

# Výskum multibariérového systému pre hlbinné ukladanie rádioaktívnych odpadov

Viliam Bauer<sup>1</sup>, Marian Šofranko a Martin Stavníkovič

## *Research of the multibarrier system for an underground deposition of radioactive wastes*

*The paper deals in brief with research problems of multiple protection barrier systems for an underground storage of highly radioactive waste in connection with the problem of resolving a definite liquidation of this waste. This problem has a worldwide importance and is comprehensively investigated, evaluated and resolved in many well accepted research centers. Present the experts agree, that the most suitable way of the long-lived radioactive wastes liquidation is their storage into suitable underground geological formations. The core insulation of radioactive wastes from the biosphere for an extremely long time can be achieved by using a technical isolation barrier in combination with an appropriate rock mass.*

**Key words:** *underground deposition, radioactive wastes, technical isolation barrier*

## Úvod

Článok v stručnej forme pojednáva o problémoch výskumu multibariérových systémov hlbinného ukladania rádioaktívnych odpadov HU RAO, a to v súvislosti s riešením problému trvalého zneškodnenia týchto vysoko aktívnych odpadov. Uvedený problém má charakter celosvetového problému a je komplexne skúmaný, posudzovaný a riešený na mnohých medzinárodne uznávaných výskumných laboratórnych pracoviskách. Experti sa v súčasnosti zhodujú v názore, že pre zneškodnenie dlhožijúcich rádioaktívnych odpadov je jedným z najvhodnejších spôsobov ich ukladanie do hlbinných geologických formácií. Izolácia rádioaktívnych odpadov od biosféry na extrémne dlhú dobu sa môže doceliť systémom viacnásobných technických izolačných bariér (multibariérový systém) v kombinácii s vhodným horninovým prostredím. Pri tomto spôsobe kombinovanej izolácie RAO je predpoklad, že reziduálne rádioaktívne látky dosiahnu biosféru až po mnoho stotisíc rokoch a to v koncentráciách, ktoré nebudú významné v porovnaní s prirodzeným pozadím rádioaktivity. Významnou oblasťou skúmania je pritom modelový výskum in – situ, ktorý komplexne skúma možnosti vhodných systémov ukladania RAO do hlbinných geologických formácií a vhodného horninového prostredia.

## Klasifikácia a charakteristika rádioaktívnych odpadov.

Rádioaktívnym odpadom sa označujú akékoľvek nevyužiteľné odpadové látky a nepoužiteľné predmety v pevnej, kvapalnej alebo plynnej forme, ktoré nemožno pre zvýšený obsah rádionuklidov alebo neodstrániteľnú kontamináciu uviesť do životného prostredia (Zákon č.130/1998 Zb. o mierovom využívaní jadrovej energie).

Rádioaktívne odpady sú podľa svojho charakteru upravované takým spôsobom, aby mohli byť bezpečným spôsobom transportované (aj manipulované vhodnou technikou), skladované (uskladňované v konkrétnych priestoroch a objektoch, a to spravidla na určité vopred stanovené obdobie), alebo trvalo uložené (ukladané do vyhradených priestorov, objektov a zariadení, pričom sa nepočíta s ich ďalším premiestnením alebo preložením).

Rádioaktívne odpady môžeme z hľadiska koncepcie HU RAO klasifikovať a rozdeliť na základe ich pôvodu a aktivity. Veľkým pôvodcom RAO môže byť jadrová energetika, teda jadrové reaktory, menším pôvodcom RAO je medicínske a inštitucionálne výskumné a priemyselné prostredie. Podľa aktivity uvažuje koncepcia HU RAO s odpadmi v dvoch hlavných skupinách, ako nízko a stredne aktívne odpady resp. vysoko aktívne odpady a vyhorelé jadrové palivo. Podľa aktivity, pôvodu a charakteru RAO teda rádioaktívne odpady rozdelíme na :

### Nízko rádioaktívne odpady

Odpady z prevádzky jadrových reaktorov, priemyselných zariadení a tzv. inštitucionálne odpady, ktoré zahŕňajú široké spektrum materiálov rôzneho zloženia a skupenstiev, a je ich možné bezpečne zneškodniť s použitím existujúcich vhodných technológií.

<sup>1</sup> prof. Ing. Viliam Bauer, CSc., Ing. Marian Šofranko, PhD., Ing. Martin Stavníkovič, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta BERG, Slovenská Republika

(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 8. 1. 2007)

### Stredne rádioaktívne odpady

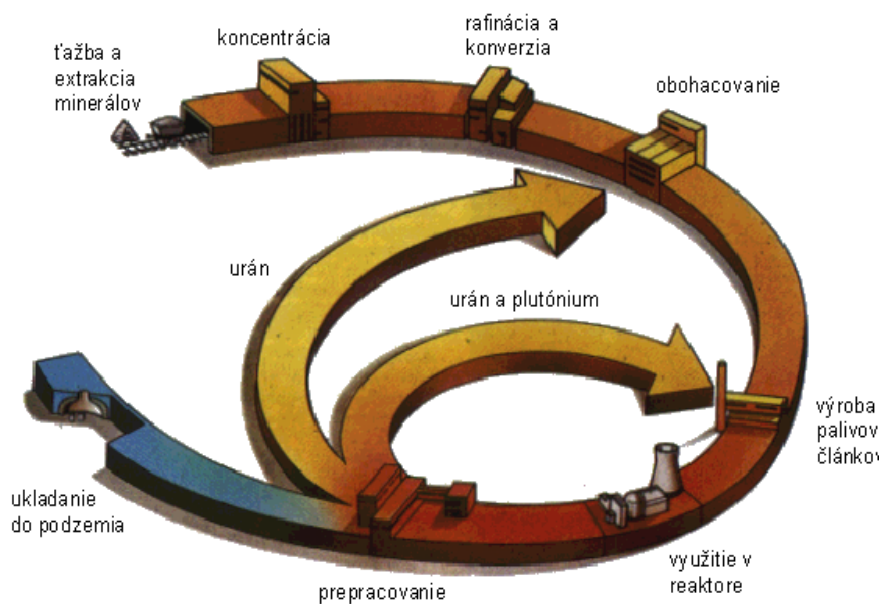
Odpady z priemyselných zariadení a inštitucionálne rádioaktívne odpady z umelých rádionuklidov a s rôznym polčasom premeny, ako aj odpady s prirodzenými rádionuklidmi a s príslušnou aktivitou vyjadrovanou v pomere k  $10^{10}$  Bq.  $\text{cm}^{-3}$ ), ktoré je možné po redukcii ich objemu bezpečne zneškodniť, resp. skladovať na úložisku rádioaktívnych odpadov v systéme multibariérovej ochrany.

### Vysoko rádioaktívne odpady a vyhorené jadrové palivo

Sú to vysokoaktívne odpady tvorené  $\alpha$ -žiaricmi a odpady vznikajúce zo štípných produktov uránového paliva v reaktore, ktoré zostávajú uzavreté v palivových článkoch. Tieto odpady majú vysokú rádioaktivitu a rádiotoxicitu, pričom vyhorené jadrové palivo obsahuje viac než 1000 rádionuklidov, ktorým je nutné zabrániť ich preniknutiu do prirodzeného kolobehu rádionuklidov v životnom prostredí na mimoriadne dlhú dobu, t.j. až na tisíce a státisíce rokov). Po poklese rádioaktivity i tepelného výkonu vyhoreného paliva (ochladzovaním, ktoré trvá 3 - 5 rokov), sa vyhorené jadrové palivo premiestňuje do medziskladov, kde sa skladuje po dobu 40 - 50 rokov. Po uplynutí tejto doby klesne rádioaktivita a produkcia tepla na úroveň, kedy je možné definitívne uloženie v hlbinnom úložisku. Význačnými vlastnosťami vyhoreného paliva je jeho rádioaktivita a zvyškový tepelný výkon. Vyhorené jadrové palivo sa podľa vyhlášky č. 67/1987 Zb. nepovažuje za rádioaktívny odpad, ale tvorí samostatnú kategóriu.

### Existujúce koncepcie zneškodňovania RAO v zemskej kôre.

Z hľadiska uvažovanej koncepcie HU RAO má význam detailnejší pohľad na palivový cyklus jadrovej elektrárne, pretože jadrová energia sa v posledných rokoch stáva čoraz viac žiadanejším energetickým zdrojom, ktorý je v zásade rešpektovaný aj laickou verejnosťou, aj keď má aj svojich veľkých odporcov. V súčasnej dobe je na svete v prevádzke viac ako 440 reaktorov s celkovým výkonom okolo 400 000 MW (čo predstavuje celkovú celosvetovú výrobu takmer 25 % elektrickej energie), pričom ďalších 35 reaktorov je v etape výstavby, a počet novo budovaných reaktorov v Číne, Indii a Rusku prudko narastá.



Obr. 1. Palivový cyklus jadrovej elektrárne.  
Fig. 1. Fuel Cycle of Nuclear Power Plant.

Palivovým cyklom jadrovej elektrárne (obr. 1) sa označuje proces zahŕňajúci ťažbu uránovej rudy, jej chemické spracovanie, obohacovanie o  $^{235}\text{U}$ , výrobu palivových článkov, využitie paliva v reaktore, prepracovanie vyhoreného paliva a konečné bezpečné uloženie nevyužiteľného vyhoreného paliva a ostatných rádioaktívnych odpadov vznikajúcich pri všetkých fázach palivového cyklu.

### Ťažba uránových rúd

Podľa geologického výskytu sa uránová ruda ťaží buď povrchovým, hlbinným alebo kombinovaným spôsobom dobývania, pričom sa pri jednotlivých všetkých ťažobných operáciách musia dodržiavať základné bezpečnostné predpisy, s cieľom zabrániť vnútornej kontaminácii pracovníkov v baniach radionuklidmi ťaženej uránovej resp. thórovej rudy.

### Spracovanie a rafinácia uránovej rudy

Spravidla sa jedná o rôzne spôsoby spracovania, ku ktorým patria fyzikálna a fyzikálno-chemická úprava rúd, ďalej výroba chemického uránového koncentrátu, rafinácia chemického uránového koncentrátu a výroba požadovanej zlúčeniny uránu.

### Obohacovanie uránu

Izotopové obohacovanie uránu je nevyhnutným krokom pri výrobe paliva. Pre obohacovanie uránu sa vyvinuli postupy izotopovej separácie, medzi ktoré patria difúzna metóda, plynová centrifúgová metóda, aerodynamické oddelovanie pomocou plynovej dýzy a laserové metódy.

### Prepracovanie vyhoreného jadrového paliva

Jadrové palivo sa v reaktore využíva počas doby optimálnej z fyzikálneho i ekonomického hľadiska. Po uplynutí tejto doby (spravidla 1 až 4 roky) sa palivo z reaktora vyberie a vymení sa vsádzka. Vyhorené jadrové palivo obsahuje štiepne produkty s vyšším obsahom aktinoidov, zostatkové množstvo uránu a novo vzniknuté plutónium, ktoré je možné prepracovaním znovu získať a uviesť do formy použiteľnej v reaktore. Po vybratí z reaktora sa musia vyhorené palivové tyče dochladzovať 3 až 5 rokov v chladiacich bazénoch budovaných priamo pri reaktoroch. Počas chladenia výrazne klesá teplota, z 1120°C na 130°C, i rádioaktivita, z  $10^{16}$  Bq na  $10^{10}$  Bq. Prepracovanie vyhoreného paliva zahŕňa regeneráciu palivových článkov, výrobu štiepných materiálov, oddelenie produktov štiepenia, výrobu radionuklidov a zneškodnenie rádioaktívneho odpadu vzniknutého pri prepracovaní.

### Existujúce koncepcie zneškodňovania RAO v zemskej kôre.

Zásadný princíp zneškodňovania vysokoaktívnych odpadov (VAO) a vyhoreného jadrového paliva (VJP), ktorý je v súčasnosti dlhodobo celosvetovo akceptovaný, počíva v dokonalej izolácii týchto odpadov od biosféry, teda od všetkých jej zložiek, ktoré sú zahrnuté do životného prostredia. Výskum a vývoj technológií zneškodňovania RAO je kontinuálny a prebieha často na medzinárodnej úrovni. Dôvodom výskumu metód a technológií trvalého zneškodnenia odpadov je skutočnosť, že prirodzeným rádioaktívnym rozpadom by sa rádioaktívny odpad likvidoval mimoriadne dlhú dobu, dosahujúcu až milióny rokov. Výskum je často orientovaný na *oblasť hodnotenia migrácie radionuklidov* a ich prestupu resp. na ich spontánne šírenie sa cez inžinierske bariéry, a v rovnakej miere aj na *oblasť vývoja vhodných materiálov pre konštrukciu inžinierskych bariér*. Hlavnou požiadavkou jadrovej bezpečnosti pri dlhodobom uskladnení vyhoreného jadrového paliva je vylúčenie možnosti výskytu nadkritického množstva uránu a plutónia, porušenie hermetického uzavretia vyhorených palivových tyčí a zabránenie roztaveniu paliva vplyvom vlastného zvyškového tepelného výkonu. V posledných rokoch sa výskum zamerlal na použitie rôznych spôsobov izolácie RAO, konkrétne na ich ukladanie do morského dna, ukladanie vo veľmi hlbokých vrtoch, ukladanie v tavenej hornine, v antarktickom ľade, injekťáž odpadov do hlbokých vrtoch, transmutácia, i v súčasnosti pravdepodobne najrealizovateľnejšia možnosť, hlbinné ukladanie RAO vo vhodných geologických formáciách.

### Ukladanie pod morským dnom

Spôsob ukladania rádioaktívneho odpadu do sedimentov tvoriacich dno oceánov predstavuje veľmi perspektívnu oblasť a atraktívnu oblasť konečnej likvidácie RAO, pretože známe geologické formácie pod oceánmi, pokrývajúce až 70 % zemskeho povrchu, sú doteraz ešte ekonomicky a technicky nevyužitú. Pri tomto spôsobe ukladania je základným princípom fixácia rádioaktívneho odpadu v kovových kontajneroch umiestňovaných do vrtoch resp. jám veľkého profilu, ktoré sú umiestnené pod hladinou oceánu.

### Ukladanie vo veľmi hlbokých vrtoch

Tento spôsob ukladania RAO umožňuje takmer dokonalú izoláciu VAO a VJP od biosféry, uložením do hlbokých vrtoch (viac ako 10 000 m) v tektonicky stabilných oblastiach, ktoré budú vrtané/budované modernými technológiami napr. Litho-Jet. Progresívne technológie si budú zároveň vyžadovať nové manipulačné a logistické technológie pri ukladaní RAO, ale tiež inováciu materiálových technológií pri

technických riešení utesňovania a vytvárania multibariérového systému ochrany. Pri uvedenej technológii je potrebné počítať s vysokými ekonomickými nákladmi [2].

### **Ukladanie v Ťadovcových masívoch**

Spôsob konečného uloženia VAO do kontinentálneho Ťadového masívu predpokladá spolupôsobenie RAO a fyzikálneho procesu rekryštalizácie Ťadu. V zásade sa jedná o zatavenie rádioaktívnych odpadov do Ťadu v špeciálnych kanistroch. Metóda by si vyžiadala enormné vysoké náklady na výskum a tiež zmenu legislatívnych podmienok v rámci IAAE – Medzinárodná asociácia pre atómovú energiu.

### **Ukladanie do tavenej horniny**

Priame ukladanie VJP a vysokoaktívnych kvapalných odpadov do podzemných kaverien umiestnených vo veľkých hĺbkach cca. 2000 m, predpokladá roztavenie horniny v priestore ukladania RAO (napr. granity) a vnikaniu odpadu do takto roztavenej horniny.

### **Injektáž vysokoaktívnych odpadov do hlbokých vrtov**

Pri tejto metóde sú kvapalné RAO odpady vtláčené čerpadlami do veľmi hlbokých vrtov cca. 1000 až 5000 m, do pórovitých priepustných synklinálnych pieskovcov, prekryté nepriepustným bridličnatým nadložíom, ktoré dokonale izoluje ukladané RAO od biosféry. Iným spôsobom môže byť rozrušenie masívu bridlic pomocou vysokotlakovej vodnej injektáže, pri ktorej sa vytvorí systém horizontálnych puklín, do ktorého sa následne injektuje zmes kvapalných rádioaktívnych odpadov, bentonitu a cementu do hĺbok od 500 do 1000 m.

## **Hlbinné ukladanie vysoko rádioaktívnych odpadov**

V súčasnosti takmer všetky medzinárodne uznávané výskumné pracoviská zaoberajúce sa problematikou hlbinného ukladania vysoko rádioaktívnych odpadov (HU RAO), využívajú koncepciu zneškodňovania týchto odpadov formou ich ukladania do vhodných tektonických štruktúr a geologických formácií. Táto jednotná koncepcia HU RAO sa riadi všeobecne platnými bezpečnostnými, politickými, eticko-spoločenskými a ekonomickými zásadami, ktoré sú permanentne prehodnocované expertmi vedeckých pracovísk na celom svete. K všeobecne akceptovanej zásade patrí na prvom mieste zásada spojená s požiadavkou maximálnej izolácie RAO od biosféry na obdobie niekoľko desiatok tisíc rokov (až 100 000 rokov). Existujúce koncepcie HU RAO predpokladajú vytváranie technických systémov viacnásobných ochranných bariér, ktoré určujú technický a bezpečnostný charakter celého systému HU RAO. Koncepcia HU RAO predstavuje principiálne takú metódu ukladania, ktorá si nevyžaduje špeciálnu inštitucionálnu kontrolu, aj keď pri súčasnom politicko-ekonomickom vývoji vo svete existujú riziká úmyselného resp. teroristického narušenia takéhoto hlbinného úložiska. Existuje viac dôvodov, ktoré podporujú realizáciu vybudovania bezpečného HU RAO. Sú to hlavne dôvody, ktoré súvisia s prípravou riešení a vývojom detailných konceptov úložísk v jednotlivých ekonomicky silných štátoch, ale aj dôvody súvisiace s novými technickými poznatkami a progresívnymi technológiami budovania podzemných objektov. Uvedené dôvody vyplývajú predovšetkým z princípu bezpečnosti, ktorá je demonštrovaná mnohými nezávislým konceptmi radiačnej ochrany, a majú veľký vplyv koncepciu HU RAO.

Hlbinné ukladanie vyhoreného jadrového paliva (VJP) a vysoko aktívnych odpadov (VAO) do vhodných geologických štruktúr je preferovanou metódou zneškodňovania v rámci prebiehajúcich národných programov v krajinách s jadrovým energetickým potenciálom, ktorá sa riadi ucelenou koncepciou a vzhľadom na hĺbku ukladania predstavuje len minimálne bezpečnostné riziko.

Pri HU RAO sú spravidla navrhované technologické systémy kontajnerovej ochrany na extrémne dlhú dobu, ktoré sa zameriavajú na izoláciu odpadu v mieste ukladania, čím sa zabráni uvoľneniu rádionuklidov do geoprostredia a biosféry, prípadne systémy riadeného uvoľňovania a rozptyľovania rádionuklidov do okolitého geologického prostredia, čo je práve opačný spôsob. Existujúce koncepty HU RAO využívajú kombináciu oboch princípov, pri ktorých sa kombinuje fáza izolácie s fázou riadeného zriedňovania a rozptyľovania, čím sa dosiahne požadovaná optimálna imobilizácia a zníženie koncentrácie rádionuklidov.

### **Všeobecné požiadavky na geoprostredie HU RAO**

Vhodný horninový masív a k nemu príslušná geologická formácia, ktoré spoločne vytvárajú tzv. hostiteľské geoprostredie ukladania, musia byť vysoko stabilné, homogénne, dostatočne suché, t.j. s minimálnou prítomnosťou vody (ktorá je najvýznamnejším transportným médiom pre migráciu rádionuklidov), ale tiež aj bez extrémnych tlakov a deformácií. Hlavné požiadavky hostiteľského geoprostredia pri budovaní HU RAO sú :

1. Vysoká pevnosť v tlaku zaručuje dlhodobú stabilitu vo všetkých etapách vývoja objektu HU RAO.

2. Vysoká tepelná vodivosť – vyžadujú sa maximálne hodnoty tepelnej vodivosti hornín kvôli permanentnému odvádzaniu uvoľňovaného tepla, jedná sa o tzv. zbytkový tepelný výkon.
3. Nízka tepelná rozťažnosť – ovplyvňuje tepelné zmeny v horninách.
4. Samotesniaca schopnosť v plastickom stave – má veľký význam pri utesňovaní a vyplňovaní puklinových horninových systémov.
5. Vysoká sorpčná kapacita – z hľadiska štruktúrnych zmien v horninách vplyvom migrácie rádionuklidov.
6. Malý stupeň nasýtenia podzemnou vodou - podzemná voda predstavuje vždy médium pre transport rádionuklidov na zemský povrch, z toho dôvodu sa vyžaduje čo najmenšia pórovitosť a priepustnosť hornín.
7. Minimum chemických reakcií – predovšetkým na interaktívnom rozhraní hornina-podzemná voda-obal RAO.

Tab. 1. Parametre charakterizujúce hypotetickú horninu vhodnú pre HU RAO.  
Tab. 1. Parameters specifying a hypothetic rock suitable for HU RAO.

Všeobecné charakteristiky hypotetickej horniny vhodnej pre HU RAO	
hydraulická vodivosť (koef. filtrácie)	$10^{-10}$ m.s <sup>-1</sup>
pórovitosť	2 – 3 %
hustota horniny	2500 kg.m <sup>-3</sup>
vzdialenosť od biosféry (zem. povrchu)	500 m
mechanická pevnosť	170 MPa
tepelná vodivosť	3,5 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

Z hľadiska vhodnosti hornín resp. hostiteľského prostredia sa pre HU RAO uvažujú predovšetkým nasledovné geologické formácie a horninové typy:

#### Granity

Granity vykazujú viaceré fyzikálno-mechanické a technologické vlastnosti, ktoré ich predurčujú pre HU RAO. Vyskytujú sa v spodných sférach lithosféry a preto majú nízky koeficient pórovitosti 0,5 %, nízky koeficient filtrácie v rozmedzí od  $10^{-11}$  do  $10^{-10}$  m.s<sup>-1</sup>, sú geochemicky stabilné a majú dobrú tepelnú vodivosť (koeficient tepelnej vodivosti sa pohybuje medzi 2,10 - 4,05 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>). Výskumom HU RAO do granitov sa zaoberajú mnohé podzemné vedecké laboratória vo Švédsku, Finsku, Kanade a Švajčiarsku.

Granitoidy sú jedným z prostredí, na ktoré sa sústreďuje pozornosť v rámci výberu vhodnej lokality pre budovanie hlbinného úložiska na Slovensku. Kryštalikum sa na Slovensku vyskytuje v jadrových pohoriach hlavného západokarpatského oblúka, ktorého centrálnu časť tvorí kryštalinické jadro zložené z kryštalických bridlíc, migmatitov a granitoidov. Granitoidy sú zastúpené stredne až hrubozrnnými porfyrickými granodioritmi až granitmi nízkej priepustnosti. Ich nadložie tvoria mladopaleozoické (grafitické bridlice s polohami vápencov) a mezozoické horniny (dolomity, vápence, bridlice a kremence). Tektonické narušenie sa prejavuje najmä šikmými posunmi na zlomoch.

#### Ílovité sedimenty

Ílovité sedimenty predstavujú široké spektrum jemnozrnných usadených hornín, ku ktorým patria ílovec, ílovité bridlice a íly, ktoré majú spravidla veľmi priaznivé technologické a fyzikálno-mechanické vlastnosti. Všeobecne majú nízku pórovitosť, priepustnosť, rozpustnosť a vysokú sorpčnú schopnosť i pri vysokých teplotách. Koeficient filtrácie býva zvyčajne okolo  $10^{-8}$  m.s<sup>-1</sup>. Tepelná vodivosť je pomerne nízka, dosahuje hodnoty 1,42 až 2,18 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> u ílov, 1,55 až 2,19 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> u ílovitých bridlíc [3]. Na druhej strane, často obsahujú vodu a majú všeobecne nízku mechanickú pevnosť, čo môže po technologickej stránke sťažiť budovanie podzemných diel a objektov konkrétneho HU RAO. Podzemné laboratória v ílových sedimentárnych formáciách majú vybudované v Belgicku, Francúzsku, Nemecku, Japonsku a Maďarsku. Ílovité sedimenty sa na Slovensku vyskytujú najmä ako súčasť karpatského flyšu, ktorý tvorí súvislé pásmo pri vonkajšom okraji Západných Karpát a rozsiahlymi výbežkami zasahuje i hlboko do centrálnych karpát. Zvodnenie ílovcov flyšu je veľmi slabé, výraznejšie zvodnenie majú len komplexy pieskocov a zlepcov. Pre svoj široký výskyt a vynikajúce vlastnosti sa s ílovitými sedimentami taktiež uvažuje ako o vhodných horninách pre budovanie hlbinného úložiska na Slovensku.

#### Soľné formácie

Výskum HU RAO orientovaný na soľné štruktúry, t.j. soľné dómy a vrstevnaté soľné formácie, je veľmi perspektívny, pretože soľné formácie predstavujú veľmi homogénne hostiteľské geoprostredie. Soľné telesá sú vo všeobecnosti extrémne nízko pórovité (0,5 %) a nepriepustné, s takmer nulovou priepustnosťou ( $10^{-23}$  až  $10^{-10}$  m.s<sup>-1</sup>). Budovanie a udržiavanie stability vydobytých priestorov predstavuje už značný problém, hlavne z hľadiska zabezpečenia výrubu vo väčších hĺbkach do 800 m. Výskum v oblasti HU RAO do soľných formácií je veľmi rozšírený v Nemecku a USA. Soľné formácie na Slovensku nie sú vhodné pre ukládanie RAO pre vysoký stupeň znečistenia.

## Tufy a tufity

Tufy vhodné pre HU RAO predstavujú dva hlavné typy, t.j. sopečné devitrifikované tufy, ktoré sú charakteristické vysokou objemovou hustotou, schopnosťou znášať vysoké tepelné zaťaženie, nízkou pórovitosťou a priepustnosťou, a nespečené zeolitické tufy, ktoré majú nízku hustotu, vysokú pórovitosť a priepustnosť, nízku tepelnú vodivosť a vysokú sorpčnú schopnosť. Uvedené horniny môžu vytvárať prirodzenú bariéru pre migráciu rádionuklidov a preto sa im venuje výskum hlavne v USA. Andezitové a ryolitové tufy tvoria na Slovensku Kremnické a Štiavnické vrchy, tufity sa vyskytujú hojne na obvodoch neogénnych vulkanických pohorí, napr. Kremnických, Štiavnických vrchov a na Poľane. S výstavbou úložiska rádioaktívnych odpadov sa v prostredí tufov a tufitov na Slovensku neuvažuje.

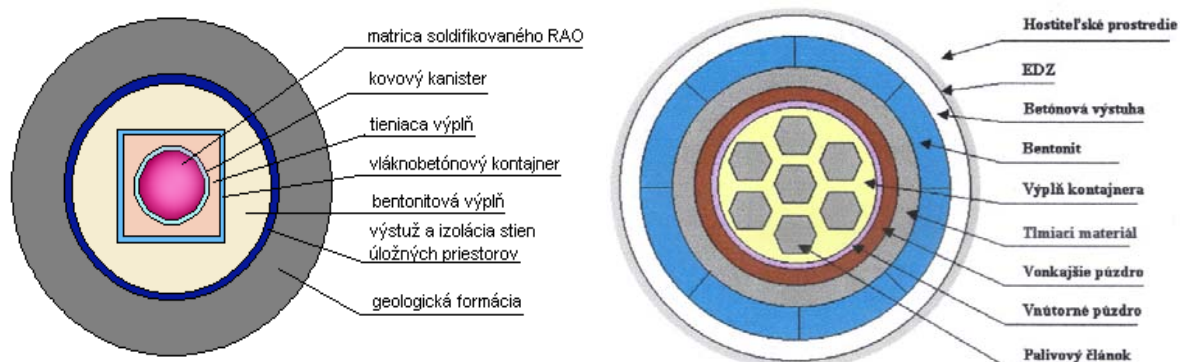
## Bazalty

Výhodou bazaltov je ich stredná tepelná vodivosť, dosahujúca 1,25 až 2,93 W.m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>, a schopnosť odolávať tepelnému zaťaženiu. Pre budovanie hlbinného úložiska je priaznivá i veľká mocnosť jednotlivých bazaltových prúdov (nad 50 m), ale nepriaznivým znakom je početný výskyt zón sekundárnej priepustnosti – zlomy, systémy puklín a trhlín, zvetraliny, medzi vrstvy sedimentov a pod. Výskumné laboratóriá sú vybudované v USA. Na Slovensku sa bazalty vyskytujú len zriedka a väčšinu vulkanických hornín tvoria najmä andezity, ktoré nie sú vhodné HU RAO.

## Princípy multibariérového systému hlbinného ukladania vysoko aktívnych odpadov.

Systém viacnásobnej ochrany, tzv. multibariérový systém (MBS), je navrhovaný pre technické projekty prevádzok hlbinného ukladania rádioaktívnych odpadov. Systém využíva spolupôsobenie viacerých prirodzených a umelých technických bariér/prekážok, ktorých účelom je zamedziť resp. úplne zabrániť migrácii uvoľnených rádionuklidov v celom systéme HU RAO.

MBS predpokladá, že vysoko aktívne rádioaktívne odpady budú pred ich uložením do podzemia upravené do jednej zo stabilných a chemicky nerozpustných foriem (proces vitifikácie alebo soldifikácie). Takto pred pripravený RAO je vkladán do „špeciálnych kovových resp. oceľových nádob“ - kovových kanistrov, ktoré sú ukladané do vláknobetónových kontajnerov. Tieto kontajnery sú predmetom samotného ukladania do vopred pripravených horizontálnych alebo vertikálnych podzemných diel, ktoré predstavujú špeciálne objekty a priestory ukladania opatrené hydroizolačnými nátermi a vrstvami prekrytia ílovitými materiálmi. V zásade poslednou umelou technickou prekážkou/bariérou je stavebná konštrukcia, t.j. výstuž a vystrojenie priestoru ukladania RAO, vrátane hydroizolácie. Poslednou prekážkou je prirodzená bariéra tvorená horninou vyskytujúcou sa v konkrétnom geoprostredí, v ktorom HU RAO budované (obr.2).



Obr. 2. Multibariérový systém.  
Obr. 2. Multibarrier system.

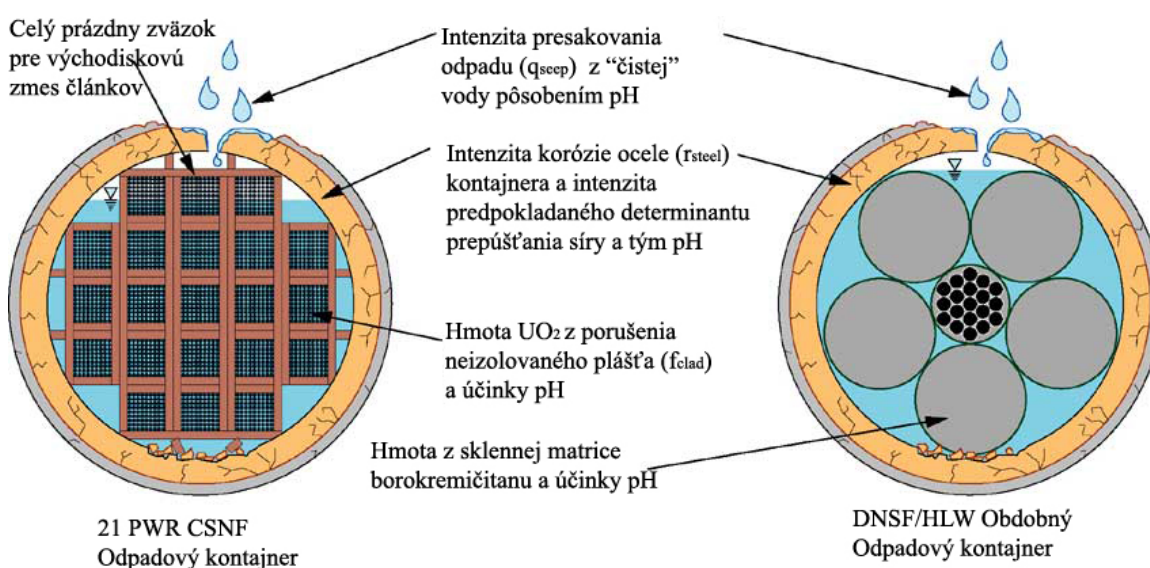
Všetky jednotlivé prvky multibariérového systému ochrany – tak technické ako aj prirodzené horninové prostredie, sú vo vzájomnej interakcii a navzájom spolupôsobia takým spôsobom, aby izolovali rádionuklidy od biosféry. Umelo vytvorené technické bariéry sú neporovnateľne menšie ako horninová bariéra, ale sú navrhované takým spôsobom, aby v kombinácii s vlastnosťami týchto bariér účinne pôsobili proti vniknutiu podzemnej vody a migrácii rádionuklidov pri prípadnom porušení obalu odpadu.

Pred uložením RAO do podzemia je potrebné vykonať úpravu rádioaktívneho odpadu, to znamená previesť konkrétny druh odpadu do bezpečnejšej formy, ktorá zabezpečí jeho dlhodobú stálosť a eliminuje jeho negatívne vplyvy na životné prostredie. Fixačný materiál musí vykazovať požadované vlastnosti napr.

vysoká hustota, vysoká tepelná vodivosť, vysoká mechanická pevnosť a dlhodobá stabilita, chemická odolnosť, odolnosť voči rádioaktívnemu žiareniu, ale rovnako musí byť inertný voči odpadu. Medzi jednoduché metódy úpravy RAO patria – cementácia (ako soldifikačná metóda, ktorá využíva rôzne druhy cementov), –bitumenácia (aplikujú sa roztavené bitúmeny a asfaltové živice), – vitrifikácia (metóda pre soldifikáciu kvapalných vysokoaktívnych odpadov s využitím kremičitanového skla),

Samostatným technickým riešením sa vyznačujú obaly pre rádioaktívne odpady, ktoré predstavujú umelú bariéru vytváranú za účelom izolácie a odtienenia rádionuklidov od okolia a na uľahčenie manipulácie pri doprave a skladovaní odpadu. Pri konštrukcii a výrobe kontajnerov sa pri HU RAO používajú v súčasnosti dva hlavné typy materiálov (obr. 3):

- Ušľachtilé zliatiny Ti, Ni, Cu, Zr, s veľmi nízkou rýchlosťou korózie (napr. zliatina titánu TiCode -12 s 0,3 % Mo, 0,8 % Ni a 0,2 % O<sub>2</sub>, ďalej zliatiny niklu ako Inconel-625, Incoloy-825 a Hastelloy - C276 a zliatina zirkónu Zircoloy-2, ktoré sú veľmi vhodnými materiálmi pri výrobe kontajnerov).
- bežné materiály z uhlíkatých ocelí, ktoré sú málo odolné voči korózii (tieto kontajner sú hrubostenné - hrúbky 25 mm, zabezpečujú dostatočné tienenie rádioaktívneho žiarenia a nevyžadujú si dodatočné tienenie kontajnerov olovom, ochudobnených uránom alebo barytbetónom, ako v prípade tenkostenných kontajnerov).



Drawing Not To Scale  
00050DC-ATP-Z1S42-171.ai

Obr. 3. Izolácia odpadov v kontajneri.  
Obr. 3. Isolation of nuclear waste container.

### Technické požiadavky a materiály používané pri MBS ochrany

Systém viacnásobnej inžinierskej a prirodzenej ochrany je vytvorený - úpravou RAO do formy odolnej vylúhovaniu vodou, - uložením takto upravených RAO do kovových alebo betónových proti koróznym kontajnerom, - ich umiestnením a utiesnením do špeciálne upravených podzemných priestorov, - vyplnením voľného priestoru materiálmi dlhodobo zabezpečujúcimi redukčné podmienky a vysokú hodnotu pH prostredia, pri ktorých je nízka rozpustnosť kľúčových rádionuklidov, a hostiteľským geologickým prostredím [Matejovi4]

V existujúcich technických projektoch sa jedná o na sebe nezávislé bariéry, ktoré využívajú rôzne materiály pre samotnú ochranu rádioaktívneho paliva (napr. zirkóniová vrstva odolávajúca veľmi vysokým teplotám), ako aj špeciálne materiály pre konštrukciu kontajnerov (napr. silná vrstva uhlíkovej oceli, alebo vysoko koróziu vzdorný materiál, ako sú meď, titán, nikel). Uvedené materiály zaručujú pomerne vysokú životnosť kontajnerov a to v intervale 500 až 1 000 000 rokov (medený kontajner). Podobným spôsobom sa hľadajú aj nové tesniace a výplňové materiály, ktoré vo svojej zhutnenej forme takmer neprepúšťajú vodu. Pre vyplnenie okolitého voľného priestoru sa používajú materiály, ktoré dlhodobo zabezpečia vhodné

mechanické a chemické vlastnosti prostredia (plasticnosť, redukčné podmienky a zásaditú reakciu prostredia), pri ktorých je nízka rozpustnosť rádionuklidov.

Ďalej sú to špeciálne materiály, ktoré sa používajú vo funkcii zábran proti vniknutiu moderátorov (látky slúžiace k spomaľovaniu neutrónov) jadrového paliva. Jednotky vyhoreného paliva majú spravidla rôzny tvar a obsahujú bariéry na zamedzenie prenikania vlhkosti. Pre obloženie kontajnerov sa aplikujú „tlmiace“ materiály na báze bentonitov, ktoré predstavujú prírodné dlhodobostabilné materiály vhodné do každého priestoru ukladania – veľkoprofilové vrty, jamy a chodby / tunely. Tieto materiály znižujú namáhanie kontajnerov, priestorovo ich stabilizujú, odvádzajú teplo kontajnerov do hostiteľskej horniny, zachytávajú jemné častice a koloidy, zabezpečujú nízku hydraulickú vodivosť, vytvárajú predpoklady pre difúzný transport látok a chemicky stabilizujú zloženie podzemnej vody.

### **Komplex hlbinného úložiska rádioaktívneho odpadu a jeho stavebná konštrukcia**

Podzemné priestory ukladania RAO, ktoré musia vyhovovať požiadavkám dlhodobej stability, musia zabezpečiť dostatočný odvod tepla a musia zabrániť prenikaniu podzemných vôd, budované špeciálnymi metódami s použitím vhodných konštrukčných, izolačných a drenážnych materiálov, predstavujú systém stavebnej konštrukcie HU RAO. Sústava podzemných diel, priestorov a objektov, ktorá tvorí komplex pre ukladanie RAO je projektovaná v kombinácii s použitými špeciálnymi materiálmi – betóny, hydrofóbné izolačné nátery, drenážne štrkové vrstvy, zásypové a utesňujúce materiály inžinierskej výplne (napr. Na - bentonity, Ca - bentonity, illity v zmesi s kremenným pieskom), prísady zlepšujúce vlastnosti výplňových zmesí, prefabrikované tvárnice a mnohé iné výstavbové konštrukčné materiály. Všetky uvedené materiály spolu s kombináciou foriem RAO, obalových kanistrov a kontajnerov, t.j. inžinierskej výplne, zaručujú spoľahlivú fixáciu rádioaktívnych odpadov na dobu viac než 500 000 rokov, čo potvrdzujú aj výskumy vykonávané na špecializovaných výskumných pracoviskách. Pritom sú konkrétne stavebné konštrukcie multibariérového systému ochrany kontinuálne vyvíjané, overované a testované v podzemných laboratóriách HU RAO metódami In-situ, a v súčasnosti existuje koordinovaná medzinárodná spolupráca krajín využívajúcich jadrovú energiu v mnohých vedecko-výskumných projektoch.

Hlbinné úložisko rádioaktívneho odpadu HU RAO predstavuje komplex podzemných inžinierskych diel a priestorov, ktorého základnou funkciou je bezpečne odizolovať rádioaktívne odpady od biosféry a zabrániť tak ich vplyvu na životné prostredie a na človeka po tisíce rokov. V rámci vybudovania HU RAO je dôležité technicky správne naprojektovať – prístupové diela spájajúce povrchové a podzemné objekty HU RAO, a zabezpečujúce, v kombinácii s ostatnými podzemnými dielami, všetky potrebné systémy pre prevádzku HU RAO, vrátane dopravy ľudí, materiálov, médií a kontajnerov RAO. V sústave podzemných diel a priestorov zohrávajú veľmi dôležitú úlohu:

- výstužné konštrukčné prvky, ktoré zabezpečujú požadovanú stabilitu diel v interaktívnom systéme „hornina – výstuž“.
- systémy vetrania a odvodňovania, pretože sa jedná o špecifické prostredie,
- monitorovacie systémy priestorov a objektov počas celej životnosti HU RAO,
- technologické možnosti dopravy a manipulácie s kontajnermi,
- prijaté stratégie utesňovania diel a priestorov, predovšetkým z hľadiska minimalizácie prítomnosti vody a hydraulickej vodivosti v podzemnom úložnom systéme,
- dlhodobá bezpečnosť úložiska VAO a VJP, ktorá sa hodnotí prediktívnym modelovaním postupného narušovania inžinierskych bariér a následného transportu rádionuklidov do životného prostredia.

### **Zásadné kritériálne podmienky hlbinného úložiska RAO.**

Podstatou všetkých koncepcií HU RAO je komplexná analýza vplyvov pôsobenia RAO na rozhraní základnej interakcie „ochranný obal – odpad“, t.j. na úrovni jednotlivých prvkov multibariérového systému a ukladaneho rádioaktívneho odpadu. Pretože MBS ochrany pred šírením sa rádionuklidov do životného prostredia predstavuje konkrétne definovaný proces, je uvedený proces možné riešiť modelovým výskumom časových a priestorových súvislostí ukladania, so zámerom využiť výsledky modelu pri navrhovaní technických a bezpečnostných opatrení a pre návrh systémov monitorovania environmentálnych vplyvov procesu HU RAO.

Z hľadiska hostiteľského prostredia je pre vybudovanie HU RAO dôležité posúdiť nasledovné základné kritéria:

- Hostiteľské prostredie – definovať ho geologicky, geomechanicky, geotektonicky, geotechnicky a hydrogeologicky.
- Priesakové vody – prehodnotiť mikroštruktúru minerálov a makroštruktúru hornín.
- Porušenosť hornín – vo vzťahu k prenosu tepelne energetického signálu.



- Interaktívny systém "hornina – odpad" z hľadiska MBS ochrany.
- Reklasifikácie horninových typov .
- Viskózne-elastické a viskózne-plastické stavy hornín hostiteľského prostredia.
- Tesniace a izolačné vlastnosti hornín.
- Prenos tepla v horninách.

Vyhodnotenie uvedených kritérií umožní spracovať katalóg kritériálnych podmienok pre určovanie vhodnosti hostiteľského horninového prostredia a pre vytypovanie vhodných lokalít ukladania rádioaktívnych odpadov v rôznych geologických podmienkach. Zároveň umožní vypracovať metodiku pre posudzovanie a určovanie kritických rozhraní v systéme viacnásobnej prirodzenej a inžiniersko-technickej ochrany, vrátane technických riešení a technologických opatrení pre systém ukladania RAO do hlbinných štruktúr .

### Záver

Súčasťou kritérií je stanovenie funkčných vzťahov pre tvorbu modelov ukladania rádioaktívnych odpadov do podzemia, a to hlavne modelovania napätového stavu uvažovaného hostiteľského prostredia HU RAO, ďalej modelovania priesakov vody v problematických granitoidných a ílovitých horninách. Samostatným problémom bude modelovanie procesov porušenia hostiteľského prostredia z hľadiska prenosu energetických signálov horninách a vytvorenie modelu MBS ochrany. V programe vývoja HU RAO budú rozhodujúce projektové a realizačné činnosti, určenie tzv. zdrojového člena VAO a stanovenie poľa blízkych a vzdialených interakcií, výber miesta ukladania, bezpečnostné rozbory, legislatívne aspekty a zapojenie verejnosti.

### Literatúra – References

- [1] Bauer,V. et al: Výskum procesov hlbinného ukladania rádioaktívnych odpadov a zisťovanie vplyvov multibariérového systému ukladania na environment. *Záverečná správa vedeckého projektu VEGA, TU Košice, 2005.*
- [2] Bielecki, R.: Teilanalyse über die Anwendung der Flammenschmelz-technologie zur Herstellung von Teufen > 1000 m für Ablagerungen von radioaktiven Abfällen im Untergrund. *Dissertationsarbeit, TU Košice, F BERG, 2006.*
- [3] Matejovič, I., Prítrský, J., Salzer,P.: Vývoj hlbinného úložiska pre vyhorené jadrové palivo a vysokoaktívne odpady v SR. *Zborník konferencie Zneškodňovanie a uskladňovanie odpadov v zemskej kôre a podzemných priestoroch. TU Košice, F BERG, Nízke Tatry- Vyšná Boca, 2000.*