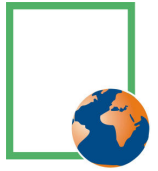




**UNIVERSITATEA "BABEŞ-BOLYAI", CLUJ-NAPOCA
FACULTATEA DE ŞTIINŢA ŞI INGINERIA MEDIULUI**



TEZĂ DE DOCTORAT

- Rezumat -

***RADONUL ŞI FLUXUL DE RADON DIN SOL.
APLICAŢII ÎN MEDIU, GEOLOGIE ŞI GEOFIZICĂ***

Doctorand:

PAPP BOTOND

Conducător ştiinţific:

Prof. Univ. Dr. CONSTANTIN COSMA

CLUJ-NAPOCA

- 2011 -

Studiile discutate în cadrul tezei de față au fost efectuate în două stagii de doctorat:

- în trecut, la Universitatea Eötvös Loránd (ELTE), Facultatea de Științe (TTK), Budapesta, Ungaria, sub coordonarea Prof. Dr. Ádám Kiss și Conf. Dr. Ákos Horváth și, recent, la Universitatea Babeș-Bolyai, Facultatea de Știința și Ingineria Mediului, Cluj-Napoca, sub conducerea Prof. Univ. Dr. Constantin Cosma.

Suportul financiar al celei de al doilea stagiu a fost sprijinit de către PROGRAMUL OPERAȚIONAL SECTORIAL PENTRU DEZVOLTAREA RESURSELOR UMANE 2007-2013, Contract POSDRU 6/1.5/S/3 - "Studii doctorale: prin știință spre societate", căruia sunt foarte recunoscător.

Cuprins

Abstract	3
1. Introducere	3
2. Metoda aplicată pentru măsurători de radon în sol	7
2.1. Exercițiu de intercomparare de măsurători de radon în sol, RIM 2010	8
3. Metodă de măsurare a permeabilității solului	10
3.1. Etalonarea instrumentului de măsurare a permeabilității solului	12
4. Aplicații ale studiilor de radon în mediu, geologie și geofizică	14
4.1. Studii de radon cu aplicații în evaluarea riscului de radon din sol	14
4.1.1. Metodă de evaluare a riscului de radon din sol sau a locurilor de clădire	15
4.1.2. Legătura dintre radonul din locuințe și radonul din sol și materialul de construcție în zona uraniferă Băița-Ștei	18
4.2. Studii de radon în sol cu aplicații în geologie	23
4.2.1. Studiu de radon și toron în zona postvulcanică Harghita și legătura cu localizarea zonei de falii	24
4.2.2. Studiu de radon pe falia Peceneaga-Camena (Dobrogea) și legătura cu localizarea faliei	30
4.3. Studii de radon în sol cu aplicații în geofizică	34
4.3.1. Metodă de determinare a unor parametri geofizici prin măsurători de radon în foraje ale unor formațiuni geologice	34
4.3.2. Modelul matematic de determinare a parametrilor geofizici și evaluarea rezultatelor	39
5. Concluzii generale	43
6. Bibliografie selectivă	47

Cuvinte cheie:

- | | |
|-----------------------------|-----------------------|
| - radioactivitate naturală, | - potențial de radon, |
| - radon în sol, | - zonă de risc, |
| - flux de radon din sol, | - falii, |
| - permeabilitatea solului, | - toron, |
| - risc de radon, | - geofizică |

Abstract

Scopul principal al tezei este aplicarea studiilor de radon și flux de radon din sol în mediu, geologie și geofizică. *Capitolul I* prezintă proprietățile radonului, sursele, generarea în sol și roci, precum și prezența radonului în diferiți factori de mediu: atmosferă, aer de interior, respectiv apă. *Capitolul II* prezintă principalele procese de migrație al radonului în sol (prin difuzie și advecție), precum și transportul către atmosferă. În acest capitol este descris deasemenea modelul general de transport al radonului din sol, în scopul determinării fluxului terestru de radon, pe baza rezultatelor măsurătorilor și calculelor. Metodele de măsurare al radonului în sol aplicate în aceste studii sunt prezentate în *capitolul III*, prin descrierea unei metode de măsurare a concentrației de radon din sol, și permeabilitatea solului. *Ultimul capitol IV* descrie în detaliu studiile de radon în sol cu aplicații în mediu ce dau ca rezultat **evaluarea riscului de radon** cu determinarea potențialului de radon din sol. Aplicațiile în geologie și geofizică dau ca rezultat **identificarea și localizarea faliilor tectonice și determinarea parametrilor geofizici ai formațiunilor geologice**, prin rolul de „element de urmă” al radonului.

1. INTRODUCERE

O componentă importantă a radioactivității naturale din scoarța terestră este **radonul** (^{222}Rn). Fiind un gaz nobil și având un timp de viață relativ lung, are o mobilitate mare de a parcurge distanțe considerabile în diferite medii geologice. Radonul este prezent peste tot în concentrații foarte diferite atât în roci și sol, în apele de suprafață și de adâncime, cât și în atmosfera exterioară și interiorul locuințelor. Concentrațiile de radon în mediile geologice depind în principal de procesele de migrație (difuzie și advecție) și de cantitatea de radon părinte, izolat în grăunțele mineral din roci și sol. Migrația ascendentă a radonului în sol este facilitată de prezența faliilor tectonice cu sau fără contribuția gazului purtător, CO_2 [*Etiopie and Martinelli, 2002*]. În atmosferă ajunge difuzând spre suprafață, această exhalatie formând fluxul de radon al scoarței terestre [*Ristoiu et al., 1995*].

Radonul și fluxul de radon din sol sunt folosite ca indicatori pentru unele aplicații ca evaluarea riscului prin determinarea potențialului de radon al solului [*Cosma, Papp, et al., 2010*], identificarea faliilor [*Papp et al., 2010*], respectiv în aplicarea modelelor de migrație în

sol și în medii geologice [Etiopie and Martinelli, 2002] și transportul către atmosferă și interiorul locuințelor [Rogers and Nielson, 1991].

Există cel puțin trei aspecte importante în ceea ce privește studiile legate de radon. Un prim aspect este legat de prezența radonului și radiului în apele subterane (fântâni, izvoare, ape minerale, ape geotermale, etc). Pe lângă cunoașterea dozei de radiații primite de populație prin folosirea acestor surse de apă (prin indigestie, tratament balnear sau inhalarea radonului emanat) [Szabo, 1978; Cosma et al., 2008; Moldovan et al., 2009], cunoașterea conținutului de radon din apele subterane și geotermale este de mare interes în studii de geofizică [Cosma et al., 1996 a,b; Horváth et al., 2000; Roba et al., 2010]. Al doilea aspect este legat de potențialul de radon din sol și fluxul de radon de la suprafața solului. În legătură cu acesta, sunt importante eventualele anomalii care pot pune în evidență aglomerări de substanțe radioactive sau prezența unor falii, caz în care fluxul de radon din sol este relativ ridicat [Cosma et al., 1996 a,b]. Al treilea aspect foarte important este legat de radonul din interiorul locuințelor. Dacă în aerul exterior concentrația medie de radon este de 4-8 Bq·m⁻³, depinzând foarte mult de condițiile geologice și meteorologice, în interiorul locuințelor acesta poate să producă prin acumulare valori normale de 20-80 Bq·m⁻³, ducând în unele cazuri la valori de ordinul de mii de Bq·m⁻³ [Cosma et al., 2009]. În cazul concentrațiilor de interior mari, sursele principale ale radonului sunt solul și materialele de construcții care conțin acumulări de materiale radioactive sau steril de uraniu în zone uranifere, considerate zone cu risc de radon „radon prone area” [Sandor et al., 1999; Saintz et al., 2009].

Valori mărite se pot observa de asemenea în cazul lucrărilor din subteran, din minele de uraniu sau în industria materialelor fosfatice, etc. Studiile efectuate pe diferite grupuri de mineri au pus în evidență o corelație sigură între concentrația de radon și riscul de cancerul pulmonar [Dinu A, 2008]. Astăzi, sunt în curs de desfășurare studii epidemiologice (SERTIR, 2008) precum și Proiecte Europene Comune (POSCCE, 160/2010) care caută să evidențieze legătura între riscul de cancer pulmonar și concentrația de radon, chiar în cazul unor concentrații normale de interior de 40-300 Bq·m⁻³ [Cosma et al., 2009]. Acest al treilea aspect formează principalul domeniu de desfășurare a majorității cercetărilor asupra radonului.

Pe lângă aceste aspecte importante ale studiilor legate de radon, un alt mare câmp de cercetare constituie aplicațiile radonului în probleme de geofizică, unde un aspect important este rolul de element de urmă „trace element” sau element de monitorizare, care poate da informații despre proprietățile geofizice ale formațiunilor geologice [Papp et al., 2008]. O altă aplicație importantă este utilizarea unor tehnici de monitorizare în studiul erupțiilor vulcanice

[Gasparini and Mantovani, 1978; Imme et al., 2006], și a activităților seismice, unde prin monitorizarea variațiilor în concentrația de radon în foraje și ape subterane, acestea pot fi aplicate în prognoza cutremurelor de pământ [Igarashi et al. 1995; Yang et al. 2005].

Scopul cercetărilor în legătură cu radonul a fost aplicarea unor metode de măsurare a radonului și fluxului de radon din sol în studiul mediului, geologiei și geofizicii, care sunt prezentate în teză pe capitole. Metodele aplicate dau ca rezultat evaluarea riscului de radon prin determinarea potențialului de radon din sol, identificarea și localizarea direcției unor falii tectonice și determinarea unor parametrii geofizici ai formațiunilor geologice. Aceste studii au la bază o bibliografie vastă în legătură cu radonul, și iau în considerare diferitele aspecte de migrație și transport către atmosferă, respectiv comportarea acestui element în diferiți factori de mediu.

Teza este structurată pe șase capitole, după cum urmează:

Primul capitol analizează succint proprietățile radonului, sursele radonului din sol și scoarța terestră, generarea radonului în sol și în roci, respectiv prezența radonului în diferiți factori de mediu: aer, interiorul locuințelor, apă și subteran. În acest capitol se insistă asupra diferitelor nivelele de concentrații care se pot crea în acești factori de mediu.

Al doilea capitol prezintă pe larg mecanismele de migrație al radonului în sol și transportul acestuia către atmosferă, bazate pe rezultate ale măsurătorilor de concentrații de radon și flux de radon din sol. Sunt introduse caracteristicile principale ale solului, și sunt tratate principalele procese de migrație prin difuzie și advecție. De asemenea, în acest capitol este prezentat în detaliu modelul general de transport al radonului în sol prin descrierea ecuației generale de transport. Capitolul se încheie cu prezentarea diferitelor metode de rezolvare a ecuației de transport prin aproximație, insintând aici pe diferitele valori ale fluxului de radon obținute prin măsurători și calcule teoretice.

Capitolul trei abordează pe larg metodele de măsurare a radonului și fluxului de radon din sol, prin descrierea metodelor instantanee și continue de măsurare a radonului în sol, care se bazează pe diferitele tehnici de măsurare a radonului. Acest capitol conține prezentarea metodei de măsurare a radonului în sol care va fi folosit în studiile prezentate în capitolele următoare, și prezentarea unei metode speciale de măsurare a permeabilității solului, care va fi folosit în studiul prezentat în capitolul patru. Este deasemenea prezentată și o participare la o intercomparare internațională de măsurători de radon în sol.

Capitolul patru prezintă aplicațiile concrete ale studiilor de radon în mediu, geologie și geofizică. Acest capitol este împărțit în trei subcapitole, din care primul subcapitol prezintă *studiile de radon cu aplicații în mediu*, în viziunea *evaluării riscului de radon din sol*, cu determinarea potențialului de radon al solului. În prima parte al acestui subcapitol sunt prezentate metodele de evaluare a riscului de radon din sol în comparație cu o metodă a cehilor de evaluare a riscului de radon în locul unei case, prin măsurarea concentrației de radon din sol și a permeabilității solului. Partea a doua a acestui subcapitol prezintă evaluarea riscului de radon din sol și determinarea exhalăției de radon din materialul de construcție din zona uraniferă Ștei-Băița. Aceste rezultate se bazează pe rezultatele obținute din studiile de radon de interior, efectuate în locuințele din zonă, declarată zonă de risc, „radon prone area”. Subcapitolul doi prezintă *studiile de radon cu aplicații în geologie*, unde migrația ascendentă a gazelor din sol spre suprafață este favorizată și controlată de falii tectonice și, în consecință, studiile de radon se pot utiliza în *identificarea și localizarea direcției faliilor*. În prima parte a acestui subcapitol este prezentat un studiu de radon și toron în zona postvulcanică Harghita, efectuat în zona de mofete și izvoare de ape minerale din Băile Harghita (Munții Harghita), prin măsurători sistematice de radon și toron în sol. A doua parte a acestui subcapitol prezintă rezultatele unor măsurători de radon în sol pe zona de falie Peceneaga-Camena (Dobrogea), bazat pe cercetări actuale de geodinamică a faliei, efectuat de către Institutul de Geodinamică din București. Cel de al treilea subcapitol prezintă aplicații ale *studiilor de radon în geofizică*, unde se pune accent pe *rolul de „element de monitorizare” al radonului*. Prima parte al acestui subcapitol prezintă în detaliu metoda de determinare a unor parametri geofizici prin măsurători de acumulare prin difuzie al radonului, în foraje închise ale unor formațiuni geologice. Cea de a doua parte prezintă un model matematic de determinare a parametrilor geofizici, bazat pe măsurătorile de acumulare prin difuzie. Rezultatele măsurătorilor și calculele teoretice dau informații asupra parametrului de difuzie al radonului în mediul geologic, care determină permeabilitatea mediului pentru gaze. Ultima parte al acestui subcapitol prezintă verificarea reproductibilității metodei de determinare a parametrului de difuzie în alte foraje de sol.

Partea finală a tezei conține concluziile generale formulate pe baza tuturor rezultatelor obținute în urma studiilor de radon din sol.

2. METODA APLICATĂ PENTRU MĂSURĂTORI DE RADON ÎN SOL

Metoda de măsurare a concentrației de radon din sol se bazează pe prelevarea de probe de gaz din sol și măsurarea concentrației de ^{222}Rn cu detectorul de radon și toron LUK3C. Acest detector a fost dezvoltat în special pentru măsurători de radon din sol, și determină concentrația de radon relativ repede (din dezintegrarea alfa al ^{222}Rn și produșilor). Tehnica de măsurare se bazează pe tehnica de scintilație cu celule Lucas, cu volum de 145 mL, și având ca material scintilator ZnS (depus pe peretele interior al celulei). Eficiența acestei tehnici este de $2,2 \text{ imp}\cdot\text{sec}^{-1}$ la 1 Bq activitate de radon depus în celula Lucas, atunci când radonul este în echilibru cu produșii de dezintegrare [Plch 1997].

Pentru extracția gazului din sol se folosește o sondă de extracție simplă (țeavă din oțel cu lungimea $D=1\text{m}$, și diametrul exterior $d=1\text{cm}$), care se introduce în sol la o anumită adâncime. Pentru a crea un spațiu activ în capătul din sol al sondei, acesta se ridică cu câțiva cm. Pentru prelevarea de probe de gaz din sol se folosește o seringă Janet cu volum de 150 mL (egal cu volumul celulei Lucas). Proba de gaz prelevată se introduce în celula detectorului cu ajutorul unei tehnici de vid preliminar. Sistemul de prelevare de probe de gaz din sol și cel de introducere al acestuia în detector este prezentat în fig.2.1.

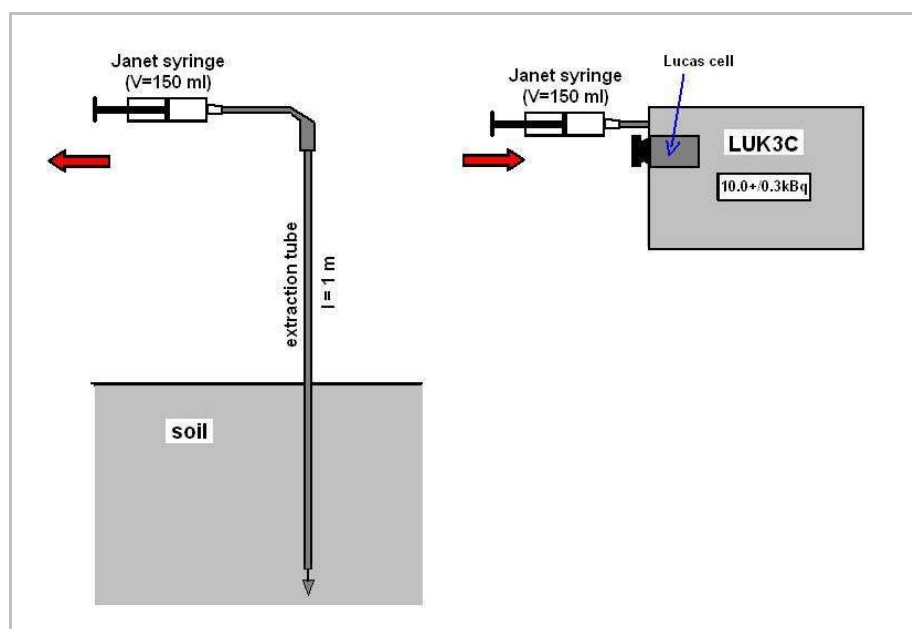


Fig.2.1. Schema sistemului de prelevare de gaz din sol și introducerea acestuia în celula Lucas al detectorului LUK3C pentru măsurarea concentrației de radon din sol.

Principiul de măsurare a activității radonului este în separarea impulsurilor ce provin din dezintegrarea alfa al Rn , de numărul de impulsuri totale alfa ($\text{Rn}+\text{Tn}$). Deoarece timpul de

înjumătățire al T_n (55,6 sec) este mult mai scurt decât cel al R_n (3,82 zile), T_n se descompune efectiv în 5 min. În acest interval de timp de întârziere (delay time) detectorul nu măsoară. După acest timp, detectorul efectuează câțiva măsurători de rată de impulsuri (între 1 și 10) provenite din dezintegrarea R_n din celula Lucas. Procesul de măsurare se termină când eroarea statistică ajunge sub 5%. În cele din urmă, detectorul determină o concentrație medie de R_n (corectat de valoarea de fond al celulei) și o valoare estimativă pentru concentrația de T_n care se determină din totalul de impulsuri (R_n+T_n) minus media impulsurilor de R_n (corectat deasemenea de fondul măsurătorii). Timpul total estimat pentru o măsurătoare este de max. 10 min [Barnet et al., 2008; Neznal et al., 2004].

2.1. Exercițiu de intercomparare de măsurători de radon în sol, RIM 2010

Metoda de măsurare a concentrației de radon din sol a fost verificat la Exercițiul de Intercomparare de Măsurători de Radon în sol (RIM 2010), Praga, 20-21.sept.2010. Rezultatele intercomparării au fost incluse într-un certificat emis de către organizatorii exercițiului, „*Protocol on the evaluation of comparison measurement of radon (^{222}Rn) activity concentration in soil gas at reference sites Cetyne, Bohostice and Buk (Czech Republic)*”. Exercițiul de intercomparare de radon la locurile de referință Cetyne, Bohostice și Buk din Republica Cehia a fost organizat în cadrul conferinței “*10th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping*”, în 22-25.sept.2010, Praga. Administratorul locurilor de referință de radon este Facultatea de Științe, Universitatea Charles din Praga. Fiecare loc de referință implică 15 puncte de măsurătoare stabilite într-o grilă de 5x5 m, iar adâncimea de extracție a gazului din sol a fost de 0,8 m.

Tipul de sol al locurilor de referință este foarte omogen, și este de la sol argilos la cel nisipos, iar roca de bază este rocă metamorfică la Cetine și Bohostice, iar la Buk este rocă vulcanică. Permeabilitatea solului cuprinde toate cele trei categorii, mică, medie și mare. Concentrația medie de radon estimat de către administratorii locurilor de referință este de: **32 kBq·m⁻³ pentru Cetyne, 47 kBq·m⁻³ pentru Bohostice și 146 kBq·m⁻³ pentru Buk.**

Rezultatele exercițiului de intercomparare, RIM 2010

Valorile medii a concentrațiilor de radon obținute de grupul nostru la cele trei locuri de referință (in cele 15 puncte al fiecarui loc de referință) sunt: **37,8 ± 3,8 kBq·m⁻³ pentru Cetyne, 52,3 ± 4,9 kBq·m⁻³ pentru Bohostice și 132,8 ± 23,9 kBq·m⁻³ pentru Buk.**

Testul exercitiului de intercomparare de radon la locurile de referință

Evaluarea rezultatelor măsurătorilor de intercomparare de radon în sol se bazează pe compararea rezultatelor individuale raportate de către un grup participant cu rezultatele celorlalte grupuri participante și cu o bază de date a unui loc de referință dat. Această evaluare s-a făcut cu un program de calcul ce cuprinde trei teste de statistică.

Testul 1 și 2 efectuează compararea rezultatelor unui grup participant cu rezultatele celorlalte grupuri, care efectuează măsurători în aceeași zi și în aceleași condiții climatice. Testul 1 calculează diferențele dintre concentrația de radon dintr-un singur punct ($N=15$) al locului de referință, raportat de către un grup participant, și mediana valorilor de radon raportat de către toate grupurile participante, care măsoară radonul în punctul identic, și în aceeași zi. Testul 2 determină regresia liniară $y = a + b \cdot x$ dintre concentrația de radon în toate punctele din cele trei locuri de referință ($N=3 \times 15=45$ puncte) raportat de către grupul participant (y), și mediana datelor de radon pentru punctele relevante, raportat de către administrator și celelalte grupuri (x) care măsoară în aceeași zi. Testul 3 compară mediile raportate de către un grup și mediile tuturor grupurilor din baza de date al unui loc de referință. Baza de date al locurilor de referință este dezvoltat treptat, și folosește rezultatele grupurilor care au trecut testul din 2000 până în prezent. În prezent, baza de date conține date al 180 de grupuri participante, care au trecut testul statistic.

După testul 1, valorile în afara intervalului de încredere la cele trei locuri de referință sunt: **4/14 pentru Cetyně, 5/15 pentru Bohostice, și 6/15 pentru Buk**. După testul 2, valorile parametrilor fitării liniare sunt: **$a = 0,599$ și $b = 0,984$** , cu coeficientul de corelație **$R^2 = 0,982$** . După testul 3, rezultatele intercomparării dintre media datelor grupului nostru și media datelor tuturor grupurilor participante ce include și baza de date din 2000 până în prezent, pentru cele trei locuri de referință sunt: **0,96 pentru Cetyně, 0,99 pentru Bohostice, și 1,041 pentru Buk. Media acestor valori este 0,997.**

Concluzii

Testul 1 și 2 (testuri orientative bazate pe compararea cu celelalte grupuri) arată un acord bun al valorilor grupului nostru cu valorile celorlalte grupuri participante la exercitiul de intercomparare. Testul 3 (testul decisiv bazat pe compararea cu baza de date al locurilor de referință) arată un acord bun între valorile medii ale noastre cu datele tuturor grupurilor care au măsurat la locurile de referință din anul 2000 și au promovat testul ($N=180$) și formează baza de date al locurilor de referință. După testul decisiv 3, comparațiile îndeplinesc testul de

criteriu și valoarea estimată a concentrației de radon din sol de către grupul nostru este foarte bine acceptat, cu o diferență relativă de 0,997 dintre determinările grupului nostru și al altor grupuri participante.

3. METODĂ DE MĂSURARE A PERMEABILITĂȚII SOLULUI

Permeabilitatea este un parametru important în procesele de transport al gazelor în sol, care influențează în mare măsură fluxul sau exhalatia de radon din sol. Permeabilitatea solurilor și rocilor este unul dintre cei mai importanți factori care determină posibilele surse de radon al unui loc de clădire, prin urmare un important parametru pentru clasificarea riscului de radon al locurilor de case. Metodele utilizate pentru clasificarea riscului se bazează pe măsurarea concentrației de radon din sol, și a permeabilității solurilor [Barnet et al., 2008].

Determinarea in situ a permeabilității solului poate fi efectuat printr-o metodă specială a cărui principiu se bazează pe măsurarea debitului de curgere a unei cantități de apă dintr-un tub de plastic, care este conectat direct la sonda de extracție a gazului din sol. Principiul instrumentului constă în capacitatea de extracție a gazului din sol cu o presiune negativă, printr-o sondă specială cu un capăt activ constant. Zona activă este creată în capătul din sol al sondei (la o adâncime dată) prin împingerea vârfului din sol la o adâncime dată. Schema dispozitivului pentru măsurarea permeabilității este prezentat în fig.3.1.

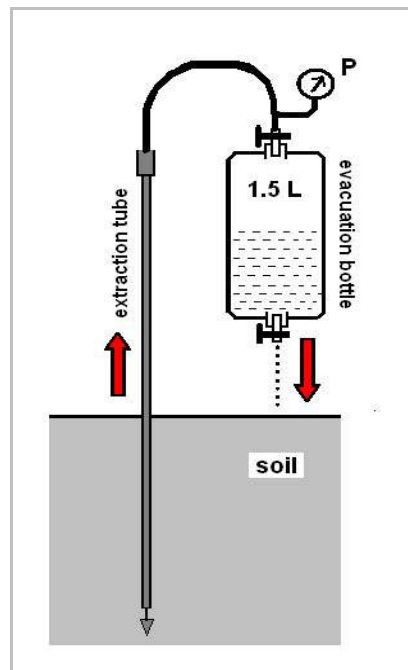


Fig.3.1. Sistemul de măsurare a permeabilității solului. Capătul superior al tubului de plastic este conectat direct la sonda de extracție din sol.

Debitul de curgere al coloanei de apă (q) depinde de permeabilitatea solului (k), astfel că pentru permeabilități mari al solului debitul este mare, respectiv pentru permeabilități mici, debitul este mic. Debitul variază între 0,036 și 7,9 L·min⁻¹. Astfel, debitul de curgere al apei (q) este direct proporțional cu permeabilitatea solului (k).

Pentru măsurarea permeabilității se consideră solul omogen și izotrop, iar gazul din sol incompresibil (diferențele de presiune sunt cu puțin mai mici decât presiunea atmosferică). Dependența permeabilității de debitul de extracție cu metoda specială este descris prin:

$$k = \frac{Q}{\Delta p} \cdot \frac{\mu}{F} \quad (3.1),$$

unde, $k[\text{m}^2]$ este permeabilitatea solului pentru gaze, $Q[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ este debitul de extracție a gazului, $\mu[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ este vâscozitatea dinamică a aerului ($=1,75 \cdot 10^{-5}$ Pa·s, la 10°C), $\Delta p[\text{Pa}]$ este diferența de presiune dintre nivelul capătului de jos al zonei active și capul sondei din sol, iar $F[\text{m}]$ este factorul de formă al sondei (ce depinde de geometria sondei).

Punctul critic al acestei metode este determinarea factorului de formă $F(L, d, D)$ al sondei. Soluții aplicabile sunt descrise în [Damkjaer and Korsbech, 1992; Mosley et al., 1996; Barnett et al., 2008; Radon-Jok, manual], iar formula rezultantă este:

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln\left(\frac{2 \cdot L}{d} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot D - L}{4 \cdot D + L}}\right)} \quad (3.2)$$

unde, L [m] este lungimea spațiului activ al capului sondei, d [m] este diametrul secțiunii active al sondei, D [m] este adâncimea de la suprafață, în aproximația $L \gg d$.

3.1. Etalonarea instrumentului de măsurare a permeabilității solului.

Etalonarea instrumentului pentru măsurarea permeabilității solului constă în studierea în laborator a dependenței parametrilor instrumentului: debit de curgere și presiune în funcție de timpul de extracție a gazului din sol. Pentru studierea dependenței parametrilor instrumentului am folosit tubul de plastic (cu volum $V \approx 1,5$ L) echipat cu cei doi robineti, cu un robinet cu reglare sensibilă pentru simularea permeabilității și un manometru pentru măsurarea presiunii negative ce se creează în tubul de plastic.

Metoda de etalonare se bazează pe măsurarea următorilor parametri: timpii intermediari de scurgere (t_i) corespunzând diferitelor volume (V_i) la diferitele diviziuni de pe tubul de plastic, și presiunea negativă (p_i) ce se exercită în tub, măsurat cu manometrul. Au

fost efectuate măsurători pentru 11 deschideri ale robinetului sensibil care simulează permeabilitatea, fiecare set de măsurători repetându-se de trei ori. Citirea parametrilor a fost efectuată conform diviziunilor de pe tub, corespunzător volumelor (V_i), din 300 în 300 mL.

Au fost calculate apoi raporturile (q/p) pentru diferite deschideri al robinetului sensibil, calculându-se debitele (q_i) și presiunile (p_i) pentru fiecare diviziune, și raporturile corespunzătoare (q_i/p_i). Pentru cele cinci diviziuni de pe tub, se calculează o medie a raportului (q/p)_m și o deviație standard $\Delta(q/p)$ _m. În fig. 3.2 este reprezentat grafic dependența (q/p)_m în funcție de timpul de curgere a apei din tub (t_m) pentru un volum de apă (V).

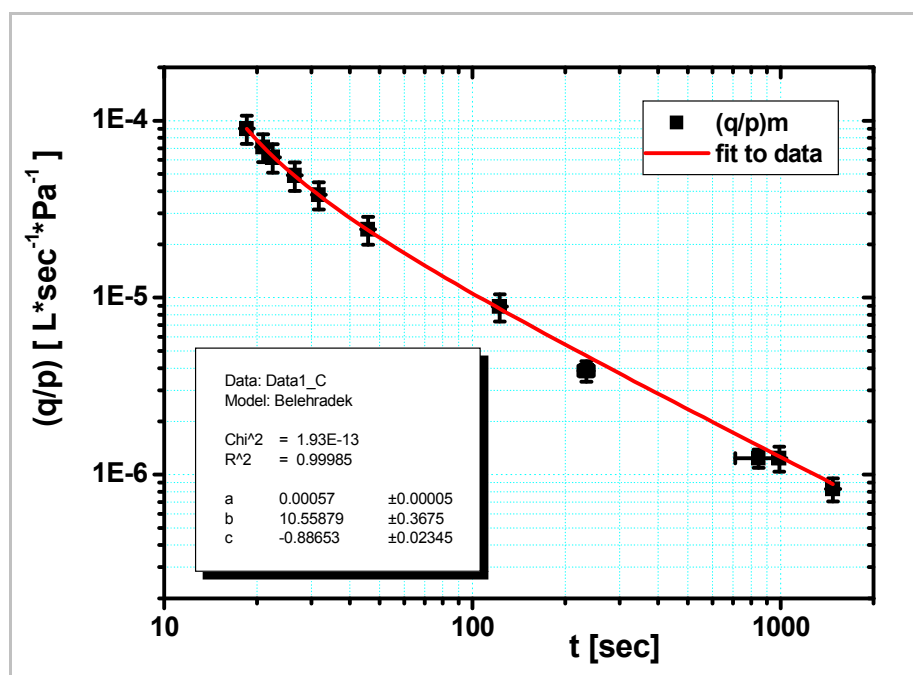


Fig. 3.2. Dependența raportului (q/p)_m de timpul de curgere al apei din tub (t_m). (în scară dublu logaritmică).

Relația dintre raportul (q/p) și timpul de curgere (t) se poate determina prin fitarea unei funcții de putere pe valorile de pe grafic:

$$q/p(t) = a \cdot (t - b)^c \quad (3.3)$$

unde valorile parametrilor obținuți prin fitare sunt $a = (5,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-4} \text{ L} \cdot \text{Pa}^{-1}$, $b = 10,56 \pm 0,37 \text{ s}$ și $c = -0,89 \pm 0,02$. Aici, $b \approx 10,6 \text{ s}$ este un parametru de timp care reprezintă limita de detecție a instrumentului, corespunzător unei valori a debitului de $7,9 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Limita superioară a instrumentului este de $\sim 40 \text{ min}$, ce corespunde la o valoare al debitului de curgere a apei mult mai mic, de doar $0,04 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.

Intercompararea metodei speciale de măsurare a permeabilității solului cu permeometrul RADON-JOK.

A fost efectuată și intercompararea „instrumentului special” de măsurare a permeabilității solului, cu permeometrul Radon-Jok (Radon v.o.s.), prin compararea parametrilor celor două instrumente. Pentru acesta sau folosit permeometrul Radon-Jok, un robinet cu reglare sensibilă pentru simularea permeabilității (ca în cazul calibrării „instrumentului special”) și un manometru pentru măsurarea presiunii negative ce se exercită în sacul de aer Radon-Jok. Cu acest sistem s-au măsurat următorii parametri: timpii intermediari (t_i) de umplere al sacului Radon-Jok și presiunea negativă (p_i) ce se exercită în sac. Au fost efectuate măsuratori pentru șapte deschideri ale robinetului sensibil care simulează permeabilitatea, fiecare set de măsurători repetându-se de trei ori. Studiarea permeometrului Radon-Jok se bazează pe calcularea raportului (q/p) pentru diferite deschideri ale robinetului sensibil. Se calculează debitele (q_i) și presiunile (p_i) pentru fiecare moment de timp (t_i), și se calculează raportul acestora (q_i/p_i). Din valorile raporturilor (q_i/p_i), se calculează o medie (q/p)_m și deviația standard $\Delta(q/p)$ _m. Se menționează că, diferențele de presiune (Δp_i) dintre diferitele momente de timp (t_i) sunt foarte mici, astfel încât instrumentul Radon-Jok are un debit de umplere a sacului constant. Dependența (q/p)_m în funcție de timpul de umplere al sacului (t_m) este prezentat în figura 3.3.

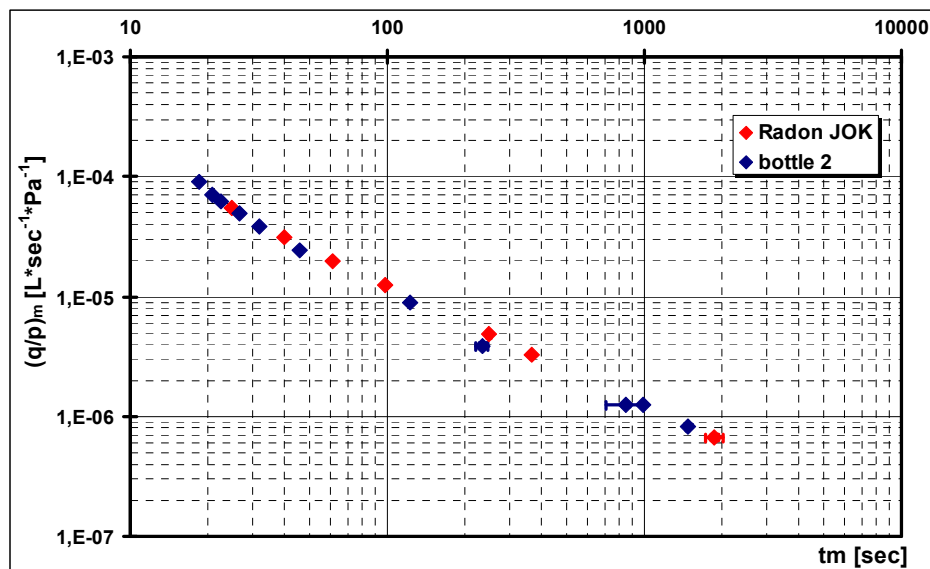


Fig. 3.3. Rezultatul intercomparării “instrumentului special” de măsurare a permeabilității cu permeometrul Radon-Jok. Punctele roșii reprezintă dependența raportului (q/p)_m de timpul (t_m) măsurat cu permeometrul Radon-Jok, iar punctele albastre reprezintă aceeași dependență cu metoda specială (în scară dublu logaritmică).

Concluzii

Instrumentul special proiectat pentru măsurarea permeabilității solului se poate ușor folosi în măsurătorile pe teren. Parametrul de permeabilitate (k) depinde de raportul debitului de apă ce curge din tub și presiunea negativă exercitată în tub (q/p), și depinde deasemenea de factorul de formă al sondei (F). Intervalul de măsurare a permeabilității cu metoda specială este de la permeabilități foarte mari ($5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$, corespunzător unui timp de extracție de 11 sec) la permeabilități ultra mici ($7 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$, corespunzător unui timp de extracție de 40 min). Intercompararea celor două instrumente pentru măsurarea permeabilității este reușită. Valorile parametrilor $(q/p)_m$ sunt într-o corelație bună în limitele erorilor de măsurare.

4. APLICATII ALE STUDIILOR DE RADON ÎN MEDIU, GEOLOGIE ȘI GEOFIZICĂ

În acest capitol sunt prezentate aspecte ale metodei de măsurare a radonului în sol, cu aplicații concrete în *mediu* (prin evaluarea ricului de radon din sol); în *geologie* (prin identificarea faliilor tectonice și localizarea direcției acestora); și în *geofizică* (prin determinarea parametrilor geofizici ai unor formațiuni geologice).

4.1. Studii de radon cu aplicații în evaluarea riscului de radon din sol

Cercetările din ultimii ani au demonstrat că radonul reprezintă principala sursă de iradiere a populației, contribuind cu aproximativ 57 % la doza efectivă anuală, putând ajunge în unele zone la contribuții de peste 95 %, crescând doza naturală cu 5-10 ori față de expunerea medie de 2,2 mSv/an. În funcție de condițiile geologice și meteorologice, sunt identificate regiuni cu aglomerări importante de materiale radioactive, astfel încât dozele efective anuale pot fi de 55-200 de ori mai mari decât media la nivel global. Comparând doza efectivă colectivă datorat expunerii la radon anual pentru populația din România (1,77 mSv) și doza efectivă medie anuală în întreaga lume (1,2 mSv), se observă că valoarea pentru România acesta este ușor crescut [Cosma et al., 2009]. În România au existat și există programe regionale de radon, conducând la rezultate pe un domeniu foarte larg al concentrațiilor de interior, de la câțiva zeci până la câțiva mii de $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$. În ultimii 20 de ani, Laboratorul de Radioactivitatea Mediului din Facultatea de Știința Mediului, Universitatea Babeș-Bolyai, desfășoară campanii regionale pentru studiul radonului de interior din județele

din Transilvania (Cluj, Bihor, Alba, Bistrița, Sibiu), prin efectuarea de măsurători în peste 1800 de case. Pe baza rezultatelor, expunerea medie estimat pentru radonul de interior este de $82,5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ [Cosma et al 2009; Sainz et al, 2009].

În zonele cu risc de radon („**radon-prone areas**”) concentrația de radon în atmosferă și în locuințe poate atinge nivele ridicate. Aceste nivele sunt datorate solului și materialelor de construcții. Estimarea riscului de radon din sol se bazează pe evaluarea potențialului de radon din sol prin măsurarea concentrației de radon din sol și a permeabilității solului. [Papp et al., 2009; Papp et al., 2010; Cosma, Papp, et al., 2010].

4.1.1. Metodă de evaluare a riscului de radon din sol sau a locurilor de clădire

Evaluarea riscului de radon din sol este util în elaborarea unor măsuri de protecție împotriva radonului, în construcții. Metodele de evaluare a riscului de radon sunt folosite de asemenea în scopuri de cartografiere de radon, în care rezultatele servesc pentru evaluarea potențialului geogenic de radon în unități geologice [Kemski et al., 2001]. Modelul utilizat pentru evaluarea riscului de radon din sol este modelul lui Neznal [Neznal et al., 2004], care se bazează pe determinarea potențialului de radon al solului prin măsurarea concentrației de radon din sol și permeabilitatea solurilor. Modelul folosește trei categorii de risc (indice de radon): *mică*, *medie* și *mare*. Astfel, o concentrație de radon și permeabilitate a solului mare, rezultă un risc de radon și probabilitate de transfer al radonului în locuințe, ridicat.

Tabel 4.1. Evaluarea indicelui de radon (risc de radon) [din Neznal et al., 2004].

Categoriile de risc, RI	Concentrația de radon din sol C_{Rn} [kBq·m⁻³]		
	<i>Mică</i>	$C_{Rn} < 30$	$C_{Rn} < 20$
<i>Medie</i>	$30 \leq C_{Rn} < 100$	$20 \leq C_{Rn} < 70$	$10 \leq C_{Rn} < 30$
<i>Mare</i>	$C_{Rn} \geq 100$	$C_{Rn} \geq 70$	$C_{Rn} \geq 30$
permeabilitate	<i>mică</i>	<i>medie</i>	<i>mare</i>

Concentrația de radon din sol este un parametru de bază în determinarea potențialului de radon al locului unei clădiri. De obicei, pentru determinarea concentrațiilor de radon din sol se utilizează măsurători instantanee prin prelevare de probe de gaz din sol, de la adâncimea standard de **0,8 m**, și reprezentate în [kBq·m⁻³]. Limita de detecție pentru concentrațiile de radon trebuie să fie de minim **1 kBq·m⁻³**, datorită fiabilității de detecție a instrumentelor și eventualele erori de prelevare de probe.

Datorită distribuției neomogene de radon în sol și prezența anomaliilor, determinarea potențialului de radon necesită efectuarea mai multor măsurători de concentrații de radon. În cazul unui loc de clădire $\leq 800 \text{ m}^2$, măsurătorile trebuie efectuate în cel puțin 15 puncte de prelevare, luate în cadrul suprafeței de sol din jurul clădirii. Atunci când este evaluat un loc de clădire $> 800 \text{ m}^2$, probele de gaz din sol sunt colectate într-o grilă de $10 \times 10 \text{ m}$, astfel încât trebuie acoperit cadrul solului din jurul clădirii. În cazurile unor anomalii locale de radon mai mari decât de trei ori cea de a treia quartilă ($3 \cdot C_{Rn,75}$), se recomandă ca numărul de puncte de prelevare să fie mărit și să se folosească o grilă de $5 \times 5 \text{ m}$. [Neznan et al., 2004].

În clasificarea unui loc de clădire $\leq 800 \text{ m}^2$ (ce implică 15 măsurători de concentrații de radon), valoarea decisivă pentru concentrația de radon este quartila a treia a setului de valori (C_{75}). Valori **sub $1 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$** sunt excluse din setul de date, acestea nefiind caracteristice nivelelor de radon din sol, iar concentrațiile mai mari decât a treia quartilă reprezintă anomalii locale de radon [Neznan et al., 2004].

Permeabilitatea solului este al doilea parametru decisiv în determinarea potențialului de radon al locului unei clădiri. Permeabilitate mare permite un transport al radonului din sol și transfer în clădire crescut, astfel că în cazul solurilor permeabile poate fi estimat un risc crescut de radon. Permeabilitatea solurilor poate fi determinat prin măsurători in situ, unde permeabilitatea k este dat în [m^2]. Măsurătorile in situ de permeabilitate se efectuează la o adâncime de **0,8 m** în sol. Metoda in situ constă în măsurarea fluxului de gaz din sol, prin extracție sau atunci când este pompat în sol sub presiune constantă [Neznan et al., 2004].

Pentru evaluarea riscului de radon, categoriile de permeabilitate ale solurilor sunt următoarele: $k < 4,0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ pentru permeabilitate mică, $4,0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 < k < 4,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ pentru permeabilitate medie, și $k > 4,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ pentru permeabilitate mare. Numărul de măsurători in situ de permeabilitate sunt aceleași ca și pentru măsurătorile de concentrații de radon din sol, adică, cel puțin 15 măsurători pentru o clădire (cu o suprafață a locului clădirii $\leq 800 \text{ m}^2$), sau efectuarea de măsurători într-o rețea de $10 \times 10 \text{ m}$ pentru locuri $> 800 \text{ m}^2$. Quartila a treia a setului de date diminuează influența rezultatelor cu valori eronate și anomalii locale de permeabilitate [Neznan et al., 2004].

Quartila a treia a setului de permeabilități (k_{75}) este valoarea decisivă pentru clasificarea unui loc de clădire $\leq 800 \text{ m}^2$, cu cel puțin 15 măsurători in situ de permeabilitate. Valorile mai mari decât a treia quartilă sunt excluse din setul de date. Pentru locuri ale clădirilor $> 800 \text{ m}^2$, măsurătorile de permeabilitate trebuie să fie făcute într-o grilă de 10×10

m, ce depinde de omogenitatea locului și a setului de date. Anomaliile locale pot influența clasificarea finală a permeabilității. [Neznan et al., 2004].

Potențialul de radon din sol

Determinarea potențialului de radon din sol se bazează pe evaluarea concentrației de radon din sol și permeabilitatea sub-solurilor. Concentrație mare de radon și permeabilitate a solului mare, rezultă probabilitate mare de pătrunde a radonului în clădire. **Indicele de radon al unui loc de clădire (RI)** indică nivelul de risc de radon emanat din roca de fundație și/sau subsol, iar **potențialul de radon (RP)** exprimă indicele de radon al locului (RI), pentru categoriile mic, mediu și mare [Neznan et al., 2004].

Metoda potențialului de radon se bazează pe tabelul de clasificare a indicelui de radon (tabel 4.1), pe baza căruia modelul de potențial de radon poate fi reprezentat pe o diagramă conform fig.4.1. Potențialul de radon RP este definit de ecuația:

$$RP = (C_{Rn} - 1) / (-\log k - 10) \quad (4.1)$$

unde, C_{Rn} [kBq·m⁻³] este quartila a treia a concentrațiilor de radon din sol, și k [m²] este quartila a treia a datelor de permeabilitate a solului. Reprezentarea grafică este dată în fig. 4.1. [Neznan et al., 2004, Barnet et al, 2008].

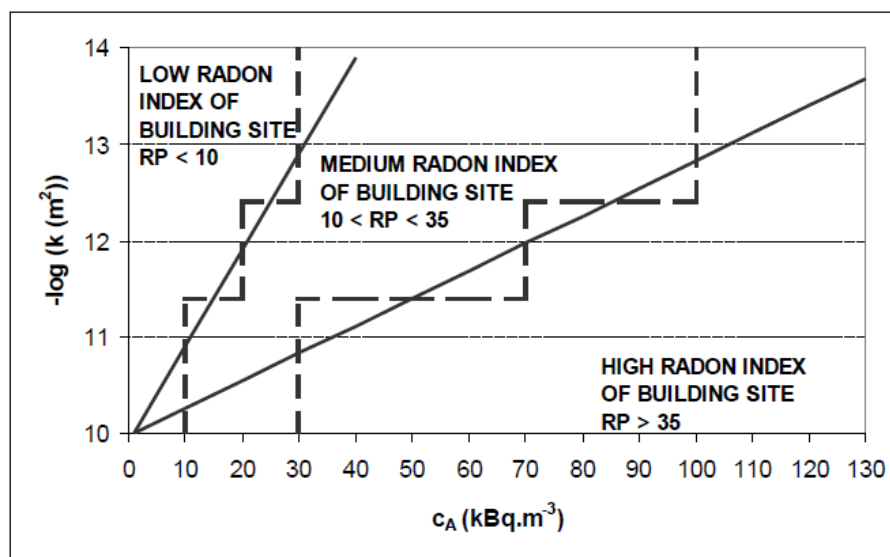


Fig. 4.1. Potențialul de radon al unui loc de clădire [după Neznan, 2004; Barnet et al., 2008]

Pentru evaluarea riscului unui loc de clădire cu modelul de potențial de radon, valorile decisive pentru calcularea potențialului de radon (RP) sunt quartila a treia a setului de date de

concentrații de radon din sol (C_{Rn75}) și quartila a treia a setului de date de permeabilitate a solului (k_{75}). Prin urmare, indicii de radon (RI) al locului unei clădiri sunt următoarele: pentru $RP < 10$, RI este mic; dacă $10 \leq RP < 35$, RI este mediu; iar dacă $RP \geq 35$, RI este mare [Neznal et al., 2004; Barnet et al., 2008].

4.1.2. Legătura dintre radonul din locuințe și radonul din sol și materialul de construcție în zona uraniferă Băița-Ștei

Studiul de față prezintă o parte a unei cercetări cu privire la expunerea la radonul din locuințe. Zona cu nivelul de radioactivitate naturală cel mai ridicat din Transilvania a fost localizat în zona Băița-Ștei (județul Bihor), unde s-a înregistrat concentrații de radon de interior de peste $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ [Cosma, et al. 2009; Sainz et al, 2009].

Zona Băița-Ștei este situat în Munții Bihor (partea NW a României), în vecinătatea minelor de uraniu "Avram Iancu" și "Băița". Coordonatele geografice sunt: N: $46^{\circ}28'$ și E: $22^{\circ}34'$, și altitudinea de 430 m. Această zonă include orașul Ștei și câteva localități (Băița-Plai, Băița-Sat, Nucet, Fânațe, Câmpani, etc), cu un total de 15.000 de locuitori.

Principalele cauze pentru existența de concentrații mari de radon de interior în această regiune reprezintă folosirea sterilului de uraniu (din minele care funcționau în perioada 1952-1990) ca materiale de construcție, cât și subsolurile caselor cu permeabilitate ridicată. Majoritatea dintre aceste case au fost construite folosind steril radioactiv sau materiale de construcție (nisip, pietriș, etc.) de pe râul Crișul-Băița, având un conținut ridicat de uraniu și radium [Sandor et al, 1999].

Măsurători de radon de interior și rezultate

Punctul de pornire al măsurătorilor de radon din sol este un studiu detaliat de radon de interior din zona Ștei-Băița, efectuat între 2003-2008. Studiul are la bază măsurători integrate de radon în 335 de case selectate aleator din zona Ștei-Băița, a căror rezultate constituie baza unui proiect de cercetare POSCCE (IRART, „IMPLEMENTATION OF RADON REMEDIATION TECHNIQUES IN DWELLINGS OF BĂIȚA URANIUM MINE AREA” [Cosma, Papp, et al., 2011; Cucoș, Papp et al., 2011].

Pentru măsurarea concentrațiilor de radon de interior s-a folosit detectori de urme CR 39, respectând protocolul de măsurare NRPB. În scopul de a evalua concentrațiile medii de

radon de interior, detectorii au fost expuși în încăperi locuite ale caselor (dormitoare, camere de zi, la o înălțime de 1,0-1,5 m de podea). [Cosma, et al., 2009; Sainz et al., 2009].

Valorile concentrațiilor de radon se află într-un domeniu larg de la **15 la 2000 Bq·m⁻³**, depinzând de structura materialului de construcție și de de subsolul clădirii. Având în vedere condițiile geologice și corecțiile sezoniere, valoarea medie a concentrațiilor de interior este de **343,5 Bq·m⁻³**, care este de 4,16 ori mai mare decât media de radon de interior raportat pentru Transilvania, fiind de 82,5 Bq·m⁻³ [Cosma, et al. 2009, Sainz et al., 2009]. Concentrațiile de radon de interior din zona monitorizată sunt semnificativ mai mari decât nivelul recomandat de 100 Bq·m⁻³ pentru expunerea pentru populație și cea ocupațională [WHO, 2009].

Domeniul concentrațiilor de radon conține două subdomenii relevante, care indică principalele surse de radon în locuințe. Primul subdomeniu conține valori sub **400 Bq·m⁻³**, corespunzător unui procentaj de **~90 % din casele** investigate, și provine din **sol și materiile de construcție normale, ca prima sursă de radon**. Al doilea subdomeniu conține valori peste **600 Bq·m⁻³**, corespunzător unui procentaj de **~ 6 % al caselor**, și provine din **sterilul de uraniu folosit în construcții, ca cea de a doua sursă de radon** [Sainz et al., 2009].

Măsurători de radon în sol și rezultate

Măsurătorile preliminare de radon în sol în zona Băița-Ștei au fost efectuate în toamna anului 2010, în condiții de teren din zonă relativ uscate. Scopul măsurătorilor a fost determinarea potențialului de radon din sol, pentru estimarea riscului de radon din zonă. [Cosma, Papp, et al., in press 3]. Pentru acesta, am efectuat un număr de 30 de măsurători de radon în sol și permeabilitatea solului, în 10 locuri din întreaga zonă (de-alungul curgerii râului Băița-Criș). Adâncea de prelevare de probe de gaz din sol pentru măsurători de radon și permeabilitatea solului a fost între 50-80 cm, depinzând de structura de roci solide a stratului de sol de suprafață. Menționăm că în Munții Apuseni rocile solide apar frecvent în stratul superior al solului, la adâncimea de 50 cm.

Metoda de măsurare a concentrației de radon în sol și a permabilității solului este prezentat în detaliu în cap.2 respectiv cap.3. Rezultatele măsurătorilor de concentrații de radon din sol și permeabilitatea solurilor din cele 10 locuri investigate din zona Băița-Ștei sunt reprezentate în tabelul 4.2.

Table 4.2. Valorile măsurate ale concentrațiilor de radon din sol și erorile ($CRn \pm dCRn$) respectiv permeabilitățile solurilor (k). (Cifra din paranteză sub numele locului reprezintă numărul de măsurători din acel loc. Parametrul D [m] reprezintă adâncimea de extracție a gazului din sol.)

<i>Locul</i>	<i>D</i> [m]	<i>CRn ± dCRn</i> [kBq·m ⁻³]	<i>k</i> [m ²]	<i>RP</i>	<i>RI</i>
Ștei (3)	0.8	44.1 ± 2.0	1.7E-12	69.8	HIGH
	0.8	40.2 ± 2.0	2.4E-12		
	0.8	22.3 ± 1.0	2.4E-11		
Lunca Ștei (2)	0.8	22.0 ± 1.2	1.9E-13	11.5	MEDIUM
	0.8	30.1 ± 1.5	3.0E-13		
Câmpani (4)	0.7	53.5 ± 2.6	1.2E-11	101.1	HIGH
	0.7	54.5 ± 2.6	2.4E-11		
	0.7	63.4 ± 2.9	2.4E-11		
	0.8	159.5 ± 7.8	7.1E-12		
Fânațe 68 (2)	0.6	58.1 ± 2.7	6.8E-13	26.8	MEDIUM
	0.6	59.1 ± 2.6	-		
Nucet Popas (2)	0.5	61.3 ± 2.8	9.8E-12	59.8	HIGH
	0.65	46.9 ± 2,1	2.4E-11		
Nucet Criș (1)	0.7	27.1 ± 1.3	5.2E-11	93.2	HIGH
Băița 204 (5)	0.8	11.9 ± 0.7	high	59.1	HIGH
	0.8	7.9 ± 0.5	high		
	0.8	45.4 ± 2.0	high		
	0.8	128.7 ± 5.1	1.8E-11		
	0.8	23.1 ± 1.1	2.8E-13		
Băița 206 (5)	0.8	5.5 ± 0.5	1.3E-11	73.0	HIGH
	0.6	7.6 ± 0.5	high		
	0.8	42.2 ± 1.2	2.7E-11		
	0.8	35.2 ± 1.5	high		
	0.8	16.6 ± 0.8	high		
Băița Plai (4)	0.4	462.9 ± 13.3	3.3E-11	1607.2	HIGH
	0.4	398.5 ± 12.0	-		
	0.4	446.1 ± 13.0	-		
	0.5	512.0 ± 14.0	4.8E-11		

Pentru estimarea riscului de radon din zona Băița-Ștei sa folosit modelul de calcul al potențialului de radon (vezi paragraful 4.1.1). Într-un loc anume au fost efectuate mai multe măsurători de concentrații de radon în sol respectiv permeabilitate a solului. Concentrațiile de radon foarte mari (valori > 100 kBq·m⁻³) au fost excluse, acestea fiind anomalii locale ale locului. De asemenea, valorile de permeabilitate mici (valori < 4·10⁻¹³ m²) au fost excluse, deoarece acestea nu sunt caracteristice pentru zona Băița-Ștei. Din punct de vedere geologic, solurile din zonă au permeabilități ridicate. Valoarea cea mai mare a concentrațiilor de radon din sol, respectiv de permeabilitate a solului (într-un loc dat) sunt valorile decisive pentru

determinarea potențialului de radon din sol. Valorile calculate ale potențialelor de radon (**RP**) respectiv categoriile de risc (indice de radon, **RI**) sunt reprezentate în tabelul 4.2.

Valorile potențialelor de radon acoperă două categorii de risc (mediu și mare), într-un domeniu între 11,5 și 1607,2 astfel că, pentru majoritatea locurilor riscul de radon este ridicat. Ultimul loc, Băița-Plai indică un risc foarte ridicat din zonă (RP=1607,2), ceea ce este caracteristic locului, deoarece lângă acesta se află intrarea în mina veche de uraniu "Băița-Plai", unde solul are un conținut de uraniu foarte ridicat.

Măsurători de exhalatie de radon din pietrișul folosit ca material de construcție și rezultate

Scopul acestor măsurătorilor este determinarea ratei de exhalatie de radon din materialul folosit la construcția caselor din zona studiată. Materialul este un amestec de pietriș și piatră ce provine din râul Criș-Băița. Acest râu trece pe lângă mina de uraniu Băița-Plai și traversează valea Ștei-Băița. Proba de măsurat a fost uscat la temperatura de ~70°C, și a fost împărțit în trei fracțiuni. Prima este fracțiunea de nisip-pietriș, cu diametrul de 1-2 mm, al doilea este fracțiunea de pietriș, cu diametrul între 5 mm și de 2 cm, iar al treilea fracțiunea de piatră cu diametrul granulelor mai mare de 2 cm.

În scopul măsurării ratei de exhalatie, fracțiunile probei de material de construcție au fost introduse într-un vas închis, în care sa urmărit creșterea în timp a concentrației de radon. Concentrația de radon a fost măsurat cu monitorul de radon Radim3A, în versiunea Eman. Astfel, vasul a fost montat și sigilat pe camera de detecție a monitorului Radim-Eman. Rezultatele măsurătorilor de exhalatie din cele trei fracțiuni sunt prezentate în fig.4.2.

De-alungul măsurătorilor, concentrația de radon creștere și tinde la o valoare de echilibru. Această valoare de echilibru depinde de factorul de emanație de radon din probă și de conținutul de radon al probei. Din fig.4.2. se poate observa că, în prima parte (primele 18 puncte), concentrația de radon are o creștere liniară, în toate cele trei cazuri. Prin urmare, rata de creștere a fost determinat prin fitarea liniară pe valorile de concentrații în timp, unde rata de creștere este k [$\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$]. Prin urmare, rata de exhalatie din probă (**ER** [$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$]) a fost determinat din rata de creștere prin:

$$ER = k \cdot (V_{air} / M_s) \quad (4.2),$$

unde, $V_{air}[\text{m}^{-3}]$ este volumul de aer din vas, care se determină din volumul total al întregului vas ($V_{tot} = 4.0$ L) minus volumul probei (V_s), și $M_s[\text{kg}]$ este masa probei. Rezultatele fitărilor și calculele matematice sunt prezentate în tabelul 4.3.

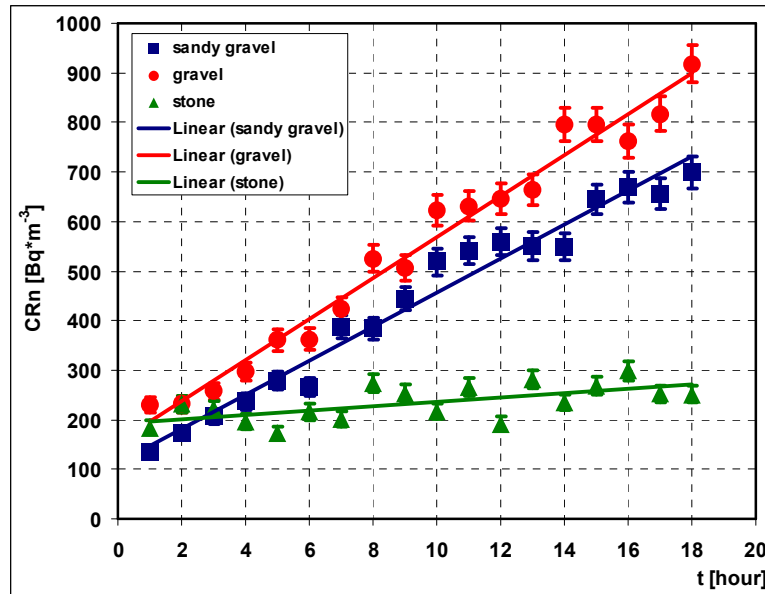


Fig. 4.2. Concentrația de radon (CR_n) în timp (t), pentru prima parte a măsurătorii (domeniul liniar). Punctele cerc corespund datelor pentru fracțiunea nisip-pietriș, pătratele corespund datelor pentru pietriș, și triunghiurile corespund datelor pentru fracțiunea de piatră. Liniile sunt fitările liniare pe valorile celor trei serii de concentrații, cu coeficienții de corelație (R^2) de: 0,977 (pentru nisip-pietriș), 0,970 (pentru pietriș) și 0,399 (pentru piatră).

Table 4.3: Rezultatele pentru rata de creștere a concentrației de radon (k) din fitările liniare, și exhalățiile de radon (ER) și erori.

Fracțiuni	$k \pm dk$ [Bq·m ⁻³ ·h ⁻¹]	V_{air} [L]	M [kg]	$ER \pm dER$ [Bq·kg ⁻¹ ·h ⁻¹]
nisip-pietriș	34.24 ± 1.50	3.44	1.4	0.084 ± 0.004
pietriș	41.40 ± 1.60	3.34	1.7	0.081 ± 0.003
piatră	4.33 ± 1.33	3.31	1.7	0.008 ± 0.003

Concluzii

Lucrarea se bazează pe rezultatele măsurătorilor integrate de concentrații de radon de interior efectuate în 335 de case din zona Băița-Ștei (zonă de „risc de radon”, în apropiere de mina de uraniu Băița), între anii 2000-2010. Rezultatele indică o valoare medie anuală a concentrațiilor de radon de interior de aproximativ $343,5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, ceea ce este de 4,16 ori mai mare decât valoarea medie estimat pentru Transilvania, de $82,5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

Distribuția valorilor de radon de interior arată existența a două surse independente de radon pentru casele din zonă. Prima sursă este solul, iar cea de a doua provine din sterilul de uraniu folosit la construcția caselor.

Pentru caracterizarea solului ca sursă principală de radon au fost efectuate măsurători de radon din sol și permeabilități ale solurilor în 10 locuri selectate. Rezultatele măsurătorilor și determinarea potențialului de radon indică un risc ridicat pentru majoritatea locurilor

investigate, acestea fiind soluri neacoperite sau terenuri de case. Locul din Băița-Plai indică un risc foarte ridicat ($RP = 1607,2$) ce este caracteristic locului, deoarece aici se află intrarea în mina veche de uraniu "Băița-Plai", unde solul are un conținut de uraniu foarte ridicat.

Cea de a doua sursă principală de radon în zona de uraniu Băița-Ștei este materialul de construcție. Amestecul de pietriș cu nisip și piatră, folosit ca material de construcție în zona Băița Ștei prezintă o exhalatie ridicată de radon. Rezultatele măsurătorilor de laborator pe cele trei fracțiuni și calculele matematice determină rate de exhalatie diferite. Primele două fracțiuni (nisip-pietriș, respectiv pietriș, de granulație mai mare) arată exhalatii de radon de aceeași mărime, în timp ce a treia (piatra normală) are o exhalatie de radon mult mai mică. Exhalatia de radon din nisip-pietriș și pietris a fost de ~10 ori mai mare față de exhalatia din piatră. Astfel, acest material are o contribuție importantă la expunerea la radon pentru populație, în casele care folosesc ca material de construcție.

Acknowledgements. Acest studiu este o parte al unui proiect de cercetare finanțat din fonduri structurale, nr. 586-12487, Contract nr.160/15.06.2010, cu titlul: *IMPLEMENTATION OF RADON REMEDIATION TECHNIQUES IN DWELLINGS OF BĂIȚA URANIUM MINE AREA / IRART* ("Implementarea tehnicilor de remediere de radon în locuințele din zona minei de uraniu Băița"), al Programului Operațional Sectorial "Creșterea Competitivității Economice" (POS-CCE) co-finanțat de Fondul European de Dezvoltare Regională.

4.2. Studii de radon în sol cu aplicații în geologie

Un aspect important al studiilor de radon (^{222}Rn) și toron (^{220}Rn) în sol este originea și migrația acestor gaze cu aplicații în geologie, unde radonul și toronul au rolul de elemente de urmă („tracce elements”), ce pot indica acumulări de material radioactiv în scoarță [Cosma et al. 1996 a], sau prezența unor falii tectonice [Cosma et al., 1996 b]. Aceste gaze radioactive se creează în mod continuu în crusta Pământului și migrează împreună spre suprafață în principal prin intermediul proceselor de difuzie și advecție [Etiopie și Martinelli, 2002]. Astfel de studii pot fi aplicate la identificarea de falii tectonice, precum și localizarea direcției sau orientării lor [Font et al., 2008; Szakács and Nédá, 2009; Cosma, Papp, et al., in press 2].

Faliile servesc drept căi de acces pentru migrarea gazelor spre suprafață și pot fi identificate prin detectarea unor activități ridicate de radon și toron în sol, ca anomalii. Detectarea unor activități mari de toron în sol pot indica anumite procese de migrație rapide

pe distanțe mari, datorită timpului de înjumătățire scurt al toronului (55 sec) față de cel al radonului (3,82 zile). Acesta este posibil numai în prezența unui gaz purtător (ex. CO₂), ce apare de obicei de-a lungul unor falii sau fracturi ale rocilor [*Etiopie and Martinelli, 2002*]. Structurile tectonice ce emit gaze naturale pot fi cartografiate astfel printr-o combinație de măsurători de radon și toron, susținute de măsurători de CO₂. Studiile de toron combinate cu alte investigații geologice ajută la determinarea mai precisă a sursei și originii radonului în scoarța terestră [*Szakács and Neda 2009; Papp et al., 2010*].

4.2.1. Studiu de radon și toron în zona postvulcanică Harghita și legătura cu localizarea zonei de falii

În urma activității postvulcanice, cantități mari de CO₂ ajung la suprafață, care transportă gaze radioactive cum ar fi radonul (²²²Rn) și toronul (²²⁰Rn). În funcție de condițiile geologice și hidrogeologice locale, emanațiile de CO₂ pot fi emanații de gaze uscate (mofetă) sau dizolvate în ape minerale. Mofetele sunt în principal emanații de CO₂ uscat la temperaturi scăzute, care izbucnește din adâncurile Pământului spre suprafață. Gazele de mofetă au de obicei origine magmatică sau o componentă de mantă. De-a lungul lanțului vulcanic Harghita (Carpații Orientali) de origine neogenă există multe iviri de emanații de CO₂ uscat. Migrația ascendentă a acestor gaze spre suprafață este favorizat și controlat de așa numite falii tectonice [*Neda et al. 2008 a,b; Szakacs and Neda 2009; Papp et al., 2010*].

Studiul de față se bazează pe măsurători de radon și toron în sol, efectuate în zona mofetelor și izvoarelor de ape minerale din Băile-Harghita (Munții Harghita). Scopul studiului a fost identificarea și localizarea direcției sistemului de falie ce controlează apariția celor două mofete și izvoare de ape minerale din stațiune, prin măsurători sistematice de radon și toron în sol.

Zona de studiu aparține Munților Harghita de Nord care face parte din lanțul vulcanic de origine neogenă a Carpaților Orientali și aparține vechiului vulcan Varghis. Stațiunea Băile-Harghita se situează la ~18 km vest de Miercurea Ciuc, are o altitudine între 1300-1400 m, și coordonate geografice: N: 46°23'18" și E: 25°38'19". Rocile vulcanice din zonă apar într-una din zonele hidrotermale principale ale vulcanului Varghis, de-a lungul faliei presupuse de direcție NS. Conținutul de CO₂ al emanațiilor post-vulcanice este de peste 99,8 % din emisiile totale de gaze. Mofetele din Băile Harghita sunt în esență emanații pure de CO₂, cu conținut de urme sulfuroase și alte gaze.

Măsurători de radon și toron în sol în zona mofetelor și izvoarelor de ape minerale din Băile-Harghita, și rezultate

Măsurătorile in situ de radon și toron în zona mofetelor și izvoarelor de apă minerală din Băile-Harghita au fost efectuate în 2009 iunie, în condiții meteorologice relativ uscate în zonă. Măsurătorile au fost făcute în două grupe, de-a lungul unor linii de profil bine determinate. Primul profil a fost localizat în partea din fața mofetelor (profilul A), iar cel de al doilea la o distanță de ~200 m de mofete către S (profilul B) (vezi fig. 4.3 și fig. 4.5). În cazul profilului A, linia de profil a fost ales perpendicular pe direcția ce leagă cele două mofete. În cazul profilului B, linia de profil a fost ales perpendicular pe direcția ce unește mofetele și izvoarele de ape minerale din stațiune.

Principalul criteriu de selecție necesar pentru cele două profile de măsurare a fost ca aceștia să fie normale pe direcția faliilor presupuse. În primul rând am încercat să identificăm falia locală reprezentat la suprafață printr-o linie virtuală ce leagă cele două mofete. Direcția faliei locale presupuse este la 50° W din direcția N. În al doilea rând am presupus că sistemul de falii majore este localizat de-a lungul mofetelor, și că izvoarele de ape minerale din Băile-Harghita sunt aliniat pe o direcție de 5° E din direcția N.

Metoda de măsurare a concentrațiilor de radon și toron în sol este prezentat în detaliu în cap. 2. Adâncimea de prelevare de gaz din sol în cazul profilului A a fost de 60 cm, ce a rezultat dintr-o măsurătoare locală într-un profil vertical în sol, de la adâncimea de 30 cm până la 80 cm. Rezultatele acestor măsurători arată că valoarea concentrației de radon la adâncimea de 60 cm ($4,61 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$) nu se modifică în mod semnificativ, în limita erorilor. În cazul profilului B, adâncimea de prelevare de 40-50 cm a fost ales în funcție de proprietățile solului (roci solide), ceea ce împiedică pătrunderea sondei la adâncimi mai mari.

Măsurătorile de-a lungul profilului A. În cazul profilului A, concentrațiile de Rn și Tn au fost măsurate în fața celor două mofete, în 11 puncte (notate de la A1 la A11). Coordonatele (lat. și long.) punctelor înregistrate cu GPS sunt prezentate în tabelul 4.4, iar locațiile lor în figura 4.3. Direcția ce unește punctele de măsurare este perpendicular pe direcția presupusă a faliei locale care leagă cele două mofete. Distanța dintre primul punct (A1) și ultimul punct (A11) de pe profil este de 44,3 m, iar distanța medie dintre puncte este de ~4,4 m.

Table 4.4. Coordonatele și altitudinile locațiilor celor două mofete (A și B) respectiv extremitățile profilului A

Puncte		N	E	Alt.
Mofeta A		46°23'19.02"	25°38'20.34"	1298 m
Mofeta B		46°23'18.60"	25°38'20.70"	1297 m
Extremitățile profilului A	A1	46°23'18.30"	25°38'19.30"	1306 m
	A11	46°23'18.80"	25°38'21.40"	1298 m

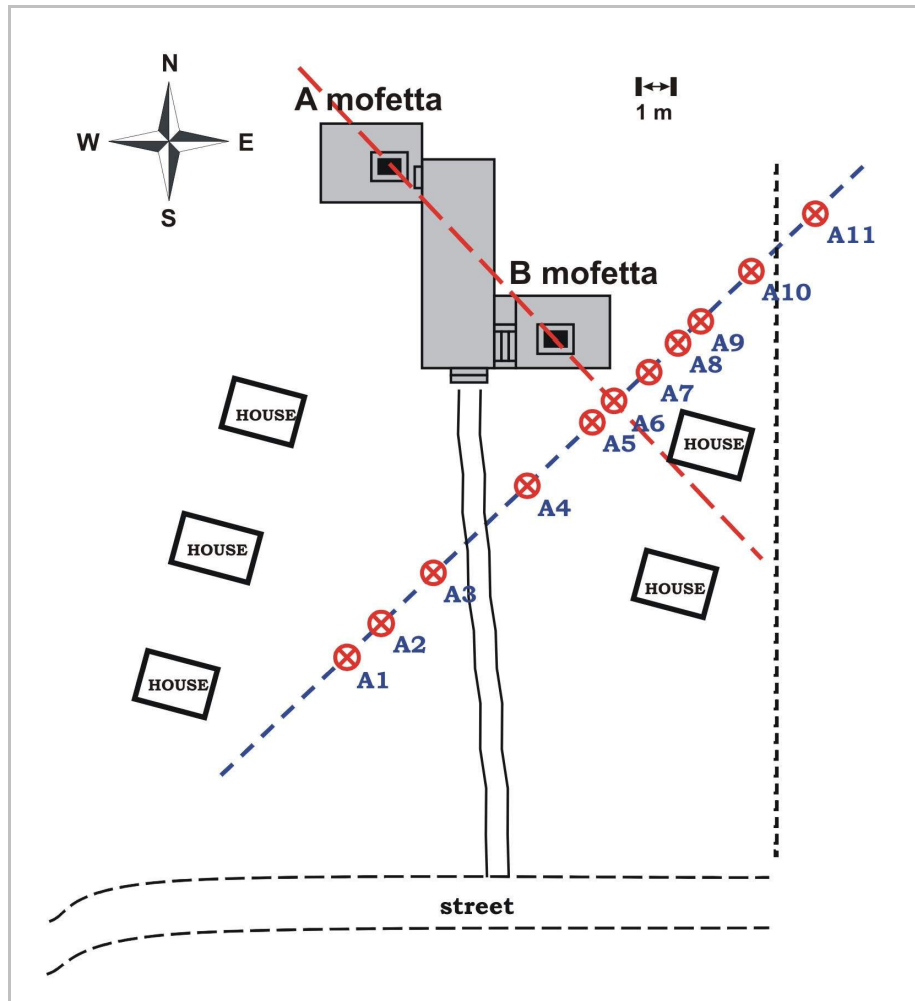


Fig. 4.3. Locațiile celor două mofete (pătrate negre), al căsuțelor din jur (“house”), și al celor 11 puncte de măsurători (cercuri mici cu interior X) aliniate perpendicular (linie discontinuă) pe direcția ce unește cele două mofete (direcția faliei presupuse, linie întreruptă).

Rezultatele măsurătorilor pe profilul A sunt prezentate în fig.4.4. ca distribuții ale concentrațiilor de radon și toron, unde valorile concentrațiilor sunt de ordinul $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Valorile concentrațiilor de radon au un domeniu larg, între 2,5 și $19,1 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Acest domeniu are două extremități (punctele A1-A3, și A10-A11) și o porțiune de mijloc (punctele A4-A9), care prezintă o distribuție cu un singur maxim în punctul A6, cu valoarea de $7,0 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Valorile concentrațiilor de toron au un domeniu asemănător ca și concentrațiile de

radon, între 0,9 și 18,6 kBq·m⁻³. Distribuția de toron prezintă la fel un singur maxim în același punct A6, cu valoarea de 18,6 kBq·m⁻³.

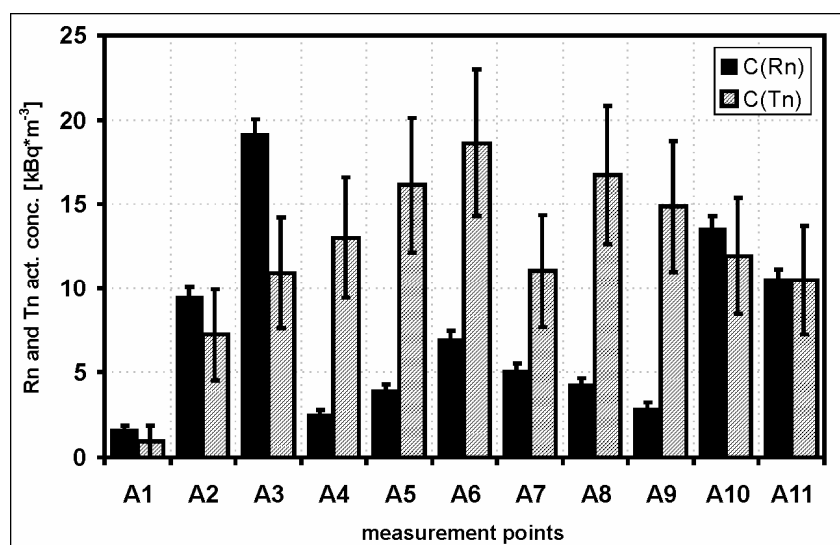


Fig. 4.4. Distribuția concentrațiilor de radon și toron din profilul A. Coloanele negre reprezintă concentrațiile de radon (CRn) și coloanele gri sunt concentrațiile de toron (CTn).

Diferența în ordinea de mărime dintre mijlocul și extremitățile distribuției de radon din profilul A este cauzat de faptul că măsurătorile au fost efectuate în diferite straturi superioare de sol, în aceeași adâncime de 60 cm. Aceste straturi superioare pot să aibă grosimi variabile. Astfel, extremitățile cu punctele A1, A2, A3, A10 și A11 au fost măsurate în același substrat al solului (**eluviation horizon**, la o adâncime de 62 cm), în timp ce în domeniul de mijloc (punctele A4-A9) gazul din sol a fost prelevat dintr-un alt substrat (argilos sau **iluviation horizon**), astfel că concentrațiile din domeniul de mijloc au fost influențate de grosimea substratului de sol, față de cele din extremități. Substratul de mijloc poate fi mult mai gros decât cel al punctelor extreme. Astfel, poziția stratului superior argilos și conținutul de umiditate al acestuia sugerează că permeabilitatea pe verticală este mică și doar o mică parte din gazul ascendent de radon atinge adâncimea de măsurare. Timpul de înjumătățire al radonului (3,84 zile) poate fi suficient de lung pentru a permite ca acesta să iasă din substratul argilos.

Deoarece concentrațiile de toron au un singur maxim, este posibil ca conținutul de umiditate și stratul de argilă în care au fost efectuate măsurătorile, nu împiedică fluxul de toron. O altă explicație este că toronul provine dintr-un alt strat decât radonul (mult mai superior), în toate punctele de măsurare. Motivul este timpul de înjumătățire mult mai scurt al toronului (55 sec), ceea ce rezultă la un parcurs mai scurt, în comparație cu radonul.

Măsurătorile de-a lungul profilului B. În cazul profilului B, concentrațiile de radon și toron au fost măsurate în cinci puncte selectate de-a lungul unei linii perpendiculare pe direcția ce unește mofetele, izvoarele de apă minerală, și bazinele (notate de la B1 la B5). Coordonatele (lat. și long.) ale punctelor înregistrate cu GPS sunt prezentate în tabelul 4.5, iar locațiile punctelor sunt reprezentate în fig.4.5. Linia ce unește punctele de măsurare este perpendiculară pe direcția presupusă a zonei de falii. Distanța dintre primul punct (B1) și ultimul punct (B5) este de 37,2 m, iar distanța medie dintre puncte este de ~9,3 m.

Table 4.5. Coordonatele și altitudinile casei mofetă, a izvoarelor de ape minerale și a bazinelor din Băile-Harghita, respectiv extremitățile profilului B

Locul	N	E	Alt.	
The Mofette house	46°23'18.30"	25°38'21.36"	1303 m	
Csipike spring	46°23'10.92"	25°38'18.78"	1287 m	
Vallató spring and spa	46°23'13.08"	25°38'18.24"	1293 m	
Lobogó spa	46°23'20.46"	25°38'21.66"	1288 m	
Szemvív spring	46°23'22.38"	25°38'22.44"	1285 m	
Extremitățile profilului B	B1	25°38'18.42"	46°23'16.02"	1291 m
	B5	25°38'20.22"	46°23'15.72"	1291 m

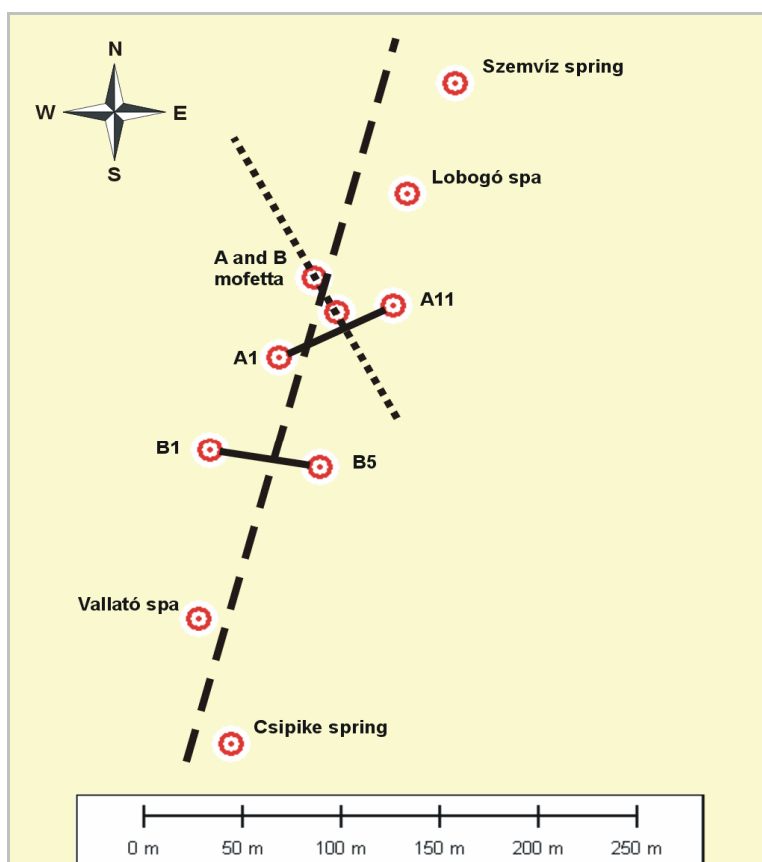


Fig. 4.5. Locația celor două mofete (A și B), extremitățile profilului A (A1 și A11), extremitățile profilului B (B1 și B5), și locațiile izvoarelor de apă minerală și bazinele din Băile-Harghita. Linia punctată (normala pe profilul A) reprezintă direcția faliei locale presupuse, iar linia întreruptă (normala pe profilul B) reprezintă direcția zonei de falie.

Rezultatele măsurătorilor pe profilul B sunt prezentate în fig.4.6 ca distribuții ale concentrațiilor de radon și toron. Se poate observa că valorile concentrațiilor de radon se situează într-un intervalul 1,2 - 30,6 kBq·m⁻³, iar distribuția are un singur maxim în punctul B2, cu valoarea de 30,6 kBq·m⁻³. Valorile concentrațiilor de toron se situează în domeniul 7,2 - 38,2 kBq·m⁻³, ca și concentrațiile de radon. Distribuția conține de asemenea un singur maxim în punctul B3, cu valoarea de 38,2 kBq m⁻³.

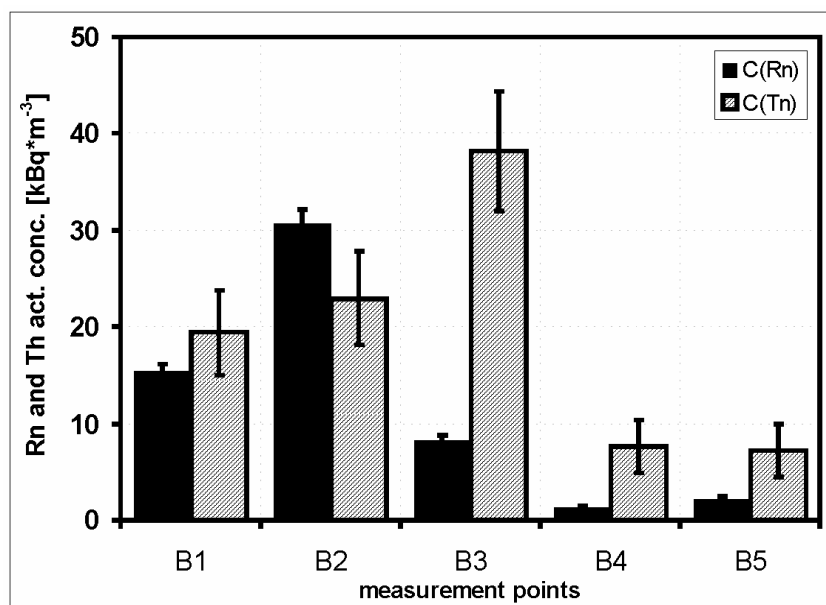


Fig. 4.6. Distribuția concentrațiilor de Rn și Tn din profilul B. Coloanele negre reprezintă concentrațiile de radon (CRn) iar coloanele gri reprezintă concentrațiile de toron (CTn).

Rezultatele măsurătorilor din profilul B arată că maximele de radon și toron au fost găsite în puncte diferite. Maxima de radon a fost găsit în B2, iar maxima de toron în B3. Cu toate acestea, nici unul dintre aceste puncte nu a fost găsit la extremitățile profilului. Explicația este că falia se situează între punctele B2 și B3, mai aproape probabil de B3, din cauza lungimii de difuzie mai scurt al toronului, în comparație cu radonul. O altă probabilitate este ca falia să fie înclinată și că maxima de toron arată intersecția acesteia cu suprafața, în timp ce radonul mai difuziv arată locația medie al acestuia. Astfel de măsurători pot fi folosite pentru detectarea prezenței și înclinației faliilor, care în cazul de față are înclinația spre est.

Rezultatele măsurătorilor de-a lungul profilului B diferă semnificativ de cele obținute de-a lungul profilului A, deoarece acesta nu arată o distribuție a concentrațiilor de radon în mai multe segmente. În cazul profilului B, adâncimea mai mică de prelevare de probe de gaz (40-50 cm) limitează toate măsurătorile la același strat de la suprafață, fără influența umidității și stratului impermeabil de argilă pentru difuzia radonului. Stratul de suprafață de-a

lungul profilului B este asociat cu un strat de sol superficial, în timp ce de-a lungul suprafeței topografice înclinate de-a lungul profilului A, stratul superior are grosime variabilă.

Acknowledgements. Acest studiu a fost finanțat de către Institutul de Programe de Cercetare (KPI) al Universității Sapientia (EMTE), prin proiectul cu titlul: „*Székelyföldi posztvulkanikus jelenségek tanulmányozása*” („*Studiul activităților postvulcanice în Regiunea de Seciune*”).

4.2.2. Studiu de radon pe falia Peceneaga-Camena (Dobrogea)

Acest studiu prezintă rezultatele preliminare ale măsurătorilor de radon în sol pe zona de falie Peceneaga-Camena (Dobrogea). Scopul studiului este identificarea locației și direcției faliei, prin măsurători de radon în sol într-o locație unde actualmente există cercetări de geodinamică a faliei, referitor la deplasarea acesteia [Besutiu, Zlagnean, 2009; 2010].

Falia Peceneaga-Camena (PCF) este una dintre cele mai cunoscute falii regionale pe teritoriul României, cu direcția NW-SE, și reprezintă limita nordică a platformei Moesice. Mai mulți geofizicieni consideră PCF ca placa limită dintre Microplaca Moesică și Placa Europei de Est [Besutiu, Zlagnean, 2009]. Din punct de vedere geologic, PCF traversează sectorul Dobrogean, separând seria Proterozoicului Superior al șisturilor verzi din Dobrogea Centrală de depozitele Paleozoic-Mezozoic al curbării Dobrogei de Nord [Săndulescu, 1994].

Diferite dovezi geologice au fost furnizate PCF având o activitate de coliziune-alunecare activă (active strike-slip activity). Bazat pe studii de micro-cinematică pe falii, sa estimat o deplasare orizontală de ~ 3 mm/an [Săndulescu, 1994]. În scopul de a clarifica comportamentul geodinamic actual al PCF, Institutul de Geodinamică al Academiei Române a inițiat un experiment geodetic, astfel că pe segmentul rezultat al PCF, a fost instalat un observator geodinamic, în satul Fântâna Mare (Baspunar). Observatorul geodinamic Baspunar a fost echipat cu două stații complete de înaltă precizie - Leica TC 1201 montați pe seria de șisturi verzi ai Dobrogei Centrale, și orientați spre două reflectoare laser instalați pe flancul celălalt al PCF, la o distanță de 300 m respectiv 350 m, pe depozitele Jurassic-Triasic al Dobrogei de Nord.

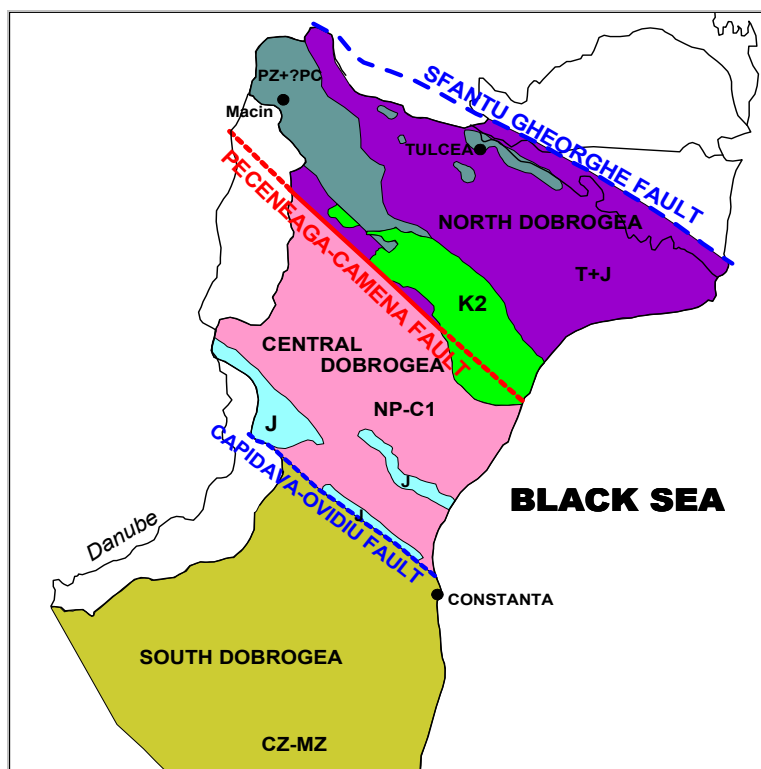


Fig. 4.7. Schiță tectonică a Dobrogei, arătând poziția Faliei Peceneaga-Camena. (PZ+?PC- Paleozoic+?Precambrian (zona Măcin); PZ-Paleozoic (zona Tulcea); T+J-Triasic+Jurasic (zona Tulcea); K2-Cretacic Superior (Bazinul Babadag); NP-C1-Neo-proterozoic-Cambrian Inferior (formațiunea Histria)).

Măsurători de radon în sol în zona Faliei Peceneaga-Camena, și rezultate

Măsurătorile de radon pe falia Peceneaga-Camena au fost efectuate în 2010 (iunie și iulie) în localitatea Fântâna-Mare (Dobrogea), în condiții uscate de teren. Coordonatele localității Fântâna Mare sunt: N: 44°51'42", E: 28°29'49", iar altitudinea de 130-170 m. Conform experimentului Baspunar, Falia Peceneaga Camena trece între poziția observatorului de geonamică menționat și locurile celor două reflectoare laser (biserica și școală).

Metoda aplicată de măsurare a radonului în sol pe zonele de falii este aceeași ca și în cazul studiului în Băile-Harghita și este prezentat în cap.2. Adâncimea de prelevare de probe de gaz din sol în cazul acestor investigații a fost de 60 cm. Măsurătorile de radon în sol au fost efectuate în mai multe locuri sitate pe o parte și cealalta a poziției presupuse a faliei, luând ca puncte de referință observatorul, cu biserica și școala. Criteriul de selecție al locurilor măsurătorilor a fost ca acestea să se alinieze pe profile care să fie normale pe direcția faliei (NW-SE). În total au fost efectuate 50 de măsurători de concentrații de radon în sol, alinate pe 5 profile. Din cauza condițiilor de teren, din aceste măsurători doar o parte au relevanță pentru distribuții reprezentative de concentrații de radon. Astfel, s-au găsit trei serii de puncte, ce formează 3 profile bine definite. Pentru identificarea coordonatelor geografice al locurilor de

măsurare respectiv a punctelor de referință (observator, biserică și școală) am folosit un GPS tip Garmin. Coordonatele punctelor celor trei profile cu altitudinile sunt prezentate în tabelul 4.6 și reprezentarea lor pe o hartă Google Earth împreună cu profilele de măsurare respectiv a direcției faliei, sunt prezentate în fig.4.8.

Table 4.6. Coordonatele și altitudinea punctelor de referință (observator, biserică, școală) și a extremităților celor trei profile (A, B și C).

Punct	N(gr,min,sec)	E(gr,min,sec)	Alt.(m)	
Observator	44° 51' 32.7"	28° 29' 44.5"	154	
Biserică	44° 51' 42.9"	28° 29' 37.4"	142	
Scoală	44° 51' 41.2"	28° 29' 38.3"	141	
Profil A	PA1 (P26)	44° 51' 42.4"	28° 29' 26.7"	148
	PA5 (P30)	44° 51' 39.2"	28° 29' 25.8"	146
Profil B	PB1 (P9)	44° 51' 39.8"	28° 29' 35.5"	141
	PB5 (P4)	44° 51' 34.8"	28° 29' 32.9"	159
Profil C	PC1 (P14)	44° 51' 39.7"	28° 29' 43.4"	132
	PC5 (P15)	44° 51' 34.1"	28° 29' 38.5"	148

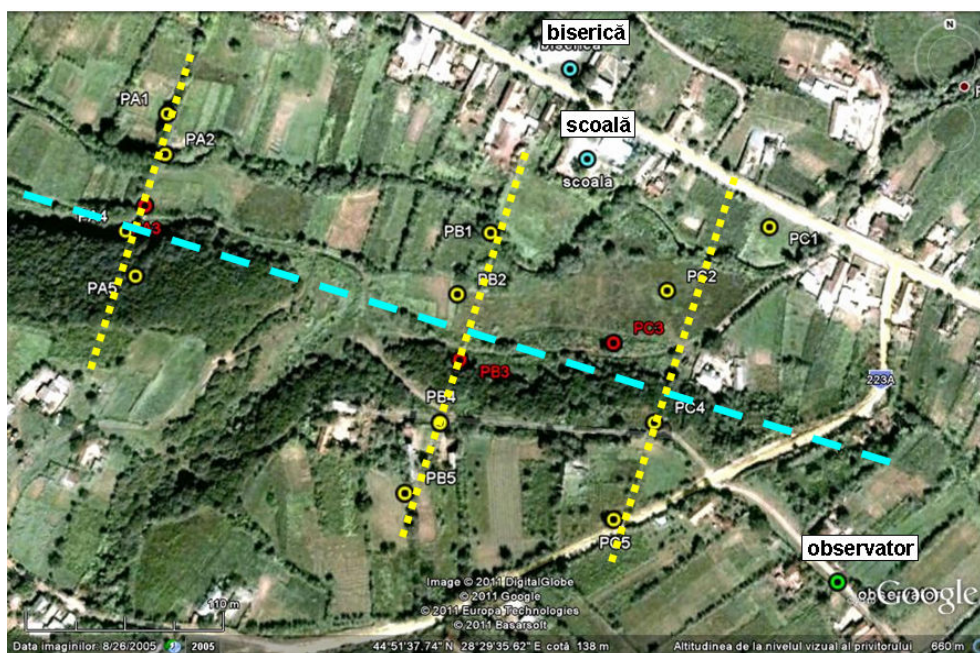


Fig.4.8. Locația punctelor de măsurare pe cele trei profile (PA, PB, PC) cu referințele: observator, biserică și școală (reflectorii laser). Cele trei linii punctate sunt profilele de măsurare, iar linia întreruptă (normală pe profile) corespunde direcției faliei Peceneaga-Camena. Această linie trece printre punctele corespunzătoare maximelor de radon.

Valorile concentrațiilor de radon pentru toate cele 50 de măsurători se situează într-un domeniu larg, între 8,0 și 50,3 kBq·m⁻³. Valorile peste 50 kBq·m⁻³ ca anomalii de radon sunt reprezentative pentru zonele cu falii, și risc de radon. Reprezentarea concentrațiilor este realizată inițial prin selectarea punctelor cu valori care redau distribuții cu un singur maxim.

Astfel, cele trei profile conțin câte 5 puncte de măsurare. Distanțele dintre primul și ultimul punct de pe profile este de 101 m pentru profilul A, 186 m pentru profilul B, și 205 m pentru profilul C. Rezultatele măsurătorilor de radon sunt reprezentate prin distribuțiile valorilor de concentrații de radon, care pentru cele trei profile sunt prezentate în fig.4.9.

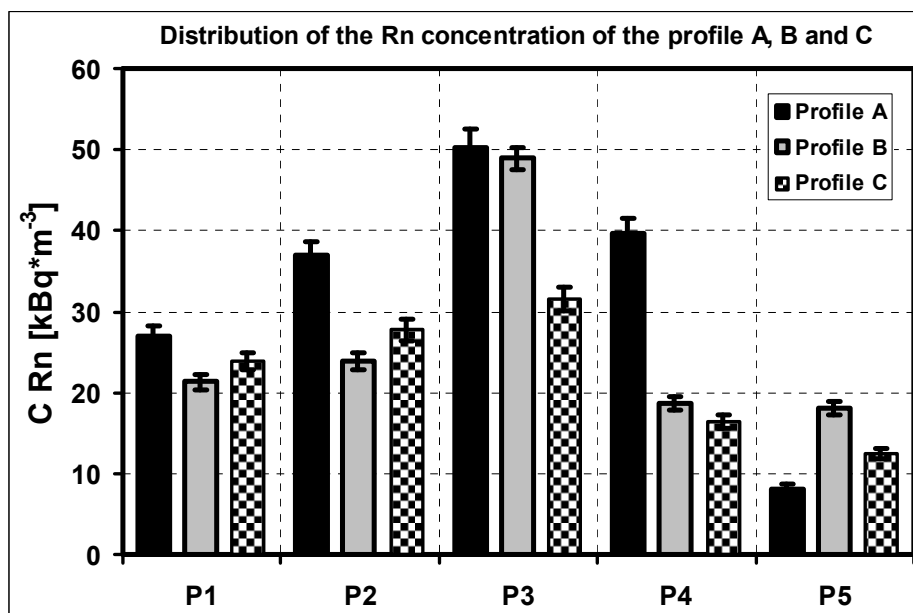


Fig. 4.9. Distribuția concentrațiilor de radon pentru cele trei profile A, B și C și erorile.

Pentru cele trei profile sau obținut distribuții ale concentrațiilor de radon cu câte un singur maxim. Pentru profilul A, maxima de concentrație este de 50,2 kBq m⁻³, pentru profilul B maxima este de 48,9 kBq m⁻³, respectiv pentru profilul C maxima de 31,5 kBq m⁻³. Aceste distribuții și maximele, arată că pentru o zonă de falii concentrațiile de radon în sol la adâncimea de ~ 60cm sunt în intervalul de minimum 20 kBq m⁻³ și 50 kBq m⁻³. Acesta pare a fi domeniul concentrațiilor de radon în sol pe zone de falii, la adâncimea de 60 cm.

Concluzii

Măsurătorile de radon și toron în sol din zona de mofete și ape minerale din Băile-Harghita au reprezentări bune și sunt reproductibile. Rezultatele măsurătorilor sunt în concordanță cu existența și poziția presupusă a faliei locale (NW-SE) care unește cele două mofete. Mofetele și izvoarele de apă minerală sunt conectate de-a lungul unei zone de falii secundare cu orientarea N-NE. Rezultatele măsurătorilor de radon și toron arată distribuții cu o singură valoare maximă în ambele cazuri. Distribuțiile sunt în concordanță cu ipoteza că linia de falie majoră trece prin punctul corespunzător valorilor maxime ale concentrațiilor de

radon și toron. De asemenea, este clar că concentrațiile de toron cu precizie mare dau o locație mai precisă pentru acest tip de caracteristică tectonică decât radonul, ca rezultat al timpului de înjumătățire și lungime de difuzie mult mai mic al toronului.

Măsurătorile de radon în sol efectuate pe Falia Peceneaga-Camena au o reprezentare bună, a căror rezultate arată și indică existența și poziția unei zone de falie orientată în direcția NW-SE. Rezultatele măsurătorilor arată distribuții cu un singur maxim ale concentrațiilor de radon pentru profilele studiate. Și aceste distribuții sunt conforme cu ipoteza că falia trece de-a lungul punctelor cu maximele de concentrații de radon.

4.3. Studii de radon în sol cu aplicații în geofizică

Radonul fiind prezent peste tot în scoarța terestră, concentrația în diferite formațiuni geologice depinde în principal de parametrii geofizici ai mediului, cum ar fi cantitatea de radium (uneori uraniu), și parametrul de difuzie. În spațiile închise ale formațiunilor geologice radonul poate avea un rol de *element urmă de monitorizare*, dacă se aplică corect metoda pentru măsurarea activității sau a concentrației. O metodă de măsurare este monitorizarea prin acumulare a difuziei, care poate fi studiat în foraje sau spații închise, izolate de schimbul de aer atmosferic. Studiul proceselor de difuzie în medii geologice corelate cu calcule ale unor modele teoretice, pot da informații asupra *lungimii de difuzie* al atomilor de radon, care este în relație cu *permeabilitatea rocilor, sau solurilor* [Papp et al., 2004; Papp et al., 2005].

Studiul descris în acest sub-capitol reprezintă cercetarea mea la Universitatea Eötvös Loránd (ELTE) din Budapesta, într-un stagiu anterior de doctorat, între 2001-2004.

4.3.1. Metodă de determinare a unor parametri geofizici prin măsurători de radon în foraje ale unor formațiuni geologice

Studiul de față propune o *metodă nouă pentru măsurarea concentrației de radon în foraje închise* ale unor formațiuni geologice și folosirea rezultatelor pentru *estimarea parametrilor de difuzie* al acestor medii [Papp et al., 2008].

Scopul studiului

Scopul principal al studiului este dezvoltarea și testarea unei metode noi pentru determinarea parametrului de difuzie și cantității de radon al formațiunilor geologice, folosind capacitatea de monitorizare a radonului. Ideea de bază este de a urmări acumularea radonului într-un foraj închis, prin monitorizarea concentrației până la nivelul de saturație, efectuat în formațiuni de argilă sau sol. Rata de creștere a concentrației de radon depinde de mărimea parametrului de difuzie în mediile respective, care determină direct permeabilitatea mediului.

În scopul de a monitoriza acumularea radonului în foraj, este necesar ca acesta să fie golit de radon. Acest lucru poate fi realizat printr-un proces simplu de "aerisire", în care aerul din foraj se schimbă cu un gaz ce nu conține radon. Procesul de aerisire poate fi efectuat ori cu aerul pur (cu conținut de radon mic), sau prin folosirea de azot îmbuteliat (fără conținut de radon). Cu toate acestea, astfel de procese de aerisire influențează în profunzime conținutul de radon în foraj și în straturile din jurul forajului. După aerisirea forajului, acumularea radonului arată o dependență de timp caracteristică, a cărei rată de creștere este determinat de mărimea parametrului de difuzie al mediului din jurul forajului [Papp et al., 2006; Papp et al., 2007].

Descrierea metodei experimentale

Pentru testarea metodei sa ales zona Mátyáshegy (Budapesta), cu altitudinea relativ mare (~150 m), unde solul este în majoritate nisipos (silty-sand). Aici sa creat un foraj în sol cu un perforator geologic manual. Diametrul forajului astfel creat este de ~8,0 cm și adâncimea de ~4,5 m, (volumul ~23 L). Adâncimea forajului a fost ales să fie suficient de mare, astfel încât parametrii meteorologici să nu influențeze concentrația de radon din foraj.

Măsurarea concentrației de radon din foraj sa efectuat cu monitorul de radon Alpha Guard. Acesta este o cameră de ionizare (cameră proporțională), care monitorizează în continuu concentrația de radon. În afară de concentrația de radon, acest instrument măsoară presiunea aerului, temperatura și umiditatea relativă a aerului la suprafață. În scopul de a efectua circulația continuă a aerului din foraj pentru măsurarea concentrației de radon la suprafață, sa folosit o pompă electronică Alpha Pump care este conectat la intrarea detectorului Alpha Guard, și al cărui debit de extracție este de $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, în mod continuu [ALPHA GUARD, Manual]. În aceste măsurători determinarea concentrațiilor de radon provine din gazul din punctul cel mai adânc al găurii (de la adâncimea de ~4,5 m), la care concentrația de radon este puțin influențat de parametrii meteorologici de la suprafață.

Rezultatele experimentale

A. Influența parametrilor meteorologici asupra concentrației de radon

O condiție necesară a măsurătorilor de difuzie a radonului în foraje ale unor medii geologice este ca forajul să fie închis și izolat și ca adâncimea de la care se colectează gazul din sol să fie suficient de mare, astfel încât factorii meteorologici de la suprafață să nu influențeze concentrația de radon. Măsurătorile de determinare a dependenței concentrației de radon din foraj de factorii meteorologici de la suprafață au fost efectuate în perioada ian-feb, 2006. Într-unul din înregistrările continue pe o perioadă de 11 zile, parametrii mășurați sunt reprezentați în fig.4.10, la intervale de oră.

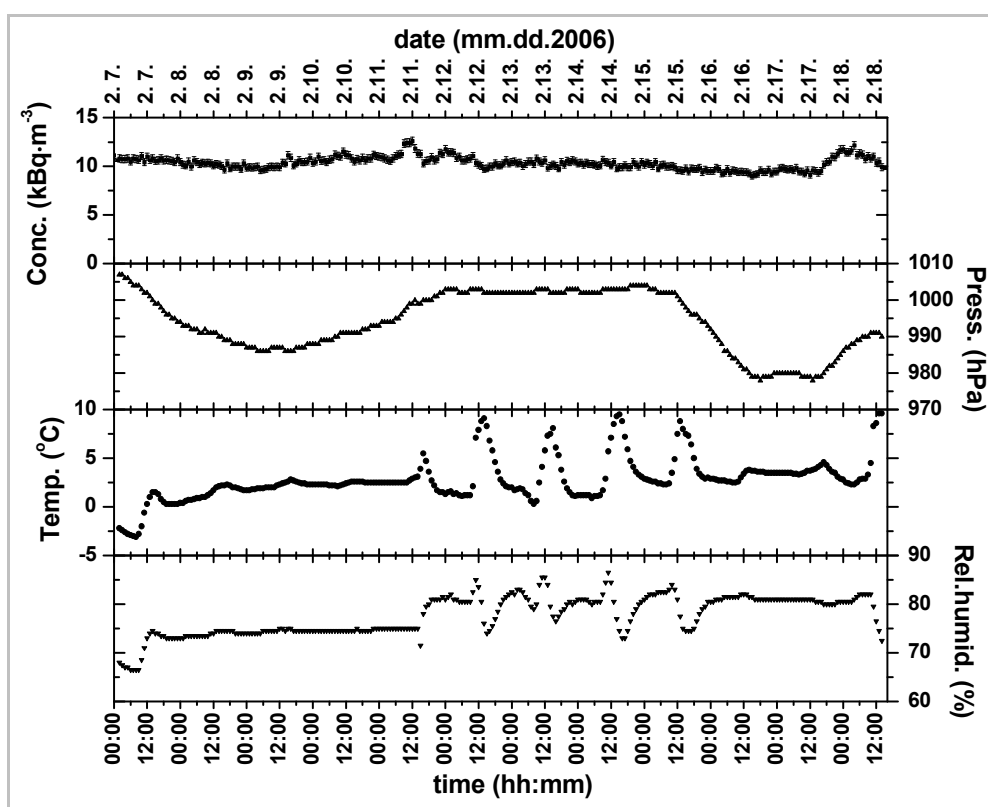


Fig. 4.10. Dependența concentrației de radon (*Conc.*) măsurat în punctul cel mai adânc al forajului, de parametrii meteorologici: presiunea atmosferică (*p*), temperatura (*T*) și umiditatea relativă (*RH*), măsurate la suprafață (toate, cu monitorul Alpha Guard)

Potrivit acestei perioade, valoarea medie a concentrației de radon din foraj la adâncimea de 4,4 m a fost de $10,4 \pm 0,4$ kBq·m⁻³, minima de $9,0 \pm 0,3$ kBq·m⁻³ și maxima de $12,6 \pm 0,4$ kBq·m⁻³. În mare parte a acestui domeniu, concentrația de radon a avut variații de ~10 % din valoarea medie, astfel că valorile acestei perioade pot fi considerate adecvate pentru scopurile noastre, în determinarea parametrilor țintă cu limita de precizie de 10-20 %.

Variațiile concentrației de radon din foraj și al parametrilor meteorologici de la suprafață arată corelații slabe, reprezentate prin coeficienții de corelație: $R_{C,P} = 0,33$ (între concentrație și presiune atmosferică); $R_{C,RH} = -0,21$ (între concentrație și umiditate relativă) și $R_{C,T} = -0,30$ (între concentrație și temperatură). Rezultatele arată că variația concentrației de radon este slab influențată de condițiile meteorologice de la suprafață.

B. Măsurători de acumulare de radon în foraj

În scopul de a studia acumularea radonului în foraj, înaintea măsurătorilor este necesar eliminarea gazului radon printr-un proces de "aerisire" a forajului. Pentru acesta am folosit inițial azot îmbuteliat, care nu conține radon. Presiunea azotului din butelie a fost controlat de către un regulator de presiune. După fiecare proces de aerisire, s-a măsurat concentrația de radon din foraj pe o perioadă de câteva ore. Măsurătorile de radon au fost efectuate cu același monitor de radon Alpha Guard, în intervale de zece minute. Măsurătorile arată că concentrația de radon în foraj pornește de la un nivel foarte scăzut și crește în fiecare caz la același nivel de saturație în echilibru. Rezultatele măsurătorilor caracteristice de concentrații de radon sunt prezentate în fig.4.11, ce corespund la diferite procese de aerisire.

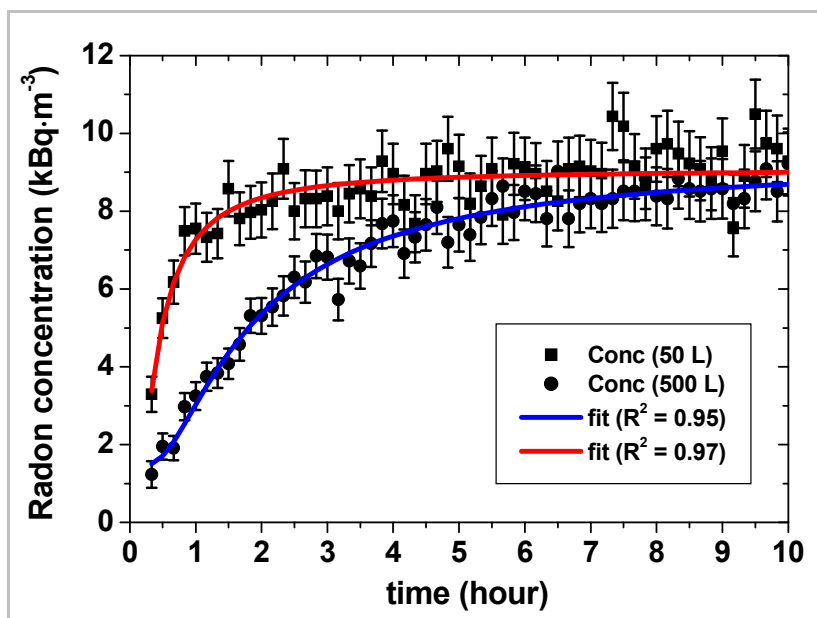


Fig. 4.11. Dependența de timp a concentrației de radon $C(t)$ în foraj (exemple). Punctele pătrat corespund valorilor măsurate în urma procesului de aerisire cu 50 L și cercurile corespund valorilor măsurate după procesul de aerisire cu 500 L. Curbele continue sunt fitările calculate ale concentrației de radon pentru diferite măsurători (vezi în text).

Pentru reprezentarea simplă a rezultatelor am parametrizat datele măsurătorilor cu o funcție simplă:

$$C(t) = C_{eq} \cdot [1 - \exp(-k \cdot (t - t_0))] \quad (4.3)$$

unde, C_{eq} este concentrația de radon în saturație la echilibru, k este un parametru de creștere a concentrației, t este timpul, și t_0 este o constantă de timp pentru o posibilă diferență în răspunsul detectorului. Această formă descrie bine datele în toate cazurile. Din imaginea de ansamblu a datelor se observă că în urma proceselor de aerisire a forajului parametrul k depinde de cantitatea de azot (V) la o presiune constantă (p) (fig.4.12), și este independent de presiunea gazului (p), la aceleași cantități (V) (fig.4.13). Dependența parametrului k de volumul de gaz la aceeași presiune arată că un volum mai mare de azot în procesul de aerisire afectează mai mult rata de acumulare de radon în foraj.

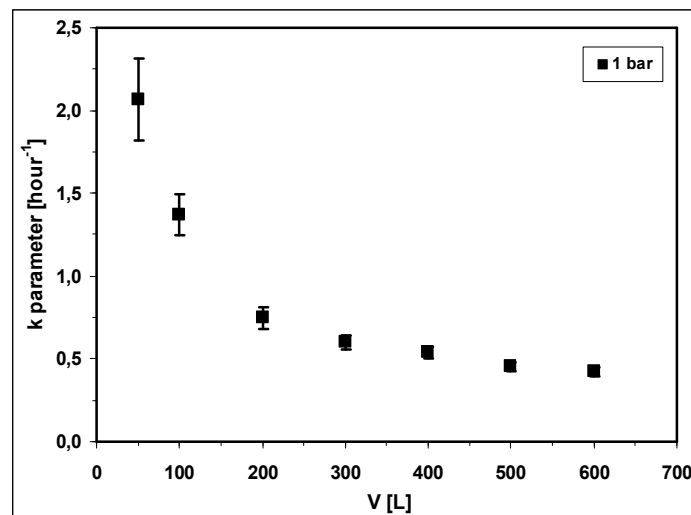


Fig. 4.12. Dependenta parametrului k de volumul de gaz (V) folosit la aerisire, pentru presiunea $p = 1$ bar. Aceste valori provin din fitările simple pe concentrațiile de radon.

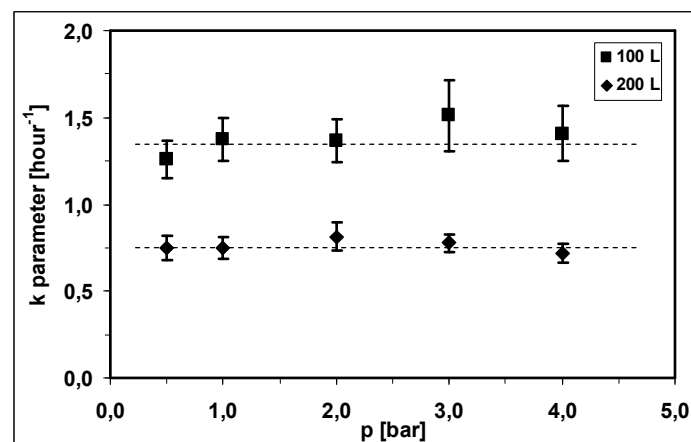


Fig. 4.13. Dependenta parametrului k de presiunea gazului (p) folosit la aerisire, pentru două valori al volumului de gaz (V). Pătratele corespund unui volum $V = 100$ L, respectiv cercețele la $V = 200$ L. Aceste valori provin din fitările simple pe concentrațiile de radon.

4.3.2. Modelul matematic de determinare a parametrilor geofizici și evaluarea rezultatelor

Presupunem că acumularea de radon în forajul aerisit este în principal rezultatul procesului de difuzie al acestui gaz din mediul din jurul forajului. Presupunem deasemenea că există practic două straturi de sol în jurul forajului, astfel încât procesul de aerisire goleşte o grosime relativ subțire a stratului în jurul peretelui găurii și, dincolo de acest strat golit mediul geologic are un conținut omogen de radon în echilibru.

Pentru estimarea nivelului de concentrație de radon din foraj într-un anumit moment, trebuie să adăugăm contribuțiile din toate părțile mediului geologic, atât din zona largă ce înconjoară forajul și are concentrație de radon în echilibru, cât și din stratul golit.

Prin urmare, pentru modelarea difuziei radonului într-un mediu geologic folosim ecuația de difuzie luând în considerare pierderile prin dezintegrare și generare de radon [Andersen, 2000; Cosma et al., 2001]:

$$\frac{\partial C(\vec{r}, t)}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C(\vec{r}, t)}{\partial \vec{r}^2} - \lambda \cdot C(\vec{r}, t) + G \quad \dots(4.4)$$

unde, $C(\vec{r}, t)$ este concentrația de radon în funcție de vectorul de direcție $\vec{r}(x, y, z)$, t este timpul, D este coeficientul de difuzie efectiv, λ este constanta de dezintegrare a $^{222}\text{Rn} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $G = \lambda \cdot C_{eq}$ este rata de generare de radon în porii din sol și C_{eq} este concentrația de radon în echilibru în mediul geologic.

Soluția acestei ecuații $C(\vec{r}, t)$ dă contribuția în timp a unei surse de radon ce difuzează într-un volum mic. Presupunem că fiecare regiune infinitezimală din mediul înconjurător dă contribuția în foraj prin difuzie. Pentru estimarea nivelului de radon în foraj, adăugăm contribuțiile $p(t)$ din fiecare punct $\vec{r}(x, y, z)$ al mediului geologic înconjurător ca funcție de timp [Koshlyakov et al., 1964]:

$$p(t) = \frac{1}{(4 \cdot \pi \cdot D \cdot t)^{3/2}} \cdot \int_0^r \exp\left[-\left(\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4 \cdot D \cdot t}\right)\right] \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (4.5)$$

Integrarea se face pentru toate punctele din marginea forajului, considerând forajul într-o geometrie cilindrică. După calcule, probabilitatea contribuției $p(t)$ va fi de forma:

$$p(t) = 0,5 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \right] \cdot s(v) \quad (4.6)$$

unde parametrii $u = \frac{r}{\sqrt{2 \cdot D \cdot t}}$ și $v = \frac{h}{\sqrt{4 \cdot D \cdot t}}$ depind de grosimea stratului aerisit (în care r și h sunt raza respectiv adâncimea cilindrului considerat), și considerăm $r \approx h$.

Parametrul $s(v)$ este aproximat printr-o funcție de eroare, astfel că:
 $s(v) = erf(v) = 1 - (1 + a_1 \cdot v^1 + a_2 \cdot v^2 + a_3 \cdot v^3 + a_4 \cdot v^4)^{-4}$ unde, $a_1=0,278393$; $a_2=0,230389$; $a_3=0,000972$ și $a_4=0,078108$. [Abramowitz and Stegun, 1964].

Rezultatul integrării depinde în principal de raportul $q_i = r_i / \sqrt{D}$, unde r_i este suma razei forajului (r_0) și grosimea efectivă a stratului curățat (Δr_i) în procesul de aerisire de ordinul i ($r_i = r_0 + \Delta r_i$) și D este parametrul de difuzie în mediul dat. Ca reprezentare, $p(t)$ este un parametru de normare a valorii absolute a concentrației de radon (C_{eq}) la valoarea măsurată $C(\vec{r}, t)$, astfel că formula rezultată pentru concentrație va fi:

$$C(\vec{r}, t) = (C_{eq} - C_0) \cdot [1 - 2 \cdot p(t) \cdot e^{-\lambda t}] + C_0 \quad (4.7)$$

unde, C_{eq} este concentrația de radon în echilibru și C_0 este nivelul inițial de radon din foraj (ce nu a fost golit în urma procesului de aerisire).

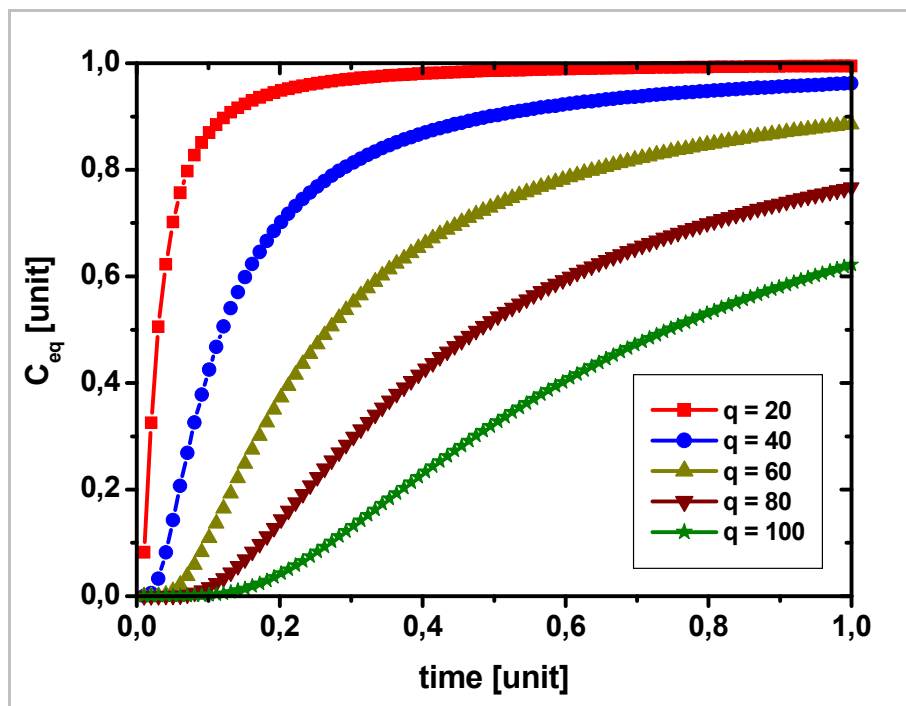


Fig. 4.14. Distribuția concentrațiilor de radon ($C(t)$) din modelul matematic de difuzie a radonului. Diferitele distribuții corespund la valori diferite ale parametrul q_i determinat de grosimea efectivă a stratului aerisit (Δr_i), și la concentrații inițiale $C_0=0$.

Rezultatele calculelor după compararea seriilor măsurate de concentrații de radon cu ecuația finală (4.7) sunt arătate în fig.4.11, prin curbele de fitare pentru cele două exemple descrise mai sus. În fiecare caz al proceselor de aerisire am determinat parametrul $q_i = r_i/\sqrt{D}$ care practic depinde de grosimea stratului curățat (Δr_i) și de coeficientul de difuzie (D). Dependența acestui paramertu (q_i) de volumul de gaz de azot (V_i) folosit în procesele de curățare la presiune a gazului pentru aerisire constant, este prezentat în fig.4.15.

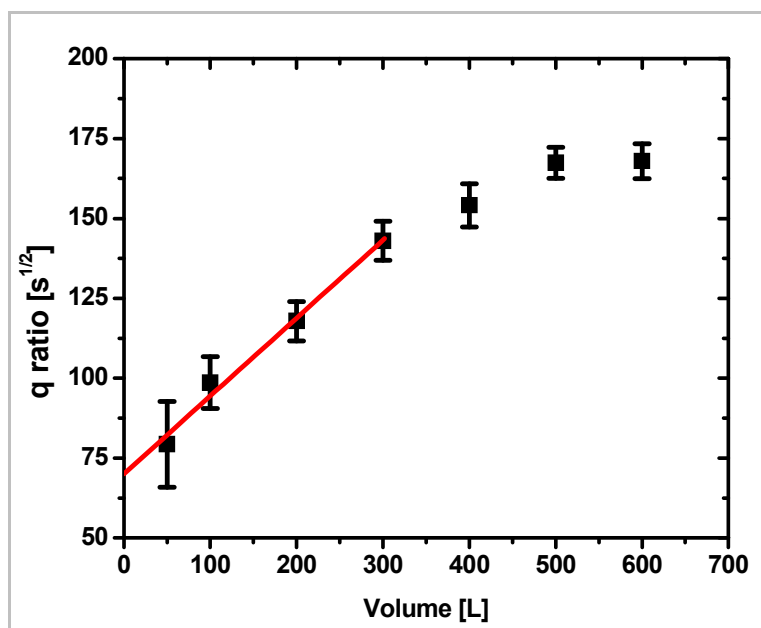


Fig. 4.15. Dependența parametrului $q = r/\sqrt{D}$ de volumul de gaz (V) din procesul de aerisire. Linia continuă reprezintă extrapolarea datelor pentru un volum 0.

În scopul de a determina parametrul de difuzie D , trebuie să cunoaștem definitiv valoarea r_i cel puțin pentru un singur caz. Desigur, nici unul din cazurile măsurate nu este identic cu cazul ideal, în care aerul din gaură inițial nu conține radon, în timp ce pereții găurii au conținutul de radon la echilibru. Acesta ar fi putut da direct valoarea reală al lui D . Cu toate acestea, putem găsi valoarea parametrului $q_i = r_i/\sqrt{D}$ pentru cazul stratului neaerisit (unde $r_i = r_0$ raza găurii), și astfel putem determina foarte ușor și foarte rapid parametrul de difuzie D . Un astfel de caz nu este realizabil experimental, deoarece ar însemna o schimbare bruscă al aerului din forajului saturat cu radon, cu aer fără radon, fără proces de aerisire. Cu toate acestea, putem face o extrapolare a rezultatelor din fig.4.15 pentru un volum $V \rightarrow 0$ al gazului folosit la aerisire, în consecință pentru cazul $r_i \rightarrow r_0$. Modificarea parametrului

$q = r/\sqrt{D}$ arată că valoarea reală al acestuia nu poate fi prea diferit de cea extrapolată în jurul volumului $V = 0$, astfel că pentru cazul studiat $\Rightarrow q_0 = (r/\sqrt{D})_{(0)} = (70,0 \pm 3,6) \sqrt{s}$.

Deoarece secțiunea forajului are valoarea nominală a razei de 4,0 cm, din cauza neuniformității solului valoarea efectivă poate fi puțin mai mare decât valoarea nominală, în jur de **4,4 cm**. Astfel, valoarea parametrului de difuzie corespunzător valorii nominale a razei forajului este $D = (3,9 \pm 0,4) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Această valoare a parametrului de difuzie corespunde cu valorile altor metode aplicate pentru cazul *tipului de sol silt-nisipos fin* [Yu et al., 1993; Nazaroff and Nero, 1988].

Concluzii

Am arătat că într-un foraj închis cu adâncimea de câțiva metri, măsurătorile de concentrații de radon în diferite condiții meteorologice sunt stabile și sunt reproductibile până la ~10%. Acesta permite introducerea unei metode simple de estimare a parametrului de difuzie a formațiunilor geologice. Prin aerisirea forajului se poate urmări acumularea radonului în foraj, ce provine din mediul geologic ce înconjoară forajul. Rata de acumulare de radon este determinat în principal de procesul de difuzie al radonului în mediul geologic.

Datele experimentale au fost comparate cu un model matematic care ia în considerare difuzia radonului, pierderile prin dezintegrare și generarea acestuia în mediul geologic. Calculele descriu cu succes creșterea în timp a concentrației de radon și dau un rezultat pentru parametrul de difuzie în diferite medii geologice cu o eroare de 20%.

În măsura în care măsurătorile și calculele teoretice sunt *reproductibile* în medii geologice cu diferite permeabilități, această metodă va putea avea aplicație practică în *proiectarea depozitelor geologice finale de materiale radioactive* prin determinarea permeabilității rocilor pentru gaze.

Acknowledgements. Acest studiu a fost finanțat de către „Agency for Research Fund Management and Research Exploitation”, „Kutatás-fejlesztési Pályázati és Kutatás-hasznosítási Iroda” (KPI) al Statului Maghiar (contract GVOP-3.2.1. 2004-04-0233/3.0).

5. CONCLUZII GENERALE

Teza înglobează trei aspecte ale măsurătorilor de radon din sol. Tratarea matematică a migrației radonului în sol și transportul acestuia către atmosferă arată că mecanismul dominant de transport al radonului către suprafața solului neacoperit este difuzia. Pentru transportul radonului din subsolul caselor către interior, procesul predominant este mecanismul de advecție.

Metoda aplicată pentru măsurători de radon în sol este o metodă simplă, eficientă și ușor aplicabilă, ce se bazează pe prelevarea de probe de gaz din sol și măsurarea concentrației de radon cu detectorul de scintilație cu celule Lucas (LUK3C). Metoda de măsurare a fost testată la Exercițiul de Intercomparare de Măsurători de Radon în Sol, la siteuri de referință din Republica Cehia (RIM, 2010). Rezultatele și testele statistice arată un acord bun al valorilor măsurate de către grupul nostru cu valorile celorlalte grupuri participante, respectiv un acord bun între valorile medii ale noastre cu baza de date al locurilor de referință. Comparatiile îndeplinesc testul de criteriu și valoarea estimată a concentrației de radon din sol de către grupul nostru este foarte bine acceptat, cu un raport relativ de 0,997 dintre determinările grupului nostru și al altor grupuri participante.

Permeabilitatea solului este un parametru important în procesele de transport al radonului în sol, care influențează în mare măsură fluxul sau exhalatia de radon din sol. Măsurătorile in situ de permeabilitate pot fi efectuate cu o metodă specială, prin măsurarea debitului de curgere a unei cantități de apă dintr-un tub de plastic, conectat direct la sonda de extracție a gazului din sol. Conform metodei, parametrul de permeabilitate depinde de raportul debitului de apă ce curge din tub și presiunea negativă exercitată în tub ($k \sim q/p$), și depinde de factorul de formă al sondei. Intervalul de măsurare a permeabilității solului cu această metodă este de la permeabilități foarte mari ($5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$), până la permeabilități ultra mici ($7 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$). În urma intercomparării instrumentului special cu permeametrul Radon-Jok, valorile parametrilor testați (q/p) sunt într-o corelație bună în limita erorilor de măsurare, astfel că măsurătorile cu instrumentul special sunt de încredere.

Studiile de radon din sol cu aplicații în mediu conduc la evaluarea riscului de radon din sol. Zona de interes a fost ales zona Băița-Ștei, fiind o zonă de risc de radon „**radon prone-area**”, unde concentrația de radon în aer și în locuințe atinge nivele ridicate (peste 13 % din casele investigate au concentrații mai mari de $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$).

- Studiul se bazează pe rezultatele măsurătorilor integrate de radon de interior, efectuate în 335 de case din zona Băița-Ștei, ce indică o medie anuală a concentrației de radon de interior de $\sim 343,5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, ceea ce este de 4,16 ori mai mare decât media estimată pentru Transilvania, de $82,5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Distribuția concentrațiilor de radon de interior arată existența a două surse independente de radon pentru casele din zonă. Prima sursă este solul și materialele de construcții normale (90 % din case, cu concentrații sub $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), iar cea de a doua sursă provine din sterilul de uraniu folosit la construcția caselor (6 % din case, cu concentrații peste $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$).
- Pentru caracterizarea solului ca principala sursă de radon au fost efectuate măsurători de radon în sol și permeabilități ale solurilor, în 10 locuri selectate din zona Băița-Ștei. Estimarea riscului de radon din sol se bazează pe evaluarea potențialului de radon, prin măsurarea concentrației de radon din sol și a permeabilității solului [*Papp et al., 2009; Papp et al., 2010; Cosma, Papp, et al., 2010*]. Concentrațiile de radon din sol au un domeniu larg de valori cuprinse între **5,5 și 512,0 kBq·m⁻³** iar valorile de permeabilitate sunt între **5·10⁻⁸ m²** (permeabilitate mare) și **2.8·10⁻¹³ m²** (permeabilitate mică). Pe baza măsurătorilor de radon din sol, determinarea potențialului de radon indică un risc ridicat pentru majoritatea locurilor investigate, acestea fiind soluri neacoperite sau terenuri de case.
- Pentru caracterizarea materialului de construcție ca sursă secundară de radon în zona Băița-Ștei, au fost efectuate măsurători de exhalatie de radon dintr-o probă cu amestec de nisip-pietriș și cu piatră, ce provine din râul Criș-Băița. Rezultatele măsurătorilor de emanație de radon din fracțiunea de nisip și pietriș prezintă o emanație de ~ 10 ori mai mare față de emanația din piatră. Prin urmare, acest material are o contribuție importantă la expunerea la radon pentru populație, în casele care folosesc ca material de construcție.

Studiile de radon din sol cu aplicații în geologie conduc la identificarea de falii tectonice și localizarea direcției sau orientării lor, prin rolul radonului și toronului ca elemente urmă („trace elements”). Faliile servesc drept căi de acces pentru migrația gazelor spre suprafață și pot fi identificate prin detectarea unor activități ridicate de radon și toron din sol. Detectarea unor activități mari de toron pot indica anumite procese de migrație rapide în raport cu timpul de viață scurt al toronului (55 sec), ceea ce este posibil numai în prezența

unui gaz purtător (CO₂), ce apare frecvent în zone de falii. Structurile tectonice pot fi cartografiate astfel printr-o combinație de măsurători de radon și toron, susținute de măsurători de CO₂ [*Papp et al., 2010*].

- Măsurătorile de radon și toron în sol din zona de mofete și ape minerale din Băile-Harghita sunt în concordanță pe de o parte cu existența și poziția presupusă a faliei locale (de direcție NW-SE) care unește cele două mofete existente în zonă, iar pe de altă parte aceste măsurători arată că mofetele și izvoarele de apă minerală conectate de-a lungul unei direcții cu orientare N-NE traversează zona de falie majoră. Rezultatele măsurătorilor arată distribuții ale concentrațiilor de radon și toron cu un maxim în ambele cazuri. Distribuțiile sunt în concordanță cu ipoteza că zona de falie trece prin punctul corespunzător valorilor maxime ale concentrațiilor de radon și toron. De asemenea, este clar că concentrațiile de toron cu precizie mare dau o locație mai precisă pentru acest tip de caracteristică tectonică decât radonul, ca rezultat al timpului de înjumătățire și lungime de difuzie mult mai mic al toronului.
- Măsurătorile de radon în sol efectuate pe zona de falie Peceneaga-Camena (Dobrogea), într-o locație unde actualmente există cercetări de geodinamică a faliei (referitor la deplasarea acesteia), au o reprezentare bună, și arată distribuții ale concentrațiilor de radon cu un singur maxim pentru profilele studiate. Astfel, rezultate măsurătorilor arată existența și poziția unei zone de falie orientată în direcția NW-SE. Și aceste distribuții sunt conforme cu ipoteza că falia trece de-a lungul punctelor corespunzător maximelor de concentrații de radon [*Cosma, Papp, et al., in press 2*].

Aplicațiile în geofizică ale studiilor de radon conduc la determinarea parametrilor geofizici ai mediilor geologice, prin monitorizarea radonului în foraje ale unor formațiuni geologice. În spațiile închise ale formațiunilor geologice radonul poate avea un rol de *element de monitorizare*, dacă se aplică corect metoda de măsurare a activității sau a concentrației. O metodă de măsurare este monitorizarea difuziei radonului prin acumulare, care poate fi studiat în foraje închise și izolate de schimbul de aer atmosferic. Studiul proceselor de difuzie în diferite medii geologice corelate cu calcule ale unor modele matematice pot da informații asupra *parametrului de difuzie*, care este în relație cu *permeabilitatea pentru gaze a rocilor și solurilor* [*Papp et al., 2004; Papp et al., 2005; Papp et al., 2008*].

- Într-un foraj închis cu adâncimea de câțiva metri, măsurătorile de radon în diferite condiții meteorologice sunt stabile și sunt reproductibile până la ~10%. Acesta permite *introducerea unei metode simple de estimare a parametrului de difuzie în medii geologice*. Prin aerisirea forajului se poate urmări acumularea radonului în foraj, astfel că rata de acumulare este determinat în principal de procesul de difuzie al radonului din mediul geologic.
- Datele experimentale au fost comparate cu un model matematic care ia în considerare difuzia radonului, pierderile prin dezintegrare și generarea acestuia în mediul geologic. Compararea datelor cu modelul matematic arată că modelul forajului aerisit urmat de modelul de difuzie al radonului în mediul din jurul găurii este valabil și descrie cu succes acumularea radonului în foraj. În final, acesta dă un rezultat pentru parametrul de difuzie al mediului, cu o eroare de ~ 20%. Pe de altă parte, concentrația de radon la saturație dă o estimare asupra conținutului de radium al formațiunilor geologice, cu o precizie de ~ 15 %.
- Metoda fost verificată și în alte două foraje, și rezultatele măsurătorilor arată concordanță cu măsurătorile din primul foraj. În măsura în care măsurătorile experimentale și calculele teoretice sunt reproductibile în medii geologice cu permeabilități diferite, această metodă poate avea aplicabilitate practică în determinarea permeabilității rocilor pentru gaze. Această aplicație are o importanță practică la proiectarea depozitelor geologice finale de materiale radioactive.

Bibliografie selectivă:

Abramowitz, M., Stegun, I.A., (1964), *Handbook of Mathematical Functions*, National Bureau of Standards Applied Mathematics Series - 55, Washington, pp.932.

Andersen, C.E., (2000), *Radon Transport Modeling: User's Guide to RnMod3d*. Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, pp.7-11.

Barnet, I., Pacheroová, P., Neznal, M., Neznal, M., (2008), *Radon in geological environment - Czech experience*. Special Papers No.19, Czech Geological Survey. Praha.

Besutiu, L., Zlagnean, L., (2009), *Watching structural and geodynamic features of a plate-boundary: Peceneaga - Camena Fault*. Geophysical Research Abstracts, vol.11, EGU 2009-12023, 2009 EGU General Assembly, Vienna.

Besutiu, L., Zlagnean, L., (2010), *Monitoring dynamics of an active plate-boundary: Peceneaga-Camena Fault*. Geophysical Research Abstracts, vol.12, EGU 2010-1514, 2010 EGU General Assembly, Vienna.

Cosma, C., Cucuș-Dinu A., **Papp, B.**, Begy, R., Sainz, C., *Soil and indoor radon connection in Baița-Ștei radon prone area (Romania)*. Journal of Environmental Radioactivity, **in press 3** (manuscript number: JENVRAD-D-11-00477; **I.F: 1,466 / 2010**).

Cosma, C., Dancea, F., Jurcut, T., Ristoiu, D., (2001), *Determination of ^{222}Rn emanation fraction and diffusion coefficient in concrete using accumulation chambers and the influence of humidity and radium distribution*. Applied Radiation and Isotopes, **54**, p.467–473.

Cosma, C., Dinu, A., **Papp, B.**, Begy, R., Gabor, A., Brisan, N., Besutiu, L., *Radon implication in life and earth science: Baita-Stei area and Peceneaga-Camena fault*. Analele Universității din București - Seria Fizica, **in press 2**.

Cosma, C., Moldovan, M., Dicu, T., Kovacs, T., (2008), *Radon in water from Transylvania (Romania)*. Radiation Measurements, **43** (8), p.1423 - 1428.

Cosma, C., **Papp, B.**, Moldovan, M., Cosma, V., Cindea, C., Suci, L., Apostu, A., (2010), *Measurement of Radon Potential from Soil Using a Special Method of Sampling*. Acta Geophysica, **58** (5), p.947-956. (**I.F: 1,0 / 2010**).

Cosma, C., Ristoiu, D., Cozar, O., Znamirovski, V., Daraban, L., Râmboiu, S., Chereji, I., (1996 a), *Studies on the occurrence of radon in selected sites of Romania*. Environment International, **22** (1), p.61-65.

- Cosma, C., Ristoiu, D., Poffijn, A., Meesen, G., (1996 b), *Radon in various environmental samples in the Herculane spa, Cerna valley, Romania*. Environment International, **22** (1), p.383-388.
- Cosma, C., Sainz, C., Cucuș, A., Dicu, T., Begy, R., Moldovan, M., **Papp, B.**, Niță, D., (2011a), *Implementarea tehnicilor de remediere a radonului în locuințele din zona minei uranifere Băița/IRART*. în volumul Conferinței Naționale a Societății Române de Radioprotecție, Ed. ETNA, p.6-11.
- Cosma, C., Szacsvai, K., Dinu, A., Ciorba, D., Dicu, T., Suci, L., (2009), *Preliminary integrated indoor radon measurements in Transylvania (Romania)*. Isotopes in Environmental and Health Studies, IEHS, **45** (3), p.259-268.
- Cucuș, A., Cosma, C., Dicu, T., **Papp, B.**, Niță, D.C., Begy, R., Moldovan, M., Cîndea, C., Fulea, D., Sainz, C., (2011), *Situația actuală a măsurătorilor de radon indoor și perspectiva acțiunilor de remediere în zona minieră Băița-Bihor (România)*. ECO TERRA-Journal of Environmental Research and Protection, Editura Bioflux, **27**, p.25-32.
- Damkjaer, A. Korsbech, U., (1992), *A small-diameter probe for in-situ measurements of gas permeability of soils*. Radiation Protection Dosimetry, **45** (1-4), p.85-89.
- Etioppe, G., Martinelli, G., (2002), *Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, **129** (3-4), p.185-204.
- Font, L., Baixeras, C., Moreno, V., Bach, J., (2008), *Soil radon levels across the Amer fault*. Radiation Measurements, **43** (1), p.319-323.
- Gasparini, P., Mantovani, M.S.M., (1978), *Radon anomalies and volcanic eruptions*. Journal of Volcanology and Geothermal Research **3** (3-4), p.325-341.
- Horváth, Á., Bohus, L.O., Urbani, F., Marx, G., Piróth, A., Greaves, E.D., (2000), *Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela*. Journal of Environmental Radioactivity, **47** (2), p.127-133.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., Sano, Y., (1995), *Ground-Water Radon Anomaly Before the Kobe Earthquake in Japan*. Science, **269** (5220), p.60-61.
- Imme, G., La Delfa, S., Lo Nigro, S., Morelli, D., Patanè, G., (2006), *Soil radon monitoring in the NE flank of Mt. Etna (Sicily)*. Applied Radiation and Isotopes **64** (5), p.624-629.

- Kemski, J., Siehl, A., Stegemann, R., Valdivia-Manchego, M., (2001), *Mapping the geogenic radon potential in Germany*. The Science of the Total Environment, **272** (1-3), p.217-230.
- Koshlyakov, N.S., Smirnov, M.M., Gliner, E.B., (1964), *Differential Equations of Mathematical Physics*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, pp.480.
- Moldovan, M., Cosma, C., Encian, I., Dicu, T., (2009), *Radium-226 concentration in Romanian bottled mineral waters*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, **279** (2), p.487-491.
- Mosley, R.B., Snoddy, R., Brubaker, S.A., Brown, J., (1996), *Experimental evaluation of geometrical shape factors for short cylindrical probes used to measure soil permeability to air*. Environment International, **22** (1), p.509-520.
- Nazaroff W.W., Moed B.A., and Sextro R.G., (1988), *Soil as a source of indoor radon: Generation, migration, and entry*, by Nazaroff W.W., and Nero A.V. In *Radon and Its Decay Products in Indoor Air.*, Ed. John Wiley and Sons, New York, p.57-112.
- Néda, T., Szakács, A., Cosma, C., Mócsy, I., (2008 a), *Radon concentration measurements in mofettes from Harghita and Covasna Counties, Romania*. Journal of Environmental Radioactivity, **99** (12), p.1819-1824.
- Néda, T., Szakács, A., Mócsy, I., Cosma, C., (2008 b), *Radon concentration levels in dry CO₂ emanations from Harghita Băi, Romania, used for curative purposes*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, **277** (3), p.685-691.
- Neznal, M., Neznal, M., Malotín, M., Barnet, I., Mikšová, J. (2004), *The new method for assessing the radon risk of building sites*, Special Papers No.16. Czech Geological Survey. Praha.
- Niță, D.C., Cosma, C., Moldovan, M., Rusu, O.A., **Papp, B.**, (2010), *Măsurători de radon în sol în zona Clujului*. Environment and Progress 14, Ed. EFES, Cluj-Napoca, p.370-373.
- Niță, D.C., Cosma, C., **Papp, B.**, Moldovan, M., (2009), *Radon measurements in the area of Cluj-Napoca (Romania)*. Studia Universitatis Babeș-Bolyai, Seria Physica, **1**, p.107-113.
- Papp, B.**, Cosma, C., Kiss, Á., (2010), *Radon potenciál vizsgálata talajban (Study of radon potential in soil)*. in the volume of the conference “VI. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia”, Nyíregyháza, p.301-306.

Papp, B. Cosma, C., Moldovan, M., Niță, D.C., (2009), *Potențialul de radon din sol și estimarea riscului de radon*. ECO TERRA, **22-23**, p.42-44.

Papp, B. Cosma, C., Niță, D.C., Moldovan, M., (2009), *Soil Radon Measurements in Cluj-Napoca (Romania)*. V. Magyar Radon Fórum, Pannon Egyetem Kiadó, Veszprém, p.55-60.

Papp, B. Deák, F., Horváth, Á., Kiss, Á., Rajnai, G., Szabó, Cs., (2008), *A new method for the determination of geophysical parameters by radon concentration measurements in bore-hole*. Journal of Environmental Radioactivity, **99** (11), p.1731-1735, (IF: 1,466 / 2010).

Papp, B. Deák, F., Horváth, Á., Kiss, Á., Rajnai, G., Szabó, Cs., (2006), *Egy új módszer radon diffúziójának vizsgálatára zárt talajfúrásban*. 3th Hungarian Radon Forum, Pannon Egyetem edition, p.59-66.

Papp, B. Deák, F., Horváth, Á., Kiss, Á., Rajnai, G., Szabó, Cs., (2007), *Új módszer radon diffúziójának vizsgálatára talajfúrásban*. 4th Hungarian Radon Forum, Pannon Egyetem edition, p.7-12.

Papp, B. Deák, F., Horváth, Á., Kiss, Á., Vid, G., (2004), *A barlangi agyagos kitöltés radon viszonyainak vizsgálata a Baradla-barlang egy pontján*. Karsztfelődés IX., Szombathely, p.321-328.

Papp, B. Deák, F., Horváth, Á., Szabó, Cs., (2005), *Study of radon diffusion in soil using closed bore-hole arrangement*. Environment and Progress III., Ed.Carpatica, Cluj-Napoca, p.291-295.

Papp, B. Horváth, Á., Kiss, Á., Rajnai, G., (2006), *Determination of the permeability of the soil, from radon concentration measurements*. Environment and Progress VI, Ed.Carpatica, Cluj-Napoca, p.370-373.

Papp, B. Szakács, A., Néda, T., Papp, Sz., Cosma, C., (2010), *Soil radon and thoron studies near the mofettes at Harghita Bai (Romania) and their relation to the field location of fault zones*. Geofluids, **10** (4), p.586–593. (I.F: 1,268 / 2010).

Ristoiu, D., Cosma, C., Ristoiu, T., Miles, J., (1996), *Radon mitigation in soils*. Symposium on Radiation Protection in Neighbouring Countries in Central Europe-1995, Proceedings, Portorož, Slovenia, September 4-8,1995, Ed. By Denis Glavič-Cindro, p.119-122.

Roba, C. A., Codrea, V., Moldovan, M., Baciú, C., Cosma, C., (2010), *Radon and radium content of some cold and thermal aquifers from Bihor County (northwestern Romania)*. Geofluids, **10** (4), p.571–585.

Rogers, V.C., Nielson, K.K., (1991), *Multiphase Radon Generation and Transport in Porous Materials*. Health Physics, **60** (6), p.807-815.

Sainz, C., Dinu, A., Dicu, T., Szacsvai, K., Cosma, C., Quindós, L. S., (2009), *Comparative risk assessment of residential radon exposures in two radon-prone areas, Ştei (Romania) and Torrelodones (Spain)*. Science of The Total Environment, **407** (15), p.4452-4460.

Sandor, G.N., Poffijn, A., Cosma, C., (1999), *Indoor Radon Survey in an Uranium Area From Romania*, Radon in the Living Environment, Athens, Greece, 19–23 April, 1999, p.207–208.

Săndulescu, M., (1994). *Overview on Romanian geology*, In: Berza, T. (Ed.), *Alcapa II Field Guidebook: Geological Evolution of the Alpine-Carpathian-Pannonian System*, Rom. J. Tecton. Reg. Geol., **74**, p.3-15, Bucharest.

Szabó, Á., (1978), *Ape și gaze radioactive în R.S. România*. Ed. Dacia, Cluj-Napoca.

Szakács, S., Néda, T., (2009), *Toronkutatósi lehetőségek a környezettudományban, (Thoron research possibility in environmental sciences)*. in the volume of the conference “V. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia”, Kolozsvár, p.299-305.

Yang, T.F, Walia, V., Chyi, L.L., Fu, C.C, Chen, C-H, Liu, T.K., Song, S.R., Lee, C.Y., Lee, M., (2005), *Variations of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan*. Radiation Measurements, **40** (2-6), p.496-502.

Yu, C., Loureiro, C., Cheng, J.J., Jones, L.G., Wang, Y.Y., Chia Y.P., Faillance, E., (1993), *Data Collection Handbook to Support Modelling Impacts of Radioactive Material in Soil*. Environmental Assessment and Information Sciences Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.