Žikić-Todorović: „Radon Measurement in Novi Sad”
- [9] Bikit I., N. Todorović, E. Varga, D. Mrđa, S. Forkapić, Z. Jovanović: „Ispitivanje emanacije radaon iz građevinskog zemljišta”, Departman za fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, 2000
- [10] Ćurčić S., I. Bikit, Lj. Čonkić, M. Vesović, J. Slivka, E. Varga, N. Žikić-Todorović, D. Mrđa: „Prva radonska mapa vojvodine”
- [11] Forkapic. S., I. Bikit, J. Slivka, Lj. Čonkic, M. Vesovic, N. Todorovic, E. Varga, D. Mrđa, E. Hulber: „Indoor Radon in Rural Dwellings of the South-Panonian Region”, Radiation Protection Dosimetry, 2006
- [12] Krewski D., J. H. Lubin, J. M. Zielinski, M. Alavanja, V. S. Catalan, R. W. Field, J. B. Klotz, E.G. LeTourneau, C. F. Lynch, J. I. Lyon, D. P. Sandler, J. B. Schoenberg, D. J. Steck, J. A. Stolwijk, C. Weinberg, H. B. Wilcox: „Residential Radon and Risk of Lung Cancer, A Combined Analysis of 7 North American Case-Control Studies”, Epidemiology, Volume 16, Number 2, March 2005
- [13] Materijal preuzet od doc dr Nataše Todorović
- [14] Slivka J., I. Bikit, M. Vesovic, Lj. Čonkić: „Gama spektrometrija, specijalne metode i primene”, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet Novi Sad, Novi Sad, 2000
- [15] [www.epa.gov](http://www.epa.gov)
- [16] [www.webelements.com](http://www.webelements.com)
- [17] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

## Kratka biografija



Gordana Majević, rođena 1. aprila 1954. godine u Nišu, osnovnu školu je završila u Žitkovcu, gimnaziju u Aleksincu, a Višu pedagošku školu u Beogradu na grupi fizika-hemije. Radi u OŠ „Ujedinjene nacije” u Beogradu kao nastavnik fizike. Udata i ima četvoro dece.

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
 PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
 KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

*Redni broj:*

**RBR**

*Identifikacioni broj:*

**IBR**

*Tip dokumentacije:*

**TD** Monografska dokumentacija

*Tip zapisa:*

**TZ** Tekstualni štampani materijal

*Vrsta rada:*

**VR** Diplomski rad

*Autor:*

**AU** Gordana Majević

*Mentor:*

**MN** docent dr Nataša Todorović.

*Naslov rada:*

**NR** Radon, glavni radioaktivni kontaminant čovekove okoline

*Jezik publikacije:*

**JP** srpski

*Jezik izvoda:*

**JI** srpski/engleski

*Zemlja publikovanja:*

**ZP** Srbija

*Uže geografsko područje:*

**UGP** Vojvodina

*Godina:*

**GO** 2007

*Izdavač:*

**IZ** Autorski reprint

*Mesto i adresa:*

**MA** Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4,  
 Novi Sad

*Fizički opis rada:*

**FO** 11/40/-/24/-/-

*Naučna oblast:*

**NO** fizika

*Naučna disciplina:*

**ND** Zaštita čovekove okoline

*Predmetna odrednica/ključne reči:*

**PO**

**UDK** Radon, radioaktivnost, zdravlje, zaštita, čovekova okolina

*Čuva se:*

**ČU** Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

*Važna napomena:*

**VN** nema

*Izvod:*

**IZ** Prikazane su osobine radona, uticaj na čoveka kao i načini merenja i zaštite. Dati su rezultati merenja koncentracija radona u zemljištu, vodi i vazduhu.

*Datum prihvatanja teme od NN veća:*

**DP** 2007.

*Datum odbrane:*

**DO** 20. 9. 2007.

*Članovi komisije:*

**KO** *Predsednik:* prof dr Miroslav Vesković

*član:* doc dr Sonja Skuban

*član:* doc dr Nataša Todorović

UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS  
KEY WORDS DOCUMENTATION

*Accession number:*

**ANO**

*Identification number:*

**INO**

*Document type:*

**DT** Monograph publication

*Type of record:*

**TR** Textual printed material

*Content code:*

**CC** Final paper

*Author:*

**AU** Gordana Majević

*Mentor/comentor:*

**MN** asistent professor PhD Nataša Todorović

*Title:*

**TI** Radon, the Main Radioactiv Environment Contaminant

*Language of text:*

**LT** Serbian

*Language of abstract:*

**LA** English

*Country of publication:*

**CP** Serbia

*Locality of publication:*

**LP** Vojvodina

*Publication year:*

**PY** 2007

*Publisher:*

**PU** Author's reprint

*Publication place:*

**PP** Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića  
4, Novi Sad

*Physical description:*

**PD** 11/40/-/24/-/-/

*Scientific field:*

**SF** Physics

*Scientific discipline:*

**SD** Environment protection

*Subject/Key words:*

**SKW**

**UC** Radon, radioactivity, helth, protection, environment

*Holding data:*

**HD** Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

*Note:*

**N** none

*Abstract:*

**AB** Paper describe radon properties, human influence, and also procedures for measurements and protection. Measurements results of radon concentration in ground, water and air are shown.

*Accepted by the Scientific Board:*

**ASB** 2007.

*Defended on:*

**DE** 20. 9. 2007.

*Thesis defend board:*

**DB** *President:* professor PhD Miroslav Vesković  
*Member:* asistent professor PhD Sonja Skuban  
*Member:* asistent professor PhD Nataša Todorović

