

**UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI**

**Facultatea de Geologie și Geofizică**



**TEZĂ DE DOCTORAT**

**Rezumat**

**Investigarea și evaluarea riscului de contaminare indus de prezența  
Depozitului Național de Deșeuri Radioactive-Băița Bihor**

**Doctorand**

*Ing. Bogdan Tudor OBREJA*

**Conducător științific**

*Prof. Dr. Ing. Daniel SCRĂDEANU*

**BUCUREȘTI 2018**

**UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI**

**Facultatea de Geologie și Geofizică**



*Titularul prezentei teze de doctorat a beneficiat pe perioada studiilor universitare de doctorat de o bursă atribuită prin proiectul „Programe doctorale și post-doctorale de excelență pentru formarea de resurse umane înalt calificate pentru cercetare în domeniile Științele Vieții, Mediului și Pământului”, beneficiar Universitatea din București, cod POSDRU/159/1.5/S/133391, proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013.*

## **TEZĂ DE DOCTORAT**

### **Rezumat**

**Investigarea și evaluarea riscului de contaminare indus de prezența  
Depozitului Național de Deșeuri Radioactive-Băița Bihor**

**Doctorand**

*Ing. Bogdan Tudor OBREJA*

**Conducător științific**

*Prof. Dr. Ing. Daniel SCRĂDEANU*

**BUCUREȘTI 2018**

## CUPRINS

CUPRINS.....	3
MULȚUMIRI .....	4
INTRODUCERE .....	5
SCOPURI ȘI OBIECTIVE .....	5
STRUCTURA TEZEI.....	6
<u>PARTEA I CARACTERIZAREA DEȘEURILOR RADIOACTIVE ȘI A SOLUȚIILOR DE DEPOZITARE.....</u>	<u>7</u>
Capitolul 1. CARACTERISTICI GENERALE ALE DEȘEURILOR RADIOACTIVE .....	7
1.1 Clasificarea deșeurilor radioactive.....	9
1.2 Managementul deșeurilor radioactive.....	9
Capitolul 2. OPȚIUNI DE DEPOZITARE A DEȘEURILOR RADIOACTIVE .....	10
2.1 Modalități de depozitare a deșeurilor radioactive în funcție de caracteristicile acestora. ....	10
2.2 Modalități de depozitare a deșeurilor radioactive în diverse formațiuni geologice. ....	11
<u>PARTEA a II-a. STUDIU DE CAZ – DEPOZITUL NAȚIONAL DE DEȘEURI RADIOACTIVE DE JOASĂ ȘI MEDIE ACTIVITATE BĂIȚA, JUD. BIHOR .....</u>	<u>12</u>
Capitolul 3. Prezentarea Depozitului Național de Deșeuri Radioactive de joasă și medie activitate – Băița, jud. Bihor.....	13
Sistemul constructiv și de monitorizare .....	13
Capitolul 4 CARACTERIZAREA CĂILOR DE INFILTRARE A APELOR METEORICE ÎN ZONA GALERIILOR DE DEPOZITARE ALE DNDR ȘI STUDIAREA RETENȚIEI RADIONUCLIZILOR. ....	16
4.1 Datele meteorologice din zona Depozitului Național de Deșeuri Radioactive – Băița Bihor.....	17
4.1.1 Parametri meteorologici monitorizați: .....	17
4.1.1.1 Precipitații .....	17
4.1.1.2 Temperatura aerului .....	18
4.1.1.3 Umiditatea aerului.....	18
4.1.1.4 Vântul.....	19
4.2 Studiul căilor de migrare a radionuclizilor în zona DNDR.....	19
4.2.1 Date Generale.....	19
4.2.2 Caracterizarea materialelor utilizate .....	19
4.2.2.1 Cesiul .....	19
4.2.2.2 Probe de rocă.....	20
4.2.2.3.Caracterizarea probelor P1-P4 cu ajutorul XRF și XRD .....	21
4.2.3 Metode de lucru .....	22
4.2.4. Rezultate și discuții .....	24
4.2.5.Concluzii .....	28
Capitolul 5 CARACTERIZAREA HIDROLOGICĂ ȘI HIDROGEOLOGICĂ A ZONEI DE INFLUENȚĂ A DNDR.....	29
5.1 Date generale .....	29
5.2 Descriere generală a bazinelor hidrografice.....	30
5.4 Interpretarea datelor hidrologice și hidrogeologice .....	31
5.5 Variații ale principalilor constituenți ai apelor studiate .....	32
CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE .....	37
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ .....	41
LISTA DE LUCRARI ELABORATE ȘI PUBLICATE .....	43

## MULȚUMIRI

La finalul desfășurării lucrărilor pentru realizarea tezei „Investigarea și evaluarea riscului de contaminare indus de prezența Depozitului Național de Deșeuri Radioactive-Băița Bihor”, doresc să le adresez mulțumiri tuturor persoanelor care m-au ajutat, susținut și încurajat de-a lungul acestei perioade.

În primul rând îmi doresc să mulțumesc coordonatorului meu științific, domnului Prof. dr. ing. Daniel SCRĂDEANU, din cadrul Universității București, Facultatea de Geologie și Geofizică, care mi-a făcut onoarea să mă îndrume, sprijine și încurajeze pe toată perioada de pregătire și de elaborare a tezei de doctorat, precum și pentru oportunitatea de a face parte din programul de burse doctorale POSDRU „*Programe doctorale și post-doctorale de excelență pentru formarea de resurse umane înalt calificate pentru cercetare în domeniile Științele Vieții, Mediului și Pământului*”, cod POSDRU/159/1.5/S/133391, proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013.

Doresc să mulțumesc echipei de îndrumare: dnei. dr. Elena NEACȘU pentru continua susținere și ajutorul acordat în desfășurarea acestei activități, precum și domnilor profesori din cadrul Universității București, Facultatea de Geologie și Geofizică, dlui. Prof. dr. ing Cristian MĂRUNȚEANU și dlui. Prof. dr. ing. Lucian PETRESCU.

În mod deosebit, doresc să îi mulțumesc dnei. dr. Felicia DRĂGOLICI, Șef al Departamentului de Management al Deșeurilor Radioactive din cadrul Institutului Național de C&D pentru Fizica și Inginerie Nucleară - Horia Hulubei (IFIN-HH) pentru sprijinul, încurajarea și încrederea, asigurate permanent pe toată durata studiilor doctorale.

Le mulțumesc tuturor colegilor din colectivul DMDR din cadrul IFIN-HH pentru susținerea acordată și în mod special dlui. ing. Dumitru MORAR - Șef punct de lucru - Depozitul Național de Deșeuri Radioactive de joasă și medie activitate Băița-Bihor, dlui. dr. Laurențiu DONE, dlui. dr. Liviu ȚUGULAN, dnei. cs. Mihaela NICU, dnei. cs. Laura IONAȘCU și dlui IDT. 1 Gheorghe DOGARU.

Nu în ultimul rând doresc să mulțumesc familiei, în special soției Ana Maria OBREJA și fiicei mele Sofia Elena OBREJA pentru înțelegerea și liniștea oferite pe toată perioada studiilor.

## INTRODUCERE

Dezvoltarea tehnicilor și tehnologiilor nucleare sub diferite forme a condus de-a lungul timpului la formarea și acumularea unor materiale radioactive considerate deșeuri radioactive, care prin definiție sunt „acele materiale rezultate din activitățile nucleare, pentru care nu s-a prevăzut nicio întrebuințare ulterioară și care conțin sau sunt contaminate cu radionuclizi în concentrații superioare limitelor de exceptare reglementate”.

Depozitarea acestor deșeuri radioactive trebuie realizată astfel încât să nu afecteze siguranța mediului înconjurător și a generațiilor actuale și viitoare.

Existența și gestionarea deșeurilor radioactive constituie problema cea mai importantă pentru toate țările în care se desfășoară activități în domeniul nuclear (în principal energetica nucleară) și chiar și pentru cele în care nu au loc astfel de activități (care dețin deșeuri radioactive rezultate din aplicații medicale, de cercetare etc).

În prezent, ca soluție de gestionare a deșeurilor radioactive, este acceptată în unanimitate ideea depozitării acestora în instalații special dedicate care, în funcție de tipul de deșeuri radioactive, pot fi amplasate atât la suprafața pământului, cât și în subteran în formațiuni geologice stabile, la adâncimi variate care pot depăși 500 m (așa numitele depozite geologice de mare adâncime destinate deșeurilor radioactive care conțin izotopi de viață lungă – ex: combustibilul nuclear uzat).

## SCOPURI ȘI OBIECTIVE

Teza de doctorat are ca obiective:

- evaluarea proprietăților dispersive ale mediului subteran și ale apelor de suprafață din zona Depozitului Național de Deșeuri Radioactive de joasă și medie activitate (DNDR) Băița Bihor.
- evaluarea riscului de contaminare indus de prezența DNDR.

Depozitul Național de Deșeuri Radioactive (DNDR) Băița – Bihor pus în operare în anul 1985, este administrat de către Institutul Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară „Horia Hulubei” (IFIN-HH) și este destinat depozitării finale a deșeurilor radioactive de joasă și medie activitate de viață scurtă provenite din activități industriale, medicale și de cercetare (denumite deșeuri instituționale), inclusiv materialele rezultate din decomisionarea reactorilor de cercetare și surse radioactive uzate.

Aceste deșeuri, premurgător depozitării la DNDR Băița Bihor, sunt colectate, tratate și condiționate în Stațiile de Tratare a Deșeurilor Radioactive (STDR) din cadrul IFIN-HH și din cadrul Sucursalei Cercetări Nucleare (SCN) Pitești, a Regiei Autonome Tehnologii pentru

Energia Nucleară (RATEN).

DNDR Băița nu este autorizat pentru depozitarea deșeurilor provenite din ciclul combustibilului nuclear.

Activitățile necesare întocmirii tezei de doctorat s-au întins pe durata a circa 4 ani (2013-2017) și au cuprins:

- documentare și cercetare bibliografică,
- prelevarea probelor de apă și de rocă, măsurători și observații în zonă și pe amplasamentul DNDR Băița Bihor,
- experimente în laboratoarele DMDR din cadrul IFIN HH.

Lucrarea prezentată ca teză de doctorat cuprinde:

- date cu caracter general legate de deșeurile radioactive și de soluțiile de depozitare ale acestora;
- rezultatele experimentelor de laborator, măsurătorilor și observațiilor de teren referitoare la zona studiată;
- analiza și compararea datelor obținute, cu date din alte lucrări referitoare la zona studiată.

Noutatea lucrării, prezentată ca teză de doctorat, este legată în principal de evaluarea comportării radionuclizilor și a evoluției diferitelor procese care au loc la contactul dintre apa subterană și rocă de-a lungul căilor de migrare. Pentru clarificarea acestor aspecte esențiale în evaluarea riscului de contaminare indus de prezența DNDR, au fost evaluate în detaliu în zona amplasării DNDR:

- caracteristicile climatologice ale zonei;
- condițiile hidrologice și hidrogeologice;
- deșeurile radioactive și materialul de umplutură;
- potențialul de etanșare al formațiunilor geologice.

## **STRUCTURA TEZEI**

Teza de doctorat este structurată în două părți, împărțite în 6 capitole și are ca scop investigarea zonei de influență a Depozitului Național de Deșeuri Radioactive de joasă și medie activitate Băița, jud. Bihor.

Partea I intitulată „Caracterizarea deșeurilor radioactive și a soluțiilor de depozitare”, este împărțită în două capitole și urmărește caracterizarea succintă a deșeurilor radioactive și a soluțiilor de depozitare a acestora, pe plan mondial, la adâncimi diferite, în diverse formațiuni geologice.

Capitolul 1 – „Caracteristici generale ale deșeurilor radioactive” - prezintă sintetic problematica deșeurilor radioactive și metodele generale de management al acestora.

Capitolul 2 – „Opțiuni de depozitare a deșeurilor radioactive” – este dedicat prezentării opțiunilor de depozitare în funcție de natura deșeurilor radioactive și de caracteristicile mediului gazdă al diferitelor amplasamente.

PARTEA a II-a. Studiu de caz – Depozitul Național de Deșeuri Radioactive de joasă și medie activitate Băița, jud. Bihor, este împărțită în patru capitole (capitolele 3 – 6) bazate pe studii legate de amplasarea și operarea DNDR Băița-Bihor.

Capitolul 3 – „Prezentarea Depozitului Național de Deșeuri Radioactive de joasă și medie activitate – Băița, jud. Bihor” - realizează o descriere detaliată a cadrului natural în care este amplasat depozitul, a barierelor inginerești utilizate, precum și a programului de monitorizare a mediului desfășurat în zona de influență a acestuia.

Capitolul 4 - „Caracterizarea căilor de infiltrare a apelor meteorice în zona galeriilor de depozitare ale DNDR și studierea retenției radionuclizilor” este o caracterizare completă a posibilelor căi de migrare (fisurația naturală a rocilor), precum și a capacității de retenție a radionuclizilor de către formațiunile traversate.

În capitolul 5 – „Caracterizarea hidrologică și hidrogeologică a zonei de influență a DNDR”, - se evaluează zona de influență a DNDR pe baza parametrilor fizico-chimici și radiologici ai apelor de suprafață și subterane din zona de influență a DNDR, cât și a zonelor adiacente, în vederea comparării acestora cu rezultatele viitoarelor studii de monitorizare.

În capitolul final, „Concluzii și contribuții personale”, este prezentată o sinteză a rezultatelor obținute, o interpretare a acestora și enumerate contribuțiile personale realizate în cadrul programului doctoral.

## **PARTEA I CARACTERIZAREA DEȘEURILOR RADIOACTIVE ȘI A SOLUȚIILOR DE DEPOZITARE**

### **Capitolul 1. CARACTERISTICI GENERALE ALE DEȘEURILOR RADIOACTIVE**

Prin definiție, deșeurile radioactive reprezintă materialele rezultate din activitățile nucleare, pentru care nu s-a prevăzut nicio întrebuințare ulterioară și care conțin sau sunt contaminate cu radionuclizi (atomi instabili ai unui element care se dezintegrează cu emiterie de energie sub formă de radiații) în concentrații superioare limitelor de exceptare reglementate de autoritatea națională de reglementare, autorizare și control a activităților nucleare.

Deșeurile radioactive sunt produse în întreaga lume în cadrul procesului de generare de energie electrică din surse nucleare, în diferitele etape ale ciclului combustibilului nuclear,

precum și în urma utilizării materialelor radioactive în industrie, medicină, agricultură și cercetare, minerit, prelucrare a minereului și din alte activități care implică folosirea materialelor radioactive. Toate țările produc și generează deșeuri radioactive, în special cele care folosesc centrale nucleare pentru a genera electricitate.

Proprietățile deșeurilor radioactive variază atât în ceea ce privește conținutul, cât și în privința proprietăților fizico - chimice. Prezența radiațiilor are drept rezultat apariția unui potențial pericol pentru oameni și pentru mediul înconjurător. Prin urmare, acestea trebuie gestionate astfel încât orice riscuri să fie reduse la niveluri acceptabile.

Depozitarea este ultima etapă din managementul deșeurilor radioactive. Aceasta se realizează prin plasarea deșeurilor radioactive în instalații de depozitare cu asigurarea securității radiologice și a protecției fizice, fără a intenționa să fie mutate sau reutilizate și cu asigurarea supravegherii pe termen lung (funcție de tipul de depozit). Securitatea este în principal realizată prin concentrare și reținere, adică izolarea deșeurilor radioactive condiționate în depozitul definitiv.

Deșeurile radioactive conțin elemente chimice radioactive care nu mai au utilizare practică, ele putând fi întâlnite, din punct de vedere al stării de agregare, sub formă gazoasă, lichidă sau solidă. Din punct de vedere al radioactivității, caracterul nociv al acestora poate varia de la perioade scurte de timp până la sute, mii de ani sau chiar sute de mii de ani.

În activitatea de management a deșeurilor radioactive, acestea sunt tratate și aduse într-o formă solidă și stabilă, reduse ca volum și imobilizate pentru a facilita transportul și depozitarea lor finală.

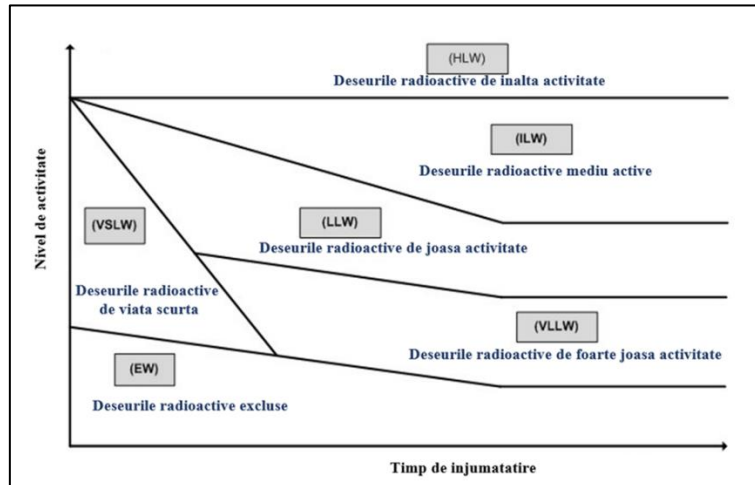
În România legislația de reglementare a activităților nucleare a fost adoptată în anii '50-'60 (odată cu punerea în funcțiune a Reactorului de Cercetare VVR-S de pe Platforma Măgurele). Odată cu adoptarea acestei legislații a fost construită Stația de Tratare a Deșeurilor Radioactive (STDR) din cadrul IFIN-HH. Aceasta a intrat în operare la sfârșitul anului 1975. Ulterior, în anul 1982, a început proiectarea și amenajarea Depozitului Național de Deșeuri Radioactive de joasă și medie activitate de la Băița, județul Bihor (DNDR), acesta fiind finalizat și pus în operare în anul 1985.

Prin punerea în funcțiune și exploatarea în condiții de securitate radiologică a celor două instalații a fost rezolvată gestionarea deșeurilor radioactive instituționale rezultate din aplicarea tehnicilor și tehnologiilor nucleare (industrie, cercetare, medicină, agricultură, învățământ, protecția mediului etc.), cu excepția ciclului combustibilului nuclear, din întreaga țară.



## 1.1 Clasificarea deșeurilor radioactive

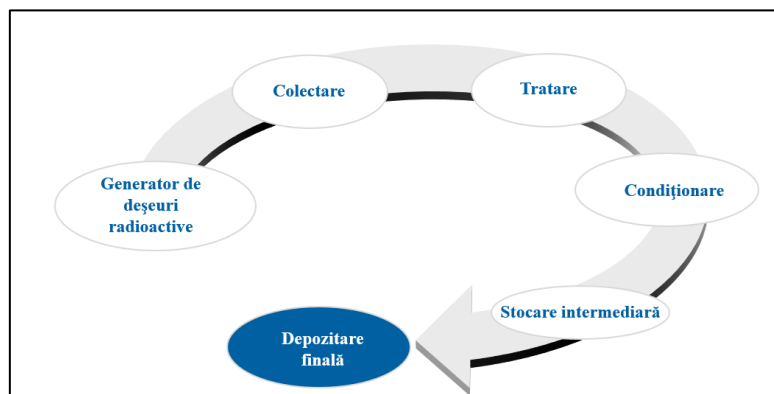
Clasificarea deșeurilor radioactive se face ținând cont de nivelul de radioactivitate și de perioada de timp în care deșeul rămâne periculos. În plus, se ia în considerare și faptul că unele deșeuri radioactive, datorită modului de producere, pot conține substanțe chimice toxice, iar toxicitatea lor, spre deosebire de radioactivitate, nu scade în timp, fapt care influențează hotărâtor modul lor de gestionare (figura 1).



Figură 1 Clasificarea deșeurilor radioactive [IAEA]

## 1.2 Managementul deșeurilor radioactive

Problematika deșeurilor radioactive presupune urmarea unor etape de bază pentru gestionarea în mod corespunzător a acestora. Aceste etape constau în predepozitarea (care include caracterizarea, pre-tratarea, tratarea, condiționarea, stocarea și transportul) și depozitarea acestora (figura 2).



Figură 2 Schema managementului deșeurilor radioactive

De asemenea, în managementul deșeurilor radioactive un pas important este caracterizarea acestora, în funcție de care se stabilesc metodele optime de gestionare a deșeurilor.

Pre-tratarea este o activitate anterioară etapei de tratare, în cadrul careia se desfășoară următoarele operațiuni: colectarea, segregarea, (sortarea deșeurilor în funcție de activitate, material, doză etc.), tratamentul chimic și decontaminarea.

Tratarea deșeurilor radioactive are ca obiectiv schimbarea caracteristicilor acestora și include următoarele activități: reducerea volumelor, extragerea radionuclizilor din deșeuri și modificarea compoziției fizice și chimice.

Condiționarea reprezintă totalitatea operațiunilor care reduc pericolul potențial dat de dispersia și migrarea radionuclizilor și au ca rezultat realizarea coletelor cu deșeuri radioactive potrivite pentru stocare sau depozitare finală, incluzând: imobilizarea deșeurilor în diferite tipuri de matrici solide (cimentul, bitumul și sticla) și închiderea/etanșarea deșeurilor în colete.

Stocarea deșeurilor radioactive are ca scop atingerea timpilor de înjumătățire necesari pentru eliberarea restrictivă/nerrestrictivă sau pentru procesarea viitoare și/sau depozitarea ulterioară a acestora.

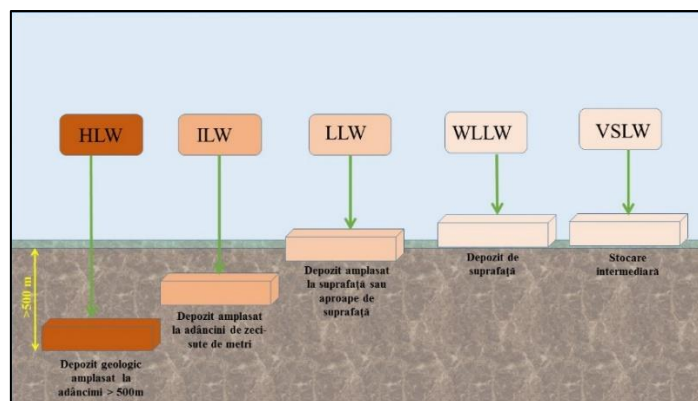
Transportul dintr-o locație în alta a deșeurilor radioactive se face în containere speciale.

Depozitarea deșeurilor radioactive se realizează în depozite special amenajate pentru acest scop în funcție de clasa în care se încadrează acestea. Acest subiect este detaliat în capitolul II al acestei lucrări.

## Capitolul 2. OPȚIUNI DE DEPOZITARE A DEȘEURILOR RADIOACTIVE

### 2.1 Modalități de depozitare a deșeurilor radioactive în funcție de caracteristicile acestora.

Depozitarea, ca o etapă finală în gestionarea deșeurilor radioactive, implică izolarea acestor deșeuri de biosferă în depozite special proiectate și construite. În funcție de natura, concentrația și de tipul radionuclizilor conținuți în deșeuri, depozitul poate să fie amplasat la suprafața pământului, subteran dar aproape de suprafață sau în formațiuni geologice optime, aflată la adâncimi mai mari de 500 m (figura 3).

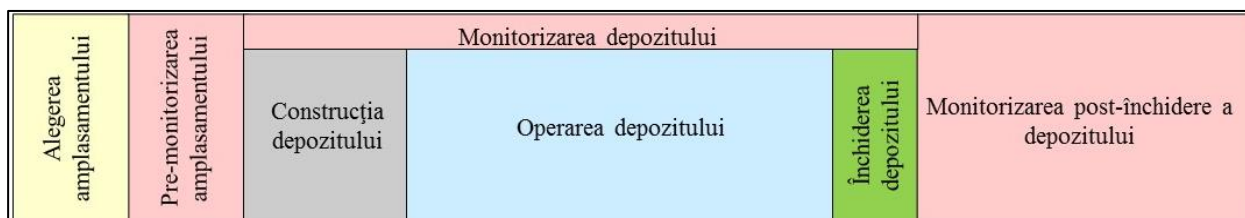


Figură 3 Modalități de depozitare a deșeurilor radioactive [IAEA, GSG-1, 2009]

Diferitele bariere ale sistemului de depozitare, naturale și ingineresti contribuie la îndeplinirea funcțiilor de siguranță pe diferite perioade de timp. Caracteristicile barierelor trebuie să vizeze izolarea pentru perioade de la câteva sute de ani a deșeurilor cu durată scurtă de viață, până la câteva mii de ani pentru deșeurile de nivel intermediar și de nivel înalt.

Programele de monitorizare ale depozitelor și implicit ale mediului înconjurător trebuie efectuate atât înainte și în timpul construirii și funcționării unei instalații de depozitare, cât și după închiderea sa (figura 4). Monitorizarea trebuie efectuată la fiecare etapă a dezvoltării și a funcționării unei instalații de depozitare, scopurile acestor programe de monitorizare incluzând:

- adunarea de date și informații în vederea evaluărilor ulterioare;
- asigurarea siguranței operaționale;
- asigurarea faptului că operarea depozitului se desfășoară în condiții de siguranță;
- asigurarea condițiilor de siguranță post - închidere.



**Figură 4 Etapele ciclului de viață pentru un depozit de deșeuri radioactive**

În vederea depozitării deșeurilor radioactive, pe plan mondial au fost elaborate mai multe opțiuni alternative care pot varia în funcție de legislația fiecărei țări în parte, de diferențele geologice ale viitoarelor amplasamente, precum și de cantitatea și de caracteristicile diferitelor tipuri de deșeuri ce urmează a fi depozitate.

## 2.2 Modalități de depozitare a deșeurilor radioactive în diverse formațiuni geologice.

Depozitarea deșeurilor radioactive în depozite special construite, la diferite adâncimi, în diverse formațiuni geologice este o soluție internațional acceptată, care izolează fizic deșeurile și limitează migrația radionuclizilor pentru o perioadă cât mai lungă de timp, în vederea scăderii naturale a cantității acestora prin dezintegrare.

Până în prezent studiile au arătat că cele mai potrivite roci gazdă pentru depozitarea deșeurilor radioactive sunt: rocile cristaline, cum este granitul nefracturat, rocile sedimentare, ca argila și sarea, din clasa evaporitelor (Tabelul 2).

**Tabel 1 Comparația parametrilor optimi pe diverse tipuri de roci**

Tip de rocă	Roci cristaline	Argile	Evaporite
<b>Conductivitate hidraulică</b>	este determinată de gradul de fracturare al rocilor	este determinată de porozitate ( $10^{-12}$ - $10^{-14}$ cm/s)	este aproape 0

<b>Retenția de radionuclizi</b>	este variabilă și depinde de mineralogia, de condițiile tectonice și structurale	foarte bună	foarte bună
<b>Stabilitatea rocilor/ a săpăturii</b>	bună	bună	în strânsă legatură cu condițiile structural-tectonice
<b>Conducerea de căldură</b>	bună	variabilă	foarte bună

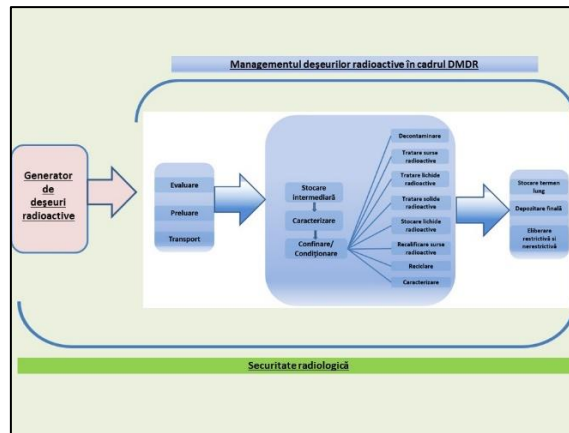
În prezent, pe plan mondial, sunt dezvoltate sau sunt în curs de dezvoltare o serie de concepte de depozitare a deșeurilor radioactive în formațiuni geologice diferite, atât în cavități/galerii ale unor foste exploatări de minerale utile (sare, uraniu, fier, calcar), cât și depozite realizate special cu ajutorul lucrărilor miniere în roci gazdă ca granit, argilă, tuf vulcanic.

Conceptul de depozitare în galerii ale fostelor exploatări miniere este utilizat pe plan mondial în țări ca: Cehia, Germania, România, în acest scop fiind alese pentru depozitare lucrările miniere care îndeplinesc condiții de amplasament optime pentru depozitare: lucrările miniere utilizate pentru depozitare trebuie să fie în general uscate/lipsite de infiltrații, în zone slab fracturate, cu adâncimi optime de depozitare, care pot ajunge până la sute de metri.

## **PARTEA a II-a. STUDIU DE CAZ – DEPOZITUL NAȚIONAL DE DEȘEURI RADIOACTIVE DE JOASĂ ȘI MEDIE ACTIVITATE BĂIȚA, JUD. BIHOR**

Cele două instalații de interes național: Depozitul Național de Deșeuri Radioactive de Joasă și Medie Activitate, de la Băița Bihor și Stația de Tratare a Deșeurilor Radioactive de pe Platforma Măgurele, alcătuiesc Departamentul Management Deșeuri Radioactive (DMDR) din cadrul Institutului Național pentru Fizică și Inginerie Nucleară „Horia Hulubei” (IFIN-HH).

Prin punerea în funcțiune (STDR în anul 1974, DNDR în anul 1985) și exploatarea în condiții de securitate radiologică a celor două instalații, a fost rezolvată gestionarea deșeurilor radioactive instituționale rezultate din aplicarea tehnicilor și tehnologiilor nucleare (industrie, medicină, agricultură, învățământ, protecția mediului etc.), cu excepția ciclului combustibilului nuclear, din întreaga țară. Departamentul Management Deșeuri Radioactive (DMDR) se ocupă la nivel național de gestionarea deșeurilor radioactive instituționale de joasă și medie activitate, în condiții de securitate radiologică a personalului operator, a populației și a mediului (figura 20).



Figură 5. Schema de gestionare a deșeurilor radioactive

### Capitolul 3. Prezentarea Depozitului Național de Deșeuri Radioactive de joasă și medie activitate – Băița, jud. Bihor

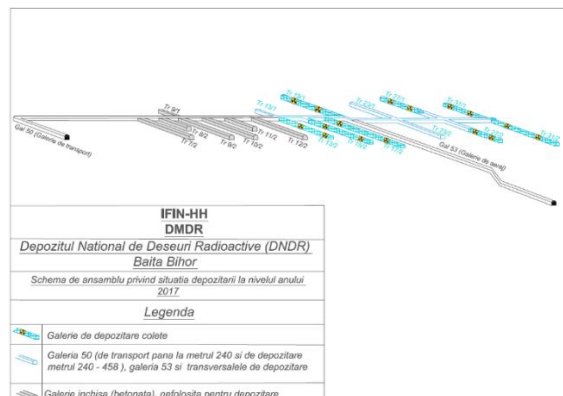
#### Sistemul constructiv și de monitorizare

#### Prezentarea DNDR Băița Bihor

Depozitul Băița Bihor este situat la o altitudine de 840 m, în două galerii de exploatare abandonate ale minei de uraniu Băița (Galeria 50 și Galeria 53 – ultima fiind utilizată pentru aeraj). Galeria 50 și 53 reprezintă o parte dintr-o rețea extinsă de galerii de prospecțiune și exploatare a uraniului, interconectate între ele.

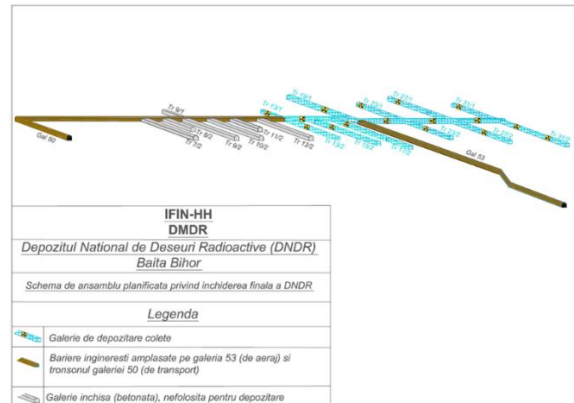
Începând din 1985, deșeurile au fost depozitate într-o serie de galerii transversale (13/1, 13/2, 15/2, 17/2, 19/1, 23/1, 23/2, 27/1, 27/2, 31/1, 31/2), poziționate perpendicular pe galeria principală de acces (Galeria 50) – (Figura 36).

Galeriile transversale (7/2, 8/2, 9/1, 9/2, 10/2, 11/2, 12/2) din vecinătatea Galeriei 50, care au fost considerate necorespunzătoare pentru depozitare, au fost în cea mai mare parte etanșate cu beton atunci când a fost construit depozitul.



Figură 6. Reprezentare schematică a gradului de umplere al DNDR la nivelul anului 2017

După umplerea celor 11 galerii transversale se va trece la umplerea secțiunii Galeriei 50 (metrul 240 – 458), între Galeriele 31/1 și 13/1 (figura 37).



**Figură 7. Reprezentare schematică a gradului maxim estimat de umplere al DNDR**

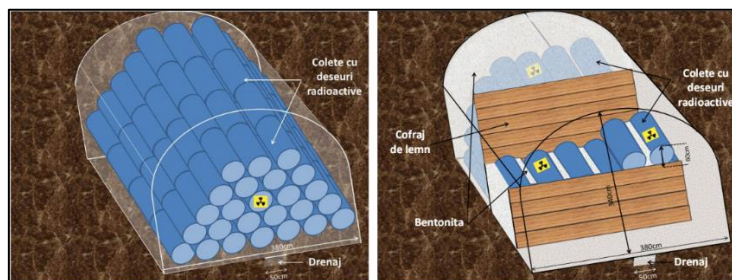
Galeriile de depozitare, împreună cu diferitele lor componente, izolează coletele cu deșeuri și limitează eliberarea de radionuclizi din depozit în geosferă și mediul înconjurător.

Caracteristicile naturale ale amplasamentului descrise în prezenta teză de doctorat asigură acestuia rolul de barieră geologică/naturală. Pentru asigurarea securității pe termen lung a depozitului a fost luată decizia de implementare și a unui sistem de bariere ingineresti, pentru a suplimenta capacitatea barierelor naturale în satisfacerea criteriilor radiologice în perioadele de operare, închidere și post-inchidere a depozitului.

#### **Sistemul de bariere ingineresti la DNDR-Băița Bihor**

În galerii, coletele cu deșeuri radioactive sunt așezate orizontal, cu generatoarea în lungul galeriilor, pe rânduri și straturi, astfel încât spațiul liber dintre colete să fie cât mai mic.

Începând cu anul 1985, când a fost pus în funcțiune depozitul și a început depozitarea primelor colete cu deșeuri radioactive condiționate, și până în anul 1996, nu s-a practicat umplerea spațiilor libere dintre colete. Începând cu anul 1996 s-a decis utilizarea bentonitei, ca material de umplere a spațiilor libere dintre colete, aceasta având și rol de retenție a eventualelor migrări de radionuclizi. Pentru a limita împrăștierea bentonitei se montează cofraje din lemn pe fiecare rând cu colete (Figura 38).



a)

b)

**Figură 8 Secțiune transversală prin galerie de depozitare prezentând modalitatea de aranjare în stivă a**



*coletelor cu deșeuri radioactive a) fără bentonită (anii 1986-1996), b) cu bentonită (1996-prezent)*

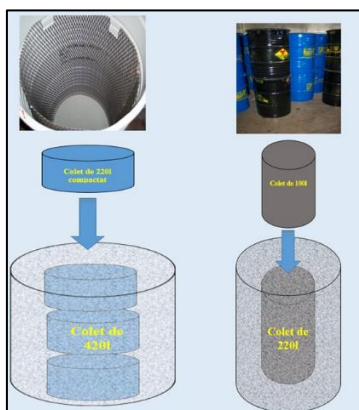
Astfel, în prezent, sistemul de bariere din cadrul depozitului este format din:

- matricea de condiționare a deșeurilor radioactive,
- materialele și tehnologiile utilizate pentru umplerea spațiilor libere dintre colete și dintre colete și pereții galeriilor de depozitare;
- mediul geologic în care este amplasat depozitul.

#### **Matricea de condiționare a deșeurilor radioactive**

Pentru depozitarea deșeurilor se utilizează colete tip A, constituite din butoaie de oțel carbon vopsite, cu volumul de 220 l, 320 l (au fost depozitate în număr limitat și nu mai sunt utilizate în prezent) sau 420 l.

În interiorul butoaielor de 220 l sunt introduse central butoaie de 100 l, tot din oțel carbon, în care sunt betonate deșeurile radioactive necompactabile. În butoaiele de 420 l sunt introduse pelete cu deșeuri radioactive obținute prin supercompactarea butoaielor de 220 l care conțin deșeuri radioactive compactabile (Figura 39). Condiționarea deșeurilor radioactive se realizează prin umplerea spațiului dintre butoiul exterior (de 220 l sau 420 l) și butoaiele interioare (de 100 l sau pelete obținute din butoaie de 220 l) cu o matrice de beton.



**Figură 9. Prezentare schematică a tipurilor de colete utilizate în depozitarea deșeurilor radioactive în România**

#### **Materialele și tehnologia utilizate pentru umplerea spațiilor libere dintre colete și dintre colete și pereții galeriilor de depozitare**

Bentonita a început să fie folosită în procesul de depozitare a deșeurilor radioactive condiționate la Băița Bihor din 1996 (Figura 40). În urma unei serii de studii și cercetări [*IFIN-HH-Sectia a VI-a, Stănciucu M.*] s-a ajuns la concluzia că bentonita din zăcămintul Orașul Nou, Satul Mare se pretează cel mai bine în vederea utilizării ca material de umplere a spațiilor libere dintre colete și că bentonita nu reacționează chimic cu betonul folosit ca barieră fizică în depozitarea finală a deșeurilor radioactive.



**Figură 10. Modalitatea de aranjare a coletelor condiționate cu deșeuri radioactive împreună cu bentonita și cofrajul de lemn:**

*a) imagine cu o stivă de depozitare incompletă, b) imagine cu o stivă de depozitare completă*

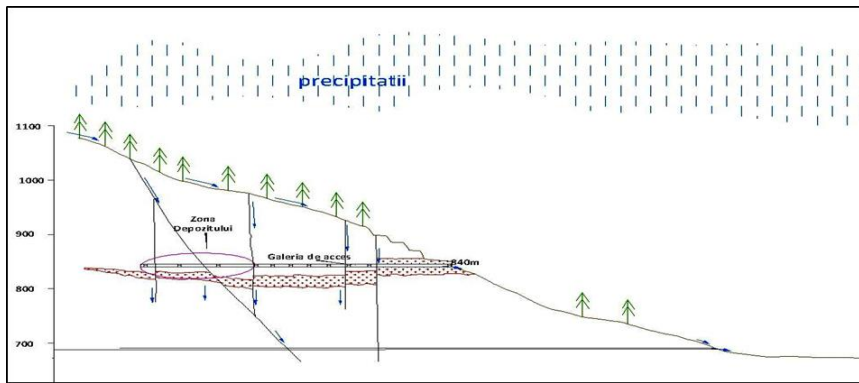
Utilizarea bentonitei ca material de umplere a spațiilor libere dintre colete este o alternativă viabilă ținând cont de rezultatele obținute din punct de vedere al capacității de sorbție și retenție, precum și al gradului de umiditate în condiții reale de depozitare și în condiții de laborator.

#### **Capitolul 4 CARACTERIZAREA CĂILOR DE INFILTRARE A APELOR METEORICE ÎN ZONA GALERIILOR DE DEPOZITARE ALE DNDR ȘI STUDIAREA RETENȚIEI RADIONUCLIZILOR.**

Considerând că apa este principalul vector de diseminare și transport a unor posibili radionuclizi în zona de influență a DNDR, am inițiat un studiu pentru o caracterizare cât mai completă a apelor și a căilor de curgere subterane (figura 45), ținând cont de:

- parametrii meteorologici ai amplasamentului,
- mineralogia și proprietățile fizico – chimice ale zonelor de fricțiune ale faliilor (caracterizarea căilor de curgere ale apelor de infiltrație de la nivelul galeriilor DNDR),
- prezența faliilor majore și a zonelor fracturate, urmărind capacitatea acestora de adsorbție a radionuclizilor (studiu de caz adsorbția  $^{137}\text{Cs}$ ).





Figură 11. Reprezentare schematică a căilor de infiltrare a apei în zona DNDR

În acest capitol sunt prezentate rezultatele obținute în urma acestui studiu.

#### 4.1 Datele meteorologice din zona Depozitului Național de Deșuri Radioactive – Băița Bihor

Stația meteorologică automată de monitorizare meteorologică amplasată în perimetrul Depozitului Național de Deșuri Radioactive – Băița Bihor, model „**WatchDog data logger WD2700**” (figura 46), are drept scop obținerea datelor necesare pentru întocmirea unui bilanț meteorologic. Bilanțul s-a realizat prin evaluarea datelor măsurate anual și a fost comparat cu date măsurate de stațiile existente în apropierea DNDR, anterior anului 2012 - anul în care a fost montată stația meteo pe amplasament.



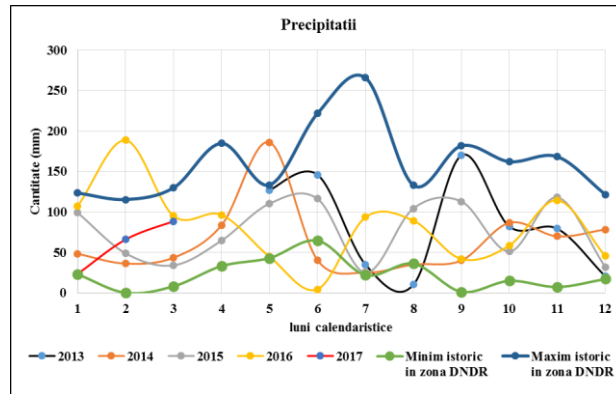
Figură 12. Stația meteorologică de pe amplasamentul DNDR

##### 4.1.1 Parametri meteorologici monitorizați:

###### 4.1.1.1 Precipitații

Precipitațiile totale anuale înregistrate de pluviometrul automat al stației meteorologice de pe amplasamentul DNDR au valori cuprinse între 772,7÷979,6 mm. La calculul acestor valori, ținând cont că pluviometrul nu este încălzit, se adaugă valorile calculate pentru

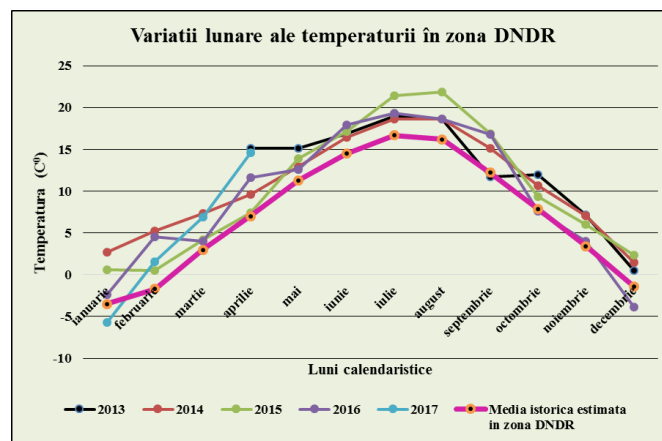
cantitățile de zăpadă căzute în lunile de iarnă. Valorile obținute sunt în concordanță, fără diferențe semnificative, cu valorile obținute anterior de către Watson et all (2005) și de către Institutul de Meteorologie și Hidrologie [*Studiu meteorologic al zonei Băița-INMH (1982)*].



Figură 13. Variații anuale de precipitații în zona DNDR

#### 4.1.1.2 Temperatura aerului

În urma analizei tendințelor de evoluție a temperaturilor medii anuale (figura 52), pe baza datelor înregistrate în perioada 2013 –2017, se poate observa că valorile lunare ale temperaturilor au fost în general mai mari cu câteva grade decât cele estimate, aceste valori medii mai mari datorându-se microclimatului zonei fostei exploatari miniere, care este influențat direct de lipsa vegetației, ceea ce conduce la o încălzire semnificativă a rocilor și astfel la atingerea unor temperaturi zonale care, pe timpul verii, pot atinge 35°C.



Figură 14. Valorile medii lunare ale temperaturii în zona DNDR

#### 4.1.1.3 Umiditatea aerului

În zona DNDR Băița Bihor valorile medii multianuale ale umidității relative a aerului pot fi cuprinse între aproximativ 80÷85% în lunile aprilie – septembrie și 90÷95% în lunile ianuarie, februarie și octombrie – decembrie.

Valorile maxime orare au atins 100%, mai ales în orele de dimineață (în jurul orei de răsărit a Soarelui) în timpul verii și în cursul nopții și chiar și al zilei, în anotimpul de iarnă. Valorile minime orare au scăzut până la 70% în decembrie, 60% în ianuarie, 50% în celelalte luni de primăvară și toamnă, precum și în luna februarie.

#### **4.1.1.4 Vântul**

În zona DNDR s-au constatat unele schimbări ale direcției vântului, acestea fiind influențate în special de configurația reliefului. Din datele obținute de la stația meteorologică s-a constatat că predomină circulația realizată pe direcția vest – est.

Datele înregistrate de stația meteorologică amplasată la DNDR pentru perioada 2013-2017 au arătat că viteza medie anuală a vântului s-a situat între 2÷5 m/s, maximul putând depăși uneori 10÷15 m/s, iar frecvența timpului calm a fost de 20÷30% vara și 30÷40% iarna.

## **4.2 Studiul căilor de migrare a radionuclizilor în zona DNDR**

### **4.2.1 Date Generale**

Hidrosfera reprezintă o cale importantă prin care substanțele radioactive pot fi dispersate în mediul înconjurător, astfel că în lucrarea de față mi-am propus să fac o evaluare a proprietăților dispersive ale mediului subteran și ale apelor de suprafață din zona de influență a DNDR Băița Bihor.

În principal, fenomenele care duc la modificarea concentrației unui radionuclid și a migrării frontului de undă a acestuia sunt:

- Sorbția și desorbția,
- Advecția,
- Difuzia,
- Schimbul ionic,
- Dezintegrarea radioactivă.

### **4.2.2 Caracterizarea materialelor utilizate**

#### **4.2.2.1 Cesiul**

Cesiul este un element care prezintă izotopi radioactivi generați ca produși de fisiune și care pot fi prezenți în deșeurile radioactive. Depozitarea deșeurilor radioactive care conțin  $^{137}\text{Cs}$  necesită precauții speciale, deoarece acesta persistă în mediu timp de aproape 300 de ani (10 timpi de înjumătățire) ca element puternic radioactiv care prezintă fenomenul de bioacumulare și poate ajunge în lanțurile alimentare.

Acest element a fost studiat pe scară largă, deoarece solubilitatea sa nelimitată și similaritatea chimică cu potasiul îl fac dăunător pentru mediu și om. Multe studii privind adsorbția Cs pe diferite feluri de sol și grupuri de argile au fost efectuate cu scopul de a elucida comportamentul acestui element chimic în mediu.

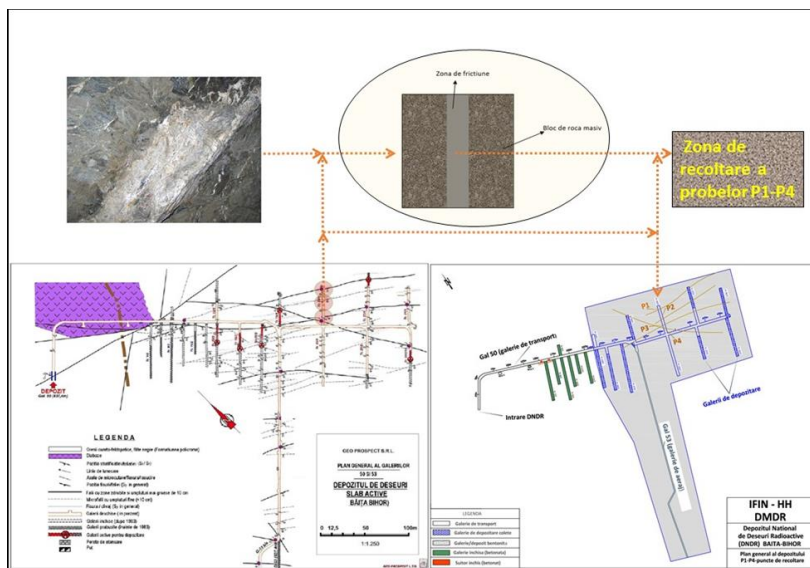
#### 4.2.2.2 Probe de rocă

Pentru eventualitatea în care materialele de umplere ar fi străpunse, este important să se cunoască modul în care contaminanții se deplasează în mediu, să se înțeleagă corect comportamentul contaminanților și modul de transport pentru a identifica riscurile asociate cu contaminarea și să se dezvolte planuri de remediere.

Acest studiu a urmărit să determine ce proprietăți ale soluției apoase și ale mediului adsorbant sunt importante în controlul comportamentului de adsorbție/desorbție a cesiului și să calculeze valoarea  $K_d$ , în condițiile specifice rocilor din zonele faliiilor care intersectează galeriile de depozitare ale DNDR.

Experimentele de curgere pe coloană cu pat fix de sorbent sunt destinate să ofere o simulare mai realistă a condițiilor de câmp dinamice pentru a cuantifica mișcarea contaminanților. Principiul metodei constă în trecerea unui lichid ce conține contaminantul de interes printr-o coloană ce conține un strat fix de diferite fracții de rocă (material prelevat din zonele de fisurație-figura 60). După străpungerea stratului de fracții de rocă, peste acesta a fost trecut un volum de apă din zona depozitului, pentru desorbția cesiului reținut în coloană.

În astfel de experimente se combină efectele chimice de adsorbție cu efectele hidrologice de curgere a apei subterane printr-un mediu poros, astfel încât este posibilă o estimare a deplasării contaminantului de interes.



Figură 15 Reprezentarea schematică a zonelor de recoltare probe

#### 4.2.2.3. Caracterizarea probelor P1-P4 cu ajutorul XRF și XRD

##### Caracterizare cu ajutorul XRF

Patru probe au fost analizate pentru elemente minore și majore; rezultatele, pentru fiecare probă în parte, obținute în urma măsurătorilor, sunt prezentate în următorul tabel:

*Tabel 2 Tabel comparativ cu conținuturile în elemente minore și majore ale probelor prelevate din zonele de falieri și din zonele compacte dintre falii, din zona galeriei 23/1 a DNDR, determinate prin fluorescența de raze X*

Proba	Na <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Fe total (%)	Mn (mg/kg)	Cr (mg/kg)	CaO (%)	Ti (mg/kg)	V (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Sr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Rb (mg/kg)	Ba (mg/kg)
P1/23/1	3.45	2.76	64.1	13.7	3.39	3.69	519	158	2.49	4930	87.4	120	200	2.13	40.9	95.9	621
P2/23/1	2.87	1.86	54.9	18.6	5.19	4.63	348	122	1.88	6139	111	89.6	252	4.35	34.3	130	783
P3/23/1	3.82	2.03	72.8	6.84	1.24	2.33	899	135	3.56	2888	50.1	83.1	91.3	37.9	57.2	28.1	196
P4/23/1	0.86	5.85	52.5	12.9	2.88	3.86	1017	116	7.56	4674	87.1	72.1	314	7.60	60.0	64.2	972
Proba 1	0.22	0.81	40.75	16.57	5.36	3.99	119.6	51.74	3.76	6734	120.1	37.6	54.04	28.33	58.59	273.56	374
Proba 2	0.54	2.09	42.91	10.83	2.48	2.51	949.27	90.62	13.01	3457	65.87	31.27	128	66.7	132.1	96.4	367.8
Proba 3	0.39	2.61	52.1	14.7	1.87	3.62	529.1	87.4	5.64	5219	95.8	41.6	111.7	121.9	170.3	107.7	607.1
Proba 4	0.96	1.67	56.1	9.35	2.84	3.34	574.0	88.6	7.45	3481	63.2	34.6	140.3	58.4	161.7	89.9	401.4

*Probele P1/23/1, P2/23/1, P3/23/1, P4/27/2 (marcate cu culoarea verde), probe de rocă analizate prin fluorescența de raze X recoltate din zonele compacte adiacente zonelor de falieri ale galeriei 23/1, descrise în studii anterioare [Țugulan et al].*

*Probele Proba 1, Proba 2, Proba 3, Proba 4 (marcate cu culoarea cărămizie), probe de rocă recoltate din zonele de falieri ale galeriei 23/1 și caracterizate în acest studiu.*

În urma comparării valorilor elementelor minore și majore, exprimate procentual, obținute cu ajutorul analizelor xrf, efectuate pe probele P1/23/1, P2/23/2, P2/23/3 P2/23/4 (prelevate din zonele nefracturate ale galeriei de depozitare 23/1) și pe probele P1, P2, P3, P4 (prelevate din zonele brechiate ale fracturilor galeriei de depozitare 23/1) se pot observa anumite scăderi sau creșteri cantitative sau procentuale ale anumitor elemente.

Aceste variații cantitative elementare sunt mici și sunt considerate normale, ținând cont că probele sunt recoltate atât din pachete de roci/zonele brechiate ale faliiilor, unde au avut loc diferite fenomene de metamorfism și alterare, cât și din zone ale galeriei 23/1, neafectate de aceste procese.

##### Caracterizarea probelor P1-P4 cu ajutorul difracției de raze X

În toate cele patru probe analizate P1÷P4 s-a observat predominanța picurilor caracteristice următoarelor minerale: cuarț, calcit, biotit, montmorilonit, clorit, feldspat, hematit, albit.

În plus, față de mineralele descrise mai sus, multe din falii și fracturi conțin cantități semnificative de minerale argiloase. Argilele sunt importante dacă luăm în considerare potențialul de transport al radionuclizilor prin sistem, datorat proprietăților de sorbție. Argilele sunt prezente atât ca depuneri fine pe planurile de falie (gol de falie), asociată adesea cu materialele de neoformație cuarțo-carbonatice, cât și ca rezultat al alterării unor minerale ca feldspați, actinolit, epidot și clorit. Compoziția este dominată de prezența montmorillonitului cu magneziu și cuarțului, uneori cu cantități semnificative de calcit.

În urma comparării probelor (P1÷P4) a fost aleasă ca probă reprezentativă proba numărul 4, în vederea analizării detaliate a gradului de adsorbție/desorbție a  $Cs^+$  care caracterizează grupul de falii analizat. Aceasta alegere s-a făcut considerând că proba este reprezentativă din punct de vedere al intensității picului de montmorilonit, care indică un conținut mediu în acest mineral, care are importante proprietăți de adsorbție.

#### 4.2.3 Metode de lucru

Proba numărul 4 a fost sitată, rezultând 3 sorturi cu următoarele repartiții granulometrice (figura 67):



Figură 16. Imagine cu cele trei fracții granulometrice N1, N2, N3

- sort N1:  $d < 0,4\text{ mm}$ ;
- sort N2:  $0,4\text{ mm} < d < 2\text{ mm}$ ;
- sort N3:  $d > 2\text{ mm}$ .

Raportul masic între cele 3 sorturi a fost N1:N2:N3 de aproximativ 1:2:48. Experimentele de adsorbție au fost realizate pe 7 amestecuri de diverse procente sort.

Din combinarea în diferite proporții a fracțiilor N1÷N3 s-au obținut 7 amestecuri cu compozițiile menționate în tabelul 13.



**Tabel 3 Compoziția, densitatea și porozitatea amestecurilor A1÷ A7**

Amestec	N1 (%)	N2 (%)	N3 (%)	$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	$\eta$ , cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
A1	100	0	0	1,375	0,255
A2	90	10	0	1,375	0,289
A3	80	20	0	1,341	0,341
A4	70	30	0	1,341	0,373
A5	50	50	0	1,309	0,421
A6	0	100	0	1,279	0,578
A7	0		100	-	-

Soluțiile de lucru au fost soluții sintetice (SS) care au simulat compoziția apei de infiltrație din depozit (tabelul 15), dar conțineau și cesiu, marcat cu <sup>137</sup>Cs, în diverse concentrații. Ele au fost preparate utilizând apa din bazinele de stocare a combustibilului nuclear uzat scos din Reactorul Nuclear IFIN-HH, ai carei parametri sunt prezentați în tabelul 14.

**Tabel 4. Caracteristicile apei utilizate la prepararea soluțiilor de lucru**

Nr. crt.	Caracteristica	Valoare
1.	Concentrație <sup>137</sup> Cs	1990 Bq/L
2.	pH	6,50
3.	Conductivitate	6,44 $\mu$ S/cm
4.	Concentrație Cl <sup>-</sup>	< 0,01 mg/L
5.	Reziduu fix la 105°C	3,90 mg/L

Deoarece, în timpul utilizării ca agent de răcire și protecție radiologică, apa de stocare a combustibilului uzat a fost permanent purificată, compoziția sa este similară apei distilate cu excepția prezenței <sup>137</sup>Cs în cantități infime, de ordinul nanogramelor, care nu influențează proprietățile fizico-chimice ale apei, dar poate fi utilizat drept trasor în acest studiu.

Activitatea <sup>137</sup>Cs a fost determinată cu ajutorul unei instalații de spectrometrie gama Trans-spec 100, cu detector HPGe coaxial, a cărei eficacitate relativă a fost de 40%. Calculul eficacității a fost făcut cu ajutorul unei soluții cu activitatea <sup>137</sup>Cs cunoscută, în aceeași geometrie cu a probei și timp de achiziție a spectrului de 60 000 s.

În aceasta apă s-au dizolvat CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O și CsCl pentru a obține soluțiile de lucru cu caracteristicile prezentate în tabelul 15.

**Tabel 5. Compoziția soluțiilor de lucru**

Nr. crt.	Caracteristica	Soluție			
		SS0	SS1	SS2	SS3
1.	Concentrație <sup>137</sup> Cs, Bq/l	1990	1990	1990	1990
2.	pH	7,50	7,50	7,65	8,20
3.	Concentrație Ca <sup>2+</sup> , mg/l	40	40	40	40
4.	Concentrație Cs <sup>+</sup> inactiv, C <sub>0</sub> , mg/l	0	1	150	1 000

Inițial, s-a determinat coeficientul de distribuție pentru fiecare dintre amestecurile A1÷A6. Pentru aceasta, în 6 pahare Erlenmeyer, fiecare conținând câte 0,5 g amestec, s-au introdus câte 100 ml SS1. Suspensiile obținute au fost agitate cu ajutorul unui agitator magnetic, la temperatura de 25 °C. La intervale regulate de timp, agitarea era oprită pentru sedimentarea suspensiilor. Din supernatant era prelevat un volum cunoscut (50 ml) de fază lichidă pentru care se măsura radioactivitatea cu scopul de a obține date cantitative legate de adsorbția Cs. După măsurare, lichidul era reintrodus în flaconul de unde fusese prelevat.

Apoi studiul a continuat cu evaluarea comportamentului de adsorbție/desorbție a cesiului pe cele 7 amestecuri cu compoziții diferite de sorturi de diverse granulometri.

Pentru aceasta, câte 55 g din amestecurile A1÷A6 s-au introdus în seringi de polipropilena cu volumul de 100 ml (C1÷C6) și s-au presat ușor cu ajutorul pistonului, sub forma de pat fix. Volumul după presare a variat între 40 – 43 cm<sup>3</sup> (figura 68). La baza seringilor s-a introdus hârtie de filtru care să susțină patul de sorbent. 550 g A7 s-au introdus într-un pahar Berzelius cu volumul de 1l (C7).

Pe coloanele C1÷C6 s-au trecut prin curgere liberă volume cunoscute de soluții SS0÷SS3. După străpungerea coloanelor, Cs<sup>+</sup> adsorbit în coloane a fost desorbit prin spălarea coloanelor cu apă naturală prelevată din zona depozitului. Efluentul de la ieșirea din coloane a fost colectat în fracții de câte 100 ml în care s-a determinat concentrația Cs<sup>+</sup> prin măsurarea radioactivității traserului <sup>137</sup>Cs utilizând tehnica spectrometriei gama.

Peste 550 g din A7 introduse într-un pahar Berzelius s-au adăugat 550 ml SS0 și s-au lăsat în repaus, cu paharul acoperit, în nișa radiochimică. La fiecare 24 h s-au prelevat câte 100 ml supernatant, care s-au măsurat prin tehnica spectrometriei gama pentru determinarea concentrației <sup>137</sup>Cs. Proba prelevată a fost reintrodusă în pahar după fiecare măsurare. După atingerea echilibrului, Cs<sup>+</sup> adsorbit pe sortul A7 a fost desorbit prin îndepărtarea supernatantului și adăugarea a 550 ml apă de infiltrație. S-au prelevat în continuare probe de 100 ml la fiecare 24 h și s-a determinat concentrația de <sup>137</sup>Cs.

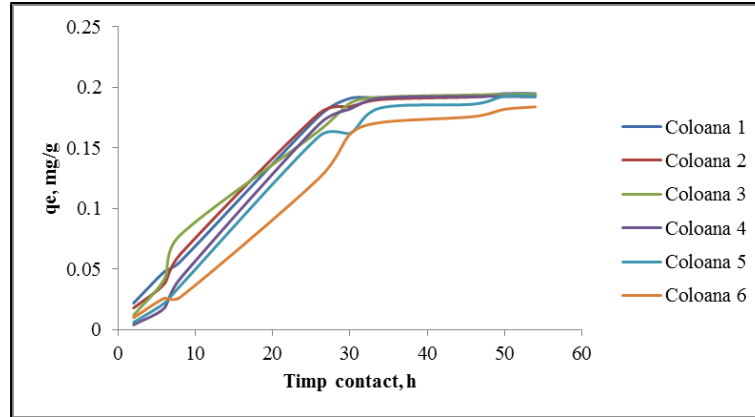
#### **4.2.4. Rezultate și discuții**

S-a studiat adsorbția Cs pe cele 7 amestecuri cu ajutorul cineticii adsorbției la o singură concentrație pentru a se determina coeficienții de distribuție. Rezultatele obținute sunt reprezentate de curbele din figurile 70-71.

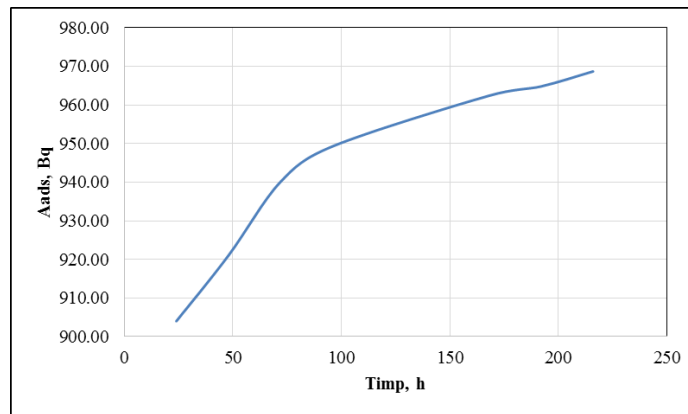
După cum se poate observa, acumularea Cs pe faza solidă crește odată cu timpul de contact, procesul fiind mai rapid în faza inițială, echilibrul fiind atins în aproximativ 24 h pentru amestecurile A1÷A6 și după aproximativ 200 h pentru amestecul A7. Pentru A1÷A6, după



aproximativ 24 de ore nu se mai observă variații semnificative ale concentrației cesiului în faza lichidă, acesta fiind ales ca timp pentru atingerea echilibrului. Pentru toate amestecurile au fost calculați coeficienții de distribuție, precum și variația acestora cu procentul de fracție grosieră ( $0,4 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$ ). Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 16 și figura 72.



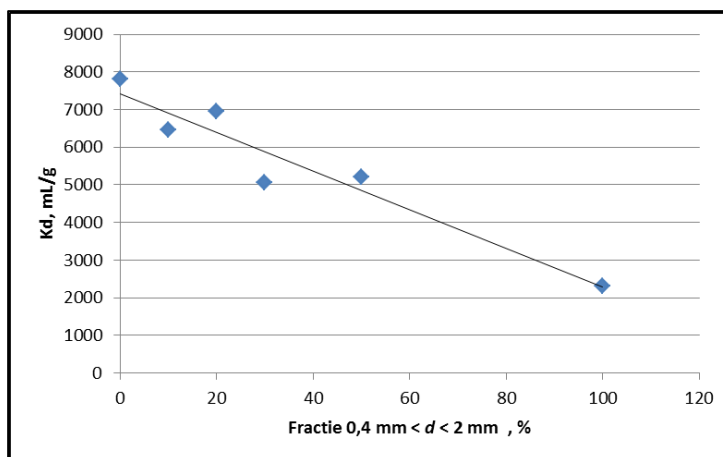
Figură 17. Curbele de adsorbție a soluției SS3 pe A1÷A5 și SS2 pe A6



Figură 18. Curba de adsorbție a soluției SS0 pe A7

Tabel 6. Coeficienții de distribuție ai amestecurilor A1÷A7

Nr. crt.	Amestec	$Kd$ , ml/g
1.	A1	7800
2.	A2	6466
3.	A3	6942
4.	A4	5063
5.	A5	5205
6.	A6	2300
7.	A7	38 *



Figură 19.  $K_d$  (ml/g) ca funcție de procentul fracției cu granulometria  $0,4 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$

Se observă un trend descendent al  $K_d$  cu creșterea procentului de fracție cu granulometria  $0,4 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$ .

În cazul în care adsorbția cesiului ar avea loc numai pe suprafețele exterioare ale granulelor minerale, s-ar fi observat o corelație clară între  $K_d$  și granulație. Deoarece corelația nu este perfectă, se presupune că materia minerală este poroasă și are situsuri de adsorbție atât pe suprafețele exterioare, cât și în interiorul granulelor. În plus, sitarea, utilizată la separarea diferitelor fracții, nu face diferența între particulele minerale individuale de dimensiuni egale și agregate constituite din particule mai mici cimentate împreună cu materii organice și / sau cu aluminiu și oxizi slabi cristalini, de exemplu. De asemenea, este posibil ca suprafața granulelor mai mari să fie acoperită de un strat de praf atașat compus din particule mai mici.

Această ipoteză este susținută și de rezultatele obținute pentru A7 care conține fragmente de rocă cu dimensiuni mari pentru care se aștepta o adsorbție redusă. Cu toate acestea, pentru acest amestec s-a obținut un  $K_d$  de 38 mL/g, iar mai mult de 98 % din  $^{137}\text{Cs}$  prezent în soluție a fost adsorbit pe faza solidă.

Valorile  $K_d$  obținute sunt comparabile cu valorile raportate în studiile anterioare, (tabelul 17) realizate pe probe de rocă macinată, recoltate din galeriile DNDR.

Tabel 7. Valori  $K_d$  obținute în prezentul studiu și studii anterioare

Nr. crt.	Descriere	$K_d$ (ml/g) Cs
1.	A1 - <a href="#">100% sort &lt; 0.4 mm</a>	7800*
2.	A2 - <a href="#">90% sort &lt; 0.4 mm - 10% sort 0.4-2 mm</a>	6466*
3.	A3 - <a href="#">80% sort &lt; 0.4mm - 20% sort 0.4-2mm</a>	6942*
4.	A4 - <a href="#">70% sort &lt; 0.4 mm -30% sort 0.4-2mm</a>	5063*
5.	A5 - <a href="#">50% sort &lt; 0.4 mm -50% sort 0.4-2mm</a>	5205*
6.	A6 - <a href="#">100% sort 0.4-2 mm</a>	2300*

7.	<b>A7 – Sort &gt; 2 mm</b>	<b>38 *</b>
8.	Gresii filitoase negre, epidotizate	<b>3115**</b>
9.	Gresie cuarțoasă rozacee cu benzi filitoase	<b>3004**</b>
10.	Gresii filitoase metamorfozate	<b>3590**</b>
11.	Gresii cuarțoase rozacee epidotizate și piritizate	<b>3537**</b>
12.	Filite grezoase în alternanță cu gresii epidotizate	<b>2736**</b>
13.	Gresii epidotizate	<b>2948**</b>
14.	Roca macinată din cadrul DNDR- studiu 1982 (valoare de referință)	<b>3363***</b>

Punctele 1÷7 (\*marcate în culorile verde și galben) - rezultate obținute în prezentul studiu.

Punctele 8÷13 (\*\*marcate în culoarea albastru) - rezultate obținute în studii anterioare [Drăgolici 2015].

Punctul 14 (\*\*\*) marcat în culoarea cărămizie) - [IFIN-HH 1982].

În urma comparării valorilor  $K_d$  obținute în urma determinărilor efectuate pentru prezentul studiu cu cele din studiile anterioare, din tabelul de mai sus (tabel 17), se pot trage următoarele concluzii:

- Valorile  $K_d$  pentru amestecurile A1÷A5 sunt mai mari decât valorile obținute în studiile anterioare, efectuate pe probe de roci diferite, caracteristice galeriilor de depozitare.
- Valoarea  $K_d$  pentru amestecul A6 este considerată o valoare ridicată, ținând cont de faptul că amestecul este alcătuit din sort cu granulația 0,4÷2 mm.
- Valoarea  $K_d$  pentru amestecul A7 a fost obținută în condiții experimentale diferite de restul amestecurilor: soluția adăugată nu conținea Cs inactiv ci numai radioizotopul  $^{137}\text{Cs}$  în concentrație de 1990 Bq/l (aproximativ 0.66 ng/l). În aceste condiții valoarea  $K_d$  obținută este considerată o valoare mare care demonstrează capacitatea ridicată de retenție a rocii.

Studiul pe coloanele C1÷C6 a urmărit determinarea performanțelor diferitelor amestecuri de sorturi în adsorbția Cs în mod continuu, într-un strat fix de sorbent. Pentru aceasta s-au trecut, prin curgere liberă, peste straturi fixe cu diverse fracții granulometrice, volume cunoscute de soluții sintetice care simulau compoziția apei de infiltrație, dar conțineau  $\text{Cs}^+$  în diverse concentrații, precum și 1990 Bq/l  $^{137}\text{Cs}$  ca traser. Atât apa de infiltrație a cărei compoziție s-a simulat, cât și probele de rocă din care s-au preparat straturile fixe de sorbent, s-au prelevat din zonele de falie/de zdrobire importante din galeria de depozitare 23/1. După străpungerea coloanelor,  $\text{Cs}^+$  adsorbit în coloane a fost desorbit prin spălarea coloanelor cu apă naturală prelevată din zona depozitului.

Pentru amestecul A7 nu s-a putut realiza un studiu în regim de curgere, s-a efectuat doar studiul desorbției  $^{137}\text{Cs}$  adsorbit.

Concentrația  $\text{Cs}^+$  a fost calculată din activitatea traserului măsurată pentru fiecare volum de efluent sau supernatant prelevat și activitatea specifică a soluției inițiale. Cantitatea de Cs,

adsorbită pe fiecare strat de sorbent, s-a calculat efectuând diferența între concentrația inițială a Cs în soluție și concentrația Cs în efluentul de la ieșirea din coloanele C1÷C6 / supernatantul din coloana C7.

Așa cum se poate observa, cesiul se adsoarbe pe fracțiile cu diverse compoziții, iar cantitatea de Cs adsorbită pentru fiecare amestec variază de la 48,1 mg la 657 mg (tabel 32).

**Tabel 8 Cantitatea de Cs (mg) adsorbită de către cele 7 amestecuri**

Nr. crt.	Amestec	Cantitate Cs adsorbită,
1.	A1	416,1 mg
2.	A2	657 mg
3.	A3	651,3 mg
4.	A4	638,9 mg
5.	A5	473,6 mg
6.	A6	48,1 mg
7.	A7	978,7 Bq

Procentele de cesiu legat ireversibil de rocă și factorii de retardare sunt prezentate în tabelul 33.

$$\text{Cs reținut (\%)} = \frac{\text{Masa Cs reținut în coloana în experimentul de adsorbție}}{\text{Masa Cs ramaș în coloana după experimentul de desorbție}} \times 100$$

**Tabel 9. Procentele de Cs legat ireversibil de amestecurile A1÷A7**

Nr. crt.	Amestec	Procent Cs legat ireversibil, %	$R_f$
1.	A1	70	42 059
2.	A2	80	30 764
3.	A3	80	27 300
4.	A4	78,5	18 203
5.	A5	66	16 185
6.	A6	23	6988
7.	A7	97	-

După cum se poate vedea, potențialul de retardare crește cu procentul de fracție fină din amestec.

#### **4.2.5. Concluzii**

Studiile privind adsorbția Cs<sup>+</sup> pe diverse combinații de sorturi obținute din probe de rocă prelevate din zonele de falie/de zdrobire importante din galeria de depozitare 23/1, au fost realizate în condiții controlate de laborator, acestea fiind esențiale pentru predicția comportamentului radionuclidului <sup>137</sup>Cs, în cazul unei posibile migrări a acestuia în urma străpungerii barierelor ingineresti ale depozitului.

În urma acestor studii au fost stabiliți ca parametri cheie ai acestui proces, compoziția mineralogică, granulometria stratului de sorbent și concentrația de Cs<sup>+</sup>. Valorile  $K_d$  obținute în urma experimentelor pe coloană sunt comparabile cu valorile raportate atât în literatură, cât și

în studiile anterioare efectuate în perioada preoperațională și pentru analizele de securitate pe roca gazdă a depozitului, care este compactă și puțin permeabilă sau impermeabilă.

Am remarcat faptul ca adsorbția Cs și factorul de retardare scad odată cu creșterea granulometriei amestecului de sorturi.

Procentele de Cs<sup>+</sup> legat ireversibil au depășit 65 %, cu excepția amestecului A6, care a avut un conținut în proporție de 100 % sort cu granulometria 0,4 mm < d < 2 mm, cea mai mică densitate, 1,279 g/cm<sup>3</sup> și cea mai mare porozitate, 0,578 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, dintre amestecurile studiate în coloană.

Deși valorile  $K_d$  furnizează informații utile, tendințele valorii sale pot fi înșelătoare dacă nu se respectă foarte strict condițiile de determinare ale acestuia. Deși astfel de măsurători nu pot fi extrapolate în mod direct la condițiile de teren, ținând cont de cantitățile reale de Cs<sup>+</sup> aflate în depozit, care nu vor depăși câteva zeci de grame (este reprezentativă numai radioactivitatea cesiului, nu și masa sa), putem aprecia că de fapt situația reală este chiar mai favorabilă decât rezultatele obținute în acest studiu. Această concluzie este susținută de rezultatele obținute pentru amestecul A7 pentru care s-a utilizat soluție sintetică ce conținea doar <sup>137</sup>Cs (nu și Cs inactiv) și pentru care procentul de Cs legat ireversibil se apropie de 100 %, deși granulația sa depășește 2 mm, conținând în general fragmente de rocă cu dimensiuni de ordinul centimetrilor (figura 67).

Acest studiu împreună cu studiile anterioare au subliniat ca aceste zone de falie/de zdrobire reprezintă practic singura cale a unei posibile migrări a radionuclizilor care pot fi antrenati cu ajutorul apelor de infiltrație și a demonstrat faptul ca aceste căi nu contribuie semnificativ la creșterea vitezei de migrare de radionuclizii.

## **Capitolul 5 CARACTERIZAREA HIDROLOGICĂ ȘI HIDROGEOLOGICĂ A ZONEI DE INFLUENȚĂ A DNDR**

### **5.1 Date generale**

În acest capitol am urmărit prin studiile efectuate (încadrarea poziției DNDR în bazinului hidrografic al zonei, prelevarea probelor, prelucrarea, analiza, reprezentarea grafică și interpretarea rezultatelor obținute) o cât mai bună caracterizare hidrologică și hidrogeologică a zonei în care este amplasat Depozitul Național de Deșeuri Radioactive Băița Bihor. În acest scop am efectuat o serie de teste pe probe de ape, care au urmărit identificarea modificărilor proprietăților fizico-chimice și radiologice, față de variații de la valorile normale ale parametrilor pe întreg circuitului acestora (precipitații-infiltrații-curgeri de suprafață).

## **5.2 Descriere generală a bazinelor hidrografice**

### **Secțiunea 1:**

#### **a) Precipitațiile**

Mișcarea apelor de suprafață din zona DNDR este afectată în mod semnificativ de relieful diversificat și abrupt. Precipitațiile căzute (rămase după evaporare) se scurg rapid pe versanți, în zona fostei exploatare miniere, în principal din cauza reliefului abrupt și a lipsei vegetației și solului vegetal.

#### **b) Infiltrațiile**

Cunoasterea și caracterizarea cât mai precisă a infiltrațiilor de apă în interiorul depozitului este importantă pentru înțelegerea comportamentului sistemului de drenaj prin masivul de rocă în care este amplasat depozitul. În decursul anilor în care s-a desfășurat studiul s-au făcut observații și a fost realizată o caracterizare hidrochimică exactă a apelor de infiltrații.

Apele de suprafață din zona DNDR sunt caracterizate de scurgeri sezoniere și pâraie mici. Alimentarea râurilor, scurgerea apei și a aluviunilor, lucrările antropice, fenomenele de îngheț și dezgheț sunt procesele de bază care influențează calitatea și compoziția apelor din zona DNDR.

În debitul total al apelor de suprafață care în final se varsă în Pârâul Mic, aflat la cca.3 km în aval de amplasamentul DNDR sunt cuprinse și apele care se scurg din lucrările miniere subterane istorice (altele decât galeriile DNDR).

### **Secțiunea 2 - Sistemul hidrologic Pârâul Mic**

Conturul bazinului Pârâul Mic are o forma ușor alungită pe direcția E-V și este delimitat de bazinul Valea Calului la nord și bazinul Crișul Poiana la sud. Pârâul Mic se unește cu bazinul Valea Calului.

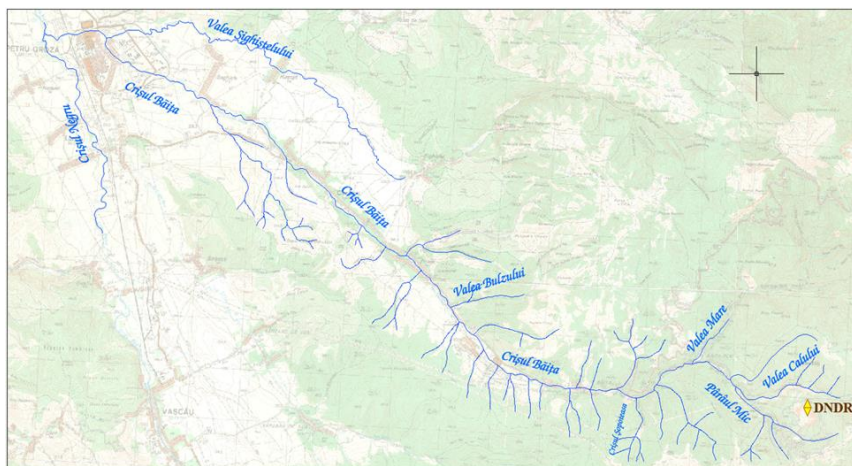
Bazinul Pârâul Mic include toate căile de circulație ale apei interconectate din bazinul hidrografic, atât din suprafață cât și din subteran, prin rețeaua de lucrări miniere și fisuri naturale. Apele subterane sunt numite ape de mină dacă curg prin galerii artificiale și ape de infiltrație dacă curg prin roca fisurată.

### **Secțiunea 3 - Zona Bazinului Crișul Băița, împreună cu afluenții sai, cuprinsă între confluența cu Pârâul Mic și confluența cu Crișul Negru.**

Crișul Băița are o lungime de circa 22 km, izvorăște la limita Munților Bihor și Biharia, este unul dintre afluenții principali ai Crișului Negru și străbate localitățile Băița, Nucet, Fânațe, Câmpani, Lunca și Ștei.

Afluenții săi principali, din punct de vedere al debitelor, sunt amplasați pe partea stângă

și sunt reprezentați de: Valea Mare, Valea Bulzului, Valea Sighiștelului, în timp ce afluenți ai săi de pe partea dreaptă sunt mult mai puțin reprezentați (figura 75).



**Figură 20** Harta hidrografică regională a zonei cuprinsă între DNDR și localitatea Ștei (locul de confluență al Crișului Băița cu Crișul Negru)

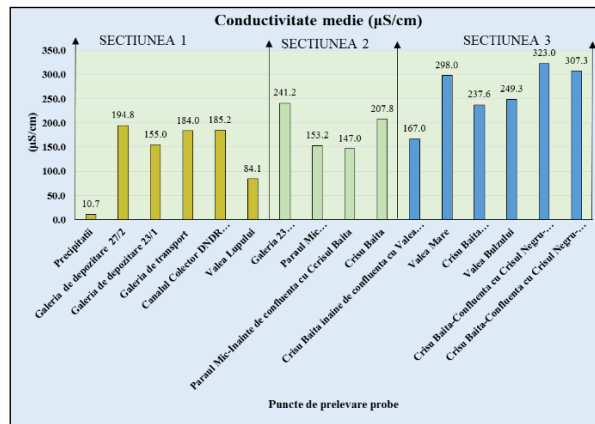
#### **5.4 Interpretarea datelor hidrologice și hidrogeologice**

Acest subcapitol urmărește caracterizarea și variația în timp din punct de vedere fizico-chimic și radiologic a apelor subterane și de suprafață din zona de influență a DNDR. Singura sursă de apă din zona DNDR este reprezentată de apa provenită din precipitațiile atmosferice.

##### **Conductivitatea electrică**

Apele provenite din precipitații în zona DNDR sunt caracterizate de o conductivitate electrică medie de  $10,7 \mu\text{S}/\text{cm}$ , cu o maximă care nu depășește  $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Apele de infiltrații/subterane din zona depozitului (galeria transversală 27/2, galeria transversală 23/1 și galeria de transport) au valori medii situate între  $155\div 195 \mu\text{S}/\text{cm}$ , mai mari decât curgerea sezonieră de suprafață (Pârâul Lupului) cu valori medii de  $84 \mu\text{S}/\text{cm}$ , ceea ce indică o curgere lentă a apei prin masivul de roci în care este amplasat depozitul, ducând la o îmbogățire a acestuia în săruri minerale (figura 85). Valori mai mari, în jurul valorii de  $300 \mu\text{S}/\text{cm}$ , se înregistrează la probele recoltate din dreptul zonelor populate, începând din dreptul localității Băița. Influența acestor zone reiese din modificarea parametrilor chimici ai apelor, așa cum este descris și în continuarea acestui capitol.

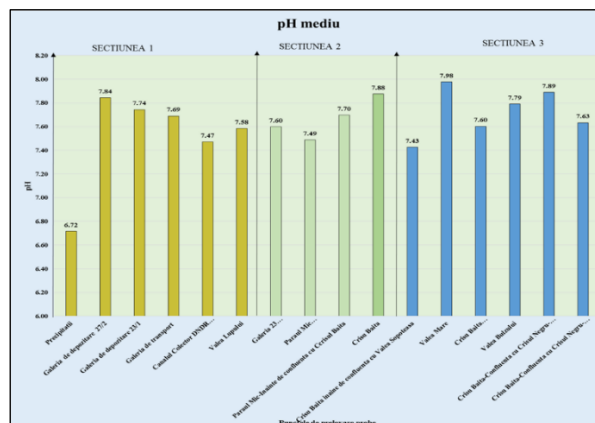




Figură 21. Variații ale conductivității medii în probele de apă analizate

### Concentrația ionilor de hidrogen (pH-ul)

Apele meteorice recoltate de la stația meteorologică de pe amplasamentul DNDR au un pH care variază între 5,5÷8,05, având aceleași caracteristici ca apa unei ploii normale/slab acide. Apa meteorică are în mod normal un pH cu o valoare aproximativă de 5,5 care se datorează dizolvării/absorbirii dioxidului de carbon (CO<sub>2</sub>) din atmosferă. Valori mai mari ale pH-ului au fost înregistrate la probele de apă obținute prin topirea zăpezii recoltate în timpul iernii, datorită conținutului mai mic de dioxid de carbon adsorbit în comparație cu apa de ploaie. Acest lucru este și un indicator al lipsei de poluare a aerului din zonă.



Figură 22. Variații ale valorilor medii de pH în probele de apă analizate

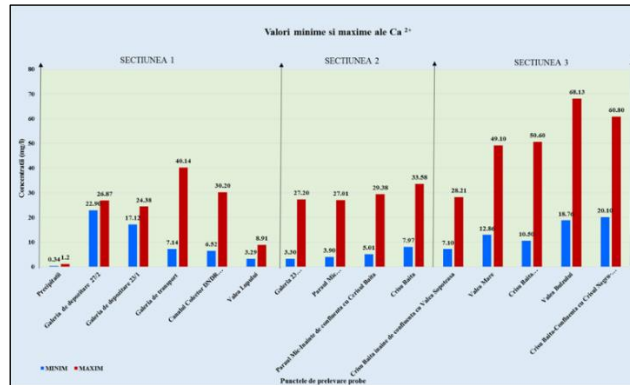
### 5.5 Variații ale principalilor constituenți ai apelor studiate

#### Calciul (Ca<sup>2+</sup>)

În cazul apelor de precipitații, prezența ionilor de Ca<sup>2+</sup> și Mg<sup>2+</sup> pot avea origine locală, sub forma de aerosoli locali. În probele recoltate din zona DNDR, concentrația ionului Ca<sup>2+</sup> oscilează de la valori mai mici de 10 mg/l la valori de peste 40 mg/l. Aceasta variație mare se observă în cazul probelor recoltate din Galeria de transport și Canal colector, în timp ce în probele prelevate din galeriile de depozitare 27/2 și 23/1 variația este aproape inexistentă (figura



87). Aceasta diferență a variației ionului  $\text{Ca}^{2+}$  dintre cele două grupuri de ape subterane este un alt indicator al curgerii lente a apelor subterane în pachetul de roci de deasupra galeriilor de depozitare.

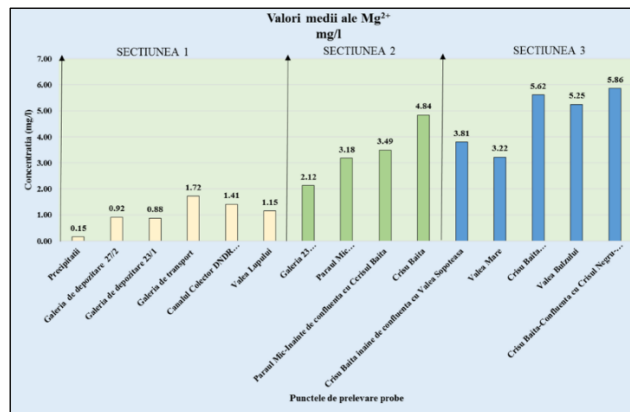


Figură 23. Variații ale valorilor minime și maxime ale cationului  $\text{Ca}^{2+}$  în probele de apă studiate

În probele recoltate din apele de suprafață se observă o variație mare a ionului  $\text{Ca}^{2+}$  care se datorează influenței directe a naturii și geometriei terenului, care permite o curgere rapidă/siroire sezonieră a apelor de precipitații.

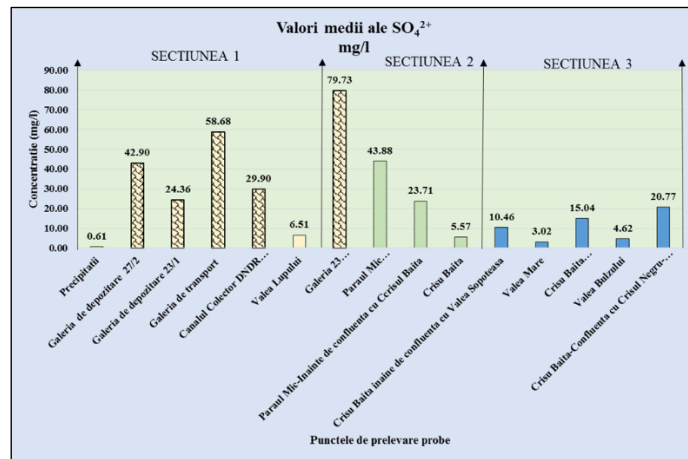
### Magneziul ( $\text{Mg}^{2+}$ )

Concentrația sa medie în apele din zona investigată este mică și variază de la 0,1 la 6 mg/l (figura 88). Este reprezentat de ionul liber  $\text{Mg}^{2+}$  care, în comparație cu calciu, prezintă o capacitate de asociere mai ridicată cu anionii anorganici formând  $\text{MgSO}_4$  și  $\text{MgCO}_3$ .



Figură 24. Variații ale valorilor medii ale anionului  $\text{SO}_4^{2-}$  în probele de apă studiate

### Sulfatii ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

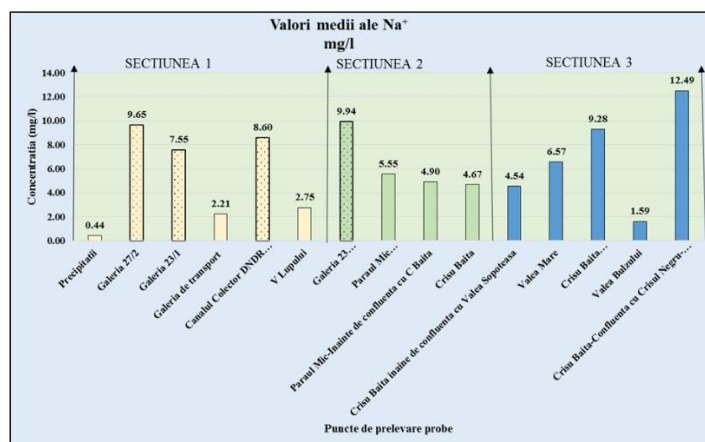


Figură 25. Variații ale valorilor medii ale anionului  $SO_4^{2-}$  în probele de apă studiate

În zona studiată acest ion are cele mai mari valori în apele subterane (coloanele hașurate), cu valori maxime care se apropie de 100 mg/l (Figura 89). O explicație a originii sulfatului din apele subterane este că în zonă sunt prezente mineralizații de sulfuri metalice (Cu, Pb, Zn, Mo, etc.). Aportul de sulfatați din minerale (compuși ai sulfului și sulfosăruri) conținuți în roci reprezintă un ansamblu de reacții complexe care au ca produs final sulfatați, hidroxid de fier insolubil și ioni  $H_3O^+$ , care conduc la creșterea posibilităților de disoluție. Cinetica reacțiilor menționate este foarte lentă, rezultând de aici că un conținut ridicat de sulfatați proveniți din oxidarea sulfurilor este un indiciu al unui tranzit îndelungat al apei în pachetul de roci străbătute.

### Sodiul ( $Na^+$ )

Sodiul este un metal alcalin, care formează săruri ușor solubile în apă, săruri ai căror ioni dizolvați tind să rămână în soluție. Ionul de  $Na^+$  participă la reacții de schimb cu alți ioni de la suprafața mineralelor argiloase, ducând la creșterea concentrației de  $Na^+$  din apele subterane. Concentrațiile din probele analizate au valori medii cuprinse 0,44 și 12,5 mg/l (figura 90).

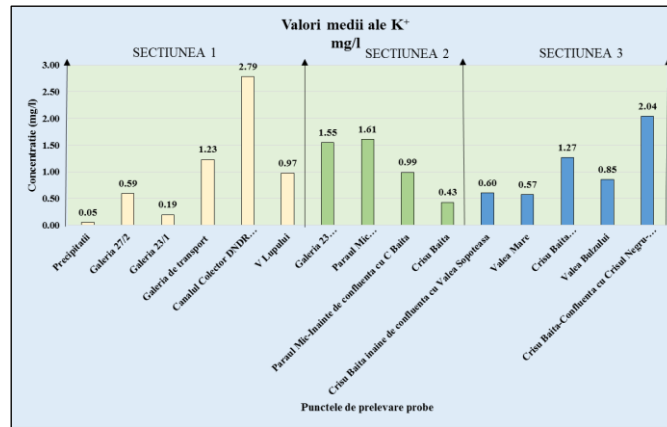


Figură 26. Variații ale valorilor medii ale cationului  $Na^+$  în probele de apă studiate

Ca și în cazul sulfaților, valorile medii mai mari ale concentrației de sodiu determinate în apele subterane din zona DNDR (coloanele punctate din grafic), se explică prin prezența mineralelelor aluminosilicatic, în special feldspat și prin procesele de albitizare asociate cu metasomatismul Na/K, în timp ce valorile mari prelevate din zonele populate indică influența antropică asupra concentrației sodiului.

### Potasiul ( $K^+$ )

În apele de precipitații ionii de  $K^+$  și  $Na^+$ , la fel ca și în cazul  $SO_4^{2-}$ , sunt un indicator al influenței curenților marini asupra acestora [Ulrich, 2002].

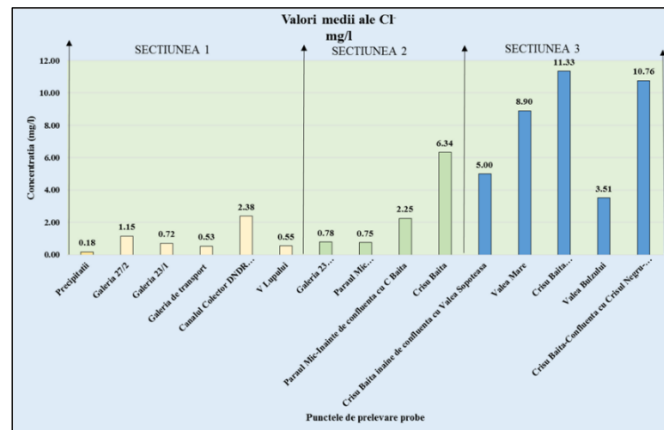


Figură 27. Variații ale valorilor medii ale cationului  $K^+$  în probele de apă studiate

Valorile medii ale ionului  $K^+$ , măsurate în probele de apă din zona studiată se încadrează în intervalul 0,2-2,7 mg/l (figura 91).

### Clorurile ( $Cl^-$ )

Anionul clor ( $Cl^-$ ) este prezent în apele analizate în concentrații medii ce variază de la 0,1 la 10,76 mg/l (figura 92).



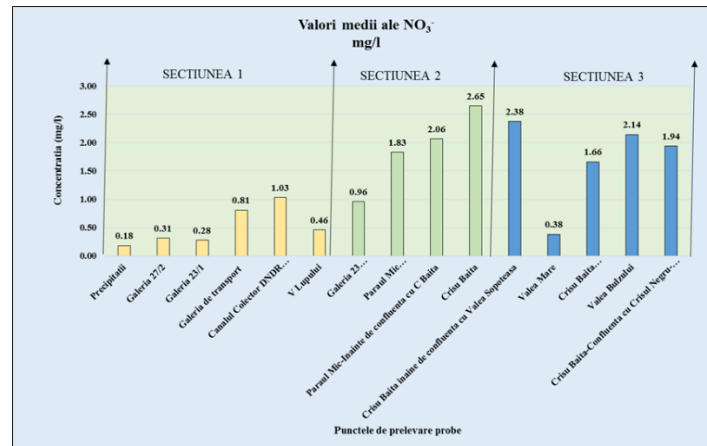
Figură 28. Variații ale valorilor medii ale anionului  $Cl^-$  în probele de apă studiate

În zona DNDR valorile înregistrate pentru ionului  $Cl^-$  sunt mici, lucru normal ținând cont că în zonă nu sunt cunoscute acumulări naturale de sare, în timp ce în zonele populate apar

creșteri ale valorilor, în general în perioada iarnă-primăvară, o posibilă explicație fiind contaminarea apelor ca urmare a utilizării sării în scopul topirii gheții/zăpezii de pe drumuri și poteci.

### Nitrații ( $\text{NO}_3^-$ )

Valorile nitraților ( $\text{NO}_3^-$ ) pentru apele studiate se situează sub 3 mg/l (figura 93). Prezența nitraților are drept cauză în general utilizarea antropică în scopuri agricole a acestora, fiind folosiți ca îngrășământ pentru plante.



Figură 29. Variații ale valorilor medii ale anionului  $\text{NO}_3^-$  în probele de apă studiate

În cazul zonelor nepopulate sau fără activitate agricolă cum este cazul zonei DNDR (Sectiunea 1), sursa nitraților este de natură organică. Aceștia pot proveni din organismele moarte (plante și animale) în urma acțiunii bacteriilor nitrificante, care transformă azotul legat organic în azotați.

**Elementele minore** ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{As}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Be}^{2+}$ ,  $\text{Bi}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cr}$  (total),  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}$  (total),  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Mn}$  (total),  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Se}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Tl}^{3+}$ ,  $\text{V}^{2+}$ ,  $\text{U}^{6+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ).

Sursa acestor elemente în apele subterane și de suprafață poate fi variată. Astfel, unele dintre ele pot avea ca origine diferite tipuri de poluări ca de exemplu:  $\text{PO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , iar altele, cum ar fi  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Al}^-$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , pot proveni în urma reacțiilor dintre apă și pachetele de roci străbătute.

În probele de apă recoltate din zonă nu a fost identificată prezența acestor microelemente în valori care să depășească activitatea minim detectabilă (AMD).

### Radionuclizii

Rezultatele determinării prezenței radionuclizilor în probele de apă prelevate în perioada 2013 – 2017, vin în completarea rezultatelor analizelor pe probe de apă efectuate în cadrul Programelor Anuale de Monitorizare a Mediului prin extinderea zonei cercetate, oferind astfel o caracterizare radiologică mai detaliată a tuturor curgerilor de apă, subterane/de suprafață din

zonă.

Analizele gama spectrometrice pe probele de apă prelevate atât în cadrul acestui studiu, cât și în cadrul Programelor anterioare de monitorizare a mediului în zona DNDR, realizate anual începând cu anul 1986, nu au pus în evidență existența radionuclizilor gama emițători naturali sau antropogeni cu activitate mai mare decât activitatea minim detectabilă (AMD).

## CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Lucrarea prezentată ca teză de doctorat și-a propus să evalueze riscul de contaminare indus de prezența Depozitului Național de Deșeuri Radioactive de joasă și medie activitate (DNDR) Băița Bihor pe baza proprietăților dispersive ale mediului subteran și ale apelor de suprafață și subterane. Pentru aceasta au fost efectuate observații și măsurători pe teren în zona depozitului, precum și studii experimentale în laborator, în vederea caracterizării proprietăților și comportamentului elementelor de mediu care pot avea contribuții asupra unei potențiale migrări de radionuclizi în mediul înconjurător.

Lucrarea cuprinde date bibliografice cu aspect general, legate de deșeurile radioactive și de soluțiile de depozitare prezentate în primele două capitole, și experimentele, rezultatele și interpretările studiilor care s-au întins pe durata a circa 4 ani (2013-2017) și care constituie contribuțiile personale (capitolele 3-5).

**Activitățile** dedicate atingerii obiectivelor prezentei teze de doctorat au fost:

- documentarea și cercetarea bibliografică,
- caracterizarea geografică și geologică a zonei din punct de vedere al încadrării și amenajării DNDR în funcție de condițiile geologice, clima, vegetația, fauna și flora,
- efectuarea de măsurători și observații în zona și pe amplasamentul DNDR Băița Bihor,
- completarea, prelucrarea și interpretarea datelor obținute în cadrul Programelor de monitorizare a mediului on-site și în vecinătatea depozitului în fazele preoperațională și operațională (1986-prezent),
- înregistrarea și analizarea variației parametrilor meteorologici mășurați cu ajutorul stației meteorologice instalate pe amplasamentul DNDR Băița Bihor începând cu anul 2013 și compararea cu datele din studiul meteorologic întocmit înainte de darea în operare a depozitului, de către INMH în anul 1982,
- efectuarea de experimente de laborator privind adsorbția Cs<sup>+</sup> pe diverse combinații de sorturi, obținute din probe de rocă prelevate din zonele de falie/de zdrobire importante din galeria de depozitare 23/1,

- efectuarea de analize de laborator pe probe de apă prelevate trimestrial din zona de influență a DNDR și din zonele adiacente (afluenți principali ai Crișului Băița), timp de patru ani; analizarea și prelucrarea datelor obținute pentru caracterizarea și evaluarea din punct de vedere fizico-chimic și radiologic, în vederea identificării unor eventuale modificări induse de prezența depozitului.

**Noutatea** lucrării este legată în principal de evaluarea diferitelor procese care au loc la contactul dintre apă și rocă de-a lungul căilor de migrare subterană din zona DNDR, procese a căror evoluție depinde de:

- caracteristicile climatologice ale zonei.
- potențialul de etanșare al formațiunilor geologice.
- condițiile hidrologice și hidrogeologice ale zonei în care este amplasat depozitul.

Principalele realizări obținute în urma acestei teze de doctorat sunt prezentate în continuare.

1. Datele obținute în cadrul programelor de monitorizare a mediului s-au realizat prin măsurări gama-spectrometrice, dozimetrice, analize fizico-chimice și măsurări de radon. Analizarea, interpretarea și prelucrarea acestor date au condus la următoarele concluzii:

- măsurările dozimetrice au demonstrat că nivelul fondului de radiații în zona Băița-Bihor este mai mare, valorile sensibil crescute ale debitului echivalentului de doză din Băița – Plai, precum și cele din jurul DNDR, fiind cauzate de prezența fragmentelor de roci cu conținut de minereu de uraniu/steril, rămase de la fosta exploatare minieră. Condițiile geologice și hidrogeologice, specifice minei Băița și zonei adiacente, asigură o protecție naturală corespunzătoare pentru populație și mediu din vecinătatea și aval DNDR. Din analiza datelor obținute s-a remarcat faptul că activitățile de la DNDR nu influențează nivelul de iradiere externă; măsurarea sistematică a nivelului iradierii externe a condus la concluzia finală că activitățile de la DNDR – Băița se desfășoară fără risc de iradiere suplimentară a personalului operator, a populației și fără impact asupra mediului înconjurător.
- analizele spectrometrice efectuate pe probele de sol, sedimente și vegetație au identificat radionuclizii naturali din seriile  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  și  $^{232}\text{Th}$  și  $^{40}\text{K}$ ,  $^7\text{Be}$ . Activitatea specifică, relativ mare, a radionuclizilor din seriile uraniului, determinată în probele de sol și sedimente, este cauzată de existența fostelor lucrări miniere (de suprafață și subteran) de explorare și exploatare a minereului de uraniu. Singurul radionuclid antropogen identificat este  $^{137}\text{Cs}$  a cărui activitate specifică maximă a fost măsurată în probe de sol prelevate din zona amonte

DNDR, ceea ce demonstrează că radionuclidul nu provine din activitățile specifice de depozitare a deșeurilor radioactive, ci de la accidentul nuclear de la Cernobîl. Același radionuclid a fost identificat și în probele de lapte, recoltate din zona studiată, în concentrații relativ reduse, valori comparabile cu cele determinate de alți specialiști în probe de lapte din țară.

- în toate probele de apă activitatea specifică a  $^3\text{H}$  se situează sub limita admisă pentru apa potabilă (100 Bq/l).
- rezultatele analizelor fizico-chimice nu au arătat variații semnificative ale parametrilor monitorizați, ele încadrându-se în variațiile sezoniere de calitate și cantitate.

2. Pentru caracterizarea căilor de infiltrare a apelor meteorice în zona galeriilor de depozitare ale DNDR a fost întocmit un bilanț meteorologic prin evaluarea datelor măsurate anual cu ajutorul stației meteorologice automată amplasată în perimetrul Depozitului Național de Deșeuri Radioactive – Băița Bihor, model „WatchDog data logger WD2700” și comparate cu date măsurate de stațiile existente în apropierea DNDR, anterior anului 2012.

Precipitațiile totale anuale înregistrate de pluviometrul automat al stației meteorologice de pe amplasamentul DNDR au valori cuprinse între 772,7÷979,6 mm, comparabile cu valoarea de 1100 mm, estimată în anul 1982 de către Institutul de Meteorologie și Hidrologie în Studiul meteorologic al zonei Băița-INMH.

Temperatura anuală a variat între -24°C-36 °C, iar media multianuală se situează în jurul valorii de 10°C.

Pentru umiditatea aerului s-au înregistrat valori cuprinse între aproximativ 80÷85% în lunile aprilie – septembrie și 90÷95% în lunile ianuarie, februarie și octombrie – decembrie.

Viteza medie anuală a vântului se situează între 2÷5 m/s, maximul depășind uneori 10÷15 m/s, iar frecvența timpului calm a fost de 20÷30% vara și 30÷40% iarna.

Acest bilanț, împreună cu datele din studiile anterioare anului 2012, arată că parametrii meteorologici din zona depozitului nu au variat semnificativ în perioadele evaluate, încadrându-se în limite normale, iar evoluția climatică nu are un efect semnificativ asupra sistemului de depozitare.

3. În cadrul studiului legat de posibilele căi de migrare a radionuclizilor din depozit s-au cercetat faliile majore și zonele fracturate din punct de vedere al capacității privind adsorția radionuclizilor (studiu de caz adsorția ionilor Cs). Au fost stabiliți ca parametri cheie ai acestui proces compoziția mineralogică, granulometria stratului de sorbent și concentrația de  $\text{Cs}^+$ . În experimentele efectuate în laborator pe diverse sorturi granulometrice prelevate din zonele faliat/fisurate ale depozitului s-au obținut pentru coeficientul de adsorție,  $K_d$  (mg/g),



următoarele valori: 38, 2300, 5205, 5063, 6942, 6466, 7800.

Ionii de cesiu se adsorb pe diversele fracții granulometrice în cantități (mg) de la 48,1 la 657, iar procentele (%) de  $\text{Cs}^+$  legat ireversibil au depășit valoarea de 65.

Aceste rezultate au fost comparate cu valorile raportate atât în literatură, în studiile anterioare efectuate în perioada preoperațională, cât și în cadrul analizelor de securitate pe roca gazdă a depozitului și au demonstrat că roca este compactă, puțin permeabilă sau impermeabilă și o bună barieră geologică în calea migrării radionuclizilor.

Valorile  $K_d$  și procentele de legare ireversibilă a ionilor de  $\text{Cs}^+$  obținute în laborator pentru sorturi granulometrice prelevate din zonele de falie/fisurare, care reprezintă practic singura cale a unei posibile migrări a radionuclizilor ce pot fi antrenați cu ajutorul apelor de infiltrație, demonstrează că aceste zone nu contribuie semnificativ la creșterea vitezei de migrare de radionuclizi.

Aceste date, corelate cu cantitățile reale de  $\text{Cs}^+$  aflate și preconizate a se depozita în depozit - care nu vor depăși câteva zeci de grame -, confirmă calitatea de barieră a formațiunilor geologice în care este amplasat DNDR Băița Bihor.

4. Caracterizarea hidrologică și hidrogeologică a zonei de influență a DNDR s-a bazat pe prelevarea de probe de apă atât din subteran (zona DNDR), cât și de suprafață (din zona de influență a DNDR) și analizarea lor din punct de vedere fizic, chimic și radionuclidic în laboratoarele DMDR (IFIN-HH), utilizând tehnici și metode moderne. Au fost determinați parametri fizici și prezența a diferite specii chimice: săruri, metale grele, ioni complecși, radionuclizi.

Parametrii fizici reprezentativi pentru o probă de apă sunt pH și conductivitatea electrică.

Pentru apele provenite din precipitații în zona DNDR a fost determinată o conductivitate electrică medie de  $10,7 \mu\text{S}/\text{cm}$ , pentru apele de infiltrații/subterane din zona depozitului au fost determinate valori medii situate între  $155\div 195 \mu\text{S}/\text{cm}$ , iar valori mai mari, în jurul valorii de  $300 \mu\text{S}/\text{cm}$ , au fost identificate pentru probele de apă supraterană recoltate din dreptul zonelor populate a caror influență reiese și din modificarea parametrilor chimici ai apelor.

Valorile pH-ului pentru apele meteorice s-au încadrat astfel: ape meteorice 5.5-8.5, ape de infiltrație din zona DNDR 7.18-8.06, ape de suprafață 6.43-8.09. Constituenții principali ai apelor studiate,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , au fost identificați în concentrații mici, de ordinul  $\text{mg}/\text{l}$  variind între 0.1 - 100  $\text{mg}/\text{l}$ , valori care indică o slabă mineralizare a apelor, reieșită și din valorile măsurate pentru conductivitate.

Elementele ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{As}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Be}^{2+}$ ,  $\text{Bi}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cr}$  (total),  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}$  (total),  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Mn}$  (total),  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Se}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Tl}^{3+}$ ,  $\text{V}^{2+}$ ,  $\text{U}^{6+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) nu au fost identificate în concentrații



care să depășească valoarea de 0.08mg/l.

Din compararea datelor obținute cu cele înregistrate în studii anterioare s-a observat că nu există nicio variație semnificativă într-o perioadă de 40 de ani de operare a depozitului.

În concluzie, rezultatele obținute în cadrul acestei teze de doctorat confirmă robustețea și performanțele sistemului de depozitare ales, demonstrând o buna izolare a coletelor depozitate pentru cel puțin 300 de ani, perioada de interes – post-închidere recomandată pentru depozitele în care sunt depozitate deșeuri care conțin radionuclidul  $^{137}\text{Cs}$ .

Impactul zero al DNDR asupra mediului este asigurat de bariera tehnică/inginerescă (coletul cu deșeuri radioactive) și de către bariera geologică evaluată complex în cadrul acestei teze prin experimente originale care confirmă o bună capacitate de izolare a radionuclizilor depozitați, chiar și în cazul unei eventuale deteriorari a barierei ingineresti.

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- ARPAD, S., (1978), *Ape și gaze radioactive în R.S. România*, Ed. Dacia, Cluj-Napoca
- BORNAZ, E., DOMOCOS, V., CATILINA, R., DORCIOMAN, D., (1991), *Studii privind retenția radionuclizilor conținuți în containerele cu deșeuri radioactive depozitate definitiv pe bentonite și tufuri vulcanice*, Contract de cercetare IFIN-HH.
- CHIOSILA, I., GHEORGHE, R., SIMION, E., (2011), *25 de ani de la accidentul nuclear de la Cernobal*.
- SCRĂDEANU, D., GHEORGHE, A (2007), *Hidrogeologie Generală* - Editura Universității din București
- DOBRIN, R.I., DULAMA, C.N., TOMA, AL., (2006), *Soil – plant experimental radionuclide transfer factors*, *Rom. Journ. Phys.*, Vol. 51, Nos. 1–2, P. 73–76
- DOUGLAS, L. A. (1989), “*Vermiculites.*” in *Minerals in Soil Environments*, J. B. Dixon and S. B. Week (eds.), Second Edition, pp. 635-674, Soil Science Society of America, Madison,
- DRĂGOLICI, F., ROTARESCU, GH., LUCA, A., PEIC, T., POSTELNICU, C., DRĂGOLICI, A.C., (1998), *Radioactivity studies in the Romanian National Repository for Radioactive Waste - Băița, Bihor region, during 14 years of resource*, Development IAEA-CN-78/42
- FICK, A. (1855), “*On liquid diffusion*”. *Poggendorffs Annalen*. 94: 59. – reprinted in “*On liquid diffusion*”. *Journal of Membrane Science*. 100: 33–38. 1995. doi:10.1016/0376-7388(94)00230
- IVANOVICI, V (1976), *Geologia Munților Apuseni* – Editura Academiei Române.

NADDAFI, K., NABIZADEH, R., SAEEDI, R., MAHVI, A.H., VAEZI, F., YAGHMAEIAN, K., GHASRI, A., NAZMARA, S., *Biosorption of lead (II) and cadmium (II) by protonated Sargassum glaucescens biomass in a continuous packed bed column*, J Hazard Mater 147 (3), pp. 785–791, 2007

KAMEL, N.H., NAVRATIL, D.J., 2002. *Migration of  $^{134}\text{Cs}$  in unsaturated soils at a site in Egypt*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 254 (3), 421–429.

MÂNDRUȚ, O. (2008), *Atlas geografic școlar*. Editura Corint, România.

HAMDAOUI, O., *Dynamic sorption of methylene blue by cedar sawdust and crushed brick in fixed bed columns*, J Hazard Mater 138 (2), pp. 293–303, 2006;

PETRESCU, A., DONE, L., DRĂGOLICI, F., PRISECARU, I., PAVEL, G., POPA, H., (2014) *Thorough investigation of Radon concentration variations in Băița Bihor (Romanian National Radioactive Waste Repository – DNDR)*, Rom. Journ. Phys., 59, Nos. 9–10, 1025–1034

QUINTESSA LIMITED (2006), *Raport preliminar de Securitate pentru Depozitul Băița Bihor, QRS-1255A-PSAR2*, (Preliminary Safety Analysis Report) versiunea 1.0

SĂNDULESCU, M. (1984), *Geotectonica României*. Editura Tehnică București.

ICPMN Baia Mare, (1982), *Studiu Geotehnic și Hidrogeologic în zona galeriilor 50-53, Băița-Bihor*

INMH, (1982), *Studiu meteorologic al zonei Băița-INMH*

#### TEZE DE DOCTORAT:

DONE, L., - *Contributii la imbunatatirea performantelor de determinare a continutului de radionuclizi naturali și antropogeni în zona de influența a depozitului național de deșeuri radioactive-Băița, Bihor* - Teză de doctorat

DRĂGOLICI, F., - *Studii privind amplasarea și operarea în condiții de securitate a depozitelor de deșeuri radioactive instituționale* - Teză de doctorat

ȚUGULAN, L., *Aplicatii de tehnici nucleare și atomice pentru studiul depozitelor radioactive naturale și antropogene* - Teza de doctorat.

#### LEGI, NORME, STANDARE, DIRECTIVE:

CNCAN, (2008), *Ordinul nr. 342/24.09.2008: Ghid privind termenii utilizați în reglementarea, autorizarea și controlul activităților nucleare, acordurile și convențiile în domeniul nuclear.*

CNCAN, (2014), *Norme fundamentale pentru gospodărirea în siguranță a deșeurilor radioactive și a combustibilului nuclear uzat*, republicate în M. O. Partea I nr.223 din 28.03.2014.

CNCAN, *Legea nr. 111/1996 privind desfășurarea în siguranță, reglementarea, autorizarea și controlul activităților nucleare.*

CNCAN, (2005), *Norme privind clasificarea deșeurilor nucleare (NDR-03).*

IAEA, *International Atomic Energy Agency, - Safety standards Classification of Radioactive Waste.*

IAEA, *International Atomic Energy Agency, - Safety standards-Storage of radioactive waste.*

IAEA -No. GSR Part 3 (Interim), *Safety Standards Regulations for protecting people and the environment.*

ICRP 1983, *Radionuclide Transformations - Energy and Intensity of Emissions* ICRP Publication 38, Ann. ICRP 11-13.

Indicativ P 100-1/2013, *Normativ de proiectare, cod de proiectare seismică- Partea I — Prevederi de proiectare pentru clădiri.*

Legea nr. 311/2004, *Privind calitatea apei potabile*

Pure and Applied Chemistry *Measurement of ph. definition, standards, and procedures*, 2002 Vol.74, No.11, pp.2169–2200

STAS 1342/91, *Apa potabilă*

#### PAGINI WEB:

<https://www.viamichelin.com/web/Maps>.

<https://www.google.com/earth/>.

[www.sien.ro/.../sien-2011-25-years-since-chernobil-nuclear-accident-227](http://www.sien.ro/.../sien-2011-25-years-since-chernobil-nuclear-accident-227).

<http://www.atsdr.cdc.gov>.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/fisfrag.html>.

#### **LISTA DE LUCRARI ELABORATE ȘI PUBLICATE**

##### **Lucrări publicate în reviste de specialitate de circulație internațională cotate ISI.**

1. L.R. ZICMAN, E. NEACȘU, L. DONE, L.C. ȚUGULAN, C. ALEXANDRU, F.N. DRĂGOLICI, M. NICU, L.F. IONAȘCU, B.T. OBREJA, G. DOGARU, T. DOBRE, (2017), *INVESTIGATION AND MODELING OF FIXED BAD CESIUM SORPTION ON NICKEL FERROCYANIDE, PRECIPITATED ON SILICA GEL*, Rom. J. Phys. 62, 806.

2. MIHAELA NICU, LAURA IONAȘCU, FELICIA DRĂGOLICI, ELENA NEACȘU, LAURA ZICMAN, BOGDAN OBREJA, (2017), *COMPARISON STUDY OF INORGANIC CEMENTS TO THE CONDITIONING OF THE SECONDARY RADIOACTIVE WASTE*, Rom. J. Phys. 62, 805.

3. B. T. OBREJA, E. NEACȘU, L. DONE, F. DRĂGOLICI, L. ȚUGULAN, L. ZICMAN, D. SCRĂDEANU, (2016), *EVALUATION OF ENVIRONMENTAL MONITORING DATA AT LOW AND INTERMEDIATE-LEVEL RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY BĂIȚA, BIHOR, ROMÂNIA*, ROM J PHYS, 61 (3 -4), 718 – 727, 2016.

**Lucrari prezentate/publicate în volumele unor manifestări științifice naționale/internaționale recunoscute, din țară și străinătate**

1. BOGDAN OBREJA, FELICIA DRĂGOLICI, DANIEL SCRĂDEANU, ELENA NEACȘU, LAURA ZICMAN, (2016), *STUDY AND INTERPRETATION OF PHYSICO-CHEMICAL AND RADIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF WATER STREAM IN THE NATIONAL REPOSITORY FOR LOW AND INTERMEDIATE RADIOACTIVE WASTE – BĂIȚA BIHOR AREA*, Book 4, Volume 1, 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM), ISBN: 978-1-5108-2990-9.

2. ELENA NEACȘU, LAURA RUXANDRA ZICMAN, BOGDAN TUDOR OBREJA, FELICIA DRĂGOLICI, (2015), *PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERIZATION OF WATER STREAMS FROM THE BĂIȚA BIHOR REPOSITORY FOR LOW LEVEL RADIOACTIVE WASTE*, *Workshop SAMPLING & CHARACTERISATION*, From Sampling to Analysis, Montpellier Corum - France, November 17-19.

3. BOGDAN OBREJA, DANIEL SCRĂDEANU, FELICIA DRĂGOLICI, ELENA NEACȘU LAURENȚIU DONE, *METHODOLOGY FOR ENVIRONMENTAL MONITORING IN THE AREA OF BĂIȚA BIHOR REPOSITORY FOR RADIOACTIVE WASTE*, INTERNATIONAL U.A.B. - B.EN.A. CONFERENCE ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

**Lucrari publicate în reviste de specialitate.**

1. LAURA RUXANDRA ZICMAN, ELENA NEACȘU, LAURENȚIU DONE, LIVIU ȚUGULAN, FELICIA DRĂGOLICI, BOGDAN TUDOR OBREJA, TĂNASE DOBRE, *REMOVAL OF <sup>137</sup>Cs IONS FROM AQUEOUS RADIOACTIVE WASTE USING NICKEL FERROCYANIDE, PRECIPITATED ON SILICA GEL*, Bulletin of Romanian Chemical Engineering Society, 2(1) (2015) 84-99 ISBN:2360-4697.