



# ЗБОРНИК РАДОВА



## XXX СИМПОЗИЈУМ ДРУШТВА ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ

2. - 4. октобар 2019. године  
Хотел “Дивчибаре”, Дивчибаре, Србија

**ДРУШТВО ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА  
СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ**



# **ЗБОРНИК РАДОВА**

**XXX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ  
Дивчибаре  
2- 4. октобар 2019. године**

**Београд  
2019. године**

**RADIATION PROTECTION SOCIETY OF  
SERBIA AND MONTENEGRO**



# PROCEEDINGS

**XXX SYMPOSIUM RPSSM  
Divčibare  
2<sup>nd</sup> - 4<sup>th</sup> October 2019**

**Belgrade  
2019**

ЗБОРНИК РАДОВА

XXX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ  
2-4.10.2019.

Издавачи:

Институт за нуклеарне науке „Винча“  
Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

За извршног издавача:

Проф. др Снежана Пајовић, научни саветник  
в.д. директора Института за нуклеарне науке Винча

Уредници:

Др Михајло Јовић  
Др Гордана Пантелић

**ISBN 978-86-7306-154-2**

©Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Техничка обрада:

Михајло Јовић, Гордана Пантелић

Електронско издање:

Институт за нуклеарне науке ”Винча”, Мике Петровића Аласа 12-14, 11351  
Винча, Београд, Србија

Тираж:

150 примерака

Година издања:

Септембар 2019.

## IZVORI NESIGURNOSTI PRI KLASIFIKACIJI RADONSKIH ZONA

Igor ČELIKOVIĆ, Gordana PANTELIĆ, Miloš ŽIVANOVIĆ,  
Ivana VUKANAC i Jelena KRNETA NIKOLIĆ

*Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija,  
icelikovic@vinca.rs, pantelic@vinca.rs, milosz@vinca.rs, vukanac@vinca.rs,  
jnikolic@vinca.rs*

### SADRŽAJ

*Evropski savet je doneo direktivu 2013/59/EURATOM (EU-BSS) po kojoj se nalaže državama članicama EU da imaju ustanovljen radonski akcioni plan, što između ostalog podrazumeva i identifikaciju radonskih prioriternih zona (Radon priority areas), odnosno zona sa različitim nivoom „prioriteta“. S obzirom da je neizvodljivo vršiti merenja radona u svakoj kući, potrebno je dizajnirati prospekciju radona kako bi se dobila reprezentativna procena srednje godišnje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama na određenoj teritoriji. Nije bitan samo reprezentativan izbor kuća, nego je i nesigurnost merenja i procene srednje godišnje koncentracije potrebno držati što je niže moguće. Nesigurnostn klasifikacije zone određenog prioriteta u nekoj oblasti je stoga kombinacija nesigurnosti pojedinačnog merenja i ekstrapolacije tog merenja na celu oblast. U ovom radu ćemo pokušati da nabrojimo i procenimo izvore nesigurnosti pri klasifikaciji i damo preporuke u cilju smanjenja stepena nesigurnosti. Ovaj rad je urađen u sklopu MetroRadon projekta.*

### 1. Uvod

Evropski savet je 2013 godine doneo direktivu 2013/59/EUROATOM vezanu za zaštitu od zračenja (European Union Basic Safety Standard: EU-BSS) [1]. U okviru ove direktive, 3 člana se odnose na radon: član 45 – radon na radnim mestima, član 74 – radon u zatvorenim prostorijama i član 103 – akcioni plan za radon. Takođe, Aneks XVIII pobliže popisuje šta sve treba da se uzme u obzir pri pravljenju akcionog plana. Član 103 ove Direktive obavezuje države članice, kao i njene pristupne članice da imaju identifikovane radonske prioritne oblasti (Radon priority areas – RPA) koji se definišu kao oblasti u kojima se očekuje da koncentracija radona u značajnom broju objekata prevazilazi relevantni nacionalni referentni nivo [1].

Budući da identifikacija neke zone kao RPA povlači brojne obaveze, kao što merenje svih radnih mesta koja se nalaze u prizemlju, da se identifikuju stambeni objekti u kojima koncentracija radona prelazi referentnu vrednost, sama definicija RPA je osetljive političke prirode i ostavljeno je državama članicama da je pobliže definišu [2]. S obzirom da nije izvodivo vršiti merenje radona u svakom objektu, potrebno je pažljivo dizajnirati prospekciju radona kako bi se dobila reprezentativna vrednost srednje godišnje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama. Nedavno je dat kvalitativni pregled nacionalnih programa merenja radona u Evropi koji je pokazao vrlo heterogen pristup pri realizaciji nacionalnih programa merenja radona [3]. Nacionalni

programi merenja radona se ne razlikuju samo po načinu izbora objekata, već i po tehnikama merenja, dužini merenja, analizi rezultata itd. Sve to dovodi do nesigurnosti pri klasifikacije zone određenog prioriteta koja zavisi od kombinovane nesigurnosti pojedinačnog merenja i nesigurnosti ekstrapolacije tog merenja na celu oblast.

## 2. Pogrešna klasifikacija radonske zone

Svrstavanjem nekog regiona u određenu klasu, postoji određena verovatnoća da se izvrši pogrešna klasifikacija. S obzirom na značajne ekonomske efekte, a vezane za zdravlje ljudi, koje pogrešna klasifikacija može da donese, potrebno je izvršiti što pouzdaniju klasifikaciju regiona. U suprotnom, može doći do generisanja dva tipa grešaka: greške prve i druge vrste [4]. Kod „greške prve vrste“ pretpostavlja se da određena regija pripada RPA, dok ona ustvari ne pripada RPA. Sa stanovišta zaštite od zračenja ova greška je manje značajna. S druge strane, kod „greške druge vrste“ određena regija se klasifikuje kao regija nižeg „radonskog prioriteta“ dok ona ustvari pripada višoj klasi, odnosno RPA. Ovu vrstu greške bi trebalo držati što je moguće nižom [4].

Mogu se razlikovati 4 vrste izvora greške klasifikacije:

- Nesigurnost pojedinačnog merenja: direktnog merenja radona u zatvorenim prostorijama
- Nesigurnost prostorne raspodele radona na osnovu koje se određuje nivo „prioriteta“ neke oblasti
- Nesigurnost procene koncentracije radona u zatvorenim prostorijama used korišćenja proksi varijabli: veličine koje se koriste da bi se procenio radon u zatvorenim prostorijama (npr. koncentracija  $^{226}\text{Ra}$  u zemlji, geogeni potencijal)
- Nesigurnost modela kojim se direktno izmerene ili procenjene koncentracije radona ekstrapoliraju na ceo region

Neki od osnovnih izvora nesigurnosti klasifikacije su dati u sledećim poglavljima kao i predozi kako ih minimizovati.

## 3. Nesigurnost pojedinačnog merenja

Postoje 3 glavna izvora radona u zatvorenim prostorijama. Najdominantniji izvor je zemljište ispod objekta, potom građevinski materijal i konačno izvor vode. U cilju pojednostavljenja analize, pretpostavljamo da je ekshalacija radona iz zemljišta i građevinskog materijala konstanta, dok se zanemaruje koncentracija radona oslobođena iz vode. Time se dobija jednostavna diferencijalna jednačina koja opisuje koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = u_s + \frac{e_B S_B}{V} - (\lambda + \lambda_V)C + \lambda_V C_{van} \quad (1)$$

gde su:  $C$  – koncentracija radona u zatvorenoj prostoriji u vremenu  $t$ ,  $u_s$  – zapreminska brzina ulaska radona iz zemlje,  $e_B$  – površinska brzina ekshalacije,  $S_B$  – površina građevinskog materijala,  $V$  – zapremina prostorije,  $\lambda$  – konstanta raspada radona,  $\lambda_V$  – brzina ventilacije i  $C_{van}$  – spoljašnja koncentracija radona.

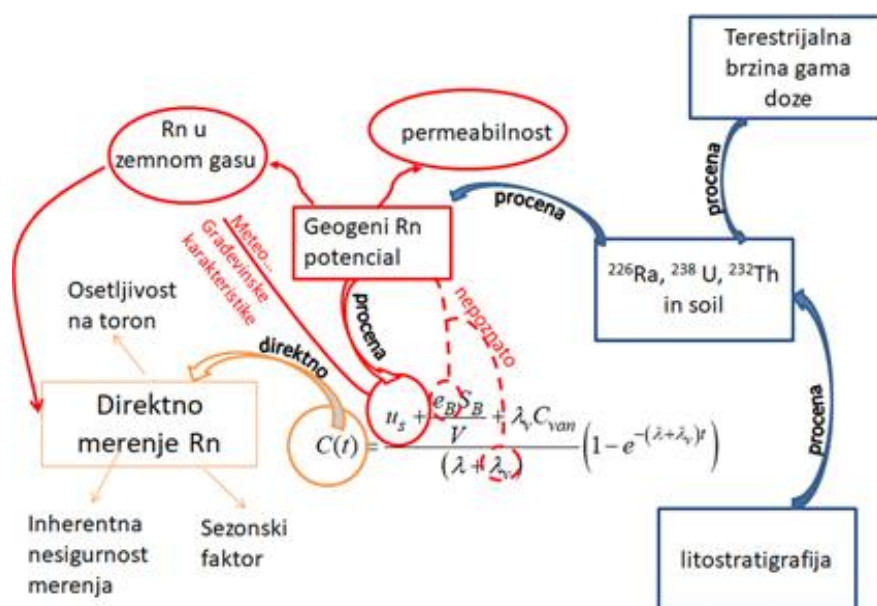
Rešenje ove pojednostavljene jednačine je dato sledećim izrazom:

$$C(t) = \frac{u_s + \frac{e_B S_B}{V} + \lambda_v C_{van}}{(\lambda + \lambda_v)} (1 - e^{-(\lambda + \lambda_v)t}) \quad (2)$$

gde prvi član opisuje doprinos iz zemlje, drugi iz građevinskog materijala, a treći iz spoljašnjeg vazduha.

Što se indirektnije meri ili procenjuje koncentracija radona u zatvorenoj prostoriji to će biti veća nesigurnost koncentracije radona, što za posledicu ima povećanu nesigurnost pri klasifikaciji radonske zone.

Na slici 1. su shematski prikazane merene veličine za procenu srednje godišnje vrednosti radona u zatvorenoj prostoriji zajedno sa dominantnim izvorom merne nesigurnosti.



**Slika 1. Merena veličina za procenu srednje godišnje vrednosti radona u zatvorenoj prostoriji zajedno sa dominantnim izvorom merne nesigurnosti.**

Najmanja nesigurnost pri određivanju srednje godišnje koncentracije radona se dobija merenjem koncentracije radona u trajanju od godinu dana. Ukoliko je merenje izvršeno u kraćem periodu, potrebno je korigovati izmerenu vrednost sezonskim faktorom, što povećava mernu nesigurnost. Detektori koji konstrukciono nisu dobro dizajnirani i imaju nezanemarljivu osetljivost na toron i potomke, unose dodatnu nesigurnost. Kod indirektnih tehnika merenja odnosno procene koncentracije radona, kod kojih se mere sekundarne veličine (radon u zemlji, geogeni radonski potencijal, sadržaj radionuklida u zemljištu...) nesigurnost procene koncentracije radona je još veća i vrlo ju je teško proceniti.

### **Merna nesigurnost radonskih detektora**

Postoji veliki broj tipova radonskih detektora, od kojih su najčešće u upotrebi: nuklearni trag detektori, detektori sa aktivnim ugljem i aktivni detektori, koji se opet razlikuju po svojoj konstrukciji i načinima detekcije. Tipične merne nesigurnosti ovih uređaja su: oko 10% za aktivne uređaje [5], od 10 – 23% za ugljene kanistre [5], mada njihova

merna nesigurnost mođe da ide i do 70% [6], dok je za nuklearne trag detektore merna nesigurnost reda 10 – 25% [5]. Dužina merenja aktivnim uređajima je reda sati, ugljenim kanistrima je reda dana, dok je za nuklearne trag detektore dužina merenja tipično reda nekoliko meseci do godinu dana. Stoga, ukoliko je cilj da se dobije srednja godišnja koncentracija radona, najpogodnija tehnika bi bila korišćenjem trag detektora, koji su pored toga veoma jeftini i jednostavni za upotrebu.

#### *Nesigurnost usled osetljivosti na toron*

Konstrukciono postoji veliki broj različitih difuzionih komora, od kojih neke imaju značajnu osetljivost na toron. Problem je pogotovo izražen kod starijih modela kad se nije posebno vodilo računa o osetljivosti na toron. Relativna osetljivost na toron, pretpostavljajući da je osetljivost na radon 1, je najizraženija kod sledećih detektora [7, 8]: 0,78 za Kfk detektore (Nemačka, 1981), 0,68 za RadTrak detektore (SAD, 1991), 0,05 za NRPB/SSI. Korišćenje difuzionih komora osetljivih na toron će za posledicu imati precenjivanje koncentracije radona u zatvorenim objektima. Uticaj koji potiče od torona je moguće smanjiti postavljanjem detektora na dovoljnu udaljenost od zida, korišćenjem detektora s što manjom osetljivošću na toron ili još bolje korišćenjem diskriminativnih detektora za radon i toron čime bi se dobile koncentracije oba izotopa.

#### *Nesigurnost usled vremenskih varijacija radona*

Uočena je varijacija radona sa vremenom. Grubo govoreći, dva tipa vremenskih varijacija se može uočiti: a) Dnevna varijacija kod koje je koncentracija radona veća tokom noći i rano ujutro dok opada tokom dana i b) Sezonska varijacija kod koje je koncentracija radona veća za vreme grejne sezone nego van nje.

Merenje mora biti dovoljno dugo da bi se usrednjile ove varijacije. U slučaju kad je merenje kraće od godinu dana, potrebno je izvršiti odgovarajuće sezonske korekcije. Sezonski faktori mogu znatno da variraju od regiona do regiona kao i od tipa objekta, pa su time izvor velike nesigurnosti pri proceni srednje godišnje koncentracije radona. Ekstremne varijacije sezonskih faktora tabelarno su pokazane na dva primera mernih kampanja u Srbiji. U slučaju nacionalne kampanje merenja radona u Srbiji [9], sezonski faktor se proračunao kao odnos srednje godišnje koncentracije radona i šestomesečne koncentracije radona merene u grejnoj sezoni, dok je sezonski faktor u Niškoj Banji proračunat za 3 letnja meseca [10].

**Tabela 1. Sezonski faktori u dve merne kampanje u Srbiji.**

<b>Merna kampanja</b>	<b>Vrednost</b>	<b>Standardna devijacija</b>	<b>Opseg varijacija</b>
Nacionalna	0,83	0,32	0,52 - 1,4
Niška Banja	2,7	1,2	1,1 – 6,0

Dati primeri jasno pokazuju količinu varijacije sezonskog faktora, pa korišćenje neodgovarajuće vrednosti sezonskog faktora može dovesti do velikog potcenjivanja ili precenjivanja srednje godišnje koncentracije radona.

U cilju smanjenja neodređenosti koja potiče usled primene sezonskog faktora, najbolje bi bilo vršiti godišnje merenje koncentracije radona, a ukoliko to nije moguće da se koriste „regionalni“ sezonski faktori, pri čemu svi objekti treba da odgovaraju jednoj distribuciji.



### *Nesigurnost usled brzine izmene vazduha*

Brzina izmene vazduha u objektu zavisi od klimatskih uslova, karakteristike građevine, kao i ljudskih navika. Tipične vrednosti brzine izmene vazduha su od 0,2 do 2 h<sup>-1</sup>, dok je srednja vrednost 0,63 h<sup>-1</sup>.

Pitanje brzine izmene vazduha postaje od posebnog značaja u sadašnjoj eri jer se u građevinskom inženjerstvu sve više primenjuje koncept energetske efikasnosti domova. Novi prozori koji bolje prijanjaju, a materijali sa boljom temperaturskom izolacijom dovode do smanjenja brzine ventilacije, čime dovode do povećanja koncentracije u unutrašnjim prostorijama [11].

#### **4. Nesigurnost procene koncentracije radona u zatvorenim prostorijama usred korišćenja proksi varijabli**

Iako je glavni izvor radona, zemlja ispod objekta, koncentracija radona u tolikoj meri varira usled antropogenih faktora, klime i meteoroloških uslova da u norveškim preporukama za merenje radona stoji da se indirektna merenja kao što su merenje radona u gasu u zemlji, sadržaj radionuklida u zemljištu i sl., ne mogu koristiti za procenu da li je potrebno vršiti saniranje objekta od visoke koncentracije radona.

Uvedena je veličina, geogeni radonski potencijal (GRP), kao mera procene rizika koji potiče od geologije, nezavisno od antropogenih faktora. Geogeni radonski potencijal je izveden od dve veličine: koncentracije radona u zemlji i permeabilnosti zemljišta i dobija se trenutnim merenjem ove dve veličine. Merena je varijacija GRP tokom godine i pokazalo se da je GRP mnogo manje zavisi od meteoroloških uslova (sadržaja vode u zemlji) od radona u zemlji.

Sa GRP kao sekundarnom veličinom za procenu koncentracije radona se jedino može do izvesne mere proceniti zapreminska brzina ulaska radona u prostoriju, dok ne pruža nikakvu informaciju o brzini ekshalacije iz građevinskog materijala i brzini izmene vazduha.

Veoma je teško proceniti vezu između radona u prostoriji i geogenog radona i kvantifikovati njihovu nesigurnost zbog faktora koji su dominantno antropogenog porekla kao što su: tip građevine (urbana, ruralna, kuća, stan, prisustvo podruma) kvalitet građevine (različit u različitim regionima, zavisi od imućnosti stanovništva), životne navike...

Ukoliko je pomoćna varijabla sadržaj urana ili radijuma u zemlji, neodređenost procene će biti još veća, budući da postoje dodatni faktori koji utiču na vezu sa GRP, kao što su faktor emanacije, poroznost, količine vode u zemljištu, a koji nisu poznati.

Još indirektniji metod koji se koristi je litostratigrafski kod kojeg bi se količina radona u prostorijama procenjivala na osnovu litologije kod koje se procenjuje koncentracija radijuma, a onda bi se redom procenjivali geogeni radonski potencijal, pa odatle zapreminska brzina ulaska i konačno sama koncentracija radona.

#### **5. Nesigurnost klasifikacije (procene koncentracije radona) u nekom regionu**

Konačno sa merenjem/procenom srednje godišnje koncentracije radona u određenom broju objekata, potrebno je proceniti koncentraciju radona u celom regionu. Stoga, pored neodređenosti merenja, odnosno procene koncentracije radona u pojedinačnom objektu, dodatna neodređenost potiče od ekstrapolacije rezultata na ceo region. Nesigurnost klasifikacije nekog regiona dodatno zavisi od:

- same definicije regiona (kvadratna ćelija određenih dimenzija npr 10 km X 10 km, geološki region, administrativni...);
- prave prostorne varijabilnosti koncentracije radona; dizajna merne kampanje u regionu:
  - broj mernih tačaka,
  - reprezentativnost (vrsta uzorkovanja, varijabilnost tipova objekata, njihov kvalitet i korišćeni materijal);
- geoloških podataka:
  - neodređenost geoloških mapa,
  - greška „pikselizacije“ odnosno problem rezolucije;
- statističke neodređenosti:
  - gustina mernih tačaka,
  - tipa pomoćnih promenljivih,
  - modela esktrapolacije...

## 6. Smanjenje nesigurnosti pri klasifikaciji radonske zone

Fridman je sa koautorima pokazao da i koeficijent varijacije koncentracije radona (drugim rečima relativna standardna devijacija) opada sa korenom broja merenih lokacija [4]. Takođe, varijansa opada ukoliko se „fiksiraju“ parametri koji utiču na disperziju koncentracije radona u zatvorenim objektima, što je ilustrovano na primeru Niške Banje gde se varijansa koncentracije radona smanjuje za faktor 1,3 ukoliko se fiksira „geologija“, za faktor 1,7 ukoliko se uključe i karakteristike objekta, dok ukoliko se uključi i ljudske navike varijansa se smanjuje za faktor 1,9 [12]. Konačno, razvijaju se brojni modeli koji pokušavaju da predvide prostornu raspodelu koncentracije radona na osnovu svih dostupnih veličina, kako izmerenih koncentracija radona u objektima, tako i svim dostupnim pomoćnim veličinama.

## 7. Zahvalnica

The research presented in this paper was realized within 16ENV04 MetroRADON project. This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme. Saradnici zahvaljuju i Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekti: P171018 и III43009).

## 8. Literatura

- [1] European Council (EC). Council Directive 2013/59/Euratom laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. *Off. J. Eur. Union L13*; 57, 2014.
- [2] P. Bossew, Radon Priority Areas – Definition, Estimation and Uncertainty. *Nucl. Technol. Radiat. Prot.* 33, 3; 2018, 286-292.
- [3] G. Pantelić, I. Čeliković, M. Živanović, I. Vukanac, J. Krneta Nikolić, G. Cinelli, V. Gruber. Qualitative overview of indoor radon surveys in Europe, *J. Environ. Radioactiv.* 263, 2019, 163-174.
- [4] H. Friedmann, et al. The uncertainty in the radon hazard classification of areas as

- a function of the number of measurements, *J. Environ. Radioactiv.* 173, 2017, 6-10.
- [5] World Health Organisation. *Handbook on Indoor Radon*. WHO, Geneva, 2009.
- [6] M. Zivanovic, Optimisation of Indoor Radon Concentration Measurements by Means of Charcoal Canisters, University of Belgrade, Doctoral thesis. 2016.
- [7] S. Tokonami, M. Yang, H. Yonehara, Y. Yamada. Simple discriminative measurement technique for radon and thoron concentrations with a single scintillation cell, *Rev. Sci. Instrum.* 73, 2002, 69–72.
- [8] S. Tokonami, H. Takahashi, Y. Kobayashi, W. Zhuo, E. Hulber. Up- to-date radon-thoron discriminative detector for a large scale survey, *Rev. Sci. Instrum.* 76, 2005, 11113505–113509.
- [9] M. Eremić Savković, V. Udovičić, D. Maletić, G. P., P. Ujić, I. Čeliković, S. Forkapić, V. Marković, V. Arsić, J. Ilić, B. Markoski. First national indoor radon survey as a tool for identify existing exposure situation in Serbia. (u pripremi)
- [10] Z. S. Žunić, I. Čeliković, P. Ujić. Baza koncentracija radona i torona merenih u okviru projekta P1965
- [11] I. Yarmoshenko, A. Vasilyev, A. Onishchenko, S. Kiselev, M. Zhukovsky. Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings. *Radiat. Prot. Dosim.* 160, 2014, 1-3, 53-56.
- [12] I. Yarmoshenko, et al. Variance of indoor radon concentration: Major influencing factors, *Sci. Tot. Environ.* 541, 2016, 155-160.

---

## SOURCES OF UNCERTAINTY IN CLASSIFICATION OF RADON ZONES

**Igor ČELIKOVIĆ, Gordana PANTELIĆ, Miloš ŽIVANOVIĆ,  
Ivana VUKANAC and Jelena KRNETA NIKOLIĆ**

*Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia*  
*icelikovic@vinca.rs, pantelic@vinca.rs, milosz@vinca.rs, vukanac@vinca.rs,*  
*jnikolic@vinca.rs*

### ABSTRACT

The EC has laid down directive 2013/59/EURATOM which represents basic safety standards regarding the radon protection of the European citizens. Within the BSS they oblige countries to establish radon action plans which include identification of Radon Priority Areas (RPA). Since it is not feasible to perform indoor radon measurements in each dwelling, it is necessary to carefully design indoor radon survey in order to get representative estimation of annual average indoor radon concentration of the certain territory. It is not sufficient only to have representative selection of dwellings, but it is important to keep uncertainty of measurement and estimation of annual radon concentration as low as possible. Uncertainty of classification of radon zones is therefore combination of uncertainties coming from a single measurement uncertainty and uncertainty of extrapolation of single or group of measurements to the whole region. In this contribution, we will try to estimate sources of classification uncertainties and to give recommendation in order to reduce level of uncertainty. The research presented in this paper was realized within 16ENV04 MetroRADON project. This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.