



UNIVERSITATEA „BABEȘ-BOLYAI”  
CLUJ-NAPOCA



FACULTATEA DE ȘTIINȚA ȘI INGINERIA  
MEDIULUI  
ȘCOALA DOCTORALĂ ȘTIINȚA MEDIULUI

# POTENȚIALUL DE RADON GEOGEN DIN PARTEA ESTICĂ A MUNȚILOR POIANA RUSCĂ

TEZĂ DE DOCTORAT  
REZUMAT

**CONDUCĂTOR DE DOCTORAT**

*Prof. Univ. Dr. CĂLIN BACIU*

**DOCTORAND**

ALEXANDRU IULIAN LUPULESCU

**Cluj-Napoca**

**2023**

## MULȚUMIRI

*Doresc să aduc mulțumiri domnului Prof. Univ. Dr. Călin Baciuc pentru încrederea, susținerea și ajutorul acordat pe toată perioada stagiului de doctorat.*

*De asemenea, adresez mulțumiri pentru sprijinul acordat comisiei de îndrumare, doamnei Conf. Dr. Nicoleta Brișan, doamnei CS I Dr. Ing. Alexandra Cucuș și domnului Lect. Dr. Tiberius Dicu. Totodată, adresez mulțumiri întregului colectiv de profesori și cercetători din cadrul Facultății de Știința și Ingineria Mediului, Universitatea Babeș-Bolyai, pentru cunoștințele acumulate în cadrul studiilor de licență și master.*

*Mulțumesc întregului personal din Laboratorul de Încercări Radon „Constantin Cosma” pentru ajutorul și oportunitatea de a face parte dintr-o echipă de cercetători profesioniști.*

*În final, mulțumesc familiei pentru înțelegerea, suportul și ajutorul oferit pe toată perioada stagiului de doctorat.*

## CUPRINS

LISTA DE FIGURI.....	3
LISTĂ DE TABELE.....	4
1. INTRODUCERE .....	5
1.1. Importanța radonului.....	5
1.2. Scopul și obiectivele tezei de doctorat.....	6
1.3. Structura tezei de doctorat.....	6
2. RADONUL.....	7
2.1. Proprietăți fizico-chimice.....	7
2.2. Cercetarea radonului rezidențial .....	7
2.3. Reglementări legislative internaționale și naționale ale radonului.....	9
2.4. Radonul geogen .....	10
2.4.1. Generarea și transportul radonului de la sursă în interiorul clădirilor.....	10
2.5. Radonul din apă .....	10
2.6. Argumentarea alegerii temei de cercetare.....	11
3. METODOLOGIA DE DESFĂȘURARE A CERCETĂRII .....	13
3.1. Zona de studiu.....	13
3.2. Determinarea potențialului de radon geogen .....	17
3.2.1. Determinarea concentrației de radon din sol.....	17
3.2.2. Determinarea permeabilității solului.....	18
3.2.3. Calculul potențialului de radon geogen.....	19
3.3. Determinarea concentrației activității de radon și radium din apă.....	19
4. REZULTATE ȘI DISCUȚII.....	21
4.1. Stabilirea unei metode eficiente de determinare a potențialului de radon geogen .....	21
4.2. Concentrația de radon din sol.....	23
4.2.1. Statistica descriptivă .....	23
4.3. Permeabilitatea solului.....	27
4.3.1. Statistica descriptivă .....	27
4.4. Potențialul de radon geogen.....	30
4.4.1. Statistica descriptivă .....	30
4.4.2. Discuții privind potențialul de radon geogen .....	33
4.5. Concentrația de activitate de radon și radium din apă .....	38
4.5.1. Concentrația de activitate de radon din apă .....	38
4.5.2. Concentrația de activitate de radium din apă .....	39
REFERINȚE BIBLIOGRAFICE.....	44

## LISTA DE FIGURI

<b>Fig. 1.</b> Harta radonului rezidențial în Europa (JRC, accesat în 2 februarie 2022).....	8
<b>Fig. 2.</b> Distribuția spațială a concentrației de radon rezidențial la nivelul României în 2013 (după Cosma et al. 2013a).....	8
<b>Fig. 3.</b> Distribuția spațială a concentrației de radon rezidențial la nivelul României în 2019 (www.smartradon.ro, accesat la 21 ianuarie 2023).....	8
<b>Fig. 4.</b> Media aritmetică a concentrațiilor de radon rezidențial (după www.smartradon.ro, 2023).....	11
<b>Fig. 5.</b> Media aritmetică a concentrațiilor de radon din sol (după Burghele et al., 2019).....	12
<b>Fig. 6.</b> Localizarea zonei de studiu .....	13
<b>Fig. 7.</b> Harta topografică a zonei de studiu .....	14
<b>Fig. 8.</b> Harta geologico-structurală a zonei de studiu (după Harta geologică a României 1:200.000, foaia Deva și Harta geologică a României 1:50.000, foaia Băuțar, cu modificări) .....	15
<b>Fig. 9.</b> Harta solurilor din zona de studiu (după Gherasi et al. 1968).....	16
<b>Fig. 10.</b> Radon Monitor-2 (RM-2).....	17
<b>Fig. 11.</b> Radon-Jok.....	18
<b>Fig. 12.</b> Schema de măsurare a potențialului de radon geogen.....	19
<b>Fig. 13.</b> Schema de măsurare a potențialului de radon geogen pentru fiecare locație .....	21
<b>Fig. 14.</b> Frecvența concentrațiilor de radon pentru cele 110 locații.....	24
<b>Fig. 15.</b> Concentrația de activitate de radon în funcție de formațiunea geologică.....	25
<b>Fig. 16.</b> Concentrația de activitate de radon din sol în funcție de tipul pedologic.....	26
<b>Fig. 17.</b> Frecvența permeabilității solului în cele 110 locații.....	28
<b>Fig. 18.</b> Permeabilitatea solului în funcție de substratul geologic .....	29
<b>Fig. 19.</b> Permeabilitatea solului în funcție de tipul pedologic .....	29
<b>Fig. 20.</b> Frecvența potențialului de radon geogen în cele 110 locații .....	31
<b>Fig. 21.</b> Potențialul de radon geogen în funcție de formațiunea geologică.....	32
<b>Fig. 22.</b> Potențialul de radon geogen în funcție de tipul pedologic .....	32
<b>Fig. 23.</b> Potențialul de radon geogen raportat la substratul geologic.....	33
<b>Fig. 24.</b> Potențialul de radon geogen raportat la vârsta geologică .....	34
<b>Fig. 25.</b> Potențialul de radon geogen raportat la pedologia zonei de studiu .....	35
<b>Fig. 26.</b> Potențialul de radon geogen raportat la elevația zonei de studiu.....	36
<b>Fig. 27.</b> Potențialul de radon geogen în grid de 5 x 5 km.....	37
<b>Fig. 28.</b> Concentrația de activitate de radon în cele 14 probe și media aritmetică pentru apa din izvor, fântână și apa de suprafață .....	38
<b>Fig. 29.</b> Concentrația de activitate de radon în ape de suprafață în zona Sterminosu (Bq/l) .....	39
<b>Fig. 30.</b> Concentrația de activitate de radon în cele 14 probe și media aritmetică pentru apa din izvor, fântână și apa de suprafață .....	40
<b>Fig. 31.</b> Concentrațiile de activitate de radon în ape de suprafață în zona Sterminosu (mBq/l).....	41

## LISTĂ DE TABELE

<b>Tabel 1.</b> Categoriile de permeabilitate (Neznal et al. 2004).....	18
<b>Tabel 2.</b> Statistica descriptivă pentru concentrația de activitate de radon din sol .....	23
<b>Tabel 3.</b> Frecvența măsurătorilor per formațiune geologică .....	25
<b>Tabel 4.</b> Frecvența măsurătorilor per formațiunea pedologică.....	26
<b>Tabel 5.</b> Statistica descriptivă pentru permeabilitatea solului .....	27
<b>Tabel 6.</b> Statistica descriptivă pentru potențialul de radon geogen .....	30

**Cuvinte cheie:** radon, radon geogen, potențial de radon geogenic, radioactivitate, radonul în apă, radiul în apă.

## 1. INTRODUCERE

### 1.1. Importanța radonului

În prezent sunt inventariate 92 de elemente chimice naturale, de la hidrogen la uraniu, care au 257 de izotopi stabili și mai mult de 1200 de izotopi radioactivi (Cosma & Jurcuț, 1996).

Radioactivitatea s-a descoperit în 1896 de către Henri Becquerel, iar numele de *radioactivitate* se datorează radiului care emitea radiații intense.

După prelucrarea unei mari cantități de pechblendă (minereu de uraniu), Marie și Pierre Curie au reușit separarea radiului și în 1902 Friedrich Dorn descoperă gazul radioactiv generat de către radiu. În 1908, pentru prima dată, William Ramsay și Robert Gray numesc această emanație niton. După anul 1920 denumirea de niton devine radon.

În România primele măsurători asupra radioactivității naturale, inclusiv asupra radonului, au început în 1908, fiind efectuate de Dragomir Hurmuzescu. Primul lui studiu s-a referit la radioactivitatea apelor minerale și geotermale. În perioada interbelică, George Atanasiu a determinat radiul și radonul din majoritatea apelor minerale și geotermale din România. Rezultatele obținute sunt disponibile în volumul *Opere alese* editat în 1977 la Editura Academiei (Atanasiu, 1977). Cercetări privind radonul din minele uranifere și neuranifere s-au realizat în cadrul Laboratorului de Radiații din orașul Ștei, județul Bihor de către Gheorghe Șandor, G. Dinică și Peic T. Acest laborator a fost tutelat de către Institutul pentru Materiale Rare și Radioactive din București (Șandor et al. 1992).

Radonul, în general, este cunoscut pentru efectele nocive asupra sănătății umane. Însă, radonul are și efecte benefice atât pentru sănătatea umană prin spa-uri de radon (Ameon, 2003; Kobal & Renier, 1987; Soto et al. 1995; Soto & Gomez, 1998), radioterapii pentru tratarea diferitelor tipuri de cancer (Kojima et al. 2019), cât și pentru știință folosit ca trasor pentru contaminarea apelor subterane (Feliu, 2022; Mattia et al. 2020), pentru diverse studii de mediu (Quindos Poncela et al. 2013) și studii geologice, geofizice și geochimice (Baskaran, 2016). Efectele nocive sunt prezentate începând cu Capitolul 2 din această teză de doctorat.

## 1.2. Scopul și obiectivele tezei de doctorat

Teza de față își propune determinarea potențialului de radon geogen în funcție de specificul geologic al zonei de studiu. Astfel, în vederea atingerii scopului, s-au impus următoarele obiective:

- Determinarea concentrației de radon din sol și a permeabilității solului,
- Calcularea potențialului de radon geogen,
- Realizarea hărților de predicție a potențialului de radon geogen în corelație cu geologia, pedologia și elevația zonei de studiu,
- Determinarea concentrației activității de radon și radium din apa de izvor, fântâni și de suprafață.

## 1.3. Structura tezei de doctorat

**Capitolul 1** descrie fenomenul de radioactivitate naturală, cum a fost descoperit acest fenomen și prezintă modul în care a apărut denumirea de radon. Tot aici sunt amintite scopul și obiectivele tezei de doctorat.

**Capitolul 2** descrie proprietățile fizico-chimice a radonului, cercetarea radonului rezidențial și sunt amintite reglementările în vigoare atât la nivel internațional cât și la nivel național. Este descris termenul de radon geogen, generarea și transportul radonului la suprafața solului și sunt prezentate studii internaționale și naționale realizate pe această tematică Tot aici este argumentată alegerea temei de cercetare.

**Capitolul 3** descrie zona de studiu din punct de vedere geomorfologic, geologic și pedologic. Sunt prezentate echipamentele pentru determinarea concentrației de radon din sol și a permeabilității solului. Sunt menționate metodele de calcul a potențialului de radon geogen. Este descris echipamentul și metodologia de determinare a concentrației de radon și radium din apă. În final, sunt descrise tipurile de analiză a datelor obținute în cadrul acestei lucrări de doctorat.

**Capitolul 4** prezintă stabilirea unei metode eficiente de determinare a potențialului de radon geogen. Sunt prezentate rezultatele obținute pentru concentrația de activitate de radon din sol, a permeabilității solului și a potențialului de radon geogen. Tot aici, sunt prezentate rezultatele concentrațiilor de activitate a radonului și radiului din diferite corpuri de apă (fântâni, izvoare, râuri).

**Capitolul 5** prezintă concluziile acestei lucrări și direcțiile viitoare de cercetare.

## 2. RADONUL

### 2.1. Proprietăți fizico-chimice

Radonul este un gaz radioactiv produs din dezintegrarea radiului ( $^{226}\text{Ra}$ ) în seria de dezintegrare naturală a uraniului. Este un gaz nobil, iar timpul de înjumătățire de 3,82 de zile. Nu participă la reacții chimice și este prezent în roci, soluri, în apele de suprafață și de adâncime, în aerul exterior și de interior.

Produsele rezultate din dezintegrarea radonului sunt atașate pe particule de aerosoli. O creștere a expunerii interne a corpului uman poate fi provocată de inhalarea în plămâni a acestor particule. În consecință, poate avea ca rezultat o incidență mai mare a cancerului la nivel pulmonar (Mikšová & Barnet, 2002). Descendenții radonului, în special poloniu-218 și poloniu-214 emit particule alfa cu energie mare (6,00 MeV pentru Po-218 și 7,69 pentru Po-214). În plus, dezintegrarea are loc într-un timp de înjumătățire scurt de 3,04 minute pentru Po-218, respectiv 164  $\mu\text{s}$  pentru Po-214 (Nero et al. 1990).

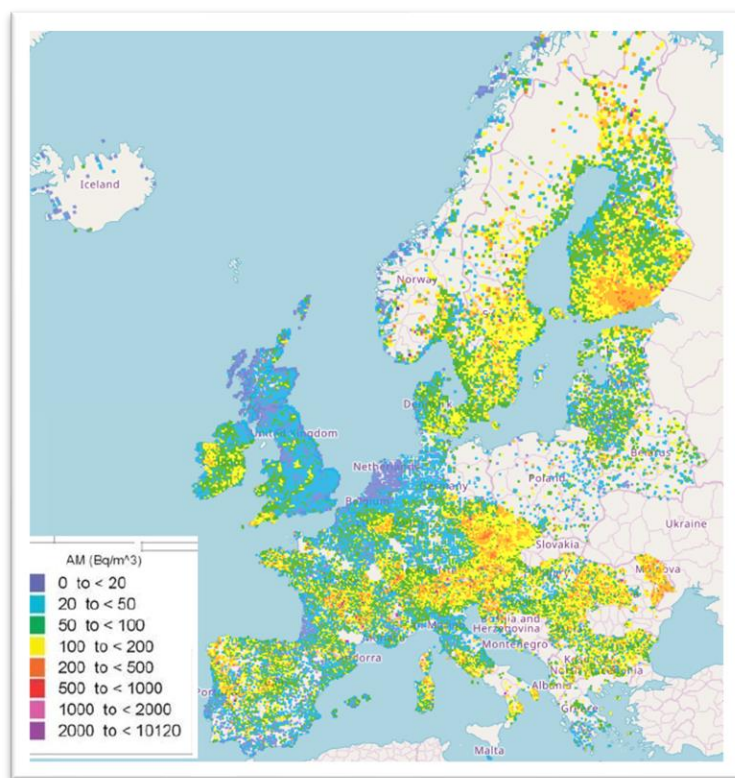
### 2.2. Cercetarea radonului rezidențial

În majoritatea studiilor efectuate în Europa, Statele Unite ale Americii și Asia, pentru determinarea radonului rezidențial s-au folosit detectorii de urme din alildiglicol (CR-39). În Europa, Tollefsen et al. (2011) au integrat datele furnizate de statele Uniunii Europene privind radonul rezidențial în vederea realizării primei hărți de acest gen la nivel de continent. Această hartă este împărțită în celule de 10 x 10 km, în **Fig. 1** fiind reprezentată distribuția radonului rezidențial (hartă actualizată în 2022). Printre țările care au înregistrat cele mai mari activități ale radonului sunt cele așezate pe roci cristaline, vulcanice sau granitice precum Republica Cehă, Finlanda (partea sudică) și Italia (partea centrală).

Nivelul de radon în interiorul clădirilor depinde de geologia zonei, materialele de construcții, prezența fundației sau a pivniței și stilul de viață al locuitorilor (Cosma et al. 2013a). Radonul a fost clasificat gaz carcinogen de către Agenția Internațională pentru Cercetarea Cancerului (eng. *IARC – International Agency Research on Cancer*) (IARC, 1988).

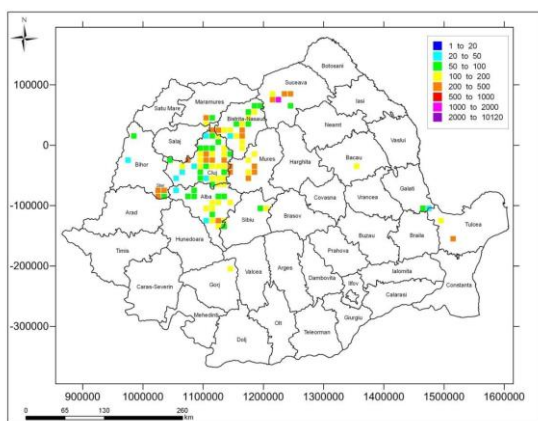
În 2019, în România s-au investigat 25 de județe acoperind 878 de celule, peste 44% din totalul celulelor populate (**Fig. 3**).



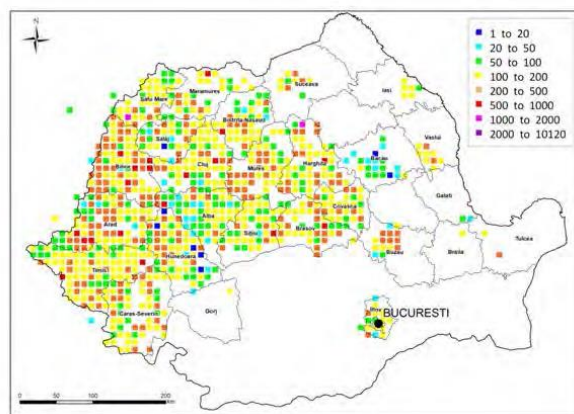


**Fig. 1.** Harta radonului rezidențial în Europa (JRC, accesat în 2 februarie 2022)

La nivelul României, primul studiu pentru realizarea unei hărți a concentrației de activitate de radon este realizat de Cosma et al. (2013a). Studiul acoperise 105 celule din totalul de 4620 (**Fig. 2**).



**Fig. 2.** Distribuția spațială a concentrației de radon rezidențial la nivelul României în 2013 (după Cosma et al. 2013a)



**Fig. 3.** Distribuția spațială a concentrației de radon rezidențial la nivelul României în 2019 (www.smartradon.ro, accesat la 21 ianuarie 2023)

### 2.3. Reglementări legislative internaționale și naționale ale radonului

În 2011, Organizația Mondială a Sănătății (OMS) a publicat noi recomandări și reglementări asupra radonului rezidențial. Aceasta le-a revizuit pe cele vechi și au scăzut nivelul de referință a expunerii la radon de la 250 Bq/m<sup>3</sup> la 100 Bq/m<sup>3</sup>. Unde nu e posibilă scăderea nivelului de radon rezidențial (din cauza geologiei) nivelul de referință este de 300 Bq/m<sup>3</sup>.

Directiva EURATOM 59/2013 obligă statele membre UE să dezvolte și să implementeze un plan de acțiune privind radonului începând cu 2018. Planul de acțiune constă în stabilirea nivelurilor de expunere la radon și riscurilor aferente în locuințe, clădiri publice și la locurile de muncă, respectiv pentru materialele de construcție cu conținut ridicat de radionuclizi naturali.

În România este inițiată din 2015, reglementarea radonului în apa potabilă prin *Legea nr. 301/2015 privind stabilirea cerințelor de protecție a sănătății populației în ceea ce privește substanțele radioactive din apa potabilă*. Această valoare a fost stabilită la 100 Bq/l pentru apa destinată consumului uman (*Legea Nr. 301/2015 Privind Stabilirea Cerințelor de Protecție a Sănătății Populației În Ceea Ce Privește Substanțele Radioactive Din Apa Potabilă*, 2015). Prin aceeași lege este reglementată și concentrația activității de radium-226 din apa destinată consumului uman la o valoare maximă admisă de 0,5 Bq/l (*Legea Nr. 301/2015 Privind Stabilirea Cerințelor de Protecție a Sănătății Populației În Ceea Ce Privește Substanțele Radioactive Din Apa Potabilă*, 2015).

În 2018 este reglementat și nivelul de radon din clădirile rezidențiale și cele de birouri sau cu acces public prin *Hotărârea de Guvern nr. 526 din 2018 pentru aprobarea Planului național de acțiune la radon*. Valoarea maximă admisă pentru concentrația de radon este de 300 Bq/m<sup>3</sup> (*HG 526/2018 - Planul Național de Acțiune La Radon*, 2018).

Principala sursă de radon în interiorul locuințelor este solul (Nero, 1989), astfel, radonul rezidențial are tendința de a fi corelat cu geologia locală. Modelarea și cartografierea potențialului de radon din interiorul locuințelor dar și cel al radonului geogen oferă oportunitatea de identificare a zonelor cu concentrații de activitate ridicate ale radonului (Dubois et al. 2010).

## **2.4. Radonul geogen**

### **2.4.1. Generarea și transportul radonului de la sursă în interiorul clădirilor**

În termeni generali, prin radon geogen se înțelege „contribuția solului/rocilor” (*eng. what earth delivers*) în ceea ce privește potențialul de radon (Gruber et al. 2013).

În timp ce harta cu potențialul de radon geogen indică riscul potențial, independent de orice construcție existentă, harta cu potențialul de radon din interiorul clădirilor reprezintă o medie a riscului real de sănătate în clădirile existente, neputând fi extrapolat la o clădire învecinată (Dubois et al. 2010). Principalul factor care influențează potențialul surselor de radon în sol și în interiorul locuințelor îl reprezintă, la scară locală, natura geologică a rocii de bază (Ciotoli et al. 2017; Kemski et al. 2001, 2005). Potențialul de radon geogen depinde de conținutul de radionuclizi din sol, respectiv permeabilitatea solului, nefiind influențat de factori antropici (Gruber et al. 2013).

Potențialul de radon geogen (*eng. GRP – Geogen Radon Potential*) este definit ca „contribuție a Pământului (solului)” la concentrația de radon. Este cunoscut faptul că în scoarța Terrei conținutul elementelor radioactive poate varia foarte mult (Appleton, 2007), în funcție de roca de bază originală (Stoici & Tătaru, 1988). Cu toate acestea, pentru a determina potențialul de radon geogen trebuie determinată concentrația activității de radon din sol și permeabilitatea solului, indiferent de datele disponibile pentru roca de bază. În prezent, diverse țări aplică metode diferite de calcul a potențialului de radon geogen, aspect care împiedică coroborarea datelor la nivel macro (Cinelli et al. 2019).

## **2.5. Radonul din apă**

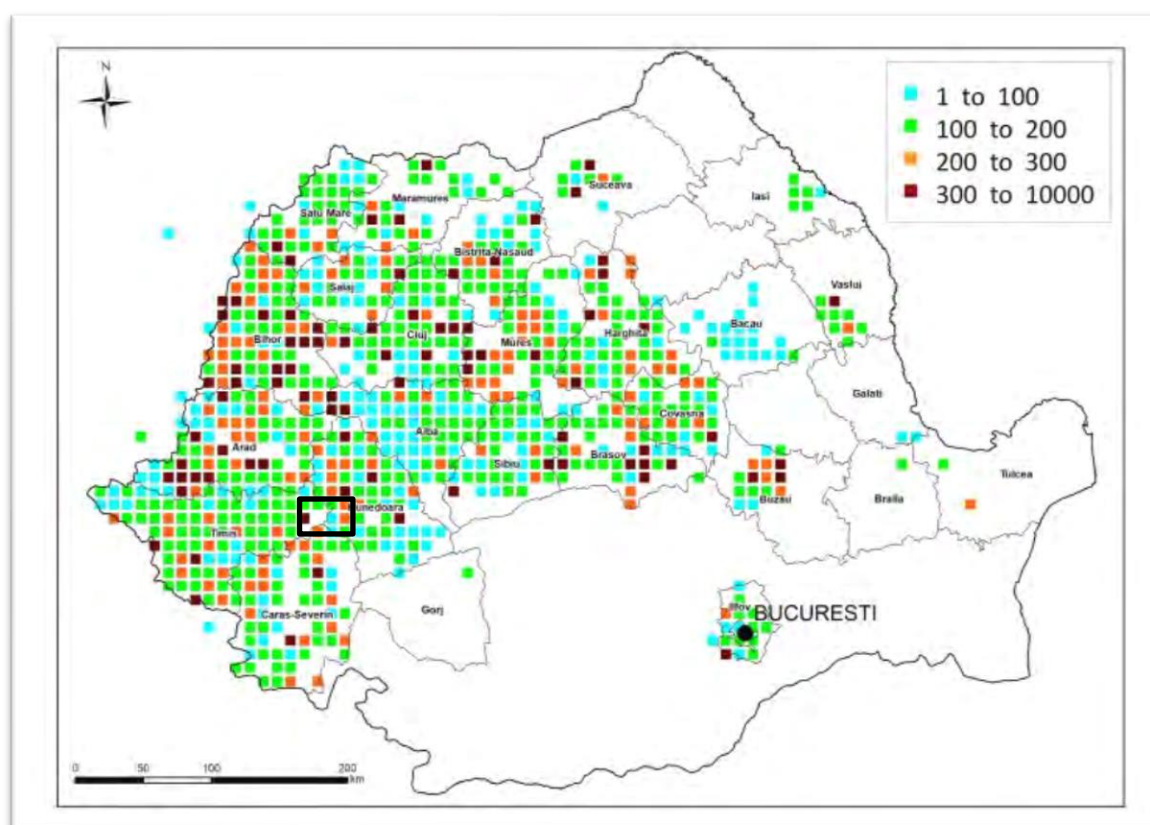
Fiind un gaz, radonul poate fi eliberat de pe suprafețele minerale și se poate dizolva în apele subterane, care îl pot duce departe de punctul său de origine. Pentru prima dată, radonul a fost observat în alimentarea cu apă de Joseph John Thomson, fiind un pioner în știința radioactivității la începutul secolului al XX-lea (Frame, 1991; Hess et al., 1990).

Radonul este ușor solubil în apă, dar este volatil. Are tendința de a părăsi apa la contactul cu aerul. Acest fenomen este cunoscut sub numele de aerare. Rata de transfer a radonului din apă în aer crește odată cu temperatura, agitația, amestecarea și suprafața. Coeficientul de partiție pentru radonul din apă la 20°C este de aprox. 0,25; astfel radonul continuă să se elibereze din apă până când concentrația din apă scade la aprox. 25% din concentrația radonului din aer (Prichard, 1987).

## 2.6. Argumentarea alegerii temei de cercetare

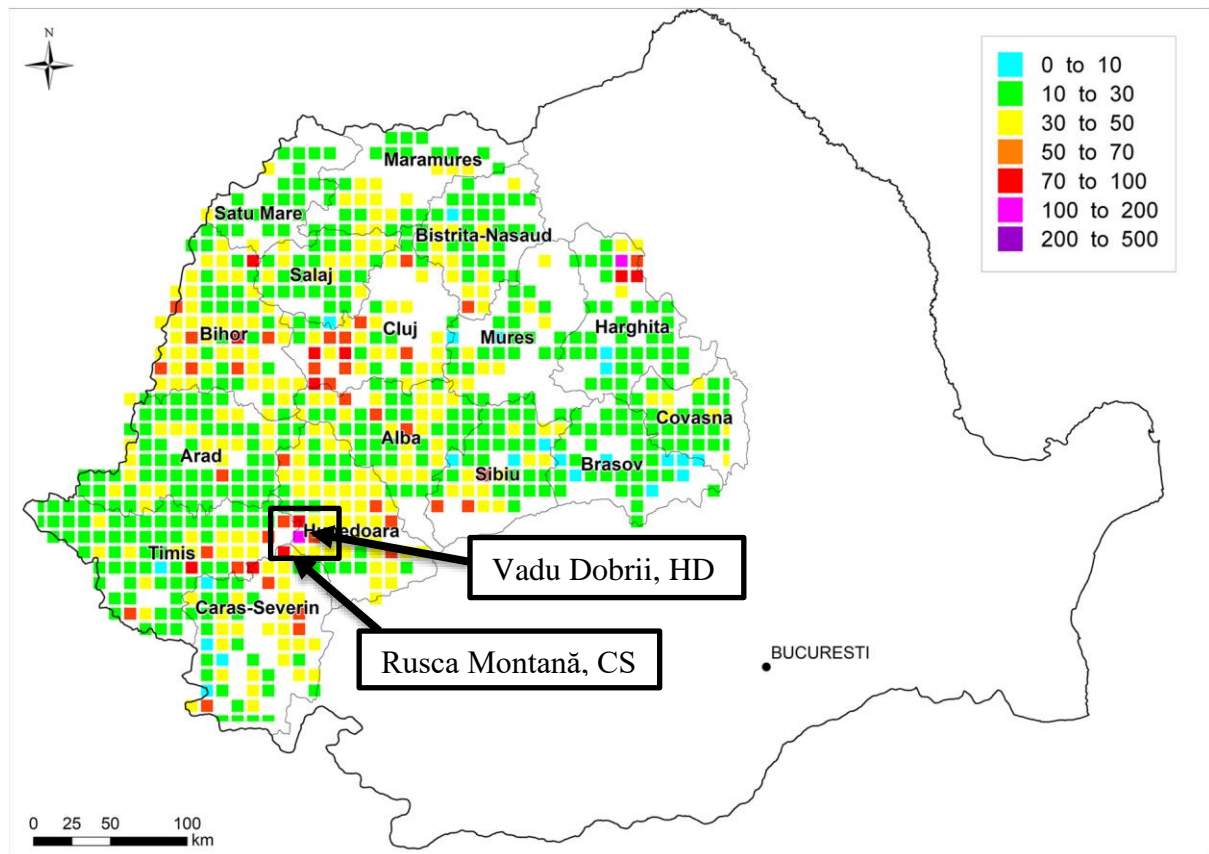
Am devenit interesat de studierea radonului începând cu anul 2013, la finele anului I de licență (în cadrul Facultății de Știința și Ingineria Mediului, Universitatea Babeș-Bolyai, Cluj-Napoca, România), când s-a început amplasarea detectorilor de radon rezidențial CR-39 în cadrul proiectului *RAMARO 73/2012 – Harta de radon (rezidențial, geogen, apă) pentru regiunile de Centru, Vest și Nord-Vest ale României*. Voluntar fiind, am amplasat în jur de 50 detectori pentru monitorizarea concentrației de radon din case. Concomitent, s-au prelevat probe de apă în vederea determinării concentrației de radon și s-au efectuat măsurători de radon în sol. După analiza datelor și realizarea hărții de radon s-a constatat că în zona Munților Poiana Ruscă există o zona predispusă la radon (Radon Prone Area).

În **Fig. 4** se poate observa media concentrațiilor de radon rezidențial la nivel național, respectiv zona de studiu pentru lucrarea de față. În zona de studiu (chenar negru) se pot observa concentrații de radon ridicate în case, acestea fiind între 200 și 300 Bq/m<sup>3</sup>, dar și o celulă cu peste 300 Bq/m<sup>3</sup>. Aceste concentrații ne pot da informații despre radonul geogen.



**Fig. 4.** Media aritmetică a concentrațiilor de radon rezidențial (după [www.smartradon.ro](http://www.smartradon.ro), 2023)

În studiul Burghele et al. (2019), se pot observa concentrații ale radonului din sol ridicate. De exemplu, în localitatea Vadu Dobrii a fost măsurată o concentrație de  $169 \text{ kBq/m}^3$  fiind cea mai ridicată valoare a radonului din tot județul Hunedoara. În comuna Rusca Montană, la o distanță de aproximativ 15 km, s-a determinat cea mai mare concentrație de radon ( $179,0 \text{ kBq/m}^3$ ) din sol din județul Caraș-Severin.



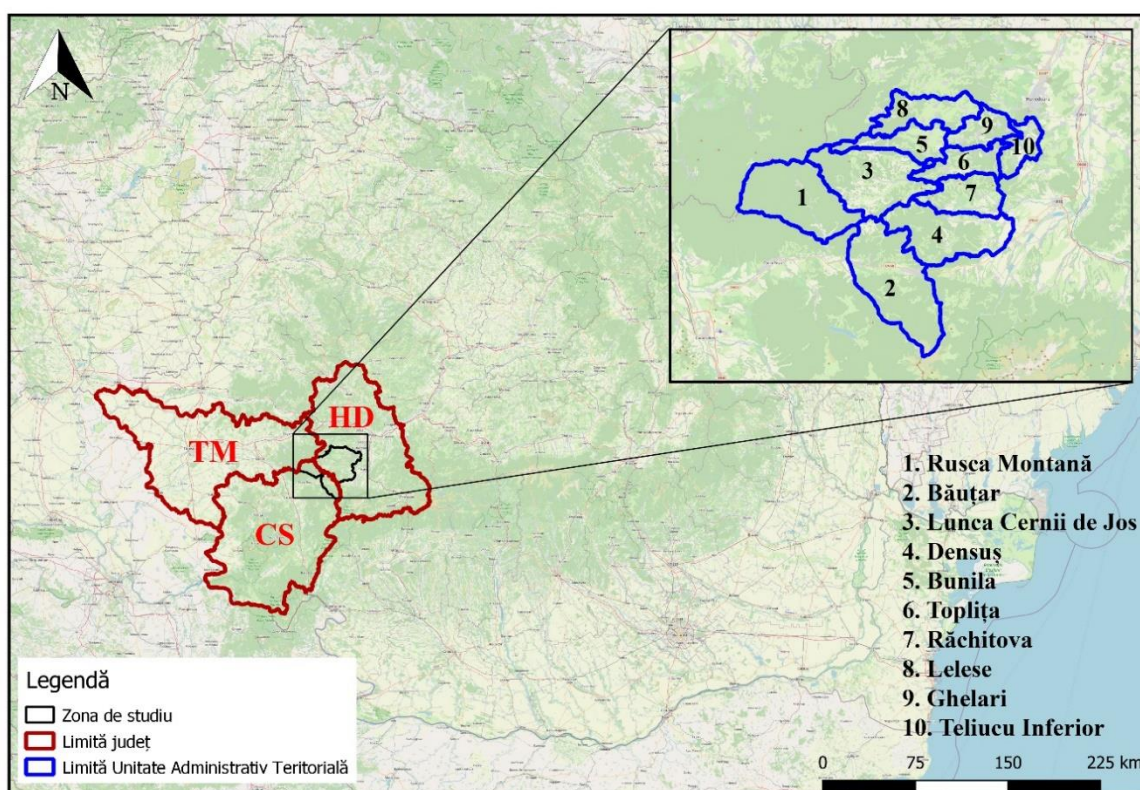
**Fig. 5.** Media aritmetică a concentrațiilor de radon din sol (după Burghele et al., 2019)

Având toate aceste date (concentrația de radon rezidențial și din sol) dar și caracteristicile geologice ale zonei, s-a propus cercetarea mai în detaliu a acestei zone în lucrarea de față printr-un studiu de caz (**Fig. 5**).

### 3. METODOLOGIA DE DESFĂȘURARE A CERCETĂRII

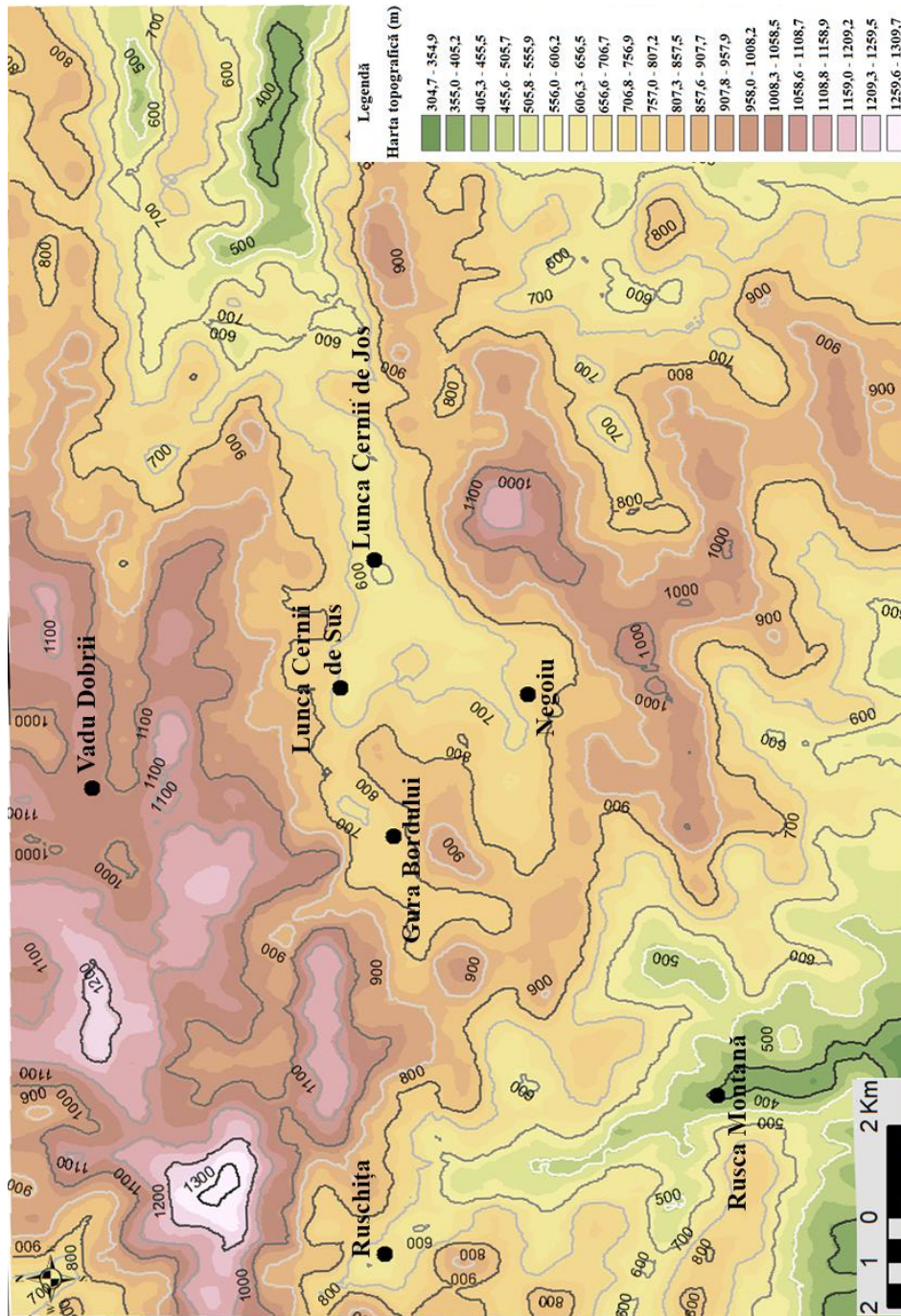
#### 3.1. Zona de studiu

Suprafața zonei de studiu (**Fig. 6**) însumează 480 km<sup>2</sup> și se află la granița județelor Hunedoara, Caraș-Severin și Timiș, pe raza a zece unități administrativ teritoriale (UAT). Două unități sunt în județul Caraș-Severin: comunele Băuțar și Rusca Montană, iar opt sunt în județul Hunedoara comunele Lunca Cernii de Jos, Densuș, Răchitova, Toplița, Bunila, Teliucu Inferior, Lelese și Ghelari.



**Fig. 6.** Localizarea zonei de studiu

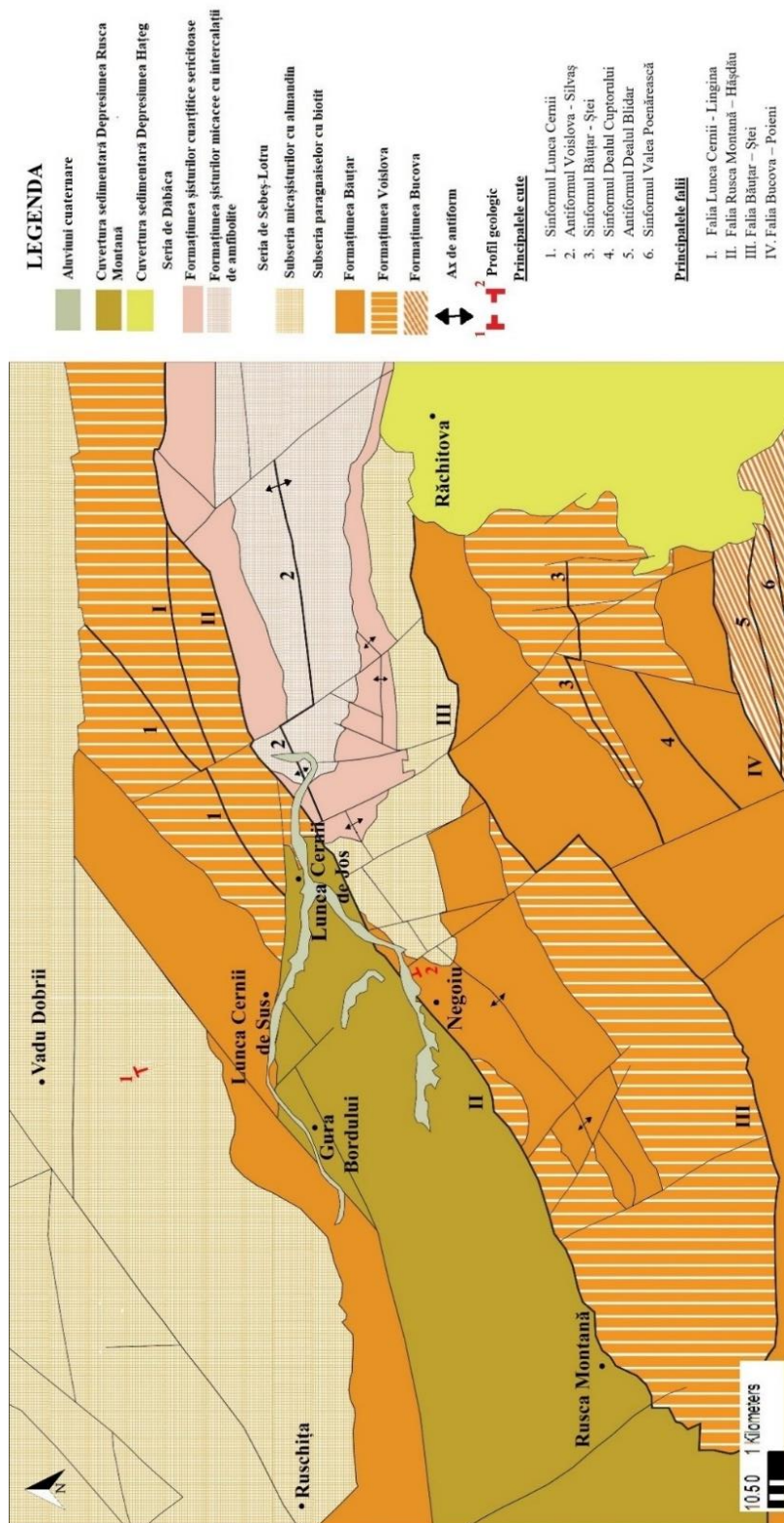
În **Fig. 7** se observă harta topografică (a elevației) pentru zona de studiu. Inițial, au fost extrase 10 000 de puncte a elevației din zona de studiu cu ajutorul programului Google Earth Pro (Google LLC), puncte care au fost introduse în programul ArcGis versiunea 10.6 și aplicând metoda geostatistică Kriging am obținut harta de interpolare pentru elevația zonei de studiu.



**Fig. 7.** Harta topografică a zonei de studiu

### **Geologia zonei de studiu**

Aria de studiu este situată în jurul comunei Lunca Cernii de Jos, iar din punct de vedere geologic-structural aparține domeniului unităților supragetice, prezente în vestul Banatului, Munții Poiana Ruscă și Munții Făgăraș, și corespunde părții estice a zonei sedimentare Rusca Montană – Lunca Cernii și formațiunilor metamorfice înconjurătoare.



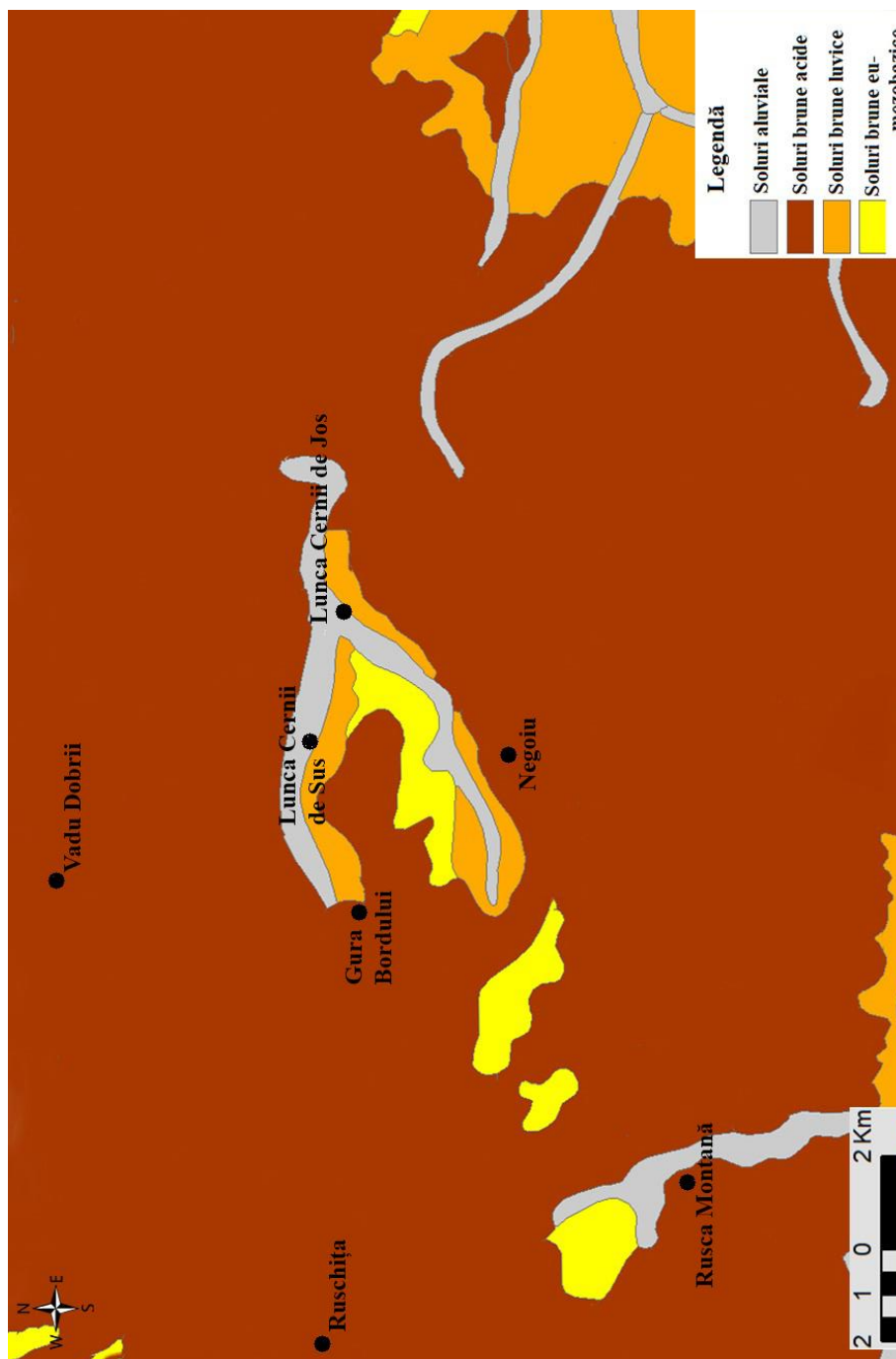
**Fig. 8.** Harta geologico-structurală a zonei de studiu (după Harta geologică a României 1:200.000, foaia Deva și Harta geologică a României 1:50.000, foaia Băuțar, cu modificări)



## Pedologia zonei de studiu

Din punct de vedere al solurilor, zona de studiu este formată preponderent de grupa solurilor brune acide (Districambosoluri), urmată de solurile brune luvice (Luvosoluri), solurile brune eu-mezobazice (Eutricambosoluri) și solurile aluviale (Aluviosoluri) (Gherasi et al. 1968).

În **Fig. 9** este prezentată harta solurilor din zona de studiu cu grupele de soluri prezente.



**Fig. 9.** *Harta solurilor din zona de studiu (după Gherasi et al. 1968)*

## 3.2. Determinarea potențialului de radon geogen

### 3.2.1. Determinarea concentrației de radon din sol

Detectorul de radon RM-2 (**Fig. 10**) este format dintr-un set de 15 camere de ionizare IK-250, cititorul ERM-3 și o pompă manuală sau electrică ce funcționează la tensiunea de 12V. Principalul avantaj al acestui detector îl reprezintă sensibilitatea, având o rezoluție de 0,1 kBq/m<sup>3</sup> și consumul de energie redus, acesta fiind alimentat cu un acumulator de 9V.

#### **ETAPE:**

- 1) Camerele de ionizare sunt vidate cu ajutorul pompei manuale (8 extrageri ale aerului) sau electrice (6 secunde),
- 2) Se introduc sondele de prelevare a gazului la o adâncime de 80 cm,
- 3) Probele de gaz din sol sunt prelevate cu ajutorul unei seringi Janet cu un volum de 150 ml conectată la sonda de prelevare.
- 4) Proba de gaz recoltată este introdusă în camera de ionizare. După ce proba din sol a fost transferată în camera de ionizare, se permite intrarea a 50 ml de aer ambiental în cameră pentru a atinge volumul total al camerei de ionizare de 200 ml.
- 5) Pentru a elimina toronul, camerele de ionizare cu proba prelevată sunt măsurate după 15 minute de la prelevare. Camera de ionizare este legată la electrometrul ERM-3 și începe măsurarea concentrației de activitate a radonului. Radiația alfa a radonului emisă în camera de ionizare dă naștere la un curent de ionizare care este măsurat în 120 secunde.
- 6) Electrometrul sau cititorul (ERM-3) afișează concentrația de radon în unități de activitate de volum (kBq/m<sup>3</sup>).



**Fig. 10.** Radon Monitor-2 (RM-2)

### 3.2.2. Determinarea permeabilității solului

Permeabilitatea solului este foarte importantă în procesul de transport a gazului în sol, aceasta influențând în mare măsură fluxul de radon sau exhalăția.

Pentru determinarea permeabilității solului s-a utilizat aparatul Radon-Jok (**Fig. 11**) de la Radon v.o.s., Republica Cehă ([www.radon.eu](http://www.radon.eu), 2022). La baza calculului pentru permeabilitatea solului stă ecuația lui Darcy.



**Fig. 11.** Radon-Jok

Permeabilitatea solului este împărțită în trei categorii. Acestea sunt prezentate în **Tabel 1** cu limitele aferente pentru permeabilitate scăzută, medie sau crescută.

**Tabel 1.** Categoriile de permeabilitate (Neznal et al. 2004)

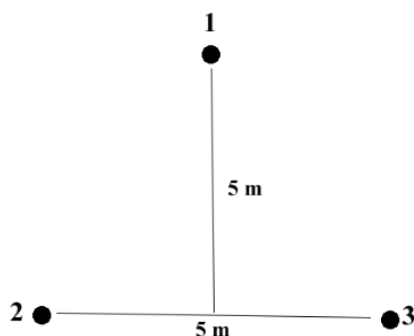
<i>Permeabilitate</i>	<i>Limită permeabilitate (<math>m^2</math>)</i>
<i>Scăzută</i>	$k < 4,0 \cdot 10^{-13}$
<i>Medie</i>	$4,0 \cdot 10^{-13} < k < 4,0 \cdot 10^{-12}$
<i>Crescută</i>	$k > 4,0 \cdot 10^{-12}$

### 3.2.3. Calculul potențialului de radon geogen

Măsurătorile pentru potențialul de radon geogen s-au efectuat pe un areal de 120-150 m<sup>2</sup>. Având în vedere neomogenitatea solului unde concentrația de radon din sol este corectată, prin aplicarea cuartilei 3 (percentila de 75%) (Mikšová & Barnet, 2002; Neznal et al., 2004):

$$GRP = \frac{\text{Cuartila 3 a concentrației de radon din sol} - 1}{-\log(\text{Cuartila 3 a permeabilității solului}) - 10} \quad (\text{I})$$

Potențialul de radon geogen s-a determinat în 3 puncte așezate sub forma unui triunghi isoscel cu baza și înălțimea de 5 m lungime (**Fig. 12**).



**Fig. 12.** Schema de măsurare a potențialului de radon geogen

## 3.3. Determinarea concentrației activității de radon și radium din apă

### A. Concentrația de radon din apă

Prelevarea probelor de apă s-a realizat în recipiente din PET de 0,5 l. S-au ales un număr de 14 puncte de probare, de unde s-au colectat apă de izvor, de fântână dar și ape curgătoare de suprafață. Determinarea concentrației activității de radon din apă s-a realizat cu ajutorul detectorului de radon RAD7 cu sistemul Rad-H<sub>2</sub>O în maximum 24 de ore de la prelevarea probelor.

### B) Concentrația de radium din apă

Prelevarea probelor de apă în vederea determinării concentrației de radium s-a efectuat în recipiente de sticlă cu un volum de 0,5 l. Acestea au fost etichetate asemănător probelor de apă pentru determinarea concentrației de radon din apă.

Determinarea concentrației de radium din apă se realizează după 30 de zile de la prelevarea probei. Concentrația de radon devine egală cu concentrația de radium din apă după această perioadă, considerându-se un echilibru secular între radon și radium. Ținând cont de acest echilibru secular, concentrația de radium din apă este determinată prin aceeași metodă prin care s-a determinat concentrația de activitate de radon din apă, descrisă mai sus.

## 4. REZULTATE ȘI DISCUȚII

### 4.1. Stabilirea unei metode eficiente de determinare a potențialului de radon geogen

Pentru a reduce timpul de lucru pe teren într-o singură locație s-a decis scăderea punctelor de măsurare a concentrației activității de radon, respectiv a permeabilității solului de la 15 puncte de măsurare la 3 puncte de măsurare, astfel reducând considerabil timpul de 4,5 ore la maxim 1,5 ore (Lupulescu et al. 2023). Astfel, s-a putut acoperi mult mai bine zona de studiu cu măsurători în mai multe locații păstrând calitatea rezultatelor.

În acest sens, s-a decis determinarea în 34 de locații a potențialului de radon geogen în 15, 9, 5 și 3 puncte de măsurare pentru a stabili câte puncte de măsurare sunt necesare pentru a determina un potențial de radon geogen care să nu difere semnificativ statistic față de formula de calcul de la care s-a plecat (Neznal et al., 2004). Măsurătorile s-au realizat pe o suprafață de 120-150 m<sup>2</sup> (Fig. 13).

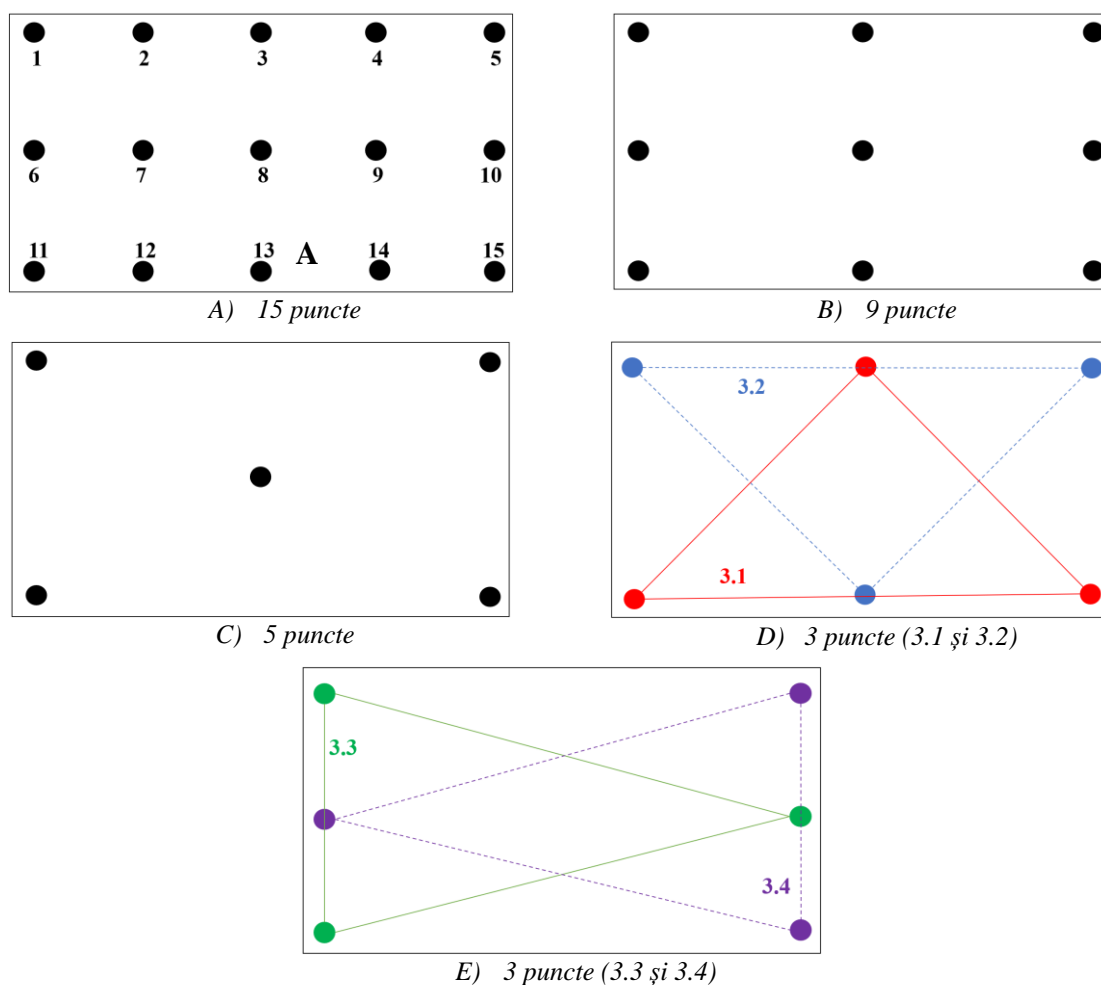


Fig. 13. Schema de măsurare a potențialului de radon geogen pentru fiecare locație

Media aritmetică pentru concentrația de activitate de radon geogen pentru cele 510 măsurători (34 de locații cu câte 15 măsurători fiecare) a fost de 31,9 kBq/m<sup>3</sup>. Concentrația minimă a fost de 0,2 kBq/m<sup>3</sup>, iar concentrația maximă a fost de 93,7 kBq/m<sup>3</sup>. Media geometrică a fost de 27,7 kBq/m<sup>3</sup>. Pentru acest studiu, media aritmetică a permeabilității solului este de 7,71 x 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>, cu o valoare minimă de 5,59 x 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup> și o valoare maximă de 2,19 x 10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>. Potențialul de radon geogen a fost calculat pentru fiecare locație utilizând concentrația de radon din sol și datele de permeabilitate a solului și s-a bazat pe ecuația (I).

O fiabilitate excelentă a fost găsită între schemele de măsurare cu 15 și 9 puncte prin ICC = 0,96 (95% CI: 0,93 – 0,98). Valoarea ICC pentru schema de măsurare în 5 puncte a fost de 0,85, în timp ce intervalul de încredere de 95% a arătat un grad de fiabilitate moderat până la bun. Pentru cele patru configurații selectate cu trei puncte de măsurare, valorile ICC au variat de la 0,77 (schema 3.3) la 0,89 (schema 3.4), intervalul de încredere asociat de 95% indicând o fiabilitate moderată până la bună. Compararea schemelor de măsurare care nu conțin aceleași puncte (cum ar fi schema 3.1 cu schema 3.2 sau schema 3.3 cu schema 3.4) a dat o valoare ICC de 0,70, respectiv 0,67, cu un interval de încredere variind de la scăzut (0,4) la bun (0,81). Pentru schema cu cinci puncte de măsurare prezentată în **Fig. 13.C** și schemele alternative care au vizat alte cinci puncte distincte (2, 4, 6, 12, 14 sau 3, 6, 10, 12, 13), ICC a indicat un interval de încredere între 0,50 și 0,94, indicând o fiabilitate între moderată și excelentă. Pentru schema cu nouă puncte de măsurare s-a făcut o comparație cu o schemă similară cu numărul de puncte; întrucât doar 15 puncte au fost măsurate pe locație, în acest caz au fost comune 3 puncte. Valoarea ICC pentru acest aranjament a fost de 0,86, cu un interval de încredere de 95% între 0,75 și 0,93. Dispersia concentrațiilor de radon din sol, evaluate cu coeficientul de corelație, a indicat o valoare de 51%.

## Concluzii

Pe baza testului T și a testului Wilcoxon, nu există nicio diferență semnificativă statistic pentru schema cu 15 și 9, 5, și 3 puncte de măsurare, cu excepția unei configurații (3.1). Măsurarea într-un singur punct a concentrației de radon nu este recomandată pentru dispozitivul RM-2. Pot apărea erori umane și tehnice, astfel încât valoarea concentrației de radon determinată poate diferi de valoarea sa reală. Un minim de trei măsurători ale concentrației de radon și a permeabilității solului vor îmbunătăți calitatea datelor.

Conform rezultatelor obținute în ceea ce privește ICC, chiar și atunci când schemele de măsurare au fost alese în așa fel încât să țintească puncte diferite la fiecare locație, o schemă

de măsurători în 5 puncte ar conduce la o fiabilitate moderată, în timp ce o schemă de măsurare în 9 puncte sau mai multe au prezentat o fiabilitate bună până la excelentă.

Acest studiu de determinare a potențialului de radon geogen pentru cele 34 de locații s-a materializat printr-un articol științific publicat de Lupulescu et al. (2023) în revista Atmosphere.

## 4.2. Concentrația de radon din sol

### 4.2.1. Statistica descriptivă

În total, concentrația de activitate de radon din sol a fost determinată în 110 locații împreună cu permeabilitatea solului. În **Tabel 2** este prezentată statistica descriptivă pentru cuartila a III-a pentru concentrația de activitate de radon din sol pentru cele 3 puncte de măsurare în 110 locații. Media aritmetică pentru concentrația de radon din sol în cele 110 locații a fost de 41,2 kBq/m<sup>3</sup>, cu un minim de 7,8 kBq/m<sup>3</sup> și un maxim de 139 kBq/m<sup>3</sup>. Media geometrică are o valoare de 35,9 kBq/m<sup>3</sup>, iar mediana 36,6 kBq/m<sup>3</sup>.

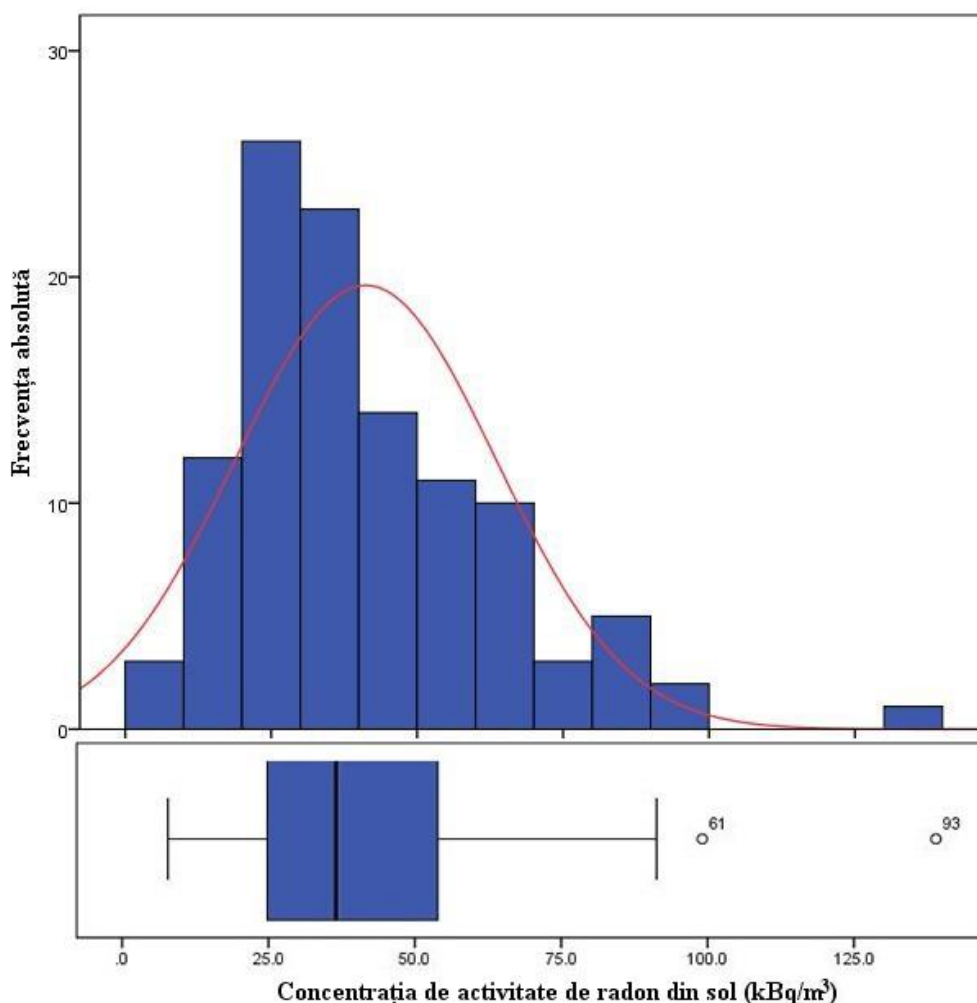
**Tabel 2.** Statistica descriptivă pentru concentrația de activitate de radon din sol

<i>Parametru</i>	<i>Valoare (kBq/m<sup>3</sup>)</i>
<i>Minim</i>	7,8
<i>Media aritmetică</i>	41,2
<i>Maxim</i>	139
<i>Deviația standard</i>	22,4
<i>Media geometrică</i>	35,8
<i>Deviația standard geometrică</i>	1,7
<i>Mediana</i>	36,6
<i>Modul</i>	37,9
<i>Varianța</i>	499,7
<i>Skewness*± eroarea standard</i>	1,295 ± 0,230
<i>Kurtosis**± eroarea standard</i>	2,533 ± 0,457

\***Skewness** – grad de asimetrie; \*\***Kurtosis** – grad de boltire (claritatea vârfului unei curbe de distribuție a frecvenței)

În **Fig. 14** se poate observa distribuția concentrației de radon din sol pentru cele 110 locații. Distribuția datelor este asimetrică cu o frecvență mai mare a valorilor scăzute, variind de 7,8 la 139 kBq/m<sup>3</sup>. Valorile pentru gradul de asimetrie (Skewness) a tuturor concentrațiilor de radon este de 1,295 ± 0,23, iar pentru gradul de boltire (Kurtosis) este de 2,533 ± 0,457. Aceste valori confirmă faptul că datele nu urmează o distribuție normală și simetrică.



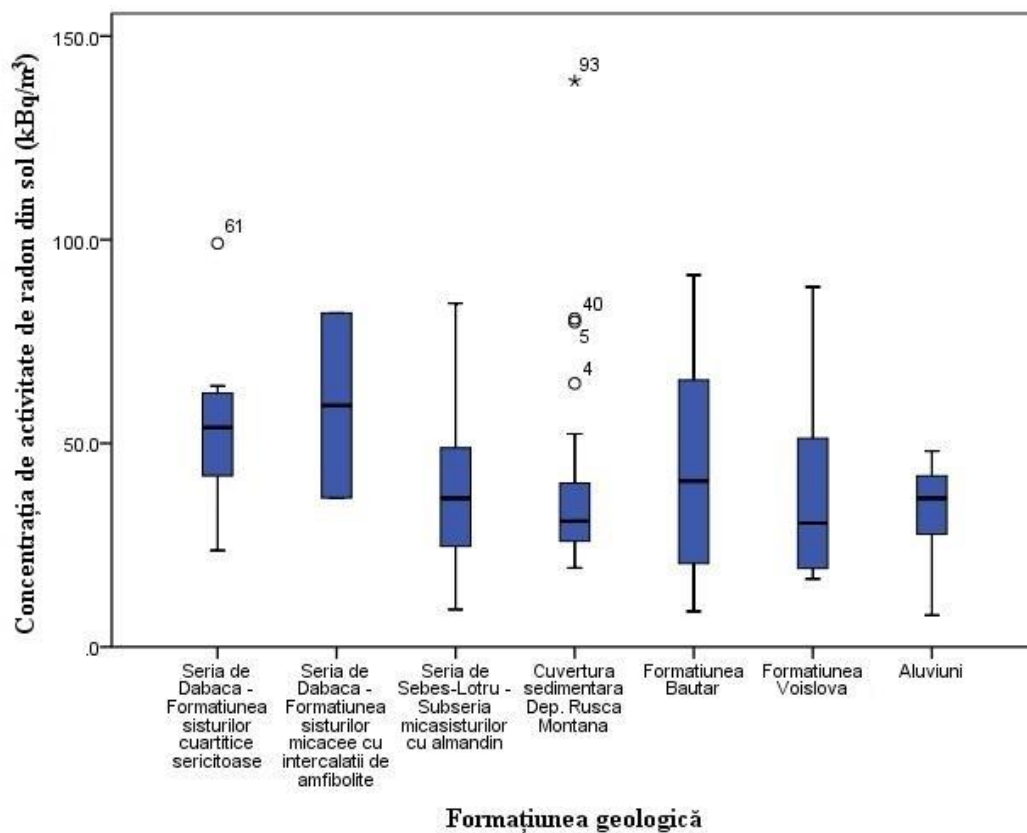


**Fig. 14.** *Frecvența concentrațiilor de radon pentru cele 110 locații*

Graficul de tip box-plot din **Fig. 14** prezintă un indicator cantitativ în ceea ce privește concentrațiile de radon din sol. Cele mai multe valori corespund unor concentrații relativ scăzute, cuprinse între 25 și 53 kBq/m<sup>3</sup>, cu mediana de 36,6 kBq/m<sup>3</sup> (linia accentuată).

**Fig. 15** prezintă concentrația de activitate de radon pentru fiecare formațiune geologică prezentată în zona de studiu. Se pot observa activități ale concentrației de radon mai ridicate în Formațiunea șisturilor micacee cu intercalații de amfibolite (Seria de Dăbâca) cu o mediană de 60 kBq/m<sup>3</sup>, în Formațiunea șisturilor cuarțitice sericitoase (Seria de Dăbâca) cu o mediană de 54,2 kBq/m<sup>3</sup>, dar și în Formațiunea Băuțar (Subseria paragnaiselor cu biotit din Seria Sebeș-Lotru) având o mediană de 41,3 kBq/m<sup>3</sup>. În aluviuni, mediana pentru concentrațiile de activitate de radon în sol a fost de 36,7 kBq/m<sup>3</sup>. Această valoare a mediane a fost determinată și pentru Subseria micașisturilor cu almandin din Seria de Sebeș-Lotru. Concentrații de radon mai scăzute au fost determinate în Formațiunea Voislova (Subseria paragnaiselor cu biotit din

Seria de Sebeș-Lotru) cu o mediană de 30,4 kBq/m<sup>3</sup> și în Cuvertura sedimentară Depresiunea Rusca Montană cu o mediană de 31,3 kBq/m<sup>3</sup>.



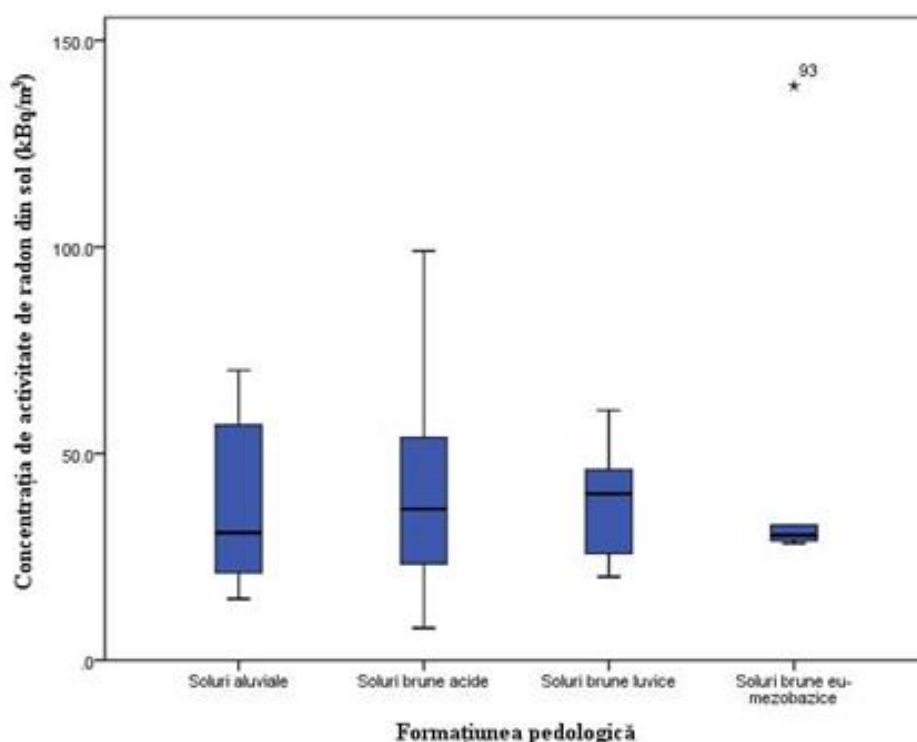
**Fig. 15.** Concentrația de activitate de radon în funcție de formațiunea geologică

În plus, pentru o rezoluție cât mai realistă s-a calculat și frecvența măsurătorilor concentrațiilor de radon pentru fiecare formațiune geologică (**Tabel 3**).

**Tabel 3.** Frecvența măsurătorilor per formațiune geologică

<i>Formațiunea geologică</i>	<i>Frecvență absolută</i>	<i>Procentaj (%)</i>
<i>Seria de Dăbâca – Formațiunea șisturilor cuarțite sericitoase</i>	7	6,4
<i>Seria de Dăbâca – Formațiunea șisturilor micacee cu intercalații de amfibolite</i>	2	1,8
<i>Seria de Sebeș-Lotru – Subseria micașturilor cu almandin</i>	27	24,5
<i>Cuvertura sedimentară Depresiunea Rusca Montană</i>	33	30,0
<i>Seria de Sebeș-Lotru – Subseria paragneisurilor cu biotit – Formațiunea Băușar</i>	26	23,6
<i>Seria de Sebeș-Lotru – Subseria paragneisurilor cu biotit – Formațiunea Voislova</i>	9	8,2
<i>Aluviuni</i>	6	5,5

În **Fig. 16** se poate observa concentrația de activitate de radon geogen în funcție de unitatea pedologică în care a fost măsurat. Cele mai mari concentrații de radon au fost determinate în solurile solurile brune luvice cu o mediană de 40,6 kBq/m<sup>3</sup>. Acestea sunt mai crescute față de mediana tuturor măsurătorilor pentru concentrația de radon din sol de 36,6 kBq/m<sup>3</sup>. Mediana concentrațiilor de radon din solurile brune acide este egală cu mediana tuturor măsurătorilor de radon din sol, fiind 36,6 kBq/m<sup>3</sup>. Concentrații mai scăzute de radon au fost determinate în solurile brune eu-mezobazice, acolo unde mediana a fost de 30,4 kBq/m<sup>3</sup> și solurile aluviale (mediana = 36,5 kBq/m<sup>3</sup>).



**Fig. 16.** Concentrația de activitate de radon din sol în funcție de tipul pedologic

Pentru a caracteriza mai bine concentrația de activitate de radon din sol în funcție de unitatea pedologică, s-a recurs la **Tabel 4** pentru a observa numărul de măsurători efectuate în fiecare formațiune. Astfel, cele mai multe măsurători au fost realizate în solurile brune acide într-un număr de 89, acestea însemnând un procent de 80,9% din totalul măsurătorilor.

**Tabel 4.** Frecvența măsurătorilor per formațiunea pedologică

<i>Formațiunea pedologică</i>	<i>Frecvența absolută</i>	<i>Procent (%)</i>
<i>Soluri aluviale</i>	8	7,3
<i>Soluri brune acide</i>	89	80,9
<i>Soluri brune luvice</i>	7	6,4
<i>Soluri brune eu-mezobazice</i>	5	5,5

### 4.3. Permeabilitatea solului

#### 4.3.1. Statistica descriptivă

Permeabilitatea solului este un factor foarte important pentru calcularea potențialului de radon geogen. Un aspect original al lucrării de față constă în măsurarea *in-situ* a permeabilității solului, cel mai adesea aceasta fiind estimată pe baza hărților de granulometrie a solurilor.

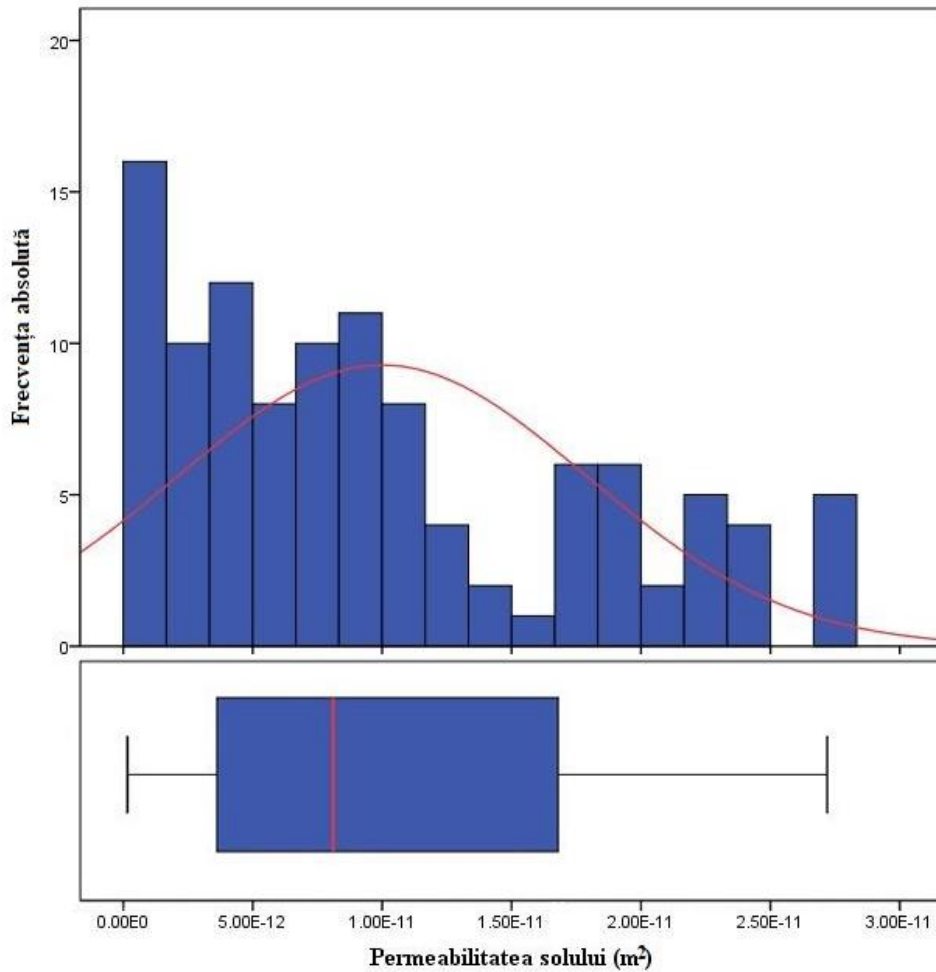
În **Tabel 5** este prezentată statistica descriptivă pentru permeabilitatea solului determinată în cele 110 locații. Media aritmetică a fost de  $1,0\text{E-}11 \text{ m}^2$  ( $1,0 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ ) cu o deviație standard de  $7,9\text{E-}12 \text{ m}^2$  ( $7,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ), fiind o permeabilitate foarte mare a solului după clasificarea făcută de Neznal et al. (2004). Valoarea minimă obținută pentru permeabilitate a fost de  $2,0\text{E-}13 \text{ m}^2$ , iar maximum de  $2,7\text{E-}11 \text{ m}^2$ . Media geometrică a permeabilității solului a fost de  $6,3\text{E-}12 \text{ m}^2$ , iar mediana este de  $8,1\text{E-}12 \text{ m}^2$ .

**Tabel 5.** Statistica descriptivă pentru permeabilitatea solului

<i>Parametru</i>	<i>Valoare (m<sup>2</sup>)</i>
<i>Minim</i>	2,0E-13
<i>Media aritmetică</i>	1,0E-11
<i>Maxim</i>	2,7E-11
<i>Deviația standard</i>	7,9E-12
<i>Media geometrică</i>	6,3E-12
<i>Deviația standard geometrică</i>	3,2
<i>Mediana</i>	8,1E-12
<i>Modul</i>	2,7E-11
<i>Varianța</i>	621
<i>Skewness*± eroarea standard</i>	0,703 ± 0,230
<i>Kurtosis**± eroarea standard</i>	-0,638 ± 0,457

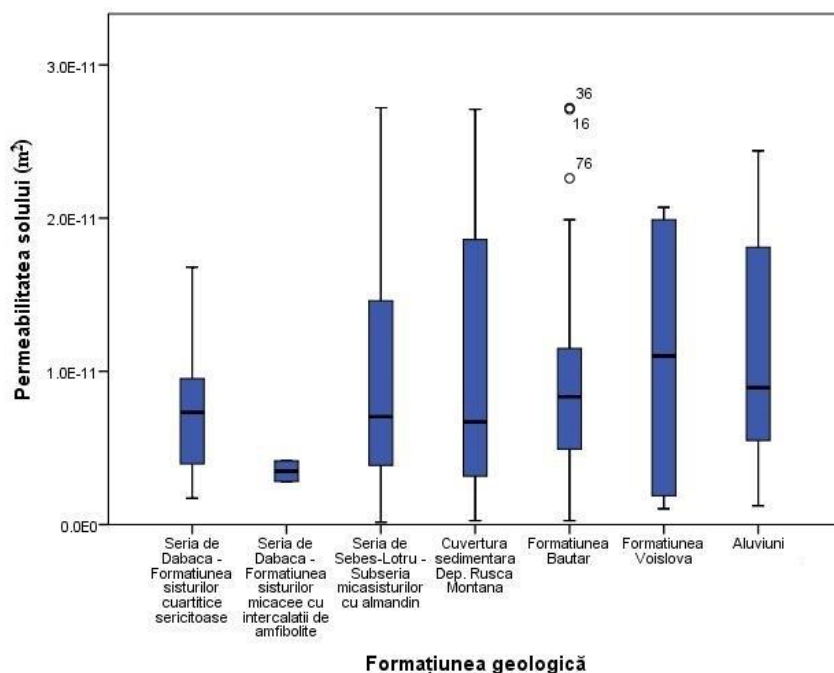
\***Skewness** – grad de asimetrie; \*\***Kurtosis** – grad de boltire (claritatea vârfului unei curbe de distribuție a frecvenței)

În **Fig. 17** este prezentată distribuția permeabilității solului determinată în cele 110 locații. Se poate observa o distribuție anormală și asimetrică cu un grad de asimetrie de  $0,704 \pm 0,230$  și un grad de boltire de  $-0,637 \pm 0,457$ . În graficul de tip box-plot sunt prezentate valorile permeabilității solului, cele mai multe fiind în zona mediei aritmetice de  $1,0\text{E-}11 \text{ m}^2$ . Linia roșie de pe grafic indică mediana tuturor valorilor permeabilității solului  $8,1\text{E-}12 \text{ m}^2$ .



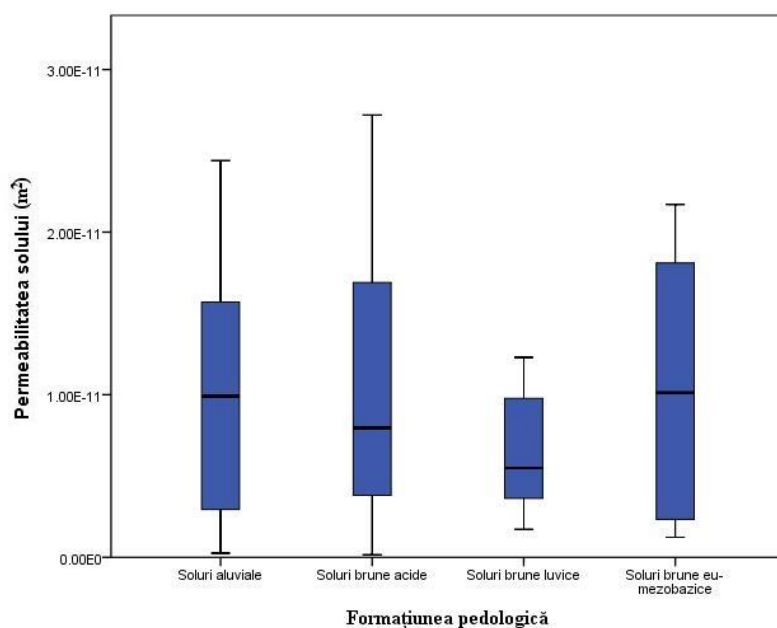
**Fig. 17.** *Frecvența permeabilității solului în cele 110 locații*

În **Fig. 18** este reprezentată permeabilitatea solului suprapusă substratelor geologice prezente în zona de studiu. Se poate observa că într-o singură formațiune geologică mediana permeabilității solului este mai crescută decât media aritmetică ( $1,0E-11 \text{ m}^2$ ) a celor 110 locații. Această formațiune este reprezentată de Formațiunea Voislova – Subseria paragnaiselor cu biotit din Seria de Sebeș-Lotru. La polul opus, cu cea mai scăzută permeabilitate a solului este Formațiunea șisturilor micacee cu intercalații de amfibolite din Seria de Dăbâca. În celelalte formațiuni geologice, mediana permeabilității solului se află în jurul medianei tuturor celor 110 locații  $8,1E-12 \text{ m}^2$ .



**Fig. 18.** *Permeabilitatea solului în funcție de substratul geologic*

În **Fig. 19** se poate observa permeabilitatea solului pentru fiecare tip pedologic în parte. Cele mai ridicate permeabilități ale solului sunt în solurile brune eu-mezobazice, având mediana în jurul valorii mediei aritmetice de  $1,00E-11$   $m^2$ . Pentru solurile brune acide, mediana măsurătorilor de permeabilitate este de  $7,9E-12$   $m^2$ , iar pentru solurile brune luvice mediana este cea mai scăzută, având o valoare de  $5,5E-12$   $m^2$ .



**Fig. 19.** *Permeabilitatea solului în funcție de tipul pedologic*

## 4.4. Potențialul de radon geogen

### 4.4.1. Statistica descriptivă

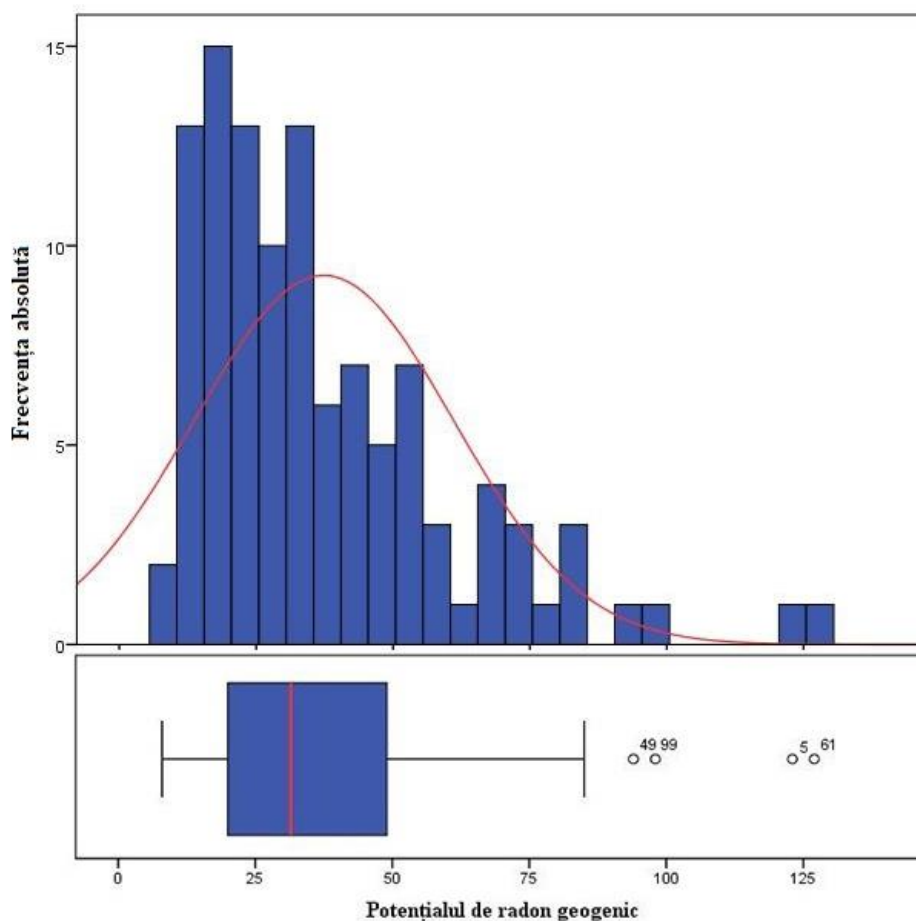
Potențialul de radon geogen este calculat cu ajutorul concentrației de activitate de radon și a permeabilității solului. În **Tabel 6** se poate observa media aritmetică cu o valoare de 37 pentru potențialul de radon geogen în cele 110 locații, cu o deviație standard de 23,7. Minimul pentru potențialul de radon geogen a fost de 8, iar maximum a fost de 127. Media geometrică și mediana au valori foarte apropiate de 31,2, respectiv 31,5. Deviația standard geometrică a fost de 1,8, modulul de 16, iar varianța de 562.

**Tabel 6.** Statistica descriptivă pentru potențialul de radon geogen

<i>Parametru</i>	<i>GRP</i>
<i>Minim</i>	8
<i>Media aritmetică</i>	37
<i>Maxim</i>	127
<i>Deviația standard</i>	23,7
<i>Media geometrică</i>	31,2
<i>Deviația standard geometrică</i>	1,8
<i>Mediana</i>	31,5
<i>Modul</i>	16
<i>Varianța</i>	562
<i>Skewness* ± eroarea standard</i>	1,441 ± 0,230
<i>Kurtosis** ± eroarea standard</i>	2,362 ± 0,457

\***Skewness** – grad de asimetrie; \*\***Kurtosis** – grad de boltire (claritatea vârfului unei curbe de distribuție a frecvenței)

În **Fig. 20** este prezentată distribuția potențialului de radon geogen pentru cele 110 locații. Se poate observa că nu este simetrică și normală, majoritatea potențialelor de radon geogen aflându-se în jurul valorii de 25. În plus, gradul de asimetrie de  $1,441 \pm 0,230$ , respectiv gradul de boltire de  $2,362 \pm 0,457$  ne indică că distribuția nu este una normală.

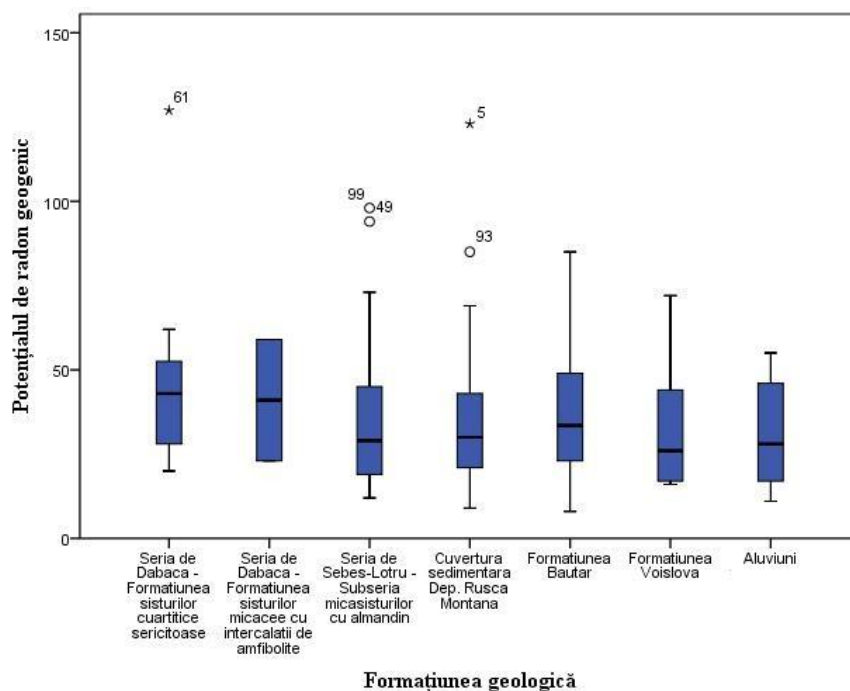


**Fig. 20.** Frecvența potențialului de radon geogen în cele 110 locații

În graficul de tip box-plot este reprezentat potențialul de radon geogen. Acesta indică faptul că valorile pentru potențialul de radon geogen variază în mare parte de la 24 la 50, cu mediana la 31,5 (linia roșie). Valorile prezentate cu cercelețe (locațiile cu codul 5, 49, 61, 99) sunt considerate valori excesive de către program.

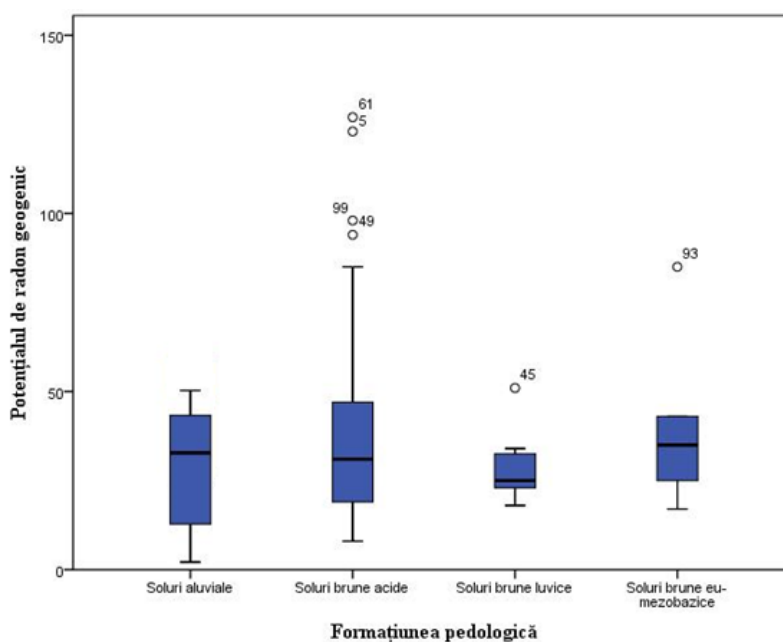
În **Fig. 21** este prezentat potențialul de radon geogen pentru fiecare formațiune geologică în parte. Se poate observa că valoarea cea mai crescută pentru potențialul de radon geogen este în Formațiunea șisturilor cuarțitice sericitoase din Seria de Dăbâca având o mediană de 43,3. Această formațiune este urmată de cea a șisturilor micacee cu intercalații de amfibolite (Seria de Dăbâca) cu o mediană de 41,2. Subseria micașisturilor cu almandin din Seria de Sebeș-Lotru și Cuvertura sedimentară depresiunea Rusca Montană au potențiale de radon geogen asemănătoare cu mediana de 29,2, respectiv 30,4. Cele mai mici valori ale potențialului de radon geogen au fost găsite pentru Formațiunea Voislova cu o mediană de 25,8, fiind urmată de aluviuni cu o mediană de 28,3.





**Fig. 21.** Potencialul de radon geogen în funcție de formațiunea geologică

**Fig. 22** arată potențialul de radon geogen pentru fiecare tip pedologic în parte. Cele mai ridicate potențiale de radon se regăesc în solurile brune eu-mezobazice cu mediana de 35,1. Aproape de mediana tuturor celor 110 locații, se regăsește mediana pentru potențialul de radon geogen din formațiunea solurilor brune acide cu o valoare de 31,1 și solurile aluviale cu valoarea de 32,2. Valori mai scăzute ale potențialului de radon au fost găsite pentru solurile brune luvice, cu o mediană de 25,3.



**Fig. 22.** Potencialul de radon geogen în funcție de tipul pedologic

#### 4.4.2. Discuții privind potențialul de radon geogen

##### A) Potențialul de radon geogen – geologia zonei de studiu

În Fig. 23 se poate observa harta predicției potențialului de radon geogen obținut prin metoda geostatistică Ordinary Kriging în 4 sectoare de analiză, locațiile unde s-au realizat măsurătorile și harta geologică a zonei de studiu.

Se observă o predicție pentru un potențial de radon geogen crescut în zona Formațiunii șisturilor cuarțitice sericitoase și a șisturilor micacee cu intercalații de amfibolite din Seria de Dăbâca (partea estică a zonei de studiu). Formațiunea Băuțar (Subseria paragneiselor cu biotit din Seria de Sebeș-Lotru) din partea de nord a zonei de studiu indică o predicție a unui potențial de radon geogen ridicat. În partea sudică, această formațiune indică o predicție de potențial ridicat doar pentru 2 puncte, în partea sud-vestică. În partea sud-estică, Formațiunea Băuțar indică o predicție scăzută a potențialului de radon geogen. O predicție ridicată mai este indicată și în formațiunea Subseriei micașturilor cu almandin în partea de SE a localității Vadu Dobrii și în partea de E a localității Ruschița.

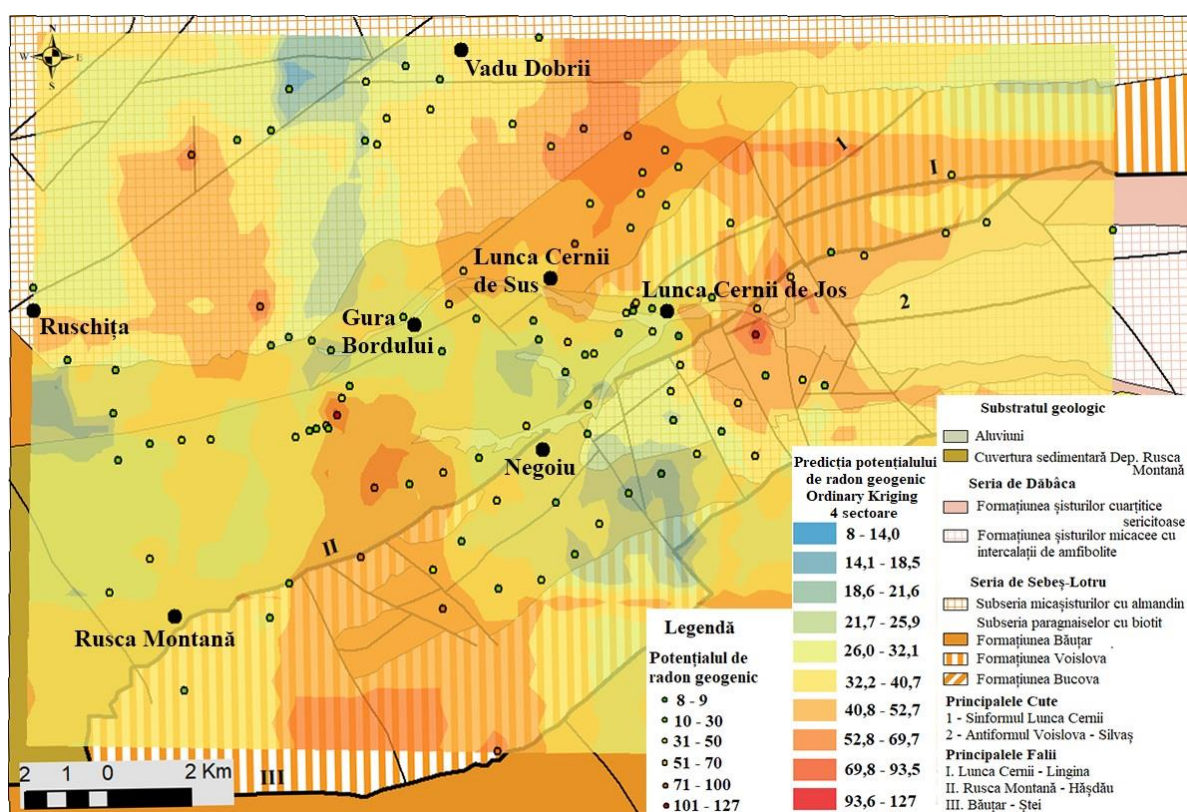
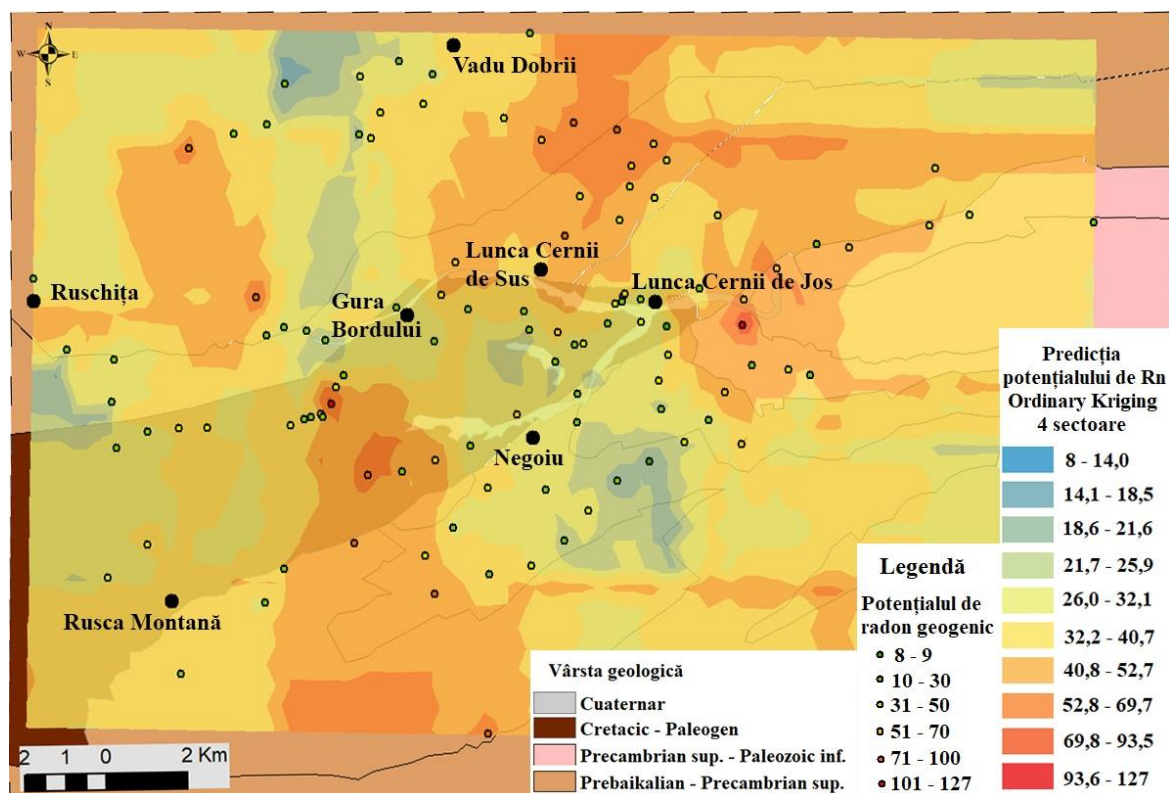


Fig. 23. Potențialul de radon geogen raportat la substratul geologic

## B) Potențialul de radon geogen – vârsta geologică

În ceea ce privește potențialul de radon geogen în funcție de vârsta geologică, în **Fig. 24** se poate observa că în zona de Cuaternar, predicția este pentru un potențial scăzut. O predicție a unui potențial puțin mai crescut este dată de grupa de vârstă Cretacic – Paleogen și Prebaikalian – Precambrian sup. Predicția pentru un potențial de radon mai crescut este dată de către grupa de vârstă geologică Precambrian sup. – Paleozoic inf., grupă în care au fost determinate și cele mai ridicate potențiale de radon geogen la nivel de mediană.

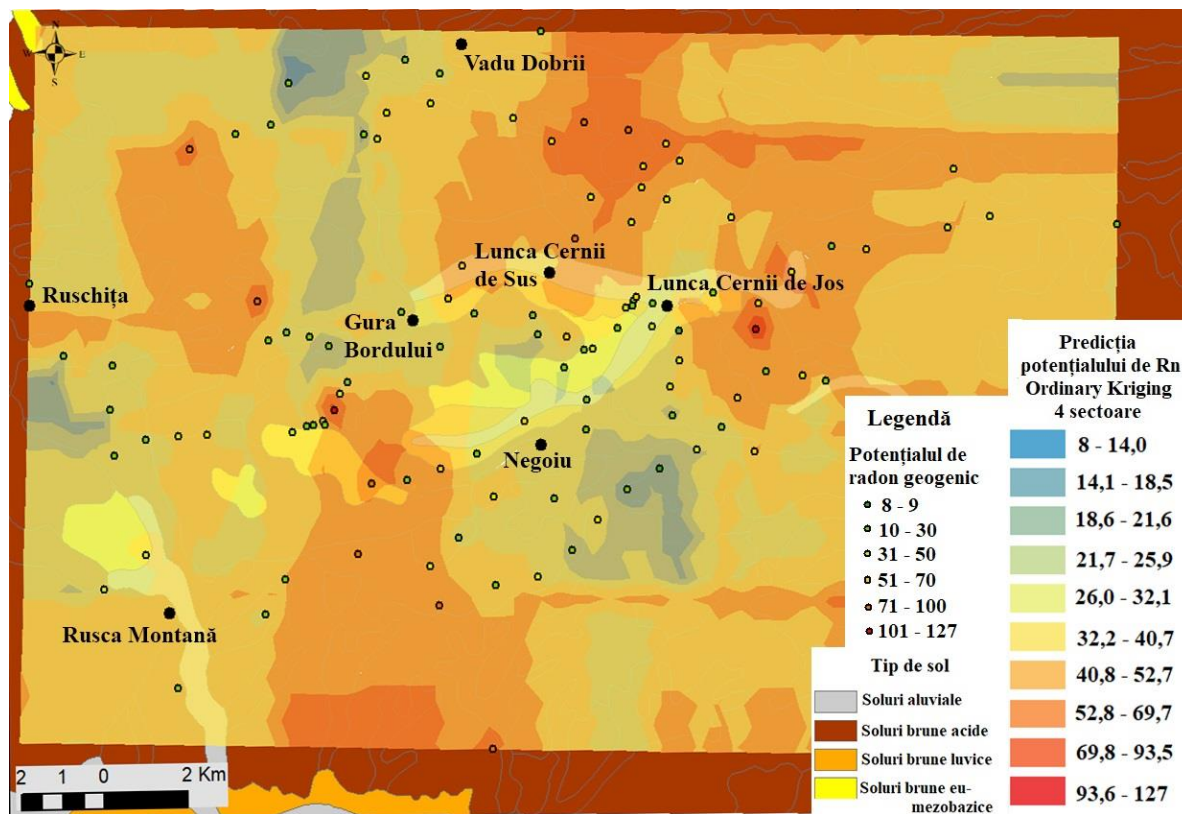


**Fig. 24.** Potențialul de radon geogen raportat la vârsta geologică

## C) Potențialul de radon geogen – pedologia zonei de studiu

În **Fig. 25** este prezentată harta predicției potențialului de radon geogen în funcție de pedologia zonei de studiu. Se poate observa că un potențial scăzut este atribuit zonelor cu soluri brune luvice. Cele mai ridicate potențiale de radon au fost determinate în solurile eumezobazice. Potențiale de radon geogen alternante au fost determinate în categoria solurilor brune acide: un potențial crescut a fost determinat în zona de E a localității Ruschița, în partea de N și E a localităților Lunca Cernii de Jos și Lunca Cernii de Sus, dar și în sudul localității Gura Bordului; un potențial scăzut a fost determinat în zona de V și N a localității Gura

Bordului, sudul localității Ruschița, vestul localității Vadu Dobrii și în jurul localității Negoiu, cu preponderență în zona SE.



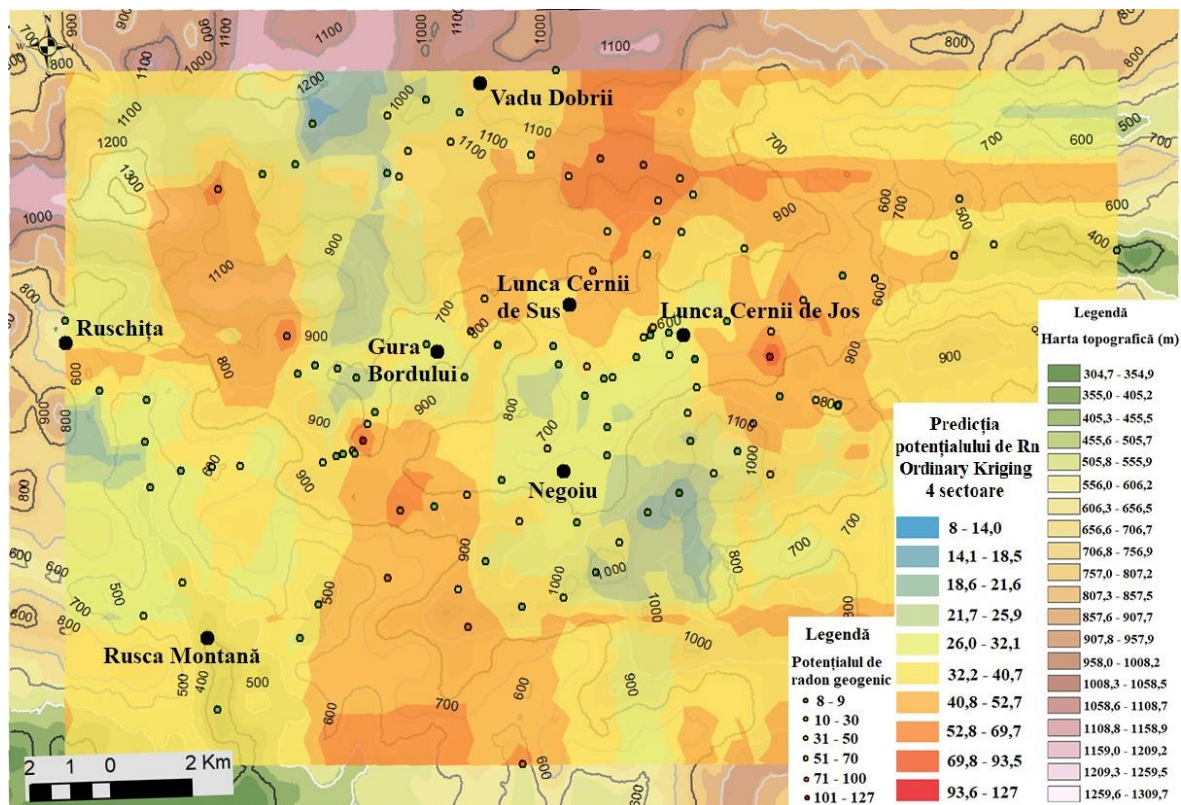
**Fig. 25.** Potențialul de radon geogen raportat la pedologia zonei de studiu

#### D) Potențialul de radon geogen – elevația zonei de studiu

Harta predicției potențialului de radon geogen în funcție de elevația zonei de studiu este prezentată în **Fig. 26**. Se poate observa că potențialul de radon geogen ridicat este determinat la altitudini de 900 – 1100 m. De exemplu, în partea de NV a zonei de studiu, potențialul de radon geogen ridicat este regăsit în jurul altitudinilor de 900 și 1100 m. La V de localitatea Negoiu, potențialul de radon ridicat este regăsit la altitudinea de 900 m. În partea de N a localității Lunca Cernii de Sus, potențialul de radon geogen este ridicat începând de la altitudinea de 900 m.

Un potențial de radon scăzut este determinat la altitudini mai mici de 900 m, însă există și excepții. De exemplu, în zona de SE a localității Negoiu, la altitudini de 1000 m, potențialul de radon geogen este scăzut, din cauza concentrației de activitate de radon scăzută și a permeabilității ridicate a solului. În partea opusă, la E de localitatea Lunca Cernii de Jos, potențialul de radon geogen este scăzut începând de la 700 m altitudine. În SV-ul localității

Vadu Dobrii, potențialul de radon este scăzut la altitudini de 1000 – 1200 m din cauza concentrației de radon scăzute.

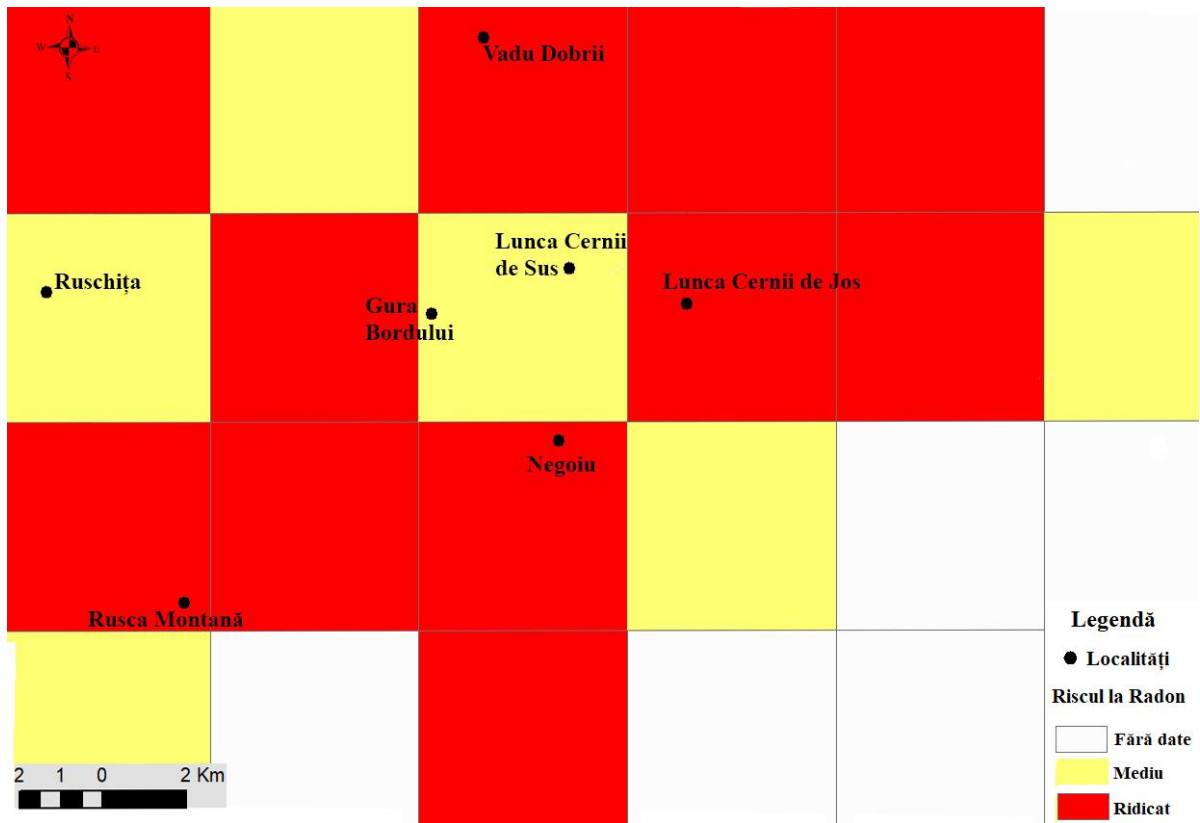


*Fig. 26. Potențialul de radon geogen raportat la elevația zonei de studiu*

### E) Potențialul de radon geogen în grid de 5 x 5 km

Fiind un domeniu de cercetare la început, studiile au raportat datele potențialului de radon geogen în diferite forme: pe regiune, la nivelul unității administrativ teritoriale, la nivel de formațiune geologică. În viitor, probabil, se va ajunge la un mod de raportare a datelor obținute pentru potențialul de radon geogen precum este cel pentru raportarea rezultatelor pentru concentrația de radon din interiorul locuințelor, și anume pe griduri de 10 x 10 km.

În lucrarea de față, datele pentru potențialul de radon geogen a fost raportat pentru griduri de 5 x 5 km, având în vedere suprafața limitată a zonei de studiu. Astfel, în **Fig. 27** este prezentată harta potențialului de radon geogen în griduri de 5 x 5 km. În celulele de culoare roșie potențialul de radon este ridicat ( $\geq 35$ ), iar în celulele de culoare galbenă potențialul este mediu ( $10 \leq \text{GRP} < 35$ ). În celulele de culoare albă nu sunt raportate date.



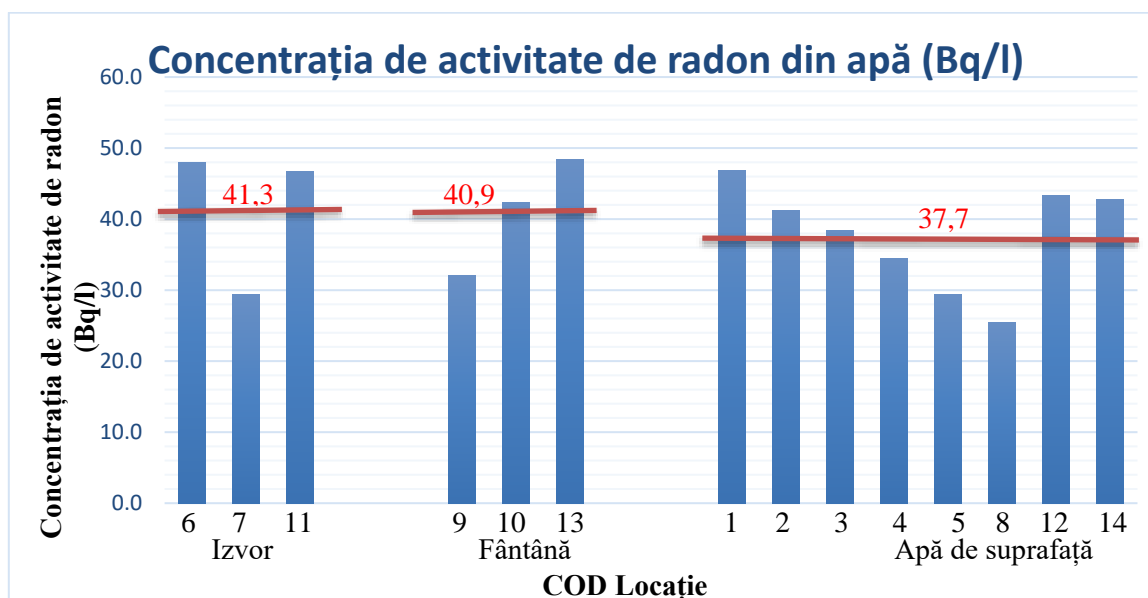
**Fig. 27.** Potențialul de radon geogen în grid de 5 x 5 km

## 4.5. Concentrația de activitate de radon și radium din apă

### 4.5.1. Concentrația de activitate de radon din apă

Cele 14 probe de apă au împărțite în 3 tipuri de apă: 8 au fost prelevate din ape de suprafață (râuri, pârâuri), 3 probe au fost din izvoare și 3 din fântâni.

În **Fig. 28** se observă concentrații relativ mai scăzute pentru apele de suprafață cu o medie aritmetică pentru toate corpurile de apă de 37,7 Bq/l, în comparație cu apa din izvoare (media aritmetică pentru cele 3 izvoare: 41,3 Bq/l), respectiv cea din fântâni (media aritmetică pentru cele 3 fântâni: 40,9 Bq/l). Totuși, concentrația cea mai ridicată de radon din apa de suprafață a fost determinată în cadrul punctului 1 cu o valoare medie de 46,9 Bq/l și o deviație standard de 2,5 Bq/l. Pentru acest corp de apă, concentrația maximă de radon determinată a fost de 50,1 Bq/l, iar cea minimă 44,8 Bq/l.



**Fig. 28.** Concentrația de activitate de radon în cele 14 probe și media aritmetică pentru apa din izvor, fântână și apa de suprafață

O atenție mai sporită a fost asupra zonei Sterminosu din arealul de studiu. Aici, în anii 1960, au avut loc lucrări miniere în vederea explorării și exploatării minereului de uraniu. Exploatarea nu a durat foarte mult timp, cauza cea mai probabilă fiind rentabilitatea scăzută privind valorificarea uraniului.

O cartare grafică a concentrațiilor de radon din apă se poate observa în **Fig. 29**. Concentrația de activitate de radon determinată în punctul de prelevare **1** a fost cea mai mare concentrație din această zonă ( $46,9 \pm 2,5$  Bq/l). Pentru proba de apă (*punctul 2*) prelevată din pârâul 1 a fost găsită concentrația de  $41,2 \pm 2,4$  Bq/l, concentrație mai mică decât concentrația

determinată în amonte râului Sterminosu. După revărsarea pârâului 1 în râul Sterminosu, în proba de apă cu nr. 3 a fost determinată o concentrație de  $38,4 \pm 1,7$  Bq/l. În proba cu nr. 4 prelevată de pe pârâul 2 a fost măsurată o concentrație de activitate de radon de  $34,5 \pm 1,4$  Bq/l. În final, concentrația de radon din proba cu numărul 5 este și cea mai scăzută dintre toate, având valoarea de  $29,4 \pm 1,2$  Bq/l.



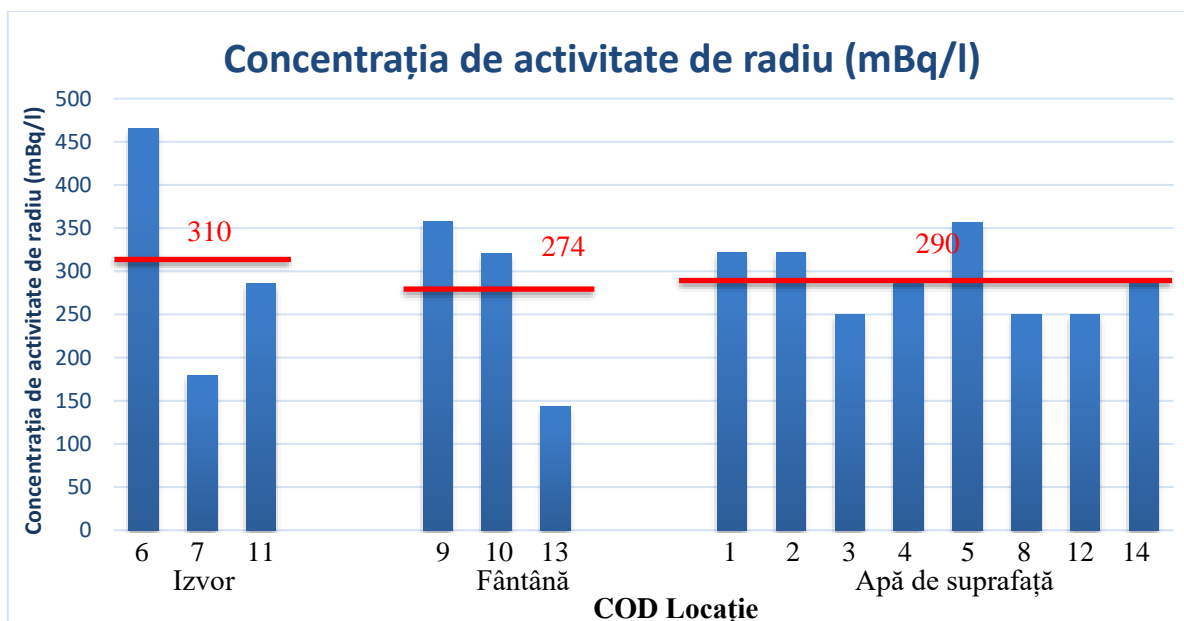
**Fig. 29.** Concentrația de activitate de radon în ape de suprafață în zona Sterminosu (Bq/l)

#### 4.5.2. Concentrația de activitate de radu din apă

Cea mai ridicată concentrație de radu ( $465 \text{ mBq/l} \pm 394 \text{ mBq/l}$ ) a fost măsurată în apa unui izvor. Concentrația cea mai scăzută determinată a fost de  $143 \text{ mBq/l} \pm 203 \text{ mBq/l}$  în apa unei fântâni.

În **Fig. 30** se pot observa concentrațiile de activitate de radu pentru fiecare locație grupate în funcție de tipul corpului de apă: izvor, fântână și apă de suprafață. Concentrațiile de radu cele mai ridicate au fost măsurate în izvoare cu o medie aritmetică de  $310 \text{ mBq/l}$ . Concentrațiile cele mai scăzute au fost determinate în apele fântânilor cu o medie de  $274 \text{ mBq/l}$ , iar în apele de suprafață a fost determinată o concentrație medie de  $290 \text{ mBq/l}$ .





**Fig. 30.** Concentrația de activitate de radiu în cele 14 probe și media aritmetică pentru apa din izvor, fântână și apa de suprafață

Tendința pentru concentrații ridicate atât pentru radon cât și pentru radiu doar în apele de izvor. Deși, au fost măsurate concentrații mai ridicate de radon în apele din fântâni (40,9 Bq/l) în comparație cu apele de suprafață (37,7 Bq/l), concentrațiile de radiu au fost ușor mai scăzute în apele din fântâni (274 mBq/l) față de apele de suprafață (290 mBq/l).

Concentrațiile de activitate de radiu din zona Sterminosu (**Fig. 31**) au fost determinate astfel: în primul punct de prelevare concentrația a fost de 322 mBq/l; o concentrație egală cu cea din primul punct a fost găsită și în al II-lea punct de prelevare (Pârâu 1); în punctul 3 de prelevare (în râul Sterminosul, aval de pârâul 1) a fost găsită o concentrație de radiu mai scăzută 250 mBq/l. În proba de apă prelevată din pârâul 2 (punctul 4) a fost determinată o concentrație de 286 mBq/l, iar în cel de-al V-lea punct de prelevare a fost măsurată concentrația de 357 mBq/l, fiind cea mai mare concentrație de radiu determinată în această zonă.



**Fig. 31.** Concentrațiile de activitate de radu în ape de suprafață în zona Sterminosu (mBq/l)

## CONCLUZII

Zona de studiu a munților Poiana Ruscă este caracterizată printr-un potențial mediu spre crescut al radonului geogen. În total, s-au investigat un minim de 738 de puncte de măsurare în cele 110 locații: în 34 de locații a fost determinat potențialul de radon în 15 puncte de măsurare, iar pentru celelalte locații în număr de 76, potențialul de radon geogen s-a determinat în 3 puncte de măsurare. Din cele 110 locații, în 44 de locații (40%) s-a determinat un potențial ridicat al radonului geogen, 64 de locații (58,2%) au indicat un potențial mediu și doar 2 locații (1,8%) au un potențial scăzut.

Concentrațiile activității de radon din zona studiată nu au reflectat o potențială corelație cu substratul geologic. Cele mai ridicate concentrații de radon au fost determinate în Seria de Dăbâca – Formațiunile șisturilor micacee cu intercalații de amfibolite, respectiv Formațiunea șisturilor cuarțitice sericitoase din Precambrian sup. – Paleozoic inf..

Permeabilitatea solului a zonei de studiu a fost crescută, raportându-ne la media aritmetică. Local, în cadrul Formațiunii șisturilor micacee cu intercalații de amfibolite, respectiv Formațiunii șisturilor cuarțitice sericitoase, permeabilitatea solului a fost cea mai scăzută din perimetrul zonei de studiu. Însă, după clasificarea permeabilității solului realizată de către Neznal et al. (2004), doar Formațiunea șisturilor micacee cu intercalații de amfibolite se încadrează în clasa medie a permeabilității solului,

Cuaternarul și grupa de vârstă Prabaikalian – Precambrian sup. sunt reprezentate de cele mai ridicate permeabilități ale solului, iar cele mai scăzute au fost măsurate în Precambrian sup. – Paleozoic inf.

Potențialul de radon geogen nu a variat foarte mult între diferitele substraturi geologice. Astfel, nu a fost determinată nicio corelație între potențialul de radon și geologia, pedologia și topografia zonei de studiu.

Seria de Dăbâca cu Formațiunea șisturilor cuarțitice sericitoase și cea a șisturilor micacee cu intercalații de amfibolite (Precambrian sup. – Paleozoic inf.) indică cel mai ridicat potențial din zona de studiu. Cele mai scăzute valori ale potențialului de radon geogen au fost determinate în Aluviunile din Cuaternar, potențial care se încadrează într-un risc mediu de radon.

Din punct de vedere pedologic, potențialul de radon geogen este cel mai ridicat în solurile eu-mezobazice, iar valorile cele mai scăzute pentru potențialul de radon au fost găsite pentru solurile brune luvice.

Majoritatea locațiilor unde a fost determinat un potențial ridicat de radon geogen au fost la altitudini cuprinse între 900 și 1000 m. Există și o excepție, în partea estică a localității Lunca Cernii de Jos potențialul de radon geogen ridicat se regăsește la o altitudine de 700 m. Prin statistica inferențială nu s-a putut determina o corelație între potențialul de radon geogen și elevația zonei de studiu.

Radioactivitatea apei potabile (izvoare și fântâni) din zona cercetată nu este ridicată. Concentrația maximă de radon măsurată în apă (48,4 Bq/l) a fost sub nivelul concentrației maxime admise de radon în apa potabilă (100 Bq/l). Radioactivitatea apei de suprafață (râuri și pârâuri) este crescută (concentrația maximă a radonului din apa de suprafață = 46,9 Bq/l), având concentrații aproximativ egale cu apa din izvoare și fântâni.

În prezent nu există o metodă unică de determinare a potențialului de radon geogen. Fiind un domeniu de cercetare la început, fiecare țară din Uniunea Europeană încearcă să dezvolte o hartă a potențialului de radon geogen în funcție de fundamentul geologic după propriile posibilități, cu aparatura existentă și resursa umană disponibilă. Din această cauză, sunt țări care realizează hărți ale concentrației de activitate de radon din sol și nu a potențialului de radon geogen în care este luată în calcul și permeabilitatea solului. Bineînțeles, pentru a calcula cât mai precis un potențial de radon geogen trebuie ținut cont de condițiile meteorologice, umiditatea relativă a solului, dar și de măsurători ale dioxidului de carbon și

metan. Aceste două gaze pot să antreneze radonul din sol și să-l aducă la suprafața solului, având rolul de purtător (carrier) al radonului în procesul de convecție care se manifestă în sol.

## **Direcții viitoare de cercetare**

Studiul potențialului de radon geogen este foarte complex. De la conținutul de radioizotopi în roca de bază, granulometria solului, până la condițiile atmosferice, toate acestea pot contribui la variația potențialului de radon geogen. În plus, în unele zone dioxidul de carbon și metanul pot să angreneze radonul geogen spre suprafața solului, astfel modificându-se exhalția de radon din sol.

Un studiu subsecvent, mai elaborat în ceea ce privește potențialul de radon geogen în funcție de substratul geologic, pe lângă concentrația de activitate de radon din sol și permeabilitatea solului, ar putea include:

- Determinarea radioizotopilor de uraniu și radiu;
- Prelevarea datelor meteorologice prin intermediul unei mini-stații meteo;
- Determinarea fluxului de dioxid de carbon, respectiv metan din punctele de prelevare a radonului;
- Determinarea umidității solului la nivelul prelevării probelor de gaz.

Toate acestea au un impact semnificativ asupra concentrației activității de radon din sol. De aceea, se dorește ca pe viitor, într-un proiect de cercetare postdoctorală, să se determine potențialul de radon geogen ținând cont de fluxul dioxidului de carbon, respectiv al metanului, a condițiilor meteorologice și a umidității solului.

Pornind de la concentrațiile de radon ridicate determinate în apele de suprafață, se dorește cercetarea mai detaliată a apelor din zona de studiu al acestei lucrări de doctorat. Această cercetare se va realiza printr-un număr mai crescut de probe prelevate din râurile și pâraiele zonei, dar și printr-o serie de măsurători efectuate lunar, păstrând același punct de prelevare pentru fiecare probă în parte. În plus, se dorește forarea unor puțuri de mică adâncime și la distanțe diferite față de râu/pârâu pentru a analiza variația concentrației de radon din apa freatică (puțuri) și apa de suprafață. Este cunoscut faptul că râul și apa freatică sunt într-o continuă relație de transport al apei (râu cu debit ridicat – râul alimentează acviferul, râu cu debit scăzut – acviferul alimentează râul). Astfel, radonul de poate analiza ca un marker de mediu, studiind circulația apelor freactice.

## REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

- Ameon, R. (2003). Le radon dans les stations thermales: une source d'exposition aux rayonnements ionisants. *Radioprotection*, 38(2), 201–215.
- Appleton, J. D. (2007). Radon: Sources, Health Risks, and Hazard Mapping. *Ambio*, 36(1), 85–89.
- Atanasiu, G. (1977). *Opere alese*. Ed. Academiei.
- Baskaran, M. (2016). *Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies*. Springer. ISBN: 978-3-319-21329-3.
- Burghel, B., Jenter, A., Cucos, A., Dicu, T., Moldovan, M., Papp, B., Szacsvai, K., Neda, T., Suci, L., Lupulescu, A., Malos, C., Floric, B., Baci, C., & Sainz, C. (2019). The FIRST large-scale mapping of radon concentration in soil gas and water in Romania. *Science of the Total Environment*, 669, 887–892. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.342>
- Cinelli, G., Tollefsen, T., Bossew, P., Gruber, V., Bogucarskis, K., De Felice, L., & De Cort, M. (2019). Digital version of the European Atlas of natural radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 196, 240–252. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.008>
- Ciotoli, G., Voltaggio, M., Tuccimei, P., Soligo, M., Pasculli, A., Beaubien, S. E., & Bigi, S. (2017). Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: A methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 166, 355–375. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.010>
- Cosma, C., Cucos (Dinu), A., & Dicu, T. (2013). Preliminary results regarding the first map of residential radon in some regions in Romania. *Radiation Protection Dosimetry*, 155(3), 343–350. <https://doi.org/10.1093/rpd/nct015>
- Cosma, C., & Jurcu, T. (1996). *Radonul si mediul inconjurator*. Ed. Dacia.
- Dubois, G., Bossew, P., Tollefsen, T., & De Cort, M. (2010). First steps towards a European atlas of natural radiation: status of the European indoor radon map. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(10), 786–798. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.03.007>
- Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom, (2013) (testimony of EURATOM 59).
- Feliu, M. D. (2022). *Improving the use of radium isotopes and radon as tracers of submarine groundwater discharge*. Institut de Ciencia I Tecnologia Ambientals.
- Frame, P. (1991). Natural Radioactivity in Curative Devices and Spas. *Health Physics*, 61(6), 80–82.
- Gherasi, N., Muresan, M., Lupu, M., Stancu, J., & Savu, H. (1968). *Harta solurilor României, Scara 1:200.000, L-34-XVII 25, Deva*. Institutul Geologic.

- Gruber, V., Bossew, P., De Cort, M., & Tollefsen, T. (2013). The European map of the geogenic radon potential. *Journal of Radiological Protection*, 33(1), 51–60. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/1/51>
- Hess, C., Vietti, M., Lachapelle, E., & Guillemette, J. (1990). Radon transferred from drinking water into house air. In *Radon, radium and uranium in drinking water* (pp. 51–67). Lewis Publishers.
- IARC. (1988). *Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans*.
- JRC. (2022, February 1). *Radiological Maps - European Commission*. Joint Research Centre. <https://remap.jrc.ec.europa.eu/Atlas.aspx>
- Kemski, J., Klingel, R., Siehl, A., & Stegemann, R. (2005). Radon transfer from ground to houses and prediction of indoor radon in Germany based on geological information. *Radioactivity in the Environment*, 7(C), 820–832. [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(04\)07103-7](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(04)07103-7)
- Kemski, J., Siehl, A., Stegemann, R., Valdivia-Manchego B A Kemski, M., & Veerhoff, K. &. (2001). Mapping the geogenic radon potential in Germany. *The Science of the Total Environment*, 272.
- Kobal, I., & Renier, A. (1987). Radioactivity of the atomic spa at Podcetrtek, Slovenia, Yugoslavia. *Health Physics*, 53, 307–310.
- Kojima, S., Cuttler, J. M., Inoguchi, K., Yorozu, K., Horii, T., Shimura, N., Koga, H., & Murata, A. (2019). Radon Therapy Is Very Promising as a Primary or an Adjuvant Treatment for Different Types of Cancers: 4 Case Reports. *Dose-Response*, 17(2), 155932581985316. <https://doi.org/10.1177/1559325819853163>
- Lupulescu, A., Baciuc, C., Dicu, T., Burghel, B.-D., & Cucos, A. L. (2023). Determining the Geogenic Radon Potential in Different Layouts and Numbers of Points. *Atmosphere*, 14(4), 713. <https://doi.org/10.3390/atmos14040713>
- Mattia, M., Tuccimei, P., Soligo, M., & Carusi, C. (2020). Radon as a Natural Tracer for Monitoring NAPL Groundwater Contamination. *Water*, 12(12), 3327. <https://doi.org/10.3390/w12123327>
- Mikšová, J., & Barnet, I. (2002). Geological support to the national radon programme (Czech Republic). *Bulletin of the Czech Geological Survey*, 77(1), 13–22.
- Legea nr. 301/2015 privind stabilirea cerințelor de protecție a sănătății populației în ceea ce privește substanțele radioactive din apa potabilă*, (2015) (testimony of Monitorul Oficial).
- HG 526/2018 - Planul Național de Acțiune la Radon*, (2018) (testimony of Monitorul Oficial).
- Nero, A. (1989). Earth, air, radon and home. *Physics Today*, 42, 32–39.
- Nero, A., Gadgil, A., Nazaroff, W., & Revzan, K. (1990). Indoor radon and decay products: concentrations, causes and control strategies. *Lawrence Berkeley Laboratory. Technical Report. LBL-27798*.
- Neznal, M., Neznal, M., Matolin, M., Barnet, I., & Miksova, J. (2004). *The new method for assessing the radon risk of building sites*. Czech Geological Survey.

- Prichard, H. (1987). The Transfer of Radon from Domestic Water to Indoor Air. *Journal AWWA*, 79(4), 159–161.
- Quindos Poncela, L. S., Sainz Fernandez, C., Fuente Merino, I., Gutierrez Villanueva, J. L., & Gonzalez Diez, A. (2013). The use of radon as tracer in environmental sciences. *Acta Geophysica*, 61(4), 848–858. <https://doi.org/10.2478/s11600-013-0119-z>
- Șandor, G., Dincă, G., Peic, T., & Stoici, D. (1992). *Proc. of IRPA VIII Congress*. Proc. of IRPA VIII Congress.
- Soto, J., Fernandez, P. L., Quindos, L. S., & Gomez-Arozamena, J. (1995). Radioactivity in Spanish spas. *Science of the Total Environment*, 162, 187–192.
- Soto, J., & Gomez, J. (1998). Radon Balneology in Spain. *International Environmental Consultancy Newsletter*, 4, 48–55.
- Stoici, S., & Tătaru, S. (1988). *Uraniul și Thoriul. Seria substanțe minerale utile*. Ed. In Tehnică.
- Tollefsen, T., Gruber, V., Bossew, P., & De Cort, M. (2011). Status of the European indoor radon map. *Radiation Protection Dosimetry*, 145(2–3), 110–116. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr072>
- [www.radon.eu](http://www.radon.eu). (2022). *Equipment \* RADON.eu*. <https://radon.eu/rm2.html>
- [www.smartradon.ro](http://www.smartradon.ro). (2023). *SMART-RAD-EN - Home*. <https://www.smartradon.ro/>