



Universitatea din București
Facultatea de Geologie și Geofizică
Școala Doctorală de Geologie



ANALIZA CONDIȚIILOR HIDRODINAMICE ȘI DE TRANSPORT AL RADIONUCLIZILOR ÎN AMPLASAMENTUL DEPOZITULUI NAȚIONAL DE DEȘEURI RADIOACTIVE BĂIȚA BIHOR

REZUMAT



COORDONATOR ȘTIINȚIFIC:

Prof. Dr. Ing. ALEXANDRU DANCHIV

DOCTORAND:

Ing. DANIELA LIVIA MIHALCEA (PARASCHIVOIU)

București, 2014



ANALIZA CONDIȚIILOR HIDRODINAMICE ȘI DE TRANSPORT AL RADIONUCLIZILOR ÎN AMPLASAMENTUL DEPOZITULUI NAȚIONAL DE DEȘEURI RADIOACTIVE BĂIȚA BIHOR

REZUMAT

CUPRINS

Pagina

CAPITOLUL I - CONDIȚII GEOLOGICE ȘI STRUCTURALE ALE AMPLASAMENTULUI DNDR BĂIȚA BIHOR	2
1 AMPLASAREA DNDR BĂIȚA BIHOR	2
2 CARACTERISTICI GEOLOGICE	2
3 CARACTERISTICI LITOLOGICE	3
4 CARACTERISTICI STRUCTURALE	3
5 CARACTERISTICI TECTONICE	3
CAPITOLUL II - CONDIȚII HIDROLOGICE ȘI HIDROGEOLOGICE ALE AMPLASAMENTULUI DNDR BĂIȚA BIHOR	4
6 CADRUL HIDROLOGIC	4
7 CADRUL HIDROGEOLOGIC	4
7.1 SISTEMUL ACVIFER DIN ZONA DNDR	4
7.2 ZONAREA SISTEMULUI ACVIFER DIN AREALUL DEPOZITULUI	5
7.2.1 Zona de infiltrație	5
7.2.2 Zona nesaturată	6
7.2.3 Zona inundată (saturată)	6
7.3 HIDROGEOLOGIA ÎN DEPOZITELE RECENTE	6
7.4 CURGEREA ÎN ȘI DIN DEPOZIT	6
CAPITOLUL III - MODELAREA CONDIȚIILOR HIDRODINAMICE ȘI DE TRANSPORT AL RADIONUCLIZILOR ÎN AMPLASAMENTUL DNDR BĂIȚA BIHOR	7
8 OBIECTIVELE MODELULUI	7
9 CONSTRUCȚIA MODELULUI MATEMATIC	7
10 MODELUL CONCEPTUAL	8
11 REALIZAREA MODELULUI (INTRODUCEREA PARAMETRILOR)	8
11.1 DISCRETIZAREA MODELULUI	9
11.2 CALIBRAREA MODELULUI	9
11.3 TERMENII SURSĂ	10
11.4 MODELUL CONCEPTUAL AL MEDIULUI CU DUBLĂ POROZITATE	10
12 SIMULAREA TRANSFERULUI RADIONUCLIZILOR ÎN MASIVUL DEPOZITULUI	11
12.1 TRANSFERUL IZOTOPILOR DE ²²⁶ Ra	11
12.2 TRANSFERUL IZOTOPILOR DE ¹³⁷ Cs	12
13 SIMULAREA TRANSFERULUI RADIONUCLIZILOR ÎN ZONA SATURATĂ DIN AMPLASAMENTUL DNDR	12
13.1 TRANSFERUL IZOTOPILOR DE ²²⁶ Ra	13
13.1.1 Distribuția concentrațiilor de ²²⁶ Ra în zona aferentă DNDR	14
13.2 TRANSFERUL IZOTOPILOR DE ¹³⁷ Cs	19
13.2.1 Distribuția concentrațiilor de ¹³⁷ Cs	19
CAPITOLUL IV - CONCLUZII	26
CAPITOLUL V – BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	29



ANALIZA CONDIȚIILOR HIDRODINAMICE ȘI DE TRANSPORT AL RADIONUCLIZILOR ÎN AMPLASAMENTUL DEPOZITULUI NAȚIONAL DE DEȘEURI RADIOACTIVE BĂIȚA BIHOR

REZUMAT

CAPITOLUL I - CONDIȚII GEOLOGICE ȘI STRUCTURALE ALE AMPLASAMENTULUI DNDR BĂIȚA BIHOR

1 AMPLASAREA DNDR BĂIȚA BIHOR

DNDR Băița Bihor este localizat la o altitudine de 840 m deasupra nivelului mării, în partea vestică a Munților Bihor, în Munții Apuseni.

Depozitul este amplasat la 2 km est față de cea mai apropiată localitate - satul minier Băița Plai. La 5 km și respectiv 6 km vest față de depozit sunt situate alte două localități: Băița Sat și orașul Nucet, care s-au dezvoltat odată cu exploatarea de uraniu.

DNDR Băița Bihor a fost amenajat în galeriile de exploatare: Galeria 50 și Galeria 53 (folosită inițial pentru ventilație).

2 CARACTERISTICI GEOLOGICE

Depozitul Băița Bihor este localizat într-o zonă complexă din punct de vedere geologic, care este rezultatul mai multor episoade de evoluție asociate cu intruziunile magmatice și activitățile hidrotermale.

Principalele caracteristici geologice și structurale din zona depozitului Băița Bihor sunt următoarele:

- Zona a fost subiectul numeroaselor episoade de încălecare a rocilor mai vechi peste cele mai noi. Astfel, în imediata vecinătate a depozitului, cele mai multe straturi permieni ale Unității de Arieșeni acoperă rocile permo – triasice ale Sistemului Pânzelor de Codru care sunt suprapuse peste rocile devoniene ale Pânzei de Poiana. Peste acestea au fost suprapuse rocile paleozoice ale Pânzelor Poiana și Biharia.
- În vecinătatea depozitului, magmatismul este asociat cu procesul de fracturare, fiind întâlnite diabaze extinse și dyke - uri de diorite în metasedimente. Mineralizarea extensivă din zonă este în cea mai mare parte asociată cu alterarea hidrotermală asociată acestui magmatism.
- Văile din aval de Băița Sat/Nucet sunt umplute cu depozite Neogene și Cuaternare specifice bazinului Beiuș. Acestea sunt în general depozite aluviale tipice zonelor din aval de o zonă muntoasă activă.

3 CARACTERISTICI LITOLOGICE

DNDR Băița Bihor este localizat în Unitatea de Arieșeni (Permian) care este constituită din meta - gresii și filite intruzive prin diabaze. În particular există un orizont major diabazic localizat imediat sub depozit. Primii 100 m sau Galeria 50 sunt incluși în diabaz. Corpul zăcământului delimitat de mina de uraniu de la Băița a avut o formă tabulară, lenticulară și a fost aliniat mai mult sau mai puțin cu straturile de roci fiind asociat cu intruziunile diabazice. Inițial zăcământul a fost exploatat de la suprafață (*Watson S. P. et al., 2006*). În zonele fracturate și faliatate ale rocilor au fost întâlnite mineralogii foarte diferite și variate, incluzând mineralizațiile hidrotermale și rocile de falii (brecciile de falii).

4 CARACTERISTICI STRUCTURALE

Din punct de vedere structural, zona este tânără și activă, majoritatea faliilor fiind relativ recente (post metamorfism).

Blocul depozitului este limitat la NV de Falia Lupului și la SE de sistemul de falieri denumit Falia Centrală. Ambele sisteme de falii sunt înclinate la 50 – 80°.

Little et al., 2006 a împărțit faliile și fracturile în trei grupuri:

- S0 – straturile sedimentare originale. Suprafața de fricțiune observată pe aceste suprafețe indică, că straturile se comportă ca planuri de alunecare din timpul deformărilor asociate cu formarea structurilor S2. Aceste straturi par să joace un rol important în circulația apelor subterane.
- S1 – foliațiile metamorfice care aproape coincid cu stratificația.
- S2 – principala direcție de fracturare.

De asemenea, *Little R. H. et al., 2005* a împărțit grupul de falii S2 în 4 subsisteme de falii (F1, F2, F3 și F4).

5 CARACTERISTICI TECTONICE

Conform *Danchiv A. et al., 2007*, structurile geologice au fost afectate de fenomene tectonice disjunctive care au generat falii normale, inverse (fără încălecare semnificativă) și falii de decroșare regională. Dintre acestea cea mai importantă este falia Galbena, localizată la E de perimetrul de interes dar care reprezintă o direcție rupturală importantă pe care se înscriu principalele falii (verticale sau sub-verticale) din zona DNDR.

În afara faliilor regionale există și o serie de falii mai mici orientate aproximativ E - V, care în prezent sugerează o mișcare normală și/sau de decroșare. În principiu nu se poate vorbi de o succesiune de falieri și probabil că direcțiile principale de falieri (NV - SE, NE - SV și E - V) au fost reluate de mai multe ori, comportându-se diferit de la o fază de activare la metabazite (*Danchiv A. et al., 2007*).



CAPITOLUL II - CONDIȚII HIDROLOGICE ȘI HIDROGEOLOGICE ALE AMPLASAMENTULUI DNDR BĂIȚA BIHOR

6 CADRUL HIDROLOGIC

Depozitul Băița Bihor este localizat în bazinul hidrografic superior al Crișului Negru, cod cadastral III-1, 42.5, conform Hărții hidrologice regionale.

Principalul afluent din zona DNDR Băița Bihor, al Crișului Negru este Crișul Băița, având punctul de confluență în localitatea Ștei. La rândul lui Crișul Băița are ca afluent principal Valea Băița, care își adună apele din zona carierei Băița prin pâraiele Valea Albioarei, Valea Calului, Pârâul Mic, Valea Cicortului, Valea Basului care apoi se varsă în Crișul Băița în localitatea Băița Plai.

Depozitul este amplasat între Pârâul Mic (curs permanent) spre SE și Pârâul Lupului (curs intermitent) imediat spre NV - ul intrării în galeria 50 pe partea SE - ică a carierei. Un al doilea pârâu (pârâul Stâncii) drenează partea centrală a carierei.

7 CADRUL HIDROGEOLOGIC

Din punct de vedere hidrogeologic, arealul DNDR aparține corpului de apă subterană ROCR05 Vașcău, Munții Codru - Moma.

Corpul de apă subterană ROCR05 Vașcău, Munții Codru - Moma este caracterizat printr-un acvifer de tip carstic - fisural, cantonat în calcare și dolomite triasice.

7.1 SISTEMUL ACVIFER DIN ZONA DNDR

Conform *Watson S. P. et al., 2006*, galeriile depozitului sunt localizate în formațiunile Permiane ale pânzei de Arieșeni. Dintre rocile interceptate de galeriile depozitului, predominante sunt gresiile metamorfozate și filitele care au fost străpunse de intruziuni eruptive bazice preponderent diabaze. Sub zona depozitului în galeria 50 a fost localizat nivelul de diabaze pe o distanță de circa 100 m.

Zona depozitului este mărginită către N - V de sistemul faliei Lupului iar către S - E de sistemul faliei centrale, ambele sisteme având înclinări cuprinse între 50 - 80°. Pe falia Lupului se realizează contactul tectonic dintre diabaze la N - V și gresii metamorfozate la S - E. La suprafață, falia centrală separă aflorimentele de gresii metamorfozate de filite negre. Este posibil ca pe această falie să fie canalizat și cursul Pârâului Mic (*Watson S. P. et al., 2006*).

Zona depozitului este extrem de fisurată și fracturată însă dislocările au un caracter minor. Discontinuitățile din masa rocilor din zona DNDR au fost clasificate de către *Watson S. P. et al., 2006*, în trei grupe:

- **S0** - stratificația sedimentară originală care poate juca un rol important în circulația apelor subterane;
- **S1** - foliația metamorfică ce coincide în mare măsură cu stratificația;
- **S2** - sistemul principal de fisuri și fracturi.

Majoritatea fisurilor și fracturilor din galeriile depozitului aparțin grupului al treilea (S2) care în funcție de direcțiile predominante de rupere a fost împărțit în patru sisteme după cum urmează:

- Sistemul F1 - are aceeași orientare ca falia „Lupului”. Falia aceasta a fost recartată la suprafață într-un „rest de vale”, la SV de intrarea în galeria 50;
- Sistemul F2 - orientat NE - SV care este mai puțin important și este întâlnit cu caracteristici de falie în galeria 50 unde prezintă o extindere locală. În restul galeriilor această orientare apare doar cu caracter de fisuri de sprijin;
- Sistemul F3 - prezintă o frecvență destul de redusă însă se remarcă o extindere importantă pe direcție. Sistemul F3 reprezintă o falie principală care traversează oblic (NNV – SSE) galeriile transversale de depozitare. Sistemul F3 practic traversează întreaga zonă activă (de depozitare) a depozitului;
- Sistemul F4 orientat NV - SE reprezintă cea mai importantă direcție de drenaj din galeriile depozitului. Acest sistem (inclusiv fisurile și fracturile de sprijin care îl însoțesc) este prezent în mai toate galeriile depozitului. În zona strictă de depozitare se disting trei falii care aparțin acestui sistem.

Drenajul apei subterane printr-o rocă fisurată are loc pe direcțiile fisurilor/fracturilor deschise, în principal cele de tensiune.

7.2 ZONAREA SISTEMULUI ACVIFER DIN AREALUL DEPOZITULUI

Danchiv A. et al., 2007 a identificat zonele existente în sistemul acvifer din arealul DNDR. În România arealele cu roci eruptive și metamorfice (necarbonatice) nu sunt considerate acvifere.

Sistemul acvifer din zona DNDR poate fi asimilat curgerilor printr-un sistem carstic cu permeabilitate triplă, de fisuri, fracturi, conducte sau galerii.

Sistemul acvifer din zona DNDR, a fost împărțit pe verticală, în trei subsisteme sau zone și anume: zona de infiltrație, zona nesaturată și zona de curgere în regim înecat (saturată, freatic).

7.2.1 ZONA DE INFILTRAȚIE

Așa cum este prezentată de către *Danchiv A. et al., 2007*, zona de infiltrație este reprezentată de partea superficială a suprafeței topografice, prin care se realizează infiltrarea apei subterane în adâncime. Această zonă include pătura de sol, unul sau mai multe orizonturi cu diferite grade de alterare ce formează zona regolitică și primul orizont de rocă cu numeroase fisuri cu deschideri minore.

Procesele de meteorizație fizico - mecanică au la bază apariția și/sau amplificarea fisurilor în urma stressului de decompresie, schimbările de fază ale apei (crioclastismul și haloclastismul), stresul termic (indus de efectele insolației) și acțiunea mecanică a organismelor.

Procesele de meteorizație chimică (alterarea), modifică conținutul chimic al mineralelor conducând la apariția de minerale noi, în principal minerale argiloase.

La altitudinea la care este localizat DNDR au fost evidențiate alterite autohtone cu un singur front de meteorizație (*Buzilă, 2005*).

Procesele antropice din zona DNDR au adus modificări esențiale de natură morfologică și chiar structurală contribuind la lărgirea fisurilor deja existente sau/și formarea de fisuri noi.

Procesele de eroziune și alterare ale pereților carierei de la Băița Bihor sunt puternic active mai ales în zonele faliatate sau fracturate. Lateral și deasupra galeriilor DNDR versanții sunt relativ instabili și căderile de roci sunt relativ frecvente. Astfel, în timp s-a produs o retaluzare naturală a versantului (prin prăbușire și acumulare la baza pereților) datorită unor procese intense de meteorizație și transport.

Rezultatul final al proceselor de meteorizație este formarea unui nivel regolitic cu o dezvoltare variabilă ce ar putea atinge grosimi apreciabile mai ales în zona retaluzată. Prezența acestui nivel poate influența atât intensitatea scurgerii pe versant (prin diminuarea acesteia) cât și a infiltrației în sistemul acvifer din care face parte și DNDR (*Danchiv A. et al., 2007*).

În zona galeriei 50 a fost menționată o creștere a prelingerilor de pe fisuri dinspre zona centrală către exterior, probabil datorată micșorării pachetului de roci de deasupra și din apropierea zonei afectate de carieră aflată într-un proces natural de retalzare.

7.2.2 ZONA NESATURATĂ

Conform *Danchiv A. et al., 2007*, zona nesaturată este constituită pe verticală din sistemul de fracturi cu deschideri milimetrice și centimetrice la care se adaugă ansamblul de lucrări miniere (orizontale și verticale) pe care circulația apei se realizează gravitațional cu nivel liber.

În mod convențional această zonă poate fi localizată între nivelul DNDR respectiv cota 840, (sau cota 850 m, acolo unde există lucrări miniere) și galeriile situate la cota 608 m considerate a fi inundate în permanență. Reacția acestei zone la precipitații este relativ rapidă. În perioadele de topire a zăpezii și primăvara, debitele vehiculate prin această zonă ating valori de peste 100 l/s (măsurători efectuate în martie - aprilie 2006).

7.2.3 ZONA INUNDATĂ (SATURATĂ)

Zona inundată a fost localizată sub cota 608 m și constă în principal din două niveluri de galerii excavate sub nivelul galeriei 11. Nu există informații clare privind morfologia acestei zone și nici modalitățile de drenare (direcții de curgere, parametri hidrogeologici etc.).

7.3 HIDROGEOLOGIA ÎN DEPOZITELE RECENTE

Depozitele recente neogene și cuaternare au un rol important asupra hidrogeologiei locale a zonei. Nivelul general al apei subterane este relativ bine cunoscut în aceste depozite, deși poate varia în funcție de regimul precipitațiilor. Au fost întâlnite câteva acvifere asociate cu orizonturile de argilă. Sub anumite condiții acestea par să fie în baza talvegurilor râurilor din depozitele recente (*Watson S. P. et al., 2006*).

7.4 CURGEREA ÎN ȘI DIN DEPOZIT

Cartarea zonelor de infiltrații din partea accesibilă a depozitului a fost efectuată pentru prima oară în anul 1982, pentru a analiza condițiile hidrogeologice inițiale, existente în zona galeriilor 50 - 53, înainte de amplasarea și începerea activității DNDR. Pe baza datelor obținute a fost realizată prima hartă hidrogeologică a zonei.

În vara anului 2005 *Geo Prospect* a realizat investigații de teren pentru stabilirea distribuției infiltrațiilor în părțile accesibile ale depozitului (*Little et al., 2006*). Investigațiile au avut la bază harta hidrogeologică realizată în anul 1982.

Watson S. P. et al., 2006 a observat că apa de infiltrație urmează căi bine definite. Infiltrațiile în depozit variază și sunt asociate cu zonele discret fracturate și faliate. Primi câțiva zeci de metri ai galeriei 50 sunt o zonă în care în anumite perioade ale anului se infiltrează multă apă. Curgeri relativ mari au fost întâlnite în galeriile de sub depozit.

Infiltrațiile în depozit sunt influențate de straturile de sedimente acoperitoare și de prezența faliilor majore și a zonelor fracturate. *Watson S. P. et al., 2006* a împărțit depozitul în 3 zone:

- **Zona 1:** Această zonă cuprinde zonele foarte fracturate, zonele inundate din apropierea intrării în galeria 50 și toată zona de sub diabaz. Între 50 - 100% din pereții galeriei din această zonă pot fi uzi sau apa poate curge prin tavan. În această zonă nu sunt localizate galerii de depozitare a deșeurilor.
- **Zona 2:** Această zonă începe în punctul în care galeriile nu mai sunt sub suprafața zonei de exploatare. A fost estimat că aproximativ 10% din pereții galeriilor din această zonă sunt uzi dar curgerile sunt în general mai mici și apa de infiltrații curge pe pereți dar nu curge prin tavan. În această zonă 5 din 13 galerii transversale sunt folosite pentru depozitarea deșeurilor.
- **Zona 3:** Această zonă este situată sub zona nefisurată. S-a estimat că 3 - 5% din pereții galeriilor din această zonă sunt uzi. În această zonă 8 din 13 galerii transversale sunt folosite pentru depozitare.

CAPITOLUL III - MODELAREA CONDIȚIILOR HIDRODINAMICE ȘI DE TRANSPORT AL RADIONUCLIZILOR ÎN AMPLASAMENTUL DNDR BĂIȚA BIHOR

8 OBIECTIVELE MODELULUI

Obiectivul prezentei lucrări este acela de a analiza cu ajutorul modelării matematice: mișcarea apei subterane și transportul radionuclizilor în zona saturată a DNDR Băița Bihor.

Obiectivele modelului matematic sunt:

- urmărirea funcționării depozitului în condițiile actuale de siguranță;
- urmărirea distribuției radionuclizilor eliberați în timp;
- stabilirea zonei de influență a DNDR;
- stabilirea extinderii zonei de monitorizare.

9 CONSTRUCȚIA MODELULUI MATEMATIC

Modelul matematic s-a realizat având în vedere următoarele:

- Curgerea apelor subterane la scară regională urmează modelul lui Toth (*Toth et al., 2010*);
- Este evidențiat efectul local al fracturilor;
- Anizotropia locală mare este evidențiată datorită efectului cumulat al heterogenității locale și al fracturării preferențiale pe anumite direcții.

Pentru simulările matematice a fost folosit pachetul de programe FEFLOW (Diersch, 2007).

Zona modelată

Delimitarea domeniului modelat este influențată în cea mai mare parte de condițiile hidrologice și hidrogeologice ale amplasamentului. Astfel, luând în considerare direcția aproximativă de curgere a apei subterane și caracteristicile geologice, domeniul modelat a inclus arealul din apropierea localităților Băița Sat și Băița Plai care înconjoară depozitul de deșeuri.

Plecând de la modelul lui Toth (*Toth et al., 2010*) s-a stabilit că sarcina piezometrică este egală cu cota apei din râuri, impusă în nodurile corespunzătoare râurilor numai pe suprafața superioară a modelului. Astfel, considerăm că nivelurile apei din râuri sunt egale cu cotele reliefului.

Condiții de margine

Plecând de la faptul că, domeniul considerat trebuie ales astfel încât condițiile de margine să nu fie influențate de prezența depozitului, a fost necesară căutarea unor condiții de margine mixte, limite de tipul râurilor, limite de flux nul corespunzătoare limitei bazinelor hidrografice, amplasate la distanțe mari de amplasament.

Condițiile de margine ale domeniului considerat sunt:

- la N - limita naturală dată de râul Crișul Băița;
- la S - limita naturală dată de râul Crișul Negru;
- la V - au fost impuse condiții de margine mixte și anume: limita naturală dată de doi afluenți necadastrați ai râurilor Crișul Băița și Crișul Negru și o limită de flux nul localizată prin trasarea aproximativă a unei linii la contactul dintre Unitatea de Arieșeni, gresiile Triasice și calcarele carstice ale pânzei de Codru, pe liniile de contur ale suprafeței topografice.

- la E - limita naturală corespunzătoare limitei bazinului hidrografic, urmărește conturul suprafeței topografice, deoarece s-a considerat că linia trasată este linia cea mai reprezentativă a direcției de curgere a apei subterane. Limita estică este o limită de flux nul, impusă pe toată grosimea modelului.

Prin introducerea limitelor naturale reprezentate de râuri, s-a evitat introducerea unor linii de curent impuse artificial de liniile de cumpănă topografică.

10 MODELUL CONCEPTUAL

Din punct de vedere fizic, modelul conceptual este reprezentat de mediul cu dublă porozitate/permeabilitate, în care în general zona depozitului este acela al unui sistem cu permeabilitate scăzută a rocii de bază, sistem care este traversat de falii mult mai tranzitive și de zone fracturate care prezintă o rețea extensivă de galerii de mină interconectate și foraje. Curgerea în aceste roci se realizează predominant prin falii, prin zonele fracturate și prin rețeaua extensivă de conexiuni.

Datorită complexității amplasamentului, nu a fost posibilă realizarea unui model conceptual simplu, unic. Drept urmare au fost făcute două abordări diferite:

- Considerarea unui mediu poros, în care parametrii hidrogeologici sunt în realitate o medie a proceselor reale complexe;
- Considerarea unui mediu poros, cu permeabilitate scăzută și cu unele elemente distincte foarte conductive, reprezentate de sistemul local de falii și falia regională existente în zona modelată, care influențează semnificativ curgerea.

Pentru definitivarea modelului matematic preliminar s-a plecat de la modelul hidrogeologic regional - Toth, considerând ca model fizic - mediul continuu (*Toth et al., 2010*).

Conform lui *Toth et al., 2010* sistemele de curgere a apelor subterane au o structură ierarhică fiind alcătuite din regime de curgere locale, intermediare și regionale, fiecare având zone de încărcare, zone de descărcare și zone de transfer.

Modelul Toth este un model spațial care permite atât analiza mișcării apei subterane și a transportului contaminanților în adâncime cât și descărcarea acestora în centre de drenaj îndepărtate de sursă.

Modelul tridimensional va fi realizat din 6 strate cu grosimi diferite, iar modelul fizic conceptual va fi cel al mediului cu dublă porozitate, în care porozitatea secundară va fi dată de sistemul de fracturi.

11 REALIZAREA MODELULUI (INTRODUCEREA PARAMETRILOR)

Principalii parametri folosiți la realizarea modelului calibrat sunt prezentați în tabelul de mai jos.

Parametru	Unitate de măsură	Valoare
Parametri generali		
Rețea poligoane superelemente	nr. poligoane	13
Rețea prisme triunghiulare interconectate	nr. prisme	35.565
Cotă strat 1	m	cota terenului
Cotă strat 2	m	25
Cotă strat 3	m	40
Cotă strat 4	m	225
Cotă strat 5	m	525
Parametri matrice poroasă		
Porozitate efectivă	%	0,001
Conductivitate	m/sec	10^{-7}
Dispersivitate longitudinală	m	250
Dispersivitate transversală	m	10
Coeficient de difuziune	m^2/sec	$1,6 \times 10^{-9}$

Parametru	Unitate de măsură	Valoare
moleculară		
Alimentare din suprafață regională	mm/an	27,37 (0,075 mm/zi)
Alimentare din suprafață locală (în vecinătatea depozitului)	mm/an	36,5 (0,100 mm/zi)
Parametri fracturi		
Deschidere fracturi	mm	1
Conductivitate fracturi	m/sec	0,816
Dispersivitate longitudinală	m	20
Dispersivitate transversală fracturi	m	0
Coefficient de difuziune moleculară fracturi	m ² /sec	1,6 x 10 ⁻⁹

Tabelul 1 Parametrii modelului

11.1 DISCRETIZAREA MODELULUI

Discretizarea domeniului a implicat întocmirea unei rețele poligonale de 13 supraelemente pe o suprafață de 23,5 km². Suprafața superioară a domeniului a fost apoi discretizată într-o rețea de 35.565 prisme triunghiulare interconectate prin 24.564 noduri.

Sistemele de fracturi locale și regionale au fost modelate cu elemente discrete, plane verticale, ce străbat masivul de rocă pe toată grosimea acestuia. Râurile existente în arealul DNDR au fost materializate separat, fiind approximate prin curbe. Rețeaua de prisme triunghiulare a fost îndesită în vecinătatea râurilor și în zona depozitului. Macrorețeaua astfel construită a constituit suportul modelului matematic.

11.2 CALIBRAREA MODELULUI

Luând în considerare condițiile hidrogeologice din arealul depozitului, reprezentate prin conductivități hidraulice și debite de infiltrare, au fost considerate două zone de distribuție și anume:

- O zonă cu valori regionale ale conductivităților hidraulice și ale debitelor de infiltrare, distribuite pe tot domeniul analizat și pe toate stratele;
- O zonă cu valori locale ale conductivităților hidraulice și ale debitelor de infiltrare, reprezentative pentru zona din imediata vecinătate a depozitului, pe o adâncime de numai 75 m, corespunzătoare primului strat.

Stratele din adâncime au fost incluse în zona cu valori regionale ale conductivității hidraulice și ale debitelor de infiltrare considerând că proprietățile lor nu au fost modificate de exploatarea masivului.

Calibrarea modelului s-a realizat la scara regională pentru a se stabili ordinele de mărime a doi parametri și anume: conductivitatea hidrolică și debitul de infiltrare. În acest sens valorile conductivității hidraulice și a debitului de infiltrare au fost modificate succesiv până când s-au obținut sarcini hidraulice cu valori apropiate de cele măsurate în punctele de referință.

Operația de identificare a considerat două tipuri de modele conceptuale:

- **Modelul cu simplă porozitate** în care conductivitatea hidrolică este datorată porozității primare reprezentată de sistemul de microfracturi ale rocii. La scară regională mediul cu simplă porozitate poate fi echivalat cu un mediu poros. Premiza de la care s-a plecat a fost aceea că mediul este echivalat cu un acvifer omogen și izotrop pe aproape întregul domeniu, caracterizat deci prin valori unice medii ale conductivității hidraulice, respectiv ale debitelor infiltrate. Pentru analiza efectului porozității primare, au fost alese 3 variante de calibrare care au condus la valori ale sarcinii hidraulice apropiate de cele măsurate în punctele de referință. Operația s-a realizat prin încercări succesive, modificând valorile conductivității hidraulice.

- **Modelul cu dublă porozitate** în care peste porozitatea primară este suprapus sistemul de fracturi regionale sau locale care pot constitui căi preferențiale de curgere - transport. Mișcarea apei subterane prin fracturi a fost modelată echivalând fracturile cu două plăci paralele situate la distanța $2b$ (deschiderea fracturii). În condițiile unei curgeri laminare, legea Darcy își păstrează valabilitatea, permeabilitatea fracturii fiind proporțională cu pătratul deschiderii. Observațiile de teren au pus în evidență o deschidere medie de 1mm care a condus la o conductivitate echivalentă a fracturii $K_{\text{fracturi}} = 8,167 \times 10^{-1}$ m/sec (0,861 m/sec). Pentru analiza efectului porozității secundare dată de fracturile majore au fost considerate trei variante.

Varianta care a condus la valorile cele mai apropiate de măsurătorile din punctele de referință a sarcinilor piezometrice este **Varianta 4**, atunci când parametrii hidrogeologici au fost: $K_{\text{matrice}} = 10^{-7}$ m/sec, $W_{\text{matrice}} = 0,075$ mm/zi (27,37 mm/an), $2b_{\text{fracturi}} = 10^{-3}$ m (1 mm) și $K_{\text{fracturi}} = 8,167 \times 10^{-1}$ m/sec (0,861 m/sec);

Ținând seama de rezultatele calibrării, modelul ales pentru simularea transferului radionuclizilor în zona saturată a fost acela al unui mediu cu dublă porozitate, în care sistemul secundar este alcătuit din sistemul de fracturi locale și regionale.

11.3 TERMENII SURSĂ

Conform *SNC Pitești, 2009* cea mai simplă metodă pentru evaluarea termenului sursă a fost „considerarea unității de depozitare ca un mediu omogen în care radionuclidul este uniform distribuit, iar mecanismul de transport este advection, ignorând procesele de dispersie și difuziune”.

În studiul amintit mai sus, *SNC Pitești* a considerat trei izotopi: ^{226}Ra , ^{137}Cs și respectiv ^{60}Co , pentru care a calculat termenii sursă, prezentați ca variație a concentrației (Bq/m^3) în timp.

11.4 MODELUL CONCEPTUAL AL MEDIULUI CU DUBLĂ POROZITATE

Modelul conceptual considerat este un mediu cu dublă porozitate alcătuit din fracturi care afectează matricea poroasă aflate în contact direct. Transferul radionuclizilor este în principal advection prin fractură și difuziv prin matricea poroasă.

În scopul analizării condițiilor de transport al radionuclizilor în amplasamentul DNDR Băița Bihor, s-a considerat soluția analitică Tang. Simularea transferului de radionuclizi s-a realizat plecând de la premisele făcute de *Tang et al., 1981* și considerând soluțiile analitice pentru un sistem de fracturi paralele *Sudicky et al., 1982*.

Prin simplitatea ei, soluția analitică Tang (*Tang et al., 1981*) este cel mai des utilizată în analiza procesului de transfer al radionuclizilor prin medii cu dublă porozitate. Schematizarea presupune o fractură infinită, cu fețele plan - paralele, aflată în contact direct cu matricea poroasă. Pornind de la ecuația transportului masiv se obține o soluție explicită a variației concentrației prin fractură și prin matricea poroasă, respectiv a adâncimii de pătrundere a contaminantului în matrice.

Permeabilitatea matricei poroase este scăzută iar transportul în matrice se realizează în principal prin difuziune moleculară. Transportul din fractură în matricea poroasă se produce prin difuzie, datorită gradientului de concentrație între fractură și matrice. În cazul unui radionuclid concentrația traserului este influențată și de procesul de dezintegrare radioactivă.

Transportul de-a lungul fracturii este în principal advection și dispersiv, fiind mult mai rapid decât în matrice.

Conform lui *Tang et al., 1982* fracturile deschise sunt în general căile cu rezistență hidraulică mică, transportul direct al contaminantului care intră în sistemul de roci fracturate realizându-se permanent de-a lungul fracturii.

Procesul de transport prin difuzie din fractură în matricea poroasă, constituie un mecanism de atenuare care poate fi foarte efectiv în îndepărtarea masei de contaminat și care întârzie astfel împrăștierea contaminantului în sistem.

În cazul unui contaminant radioactiv care are o sursă cu o concentrație constantă, distribuția contaminatului în sistem se va stabiliza datorită dezintegrării masei înmagazinate în fractură și în matricea poroasă.

Datorită procesului de difuzie care are loc în matrice, aceasta se comportă ca un sistem de înmagazinare al radionuclidului. Procesul de transport prin advecție în matricea poroasă este neglijabilă datorită contrastului mare a permeabilității dintre fractură și matrice.

12 SIMULAREA TRANSFERULUI RADIONUCLIZILOR ÎN MASIVUL DEPOZITULUI

În cazul DNDR, s-a considerat ca depozitul interceptează o fractură majoră, extinsă până la limita zonei saturate, aflată în contact direct cu matricea poroasă. S-a considerat un model conservativ, în sensul că gradul de saturație al matricii este foarte ridicat, presiunea capilară fiind sub presiunea de pătrundere. În acest fel caracterul „tampon” al zonei nesaturate este redus la minimum.

Simularea a fost făcută în condițiile problemei plan - verticale, domeniul analizat fiind alcătuit dintr-o fractură aflată în contact direct cu matricea poroasă. Extinderea domeniului a fost de 30m în direcție orizontală, respectiv de 70m în direcție verticală.

Transferul contaminanților a fost simulat considerând principalele mecanisme de transport, cu valori ale parametrilor hidrogeologici pentru matricea poroasă și fractură distribuite uniform pe întregul domeniu.

Matricea poroasă:

- Porozitate efectivă a matricii - 15 %;
- Coeficient de difuzie - 10^{-9} m²/sec;
- Dispersivitate longitudinală - 250 m;
- Dispersivitate transversală - 10 m;
- Conductivitatea matricii - 72×10^{-8} m/s.

Fractură:

- Deschiderea fracturii - 1 mm;
- Dispersivitate longitudinală - 20 m;
- Dispersivitate transversală - 0 m;
- Suprafața laterală a fracturii - 5×10^{-4} m²;
- Conductivitatea fracturii - 0,817 m/s.

Condiția de margine în curgere a fost dată sub formă de flux impus la capătul fracturii având valoarea medie a fluxului de infiltrație de $W = 0.100$ mm/zi, rezultată în urma bilanțului hidric efectuat în bazinul hidrografic aferent depozitului.

Transportul radionuclizilor a fost simulat impunând fracturii sub formă de concentrații impuse termenii sursă furnizați de SNC Pitești.

Au fost considerate patru puncte de observație amplasate pe fractură la adâncimi diferite, în care s-au înregistrat curbele de restituție.

Transferul a fost simulat utilizând pași variabili de timp pentru fiecare radionuclid. Rezultatele simulării au fost prezentate la intervale de timp egale cu 0,5, 1,0, respectiv 1,5 din $T_{1/2}$. Astfel, pentru ¹³⁷Cs transferul a fost reprezentat la 15, 30 și 60 ani de la lansare iar pentru ²²⁶Ra transferul a fost reprezentat la 800, 1.600 și 3.200 ani de la lansare, astfel încât procesul să atingă condiții de stabilitate. În final s-a obținut distribuția spațială a concentrațiilor, respectiv bilanțul debitelor masice la diferite intervale de timp.

12.1 TRANSFERUL IZOTOPILOR DE ²²⁶RA

Pentru simularea izotopilor de ²²⁶Ra au fost luate în considerație timpul de înjumătățire și constanta de dezintegrare și anume:

- Timpul de înjumătățire $T_{1/2} = 1.600$ ani (perioada de înjumătățire a ^{226}Ra este mult mai mare decât timpul de rezidență în masivul de rocă);
- Constanta de dezintegrare $\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 1,36 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$.

În vederea evidențierii ponderii cu care intervin mecanismele de transfer mecanic și de dezintegrare asupra concentrației izotopilor de ^{226}Ra în masivul de rocă, s-au analizat două situații:

Transferul izotopilor de ^{226}Ra luând în considerare procesul de dezintegrare

Radionuclizii de Ra pătrund în masiv cu valori importante $7.49\text{E}+08 \text{ Bq/m}^3$. Procesul de pătrundere este accentuat în partea superioară a masivului și la începutul transferului când gradientul de concentrație între fractură și masiv este maxim. Zona de pătrundere a radionuclizilor crește odată cu creșterea timpului de la lansare, după 1.550,9 ani ajungând la 20m adâncime, după 4.918,8 ani ajungând la 50m adâncime și după 9.941,6 ani ajungând la 75m adâncime.

Sintetizând, concentrația izotopilor de ^{226}Ra , scade cu șase ordine de mărime de la lansarea izotopilor și până la atingerea adâncimii de 75m în decursul a cca 9.942 ani.

Transferul unui traser fictiv, având sursa identică cu cea a izotopilor de ^{226}Ra ignorând procesul de dezintegrare

Ignorând procesul de dezintegrare, concentrația traserului fictiv, scade doar cu trei ordine de mărime de la lansare și până la atingerea adâncimii de 75 m în decursul a 100.316,7 ani.

Concentrația traserului scade foarte lent, masa acestuia fiind dispersată pe un interval larg de timp. Acest aspect caracterizează procesele predominant difuzive: datorită gradientului mare de concentrație între fractură și matricea poroasă, o masă importantă de radionuclizi difuzează în matrice. Transferul este lent datorită valorii scăzute a coeficientului de difuzie al rocii. Intensitatea difuziei în masa rocii este mai mare în partea superioară a domeniului unde gradientul de concentrație este maxim. Pe măsură ce radionuclizii pătrund în matrice, gradientul scade și procesul de transfer se face cu intensitate scăzută.

În consecință chiar în aceste condiții conservative rolul de tampon al zonei nesaturate este major, radionuclizii pătrund în zona saturată cu cca 0.16×10^{-4} din concentrația din sursă.

S-a observat că, efectul dezintegrării radionuclizilor ^{226}Ra duce la o micșorare a timpului de transfer a izotopilor în matricea poroasă și implicit la o scădere a concentrației cu mai multe ordine de mărime. Efectul dezintegrării este mult mai vizibil în punctele de observație 3 și 4 situate la adâncimi mai mari.

12.2 TRANSFERUL IZOTOPILOR DE ^{137}CS

Izotopii de ^{137}Cs au următoarele caracteristici:

- Timpul de înjumătățire ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,17$ ani);
- Constanta de dezintegrare $\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 7,33\text{e}^{-6} \text{ s}^{-1}$.

În cazul izotopilor de ^{137}Cs adâncimea maximă până la care radionuclizii pătrund în masivul de rocă este de 34 m. În consecință, chiar în aceste condiții conservative, un izotop cu un timp mediu de înjumătățire cum este ^{137}Cs nu pătrunde în zona saturată decât cu concentrații neglijabile.

13 SIMULAREA TRANSFERULUI RADIONUCLIZILOR ÎN ZONA SATURATĂ DIN AMPLASAMENTUL DNDR

În vederea analizei transferului radionuclizilor posibil eliberați din DNDR, la suprafață și în adâncime, a fost simulat efectul unei surse continue situată în depozit. Rularea s-a efectuat plecând de la ipoteze conservative, masivul de rocă fiind complet saturat. Au fost considerate 2 tipuri de surse continui: sursă conservativă (radionuclidul ^{226}Ra) și sursă puternic dispersivă (radionuclidul ^{137}Cs), care fac parte din clasa radionuclizilor de viață lungă și respectiv din clasa radionuclizilor de viață medie. Prin simulare s-a urmărit efectul condițiilor geologice din amplasament asupra distribuției concentrațiilor.

Modelul ales este alcătuit dintr-o succesiune de suprafețe și este delimitat la partea superioară de suprafața terenului, iar la partea inferioară de un plan situat la adâncimea de 525m. Între suprafața terenului și planul de bază au fost inserate 5 suprafețe intermediare situate, pornind de la suprafață la următoarele adâncimi: 25m, 40m, 225m și 525m. S-a realizat astfel un model spațial alcătuit din 5 strate.

Pentru a urmări distribuția concentrației radionuclizilor s-au ales 4 puncte de observație în care s-au înregistrat curbele de restituție.

Pentru fiecare izotop au fost calculate mai multe variante a concentrației în funcție de timp, însă au fost alese pentru a fi reprezentate distribuția concentrațiilor la intervale de timp reprezentative pentru izotopi, pentru fiecare suprafață intermediară.

Nu au fost efectuate teste de trasaj în zona amplasamentului. În aceste condiții valorile dispersivității au fost date de regula 1/10: dispersivitatea longitudinală este egală cu 1/10 din distanța parcursă iar dispersivitatea transversală este egală cu 1/10 din valoarea dispersivității longitudinale. Porozitatea efectivă a matricii a rezultat în urma determinărilor în laborator, iar conductivitatea fracturii a fost estimată în conformitate cu legea cubică a debitelor.

Transferul izotopilor a fost simulat considerând principalele mecanisme de transport, cu următoarele valori ale parametrilor hidrogeologici, distribuite uniform pe întreg domeniul:

Matricea poroasă:

- Porozitate efectivă a matricii - 10^{-3} ;
- Dispersivitate longitudinală - 250 m;
- Dispersivitate transversală - 10 m.

Fractură:

- Deschiderea fracturii – 1 mm;
- Dispersivitate longitudinală – 50 m;
- Dispersivitate transversală – 0,5 m;
- Conductivitatea fracturii – 0,817 m/s.

13.1 TRANSFERUL IZOTOPILOR DE ^{226}Ra

În vederea analizei transferului izotopului de ^{226}Ra , s-au înregistrat curbele de restituție în cele 4 puncte de observație considerate.

Principalele caracteristici ale curbelor de restituție sunt sintetizate în Tabelul 2, unde T_{max} și C_{max} reprezintă timpul în care ajunge valoarea maximă a concentrației în punctul de observație, respectiv concentrația maximă înregistrată în acel punct.

Punct de observație	Amplasare puncte de observație	T_{max} (ani)	C_{max} (Bq/m ³)
1	pe suprafața depozitului (sursa)	50	4,61E+08
2	pe valea Pârâul Mic, la contactul dintre factura locală și fractura regională	52	5,02E+06
3	pe falia locală din lungul văii Pârâului Mic	53	1,43E+07
4	la confluența Pârâul Mic cu valea Calului	54	1,44E+07

Tabelul 2 Concentrațiile maxime ale radionuclizilor ^{226}Ra în cele 4 puncte de observație

Analizând valorile din Tabelul 2 se observă că, concentrațiile înregistrate în punctele de observație scad cu două ordine de mărime respectiv un ordin de mărime față de concentrația maximă înregistrată în sursă, la 25m adâncime.

Se poate observa că cel mai scurt timp de transfer al radionuclizilor de ^{226}Ra și concentrația cea mai mică, s-a înregistrat în punctul de observație situat la contactul faliei locale cu falia regională (52 ani, 5,02E+06 Bq/m³). Acest fapt era de așteptat deoarece în acesta zonă transportul este puternic influențat de prezența sistemelor de fracturi, transportul realizându-se preferențial în lungul celor două fracturi.



Timpul de transfer este mai mare în punctul de observație amplasat pe falia locală din lungul Pârâului Mic (53 ani), deoarece în acest punct transportul este influențat doar de prezența faliei locale. În acest punct concentrația izotopilor de ^{226}Ra scade cu un ordin de mărime față de concentrația din sursă ($1,43\text{E}+07$ Bq/m³).

În punctul de observație situat la confluența Pârâului Mic cu valea Calului s-a înregistrat cel mai lung timp de transfer al radionuclizilor de ^{226}Ra (54 ani) punctul fiind amplasat la cea mai mare distanță față de sursă. Concentrația izotopilor de ^{226}Ra scade cu un ordin de mărime față de concentrația din sursă ($1,44\text{E}+07$ Bq/m³) și este aproape egală cu concentrația înregistrată în punctul de observație amplasat în lungul faliei locale.

Sintetizând, se observă că transferul izotopilor de Ra se produce în principal în lungul gradientului hidraulic, pe direcția E - V spre zona de drenaj situată la confluența dintre valea Calului cu Pârâul Mic, dar este influențat și de sistemul de fracturi.

13.1.1 DISTRIBUȚIA CONCENTRAȚIILOR DE ^{226}Ra ÎN ZONA AFERENTĂ DNDR

Deoarece perioada de înjumătățire a izotopului de ^{226}Ra este mult mai mare decât timpul de rezidență în masiv, s-au ales pentru a fi reprezentate intervalele de timp de 50 și respectiv 100 ani de la începutul eliberării din depozit. Pentru fiecare perioadă de timp a fost reprezentată distribuția concentrației de ^{226}Ra pentru 4 suprafețe intermediare inserate în model la adâncimile: 25m, 40m, 225m și 525m.

Distribuția concentrațiilor izotopilor de ^{226}Ra după 100 ani de la lansarea din depozit este prezentată în Figurile 1 – 4.

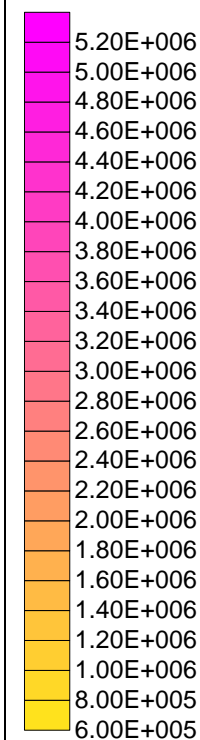
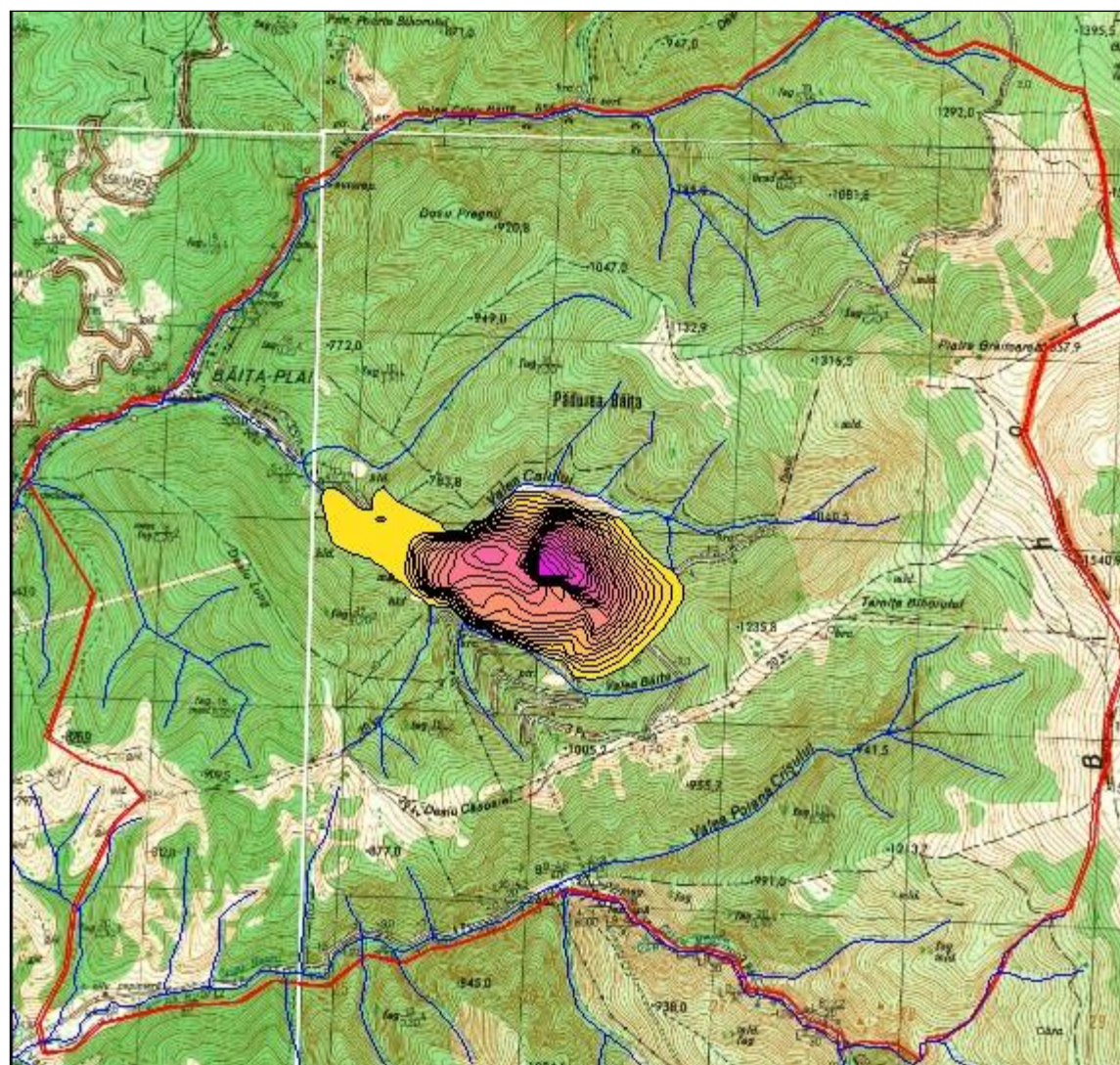


Figura 1 Distribuția
concentrației de ^{226}Ra
(Bq/m^3) după 100 ani de la
eliberarea din depozit la 25
m adâncime

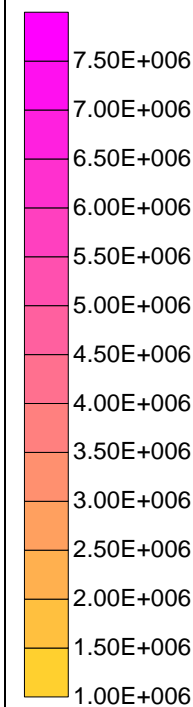
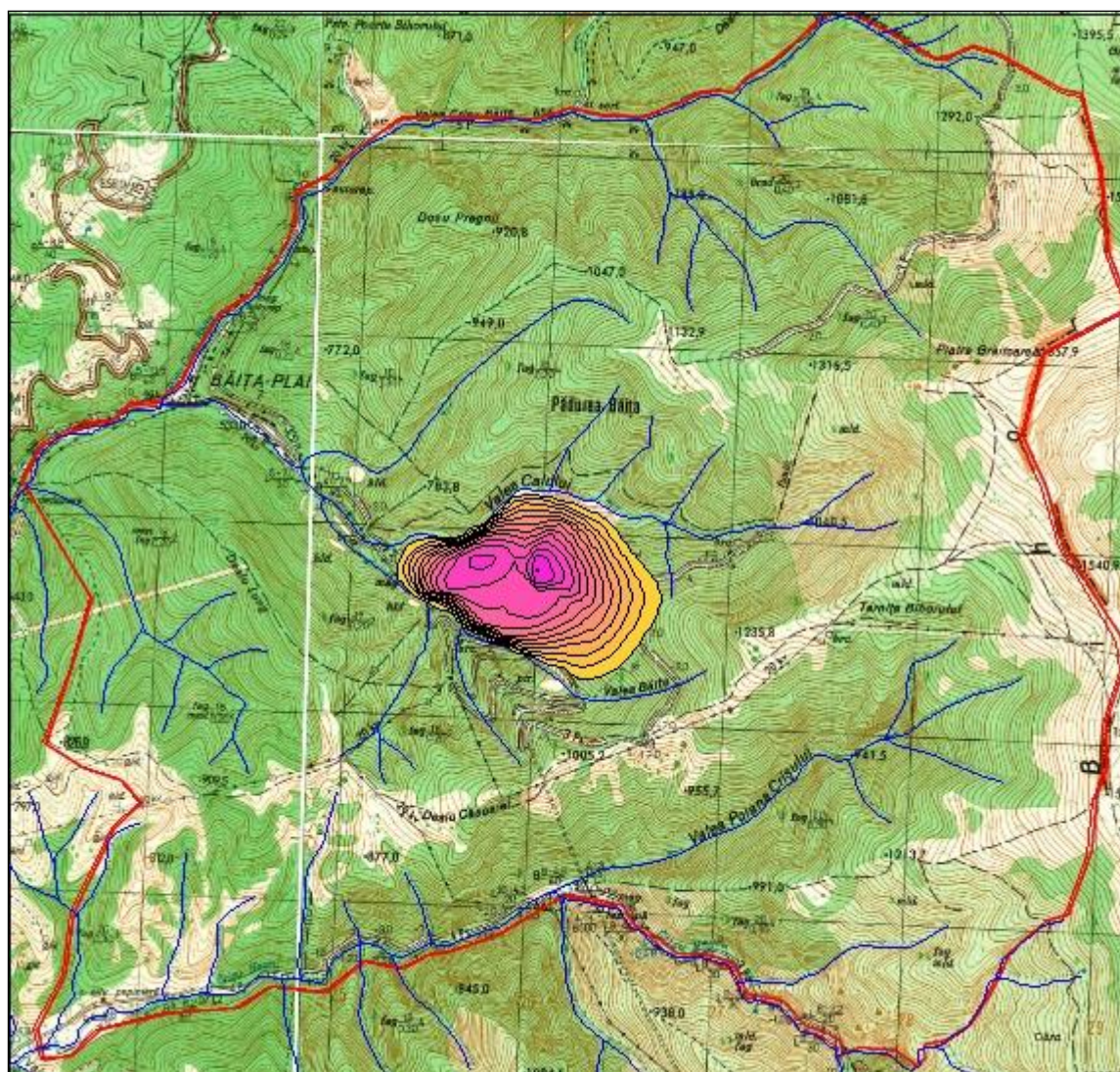


Figura 2 Distribuția
concentrației de ^{226}Ra
(Bq/m^3) după 100 ani de la
eliberarea din depozit la 40
m adâncime

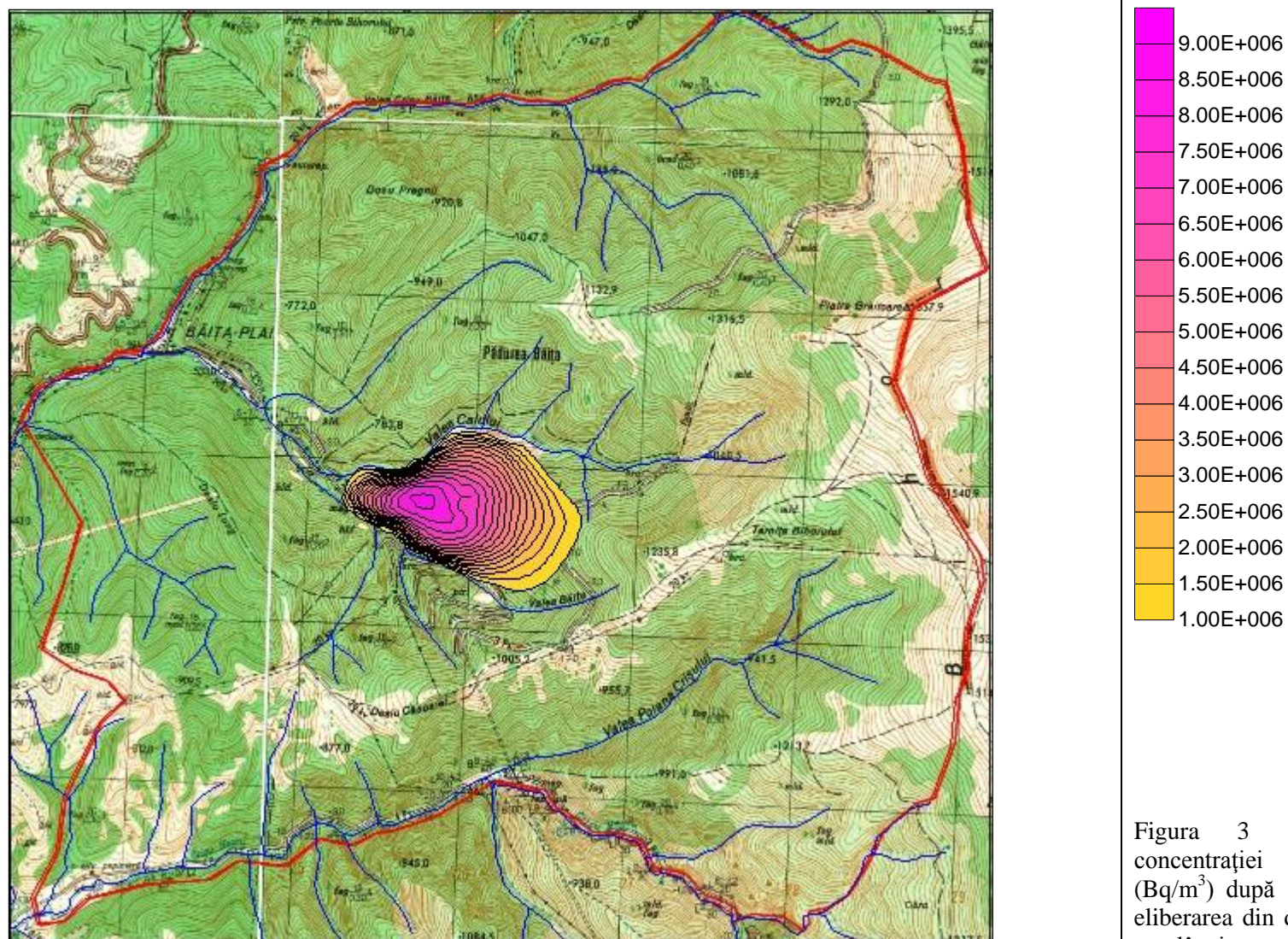


Figura 3 Distribuția
concentrației de ^{226}Ra
(Bq/m^3) după 100 ani de la
eliberarea din depozit la 225
m adâncime

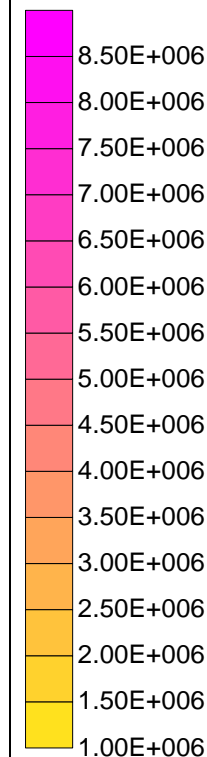
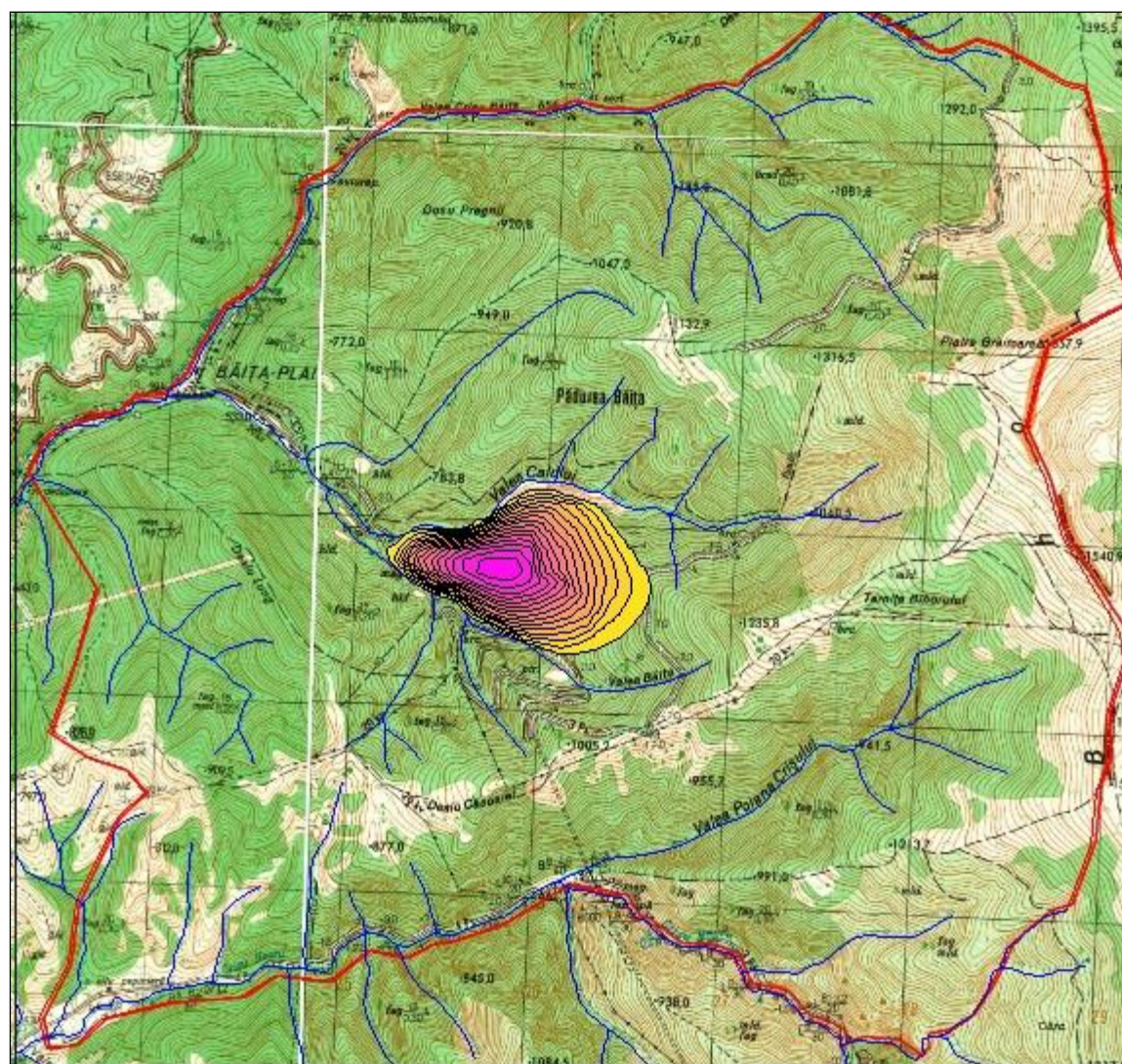


Figura 4 Distribuția
concentrației de ^{226}Ra
(Bq/m^3) după 100 ani de la
eliberarea din depozit la 525
m adâncime

Extinderea în adâncime a penei de contaminant în general în interfluviul celor două râuri, este o consecință a modelului Toth al bazinului hidrogeologic regional: odată pătrunsă în adâncime masa de contaminant se distribuie între bazinele superficiale și cele intermediare sau inferioare. Contaminantul pătruns în bazinele superficiale este descărcat în centrele de drenaj cele mai apropiate (Valea Calului și Pârâul Mic), iar cel pătruns în bazinele de adâncime este transportat în continuare în subteran și descărcat în centre de drenaj mai îndepărtate, cum este Crișul Băița.

În consecință zona cu risc maxim de contaminare din subteran este la confluența Văii Calului cu Pârâul Mic și apoi în lungul pârâului Crișul Băița. Având în vedere că apele de suprafață au viteză mare de transport este de așteptat ca pana de contaminare cu radionuclizi de Ra să ajungă și în dreptul localității Băița Sat, nu numai în localitatea Băița Plai. Transferul prin masiv reduce însă cu circa două ordine de mărime concentrațiile eliberate din depozit. Este de asemenea de subliniat pătrunderea în adâncime a izotopilor eliberați la suprafața terenului, concentrațiile acestora scăzând cu adâncimea de pătrundere.

13.2 TRANSFERUL IZOTOPILOR DE ^{137}Cs

În vederea analizei transferului izotopului de ^{137}Cs , s-au înregistrat curbele de restituție în cele 4 puncte de observație considerate.

Principalele caracteristici ale curbelor de restituție sunt sintetizate în Tabelul 3, unde T_{max} și C_{max} reprezintă timpul în care ajunge valoarea maximă a concentrației în punctul de observație, respectiv concentrația maximă înregistrată în acel punct.

Punct de observație	Amplasare puncte de observație	T_{max} (ani)	C_{max} (Bq/m^3)
1	pe suprafața depozitului (sursa)	12	4,14E+07
2	pe valea Pârâul Mic, la contactul dintre fractura locală și fractura regională	15	6,51E+05
3	pe falia locală din lungul văii Pârâului Mic	16	1,76E+06
4	la confluența Pârâul Mic cu valea Calului	20	1,43E+06

Tabelul 3 Concentrațiile maxime ale radionuclizilor de ^{137}Cs în cele 4 puncte de observație

Analizând valorile din Tabelul 6 se observă că, concentrațiile înregistrate în punctele de observație scad cu un ordin de mărime respectiv două ordine de mărime față de concentrația maximă înregistrată în sursă.

Se poate observa că cel mai scurt timp de transfer al radionuclizilor de ^{137}Cs și concentrația cea mai mică, s-a înregistrat în punctul de observație situat la contactul faliei locale cu falia regională (15 ani, $6,51\text{E}+05 \text{ Bq}/\text{m}^3$). Acest fapt era de așteptat deoarece în această zonă transportul este puternic influențat de prezența sistemului de fracturi, transportul realizându-se preferențial în lungul celor două fracturi.

Timpul de transfer este mai mare în punctul de observație amplasat la confluența dintre Pârâul Mic cu Valea Calului (20 ani) punctul fiind amplasat la cea mai mare distanță față de sursă. În acest punct concentrația izotopilor de ^{137}Cs scade cu un ordin de mărime față de concentrația din sursă ($1,76\text{E}+06 \text{ Bq}/\text{m}^3$).

În punctul de observație situat pe falia locală din lungul văii Pârâului Mic, s-a înregistrat un timp de transfer de 16 ani, valoarea concentrației scăzând cu un ordin de mărime față de concentrația înregistrată în sursă ($1,76\text{E}+06 \text{ Bq}/\text{m}^3$).

Sintetizând, se observă că și în cazul izotopilor de ^{137}Cs transferul se produce în principal în lungul gradientului hidraulic, pe o direcție E - V spre zona de drenaj situată la confluența dintre valea Calului cu Pârâul Mic, dar este influențat și de sistemul de fracturi.

13.2.1 DISTRIBUȚIA CONCENTRAȚIILOR DE ^{137}Cs

Deoarece perioada de înjumătățire a izotopilor de ^{137}Cs este mult mai mică decât timpul de rezidență în masiv, s-au ales pentru a fi reprezentate intervalele de timp de 15 ani și respectiv 30 ani de la începutul eliberării din depozit (0,5 și 1,0 din $T_{1/2}$ al acestuia). Pentru fiecare perioadă de timp a fost reprezentată



distribuția concentrației de ^{137}Cs pentru cele 4 suprafețe intermediare inserate în model la următoarele adâncimi: 25m, 40m, 225m și 525m.

Distribuția concentrațiilor izotopilor de ^{137}Cs după 30 ani de la lansarea din depozit este prezentată în Figurile 5 – 8.

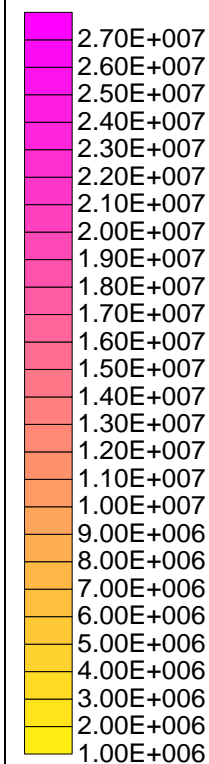
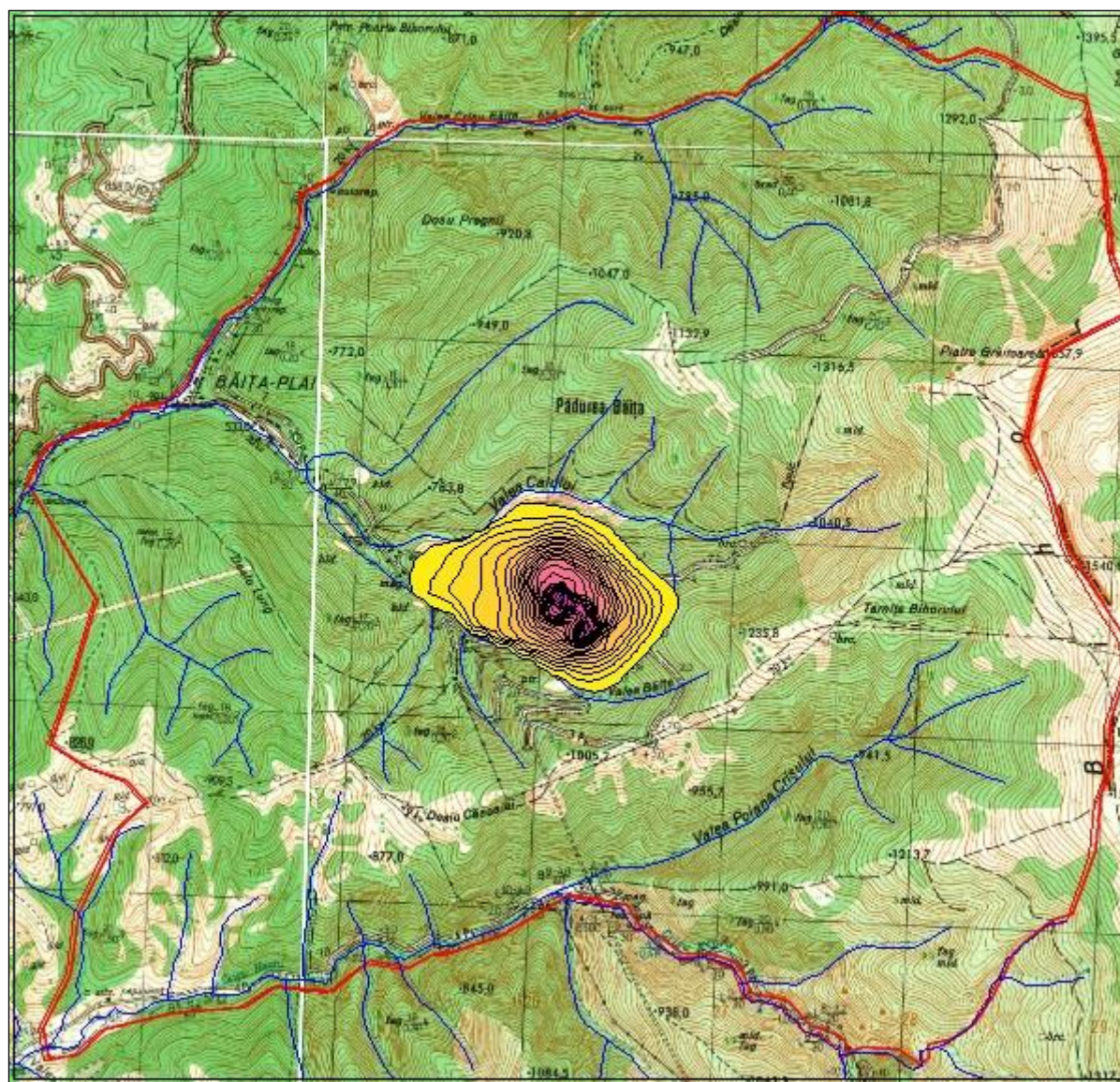
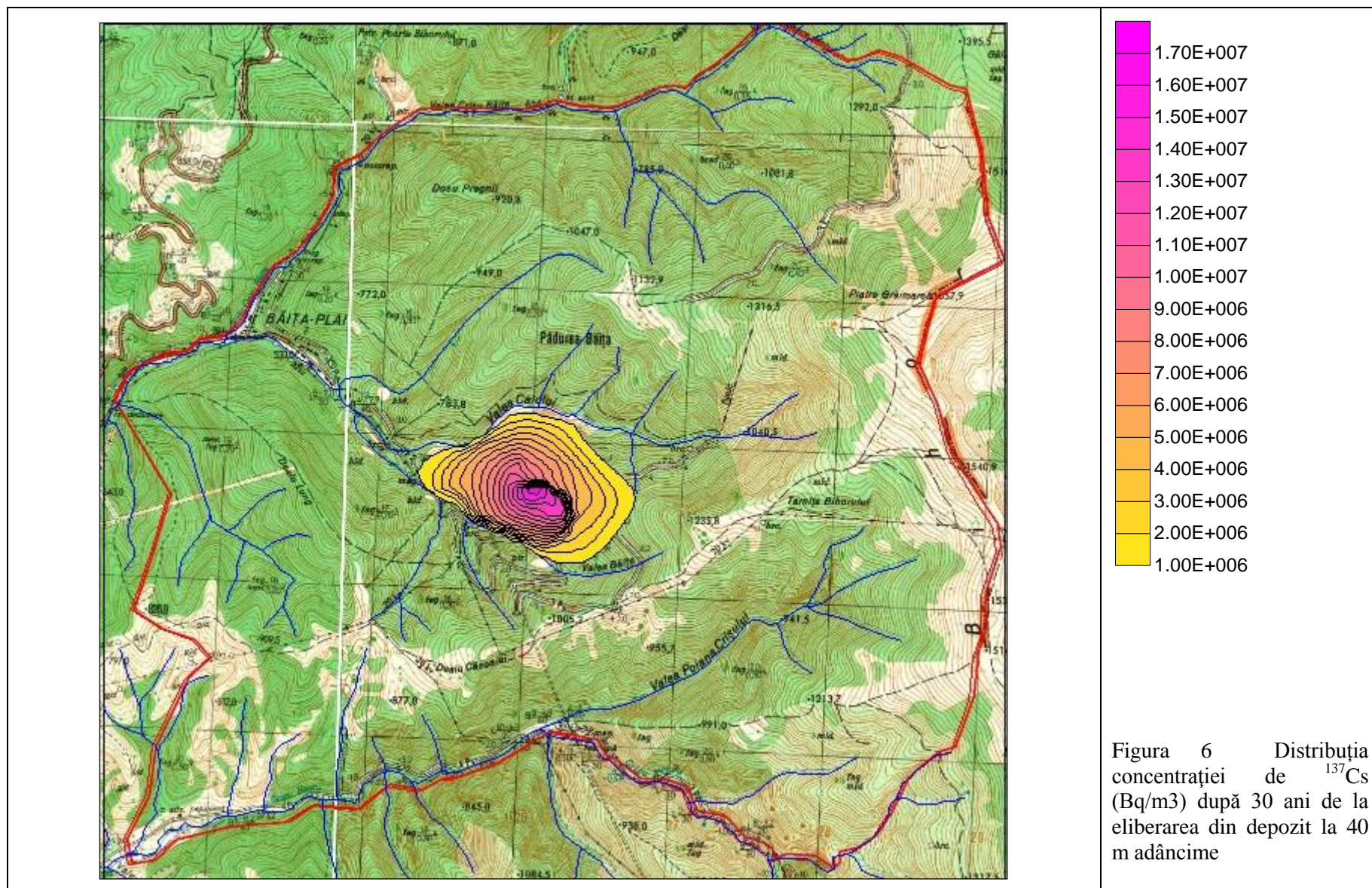


Figura 5 Distribuția concentrației de ^{137}Cs (Bq/m³) după 30 ani de la eliberarea din depozit la 25 m adâncime



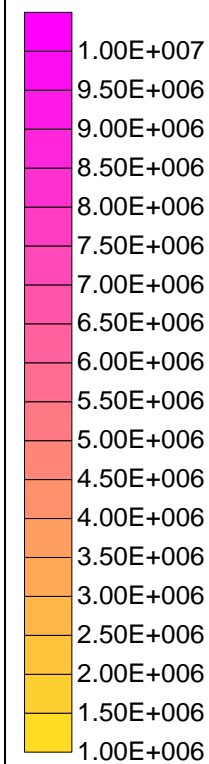
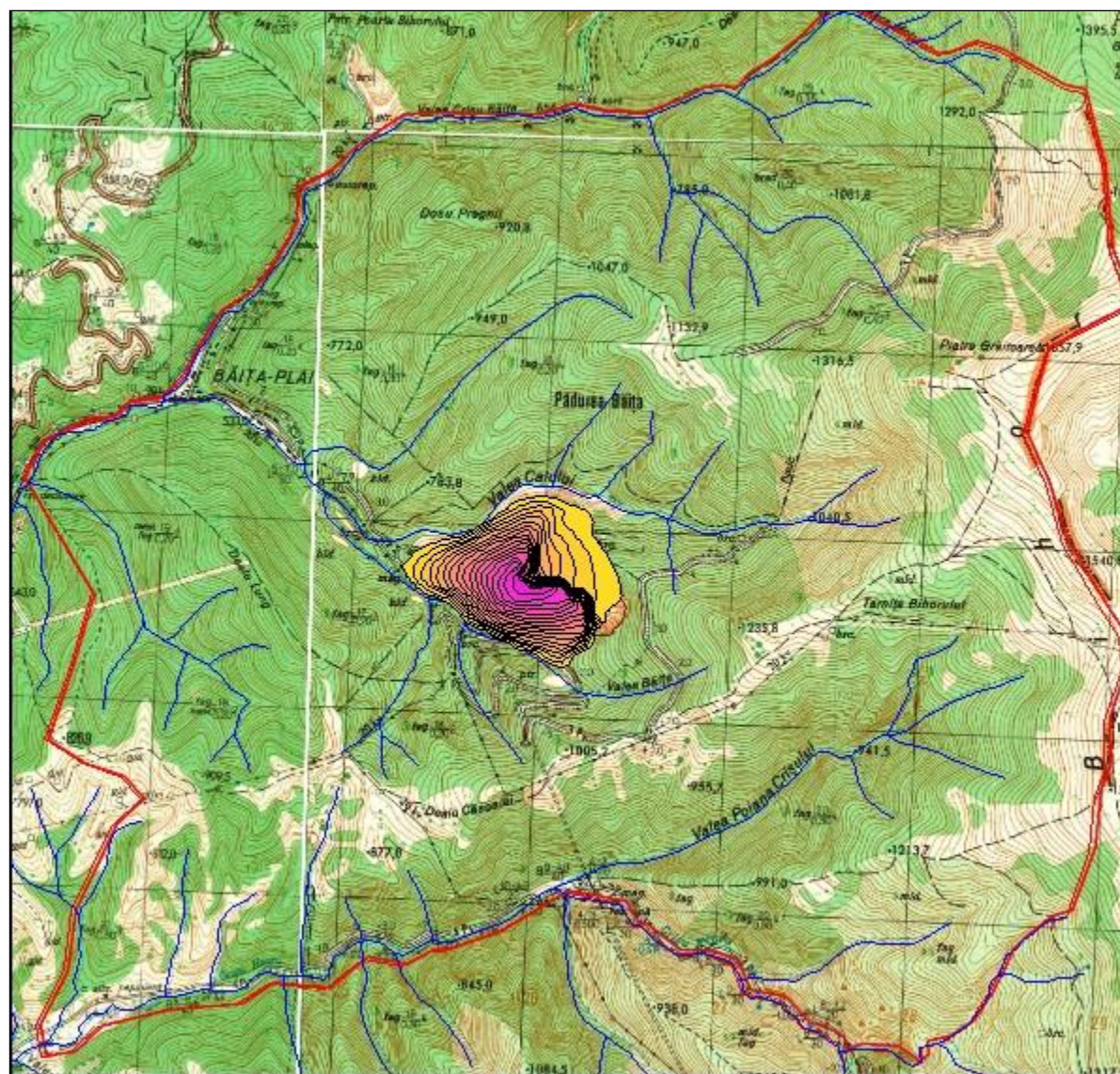


Figura 7 Distribuția
concentrației de ^{137}Cs
(Bq/m³) după 30 ani de la
eliberarea din depozit la 225
m adâncime

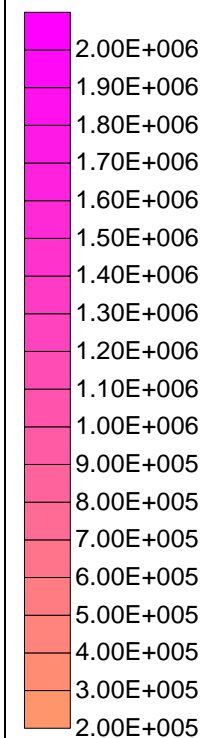
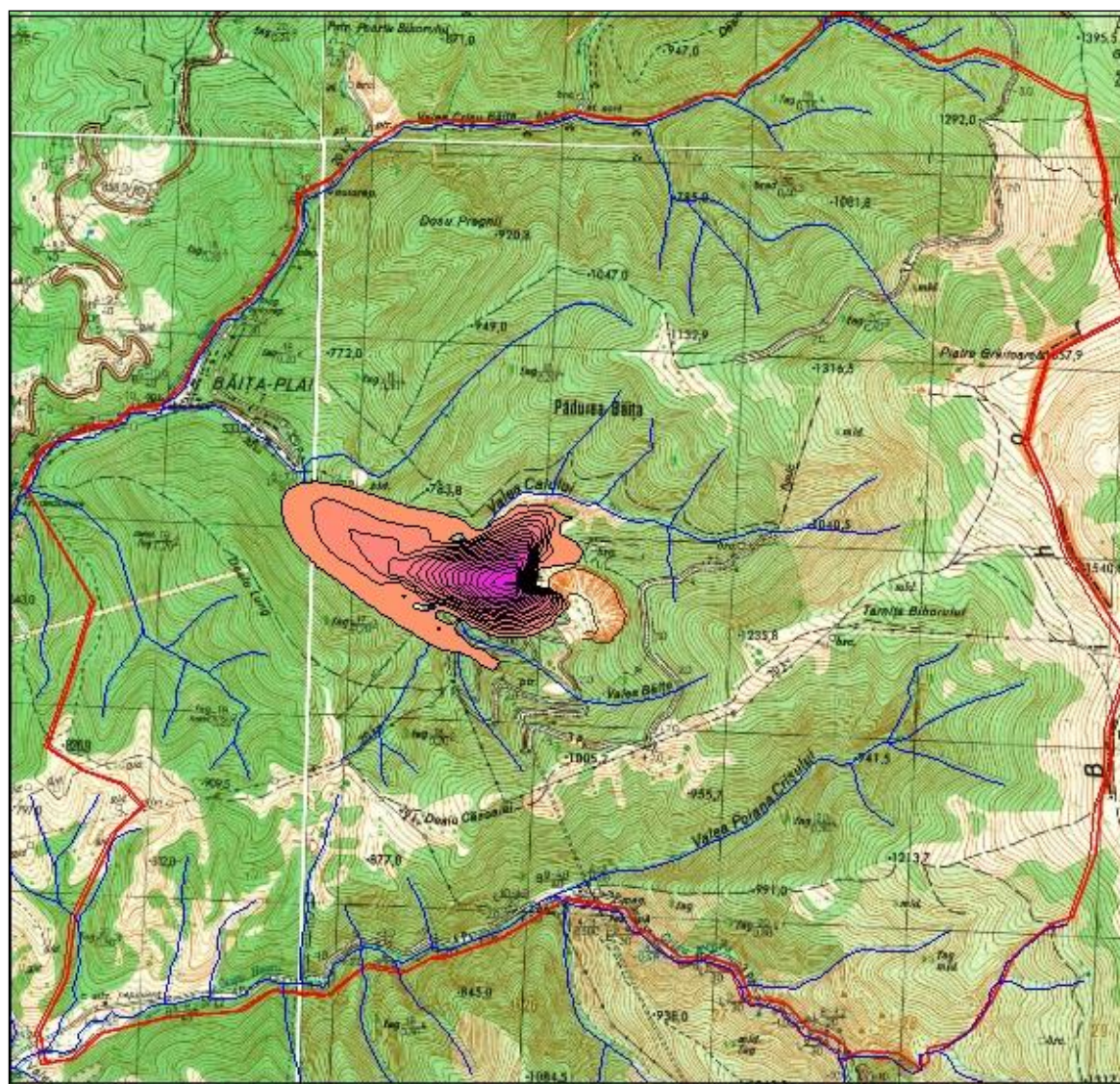


Figura 8 Distribuția
concentrației de ^{137}Cs
(Bq/m³) după 30 ani de la
eliberarea din depozit la 525
m adâncime

Extinderea aproximativ simetrică atât la suprafață cât și în adâncime a penei de contaminant este o consecință procesului de transport puternic dispersiv.

În cazul lansării radionuclizilor de ^{137}Cs zona cu risc maxim de contaminare din subteran în intervalul de adâncime 25 – 225m este la confluența Văii Calului cu Pârâul Mic.

Analizând distribuția concentrațiilor radionuclizilor de ^{226}Ra și ^{137}Cs în intervalul de adâncime 25 – 225m, se constată că indiferent de tipul de sursă considerat, transferul radionuclizilor este influențat de sistemul de fracturi orientând pana de contaminant spre centrul de drenaj cel mai apropiat (Valea Calului și Pârâul Mic).

În consecință, zona cu risc maxim de contaminare din subteran este zona de confluență a celor două râuri și apoi în lungul pârâului Crișul Băița. Se poate concluziona, că zona de influență a DNDR cuprinde pe de o parte zona din interfluviul Valea Calului și Pârâul Mic și zona confluenței celor două râuri. Având în vedere că, transferul radionuclizilor se realizează și în lungul pârâului Crișul Băița, zona de influență a DNDR trebuie extinsă până la limita de vest a domeniului modelat - Valea Crișul Băița. Astfel, se constată că, satul minier Băița Plai se află în zona de influență a DNDR, existând posibilitatea unei posibile contaminări a apelor subterane cu radionuclizi de ^{226}Ra și ^{137}Cs .

Având în vedere că, activitățile miniere de la Băița Plai au fost închise de 14 ani (o parte a minei) și respectiv de 5 ani (cealaltă parte a minei), se poate preciza că riscul apariției unei contaminări cu radionuclizi de ^{226}Ra și ^{137}Cs ca urmare a funcționării DNDR, este scăzut, având în vedere procedurile aplicate în cadrul CNU privind securitatea radiologică, care sunt în conformitate cu recomandările naționale și internaționale. Însă, desfășurarea activităților miniere în zonă încă din timpul celui de-al Doilea Război Mondial, face posibilă existența unei poluări istorice remanente cu radionuclizii asociați minereului de uraniu.

În acest sens, în situația alocării de fonduri necesare implementării unui program de monitorizare a concentrațiilor de radionuclizi în apa subterană, se propune realizarea unei rețele de monitorizare care să cuprindă și cele patru puncte de observație considerate în modelare. Dată fiind pătrunderea în adâncime a radionuclizilor se recomandă ca în fiecare punct de observație să fie amplasat un sistem de trei foraje diferențiate deschise la adâncimi de 50, 100, 150 respectiv 250m. O atenție deosebită trebuie acordată punctului de observație din imediata vecinătate a depozitului: creșterea concentrației în forajele de observație amplasate în acest punct ar indica o eventuală pierdere din depozit. Intervalele de monitorizare depind de asemeni de poziția punctelor de observație. În condiții normale de funcționare se recomandă efectuarea de măsurători anuale în punctele din apropierea depozitului, frecvența scăzând pentru punctele mai îndepărtate.

CAPITOLUL IV - CONCLUZII

Prezenta lucrare își propune analizarea condițiilor hidrodinamice și de transport ale radionuclizilor de ^{226}Ra și ^{137}Cs , în amplasamentul Depozitului Național de Deșeuri Radioactive (DNDR) Băița Bihor.

Analiza mișcării apei subterane și transportul contaminanților s-a realizat prin intermediul modelării matematice. În acest scop au fost stabilite câteva obiective prezentate mai jos:

- urmărirea funcționării depozitului în condițiile actuale de siguranță;
- urmărirea distribuției radionuclizilor eliberați, în timp;
- stabilirea zonei de influență a DNDR;
- stabilirea extinderii zonei de monitorizare.

Delimitarea domeniului modelat a fost influențată în cea mai mare parte de condițiile hidrologice și hidrogeologice ale amplasamentului. Luând în considerare direcția aproximativă de curgere a apei subterane și caracteristicile geologice, domeniul modelat a inclus arealul care înconjoară depozitul de deșeuri, inclusiv localitățile Băița Sat și Băița Plai.

Plecând de la modelul de curgere gravitațională (*Toth et al., 2010*) și de la observația unui contact direct râuri - zona saturată s-a considerat că sarcina piezometrică este egală cu cota apei din râuri, impusă în nodurile corespunzătoare râurilor numai pe suprafața superioară a modelului. Astfel, am considerat că nivelele apei din râuri sunt egale cu cotele reliefului.

Râurile au fost alese drept condiții de margine la nord, sud și vest față de DNDR. Condiția de flux nul a fost adoptată la limita estică. Localizarea precisă a limitei de flux nul a fost aleasă astfel încât să se suprapună peste limita bazinului hidrografic și potențiala pană de contaminant având drept sursă depozitul, să fie inclusă în zona modelată.

Din punct de vedere fizic, modelul conceptual a fost reprezentat de mediul cu dublă porozitate/permeabilitate.

Pentru definitivarea modelului matematic preliminar s-a plecat de la modelul hidrogeologic regional - Toth, considerând ca model fizic - mediul continuu (*Toth et al., 2010*).

S-a stabilit că, porozitatea primară a sistemului se realizează prin sistemul de fracturi, având o densitate de $0,2 - 0,5 \text{ m}^{-1}$. Densitatea mare de fracturare, comparativ cu extinderea domeniului analizat, conduce la un volum elementar reprezentativ de ordinul metrilor, alcătuind o matrice cu conductivități reduse, ceea ce face ca un prim model fizic conceptual să fie *mediul continuu*.

Peste acest sistem cu porozitate primară se suprapune porozitatea secundară datorată sistemului de falii care pot constitui căi preferențiale de curgere - transport. Se realizează astfel modelul conceptual al *mediului cu dublă porozitate*, în care porozitatea primară dată de sistemul de fracturi este echivalată cu un mediu continuu, peste care se suprapune transferul prin falii, analizate ca entități individuale.

Modelul tridimensional a fost realizat din 6 strate de grosimi diferite, iar modelul fizic conceptual a fost cel al mediului cu dublă porozitate, în care porozitatea secundară a fost dată de sistemul de fracturi.

Permeabilitatea matricei poroase este scăzută iar transportul în matrice se realizează în principal prin difuzie moleculară. Transportul din fractură în matricea poroasă se produce prin difuzie, datorită gradientului de concentrație între fractură și matrice. În cazul radionuclizilor concentrația traserului este influențată și de procesul de dezintegrare radioactivă.

Transportul de-a lungul fracturii este în principal advection și dispersiv, fiind mult mai rapid decât în matrice. Procesul de transport prin difuzie din fractură în matricea poroasă, constituie un mecanism de

atenuare care poate fi foarte eficient în îndepărtarea masei de contaminat și care întârzie astfel împrăștierea contaminantului în sistem.

Datorită procesului de difuzie care are loc în matrice, aceasta se comportă ca un sistem de înmagazinare al radionuclidului. Procesul de transport prin advecție în matricea poroasă este neglijabilă datorită contrastului mare a permeabilității dintre fractură și matrice.

Simularea transferului radionuclizilor în Masivul Depozitului

Modelul conceptual al transferului prin depozitul propriu-zis a fost modelul cu dublă porozitate: s-a considerat ca depozitul interceptează o fractură majoră, extinsă până la limita zonei saturate, aflată în contact direct cu matricea poroasă. Modelul analizat este conservativ (acoperitor) în sensul că gradul de saturație al matricei este foarte ridicat, presiunea capilară fiind sub presiunea de pătrundere. În acest fel caracterul de „tampon” al zonei nesaturate este redus la minimum.

Pentru a evidenția evoluția concentrației radionuclizilor în timpul transferului prin sistemul fractură - matrice poroasă, au fost considerate patru puncte de observație amplasate pe fractură la cota galeriei (sursa) și la următoarele adâncimi: 20m, 50m și 75m (la limita cu mediul nesaturat), în care s-au înregistrat curbele de restituție.

În urma simulărilor a rezultat că, în situația considerării procesului de dezintegrare, concentrația izotopilor de ^{226}Ra , scade cu șase ordine de mărime de la lansarea izotopilor și până la atingerea adâncimii de 75m în decursul a 9.942 ani.

În cazul în care a fost ignorat procesul de dezintegrare a rezultat o scădere a concentrației traserului fictiv cu doar trei ordine de mărime de la lansare până la atingerea adâncimii de 75 m în decursul a 100.316,7 ani. Rezultă astfel ponderea majoră a procesului de dezintegrare radioactivă în procesul de transfer al radionuclizilor în zona DNDR.

Comparând cele două variante, s-a constatat ponderea mare a dezintegrării radioactive. În consecință, chiar în aceste condiții conservative, rolul de tampon al zonei nesaturate este major. Efectul dezintegrării radionuclizilor de ^{226}Ra duce la o micșorare a timpului de transfer a izotopilor în matricea poroasă și implicit la o scădere a concentrației cu mai multe ordine de mărime.

Efectul dezintegrării este foarte vizibil în cazul izotopilor de ^{137}Cs , activitatea acestora scăzând puternic după 60 ani de la lansare (dublul perioadei de înjumătățire) și ajungând să aibă concentrații neglijabile de la adâncimea de 6 m. În consecință chiar în aceste condiții conservative, un izotop cu un timp mediu de înjumătățire cum este ^{137}Cs , nu pătrunde în zona saturată decât cu concentrații neglijabile.

În urma simulărilor realizate s-a constatat că, izotopul de ^{60}Co se dezintegrează înainte să ajungă în punctul 2 de observație (20 m adâncime). Acest fapt era de așteptat, având în vedere că izotopul de ^{60}Co face parte din clasa radionuclizilor de viață scurtă.

Simularea transferului radionuclizilor în zona saturată din amplasamentul DNDR

În vederea analizei transferului radionuclizilor posibil eliberați din DNDR, a fost simulat efectul unei surse continue situată în depozit. Rularea s-a efectuat plecând de la ipoteze conservative, masivul de rocă fiind complet saturat. Au fost considerate 2 tipuri de surse continue: sursă conservativă (radionuclidul ^{226}Ra) și sursă puternic dispersivă (radionuclidul ^{137}Cs), care fac parte din clasa radionuclizilor de viață lungă și respectiv din clasa radionuclizilor de viață medie. Prin simulare s-a urmărit efectul condițiilor geologice din amplasament asupra distribuției concentrațiilor.

Transferul izotopilor a fost simulat considerând principalele mecanisme de transport, cu valori ale parametrilor hidrogeologici, distribuite uniform pe întreg domeniu.

Valorile parametrilor hidrogeologici considerate pentru matricea poroasă au fost:

- Porozitate efectivă a matricii - 10^{-3} ;
- Dispersivitate longitudinală - 250 m;
- Dispersivitate transversală - 10 m.

Valorile parametrilor hidrogeologici considerate pentru fractură au fost:

- Deschiderea fracturii - 1 mm;
- Dispersivitate longitudinală - 50 m;
- Dispersivitate transversală - 0,5 m;
- Conductivitatea fracturii - 0,817 m/s.

S-a pus în evidență că, transferul izotopilor de Ra se produce în principal în lungul gradientului hidraulic, pe o direcție E - V spre zona de drenaj situată la confluența dintre valea Calului cu Pârâul Mic, însă este influențat și de sistemul de fracturi.

Ca urmare a simulărilor realizate pentru radionuclizii de ^{226}Ra , se poate preciza că extinderea în adâncime a penei de contaminant în general în interfluviul celor două râuri, este o consecință a modelului Toth al bazinului hidrogeologic regional. Odată pătrunsă în adâncime masa de contaminant se distribuie între bazinele superficiale și cele intermediare sau inferioare. Contaminantul pătruns în bazinele superficiale este descărcat în centrele de drenaj cele mai apropiate (Valea Calului și Pârâul Mic), iar cel pătruns în bazinele de adâncime este transportat în continuare în subteran și descărcat în centre de drenaj mai îndepărtate, cum este Crișul Băița.

Se poate spune că zona cu risc maxim de contaminare din subteran este la confluența Văii Calului cu Pârâul Mic și apoi în lungul pârâului Crișul Băița. Având în vedere că apele de suprafață au viteză mare de transport este de așteptat ca pana de contaminant cu radionuclizi de ^{226}Ra să ajungă și în dreptul localității Băița Sat, nu numai în localitatea Băița Plai. Transferul prin masiv reduce însă cu circa două ordine de mărime concentrațiile eliberate din depozit. Este de asemenea de subliniat pătrunderea în adâncime a izotopilor eliberați la suprafața terenului, concentrațiile acestora scăzând cu adâncimea de pătrundere.

S-a observat că și transferul izotopilor de ^{136}Cs se produce în principal în lungul gradientului hidraulic, pe o direcție E - V spre zona de drenaj situată la confluența dintre Valea Calului cu Pârâul Mic, dar este influențat și de sistemul de fracturi.

Extinderea aproximativ simetrică atât la suprafață cât și în adâncime a penei de contaminant, în cazul radionuclizilor de ^{137}Cs este o consecință procesului de transport puternic dispersiv. În cazul lansării radionuclizilor de ^{137}Cs zona cu risc maxim de contaminare din subteran în intervalul de adâncime 25 – 225m este la confluența Văii Calului cu Pârâul Mic.

Concluzia generală este că, indiferent de tipul de sursă considerat datorită sistemului de curgere transferul radionuclizilor se face în adâncime datorită rolului important jucat de prezența faliilor în zona DNDR. De asemenea, concentrații de radionuclizi pot fi întâlnite la distanțe foarte mari față de sursă, chiar dacă acestea sunt neglijabile.

Un rol important în transferul radionuclizilor în adâncime îl joacă, zona nesaturată, având rolul de zonă „tampon” reținând ponderea cea mai mare din concentrațiile radionuclizilor, aceste concentrații fiind neglijabile la adâncimi mari.

Pe baza rezultatelor obținute în urma modelării matematice, se poate spune că, zona de influență a DNDR cuprinde pe de o parte zona din interfluviul Valea Calului și Pârâul Mic și zona confluenței celor două râuri. Având în vedere că, transferul radionuclizilor se realizează și în lungul pârâului Crișul Băița, zona de influență a DNDR trebuie extinsă până la limita de V a domeniului modelat - Valea Crișul Băița.

În situația alocării de fonduri necesare implementării unui program de monitorizare a concentrațiilor de radionuclizi în apa subterană, se propune realizarea unei rețele de monitorizare care să cuprindă și cele patru puncte de observație considerate în modelare. Dată fiind pătrunderea în adâncime a radionuclizilor se recomandă ca în fiecare punct de observație să fie amplasat un sistem de trei foraje diferențiate deschise la adâncimi de 50, 100, 150 respectiv 250 m. O atenție deosebită trebuie acordată punctului de observație din imediata vecinătate a depozitului: creșterea concentrației în forajele de observație amplasate în acest punct ar indica o eventuală pierdere din depozit. Intervalele de monitorizare depind de asemeni de poziția punctelor de observații. În condiții normale de funcționare se recomandă efectuarea de măsurători anuale în punctele din apropierea depozitului, frecvența scăzând pentru punctele îndepărtate.

CAPITOLUL V – BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] Administrația Națională „Apele Române” Administrația Bazinală de Apă Crișuri, Planul de Management al spațiului hidrografic Crișuri, 2009 – 2015;
- [2] Bleahu M. Dumitrescu, R., Stratigrafia și tectonica Munților Apuseni, 1957;
- [3] Bond A. E., Little R. H., Niculae O., Pantazi D., Paulley A., Robinson P. C., Thorne M. C., Walke R. C. și Watson S. P., Elaborarea Raportului Preliminar de Securitate pentru Depozitul Băița Bihor (EuropeAid/117365/D/SV/RO & RO 2002/000 632.08.01) - Raportul Activității A4: Evaluări de Securitate Operaționale și Post-Închidere, Raport Quintessa QRS-1255A-RA4, Versiunea 1.0, Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK, 2005;
- [4] Bond A. Little, R. H, Naum, E. M. Nicolae, R., Niculae O., Thorne M. C. și Watson S. P., Development of the PSAR for the Repository Băița Bihor (EuropeAid/117365/D/SV/RO & RO 2002/000 632.08.01), Activity B2 Report: Updating of PSAR for the Baita Bihor Repository. Quintessa Report QRS-1255A-RB2, Version 1.0, Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK, 2006;
- [5] Danchiv A., E-cap8. Transport in Porous Media. Cours VICAIRE coordonator Prof. Drobot R., A. Muzil, 2002;
- [6] Danchiv A., Iurkiewicz A., Popa I., Studiul Cercetări privind optimizarea practicilor de depozitare a deșeurilor radioactive la Depozitul Național Băița Bihor (DNDR) în vederea asigurării securității radiologice în conformitate cu recomandările naționale și internaționale, (Contractul de finanțare pentru execuție proiecte nr. 71072/2007), Universitatea București, Departamentul de Cercetare de Geologie și Geofizică Ambientală, 2007;
- [7] Ianovici V., Borcoș M., Bleahu M., Patrulius D., Lupu M., Dimitrescu R., Savu H., Geologia Munților Apuseni, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1976;
- [8] Întreprinderea de Metale Rare (IMR), Dr. Petru Groza, Studiu geologic, tectonic, microtectonic, mineralogic și chimic în zonele galeriilor 50 și 53 Băița, 1982;
- [9] Întreprinderea Geologică de Prospekțiuni pentru Substanțe Minerale Solide (IGPSMS), Studiu hidrogeologic pentru zona carstică din Munții Bihor, în special pentru Băița Bihor (Mina de molibden), 1985;
- [10] Little R. H., Naum E. M. and Thorne, M. C., Development of the PSAR for the LLW Repository Baita Bihor (EuropeAid/117365/D/SV/RO & RO 2002/000 632.08.01), Activity A1 Report: Safety Requirements for the Baita Bihor Repository. Quintessa Report QRS-1255A-RA1, Version 1.0, Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK, 2005;
- [11] Little R. H., Watson S. P., Matyasi S și Matyasi L., Elaborarea Raportului Preliminar de Securitate pentru Depozitul de deșeuri slab active de la Băița Bihor (EuropeAid/117365/D/SV/RO & RO 2002/000 632.08.01) - Raport pentru Activitatea A7: Investigații preliminare ale amplasamentului și elaborarea RPS draft, Raport Quintessa QRS-1255A-RA7, Versiunea 1.0 Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK, 2005;
- [12] Matyasi S., Matyasi L. and Watson S. P., Development of the PSAR for the Repository Baita Bihor (EuropeAid/117365/D/SV/RO & RO 2002/000 632.08.01), Activity B1 Report: In-situ and Laboratory Measurements. Quintessa Report QRS- 1255A-RB1, Version 1.0, Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK, 2006;

- [13] Michael O. Schwartz, Modelling Groundwater Contamination Above a Nuclear Waste Repository at Gorleben, Germany, *Hydrology Journal*, 2012;
- [14] Mutihac V., Stratulat I. M., Fechet M. R., *Geologia României*, Editura Didactică și Pedagogică, R.A., 2004;
- [15] Scrădeanu D., Gheorghe A., *Hidrogeologie generală*, Editura Universității din București, 2007;
- [16] SITON, *Studiu de fezabilitate pentru modernizarea Depozitului Național de Deșeuri Radioactive Băița Bihor*, 2002;
- [17] Stoici S. D., *Districtul metalogenetic Băița Bihorului, Cercetări geologice și miniere*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1983;
- [18] Thorne M. C., *Decay Corrected Inventory*. Thorne M. C. and Associates Limited External Memorandum to Little R., 2005;
- [19] Thorne M. C., *Development of the PSAR for the Repository Baita Bihor (EuropeAid/117365/D/SV/RO & RO 2002/000 632.08.01), Activity A3 Report: Updated Radionuclide Inventory for the Baita Bihor Repository*. Quintessa Report QRS-1255ARA3, Version 1.0, Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK, 2005;
- [20] Thorne M. C., *Future Disposals at Baita Bihor*. Thorne M. C. and Associates Limited External Memorandum to Little R., 2005;
- [21] Thorne M. C., *Response to Comments on Inventory*. Thorne M. C. and Associates Limited External Memorandum to Little R., 2005;
- [22] Toth Jozsef, *Gravitational Systems of Groundwater Flow, Theory, Evaluation, Utilization*, Cambridge University Press, New York, 2009;
- [23] Toth Jozsef, Hazashi Masaki, *The Theory of Basinal Gravity Flow of Groundwater and its Impacts on Hydrology in Japan*, *Journal of Groundwater Hydrology*, Volume 52, No. 4, 2010;
- [24] Watson S. P., Matyasi S. and Nicolae R., *Development of the PSAR for the LLW Repository Baita Bihor (EuropeAid/117365/D/SV/RO & RO 2002/000 632.08.01), Activity A2 Report: Determination of the Range of Uncertainty of Each Main Component of Dose Assessment of the Baita Bihor Repository*. Quintessa Report QRS-1255A-RA2, Version 1.0, Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK, 2005;
- [25] Watson S. P., Matyasi S., Matyasi L. Vlas G. Nicolae R. and Butler A. P., *Development of the PSAR for the Repository Baita Bihor (EuropeAid/117365/D/SV/RO & RO 2002/000 632.08.01), Activity A6 Report: Improved Site Characterisation and Specification for a Site Investigation Programme*. Quintessa Report QRS-1255A-RA6, Version 1.0, Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK, 2006;
- [26] Watson S. P., Matyasi S., Matyasi L., Vlas G., Nicolae R. și Butler A. P., *Elaborarea Raportului Preliminar de Securitate pentru Depozitul de deșeuri slab active de la Băița Bihor (EuropeAid/117365/D/SV/RO & RO 2002/000 632.08.01) - Raport pentru Activitatea A6: Caracterizarea îmbunătățită a amplasamentului și descrierea programului de investigații în amplasament*, Raport Quintessa QRS-1255A-RA6, Versiunea 1.0, Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK, 2005;
- [27] Watson S. P., Matyasi S., Matyasi L., Vlas G., Nicolae R., Butler A. P., Little R. H., Bond A. E., Niculae O., Pantazi D., Paulley A., Robinson P. C., Thorne M. C. and Walke R. C. *Preliminary Safety Analysis Report for Baita Bihor Repository*, Quintessa Report QRS-1255A-PSAR2, Version 1.0, Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK, 2006;
- [28] Watson S. P., Matyasi S., Matyasi L., Vlas G., Nicolae R., Butler A. P., Little R. H., Bond A. E., Niculae O., Pantazi D., Paulley A., Robinson P. C., Thorne M. C. and Walke R. C. *Draft Preliminary Safety Analysis Report for the Băița Bihor Repository*. Quintessa Report QRS-1255A-PSAR1, Version 1.0, Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK, 2005.