

ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

NUCLEAR WASTE DISPOSAL

Lucija Nađ, Boris Kavur ^{1*}

¹ Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: boris.kavur@gmail.com

Sažetak: U radu se obrađuju problematika i mogućnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada (RAO). Prikazane su različite strategije odlaganja RAO, svjetska iskustva i praksa te neki geotehnički aspekti problematike odlaganja RAO. Daje se osvrt na problem izbora lokacije odlagališta i provedbu istražnih radova. Opisan je koncept dubokog geološkog odlagališta i primjena višestrukih barijera za izolaciju RAO. Navode se prikladni tipovi matičnih stijena za smještaj odlagališta uključujući geološke i hidrogeološke uvjete koje treba pružiti odabrana geološka formacija. Također se opisuju načini i nužni uvjeti za plitko odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada. Prikazuju se i mogućnosti za preliminarnu procjenu sigurnosti odlagališta RAO. Daje se osvrt na situaciju u Hrvatskoj u pogledu rješavanja aktualnog problema izbora lokacije budućeg skladišta i odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada.

Gljučne riječi: odlaganje radioaktivnog otpada, izbor lokacije odlagališta, procjena sigurnosti odlagališta.

Abstract: The paper discusses issues and possibilities for nuclear waste (NW) disposal. Various strategies, international experience and practice in NW disposal as well as geotechnical aspects of the disposal are shown. It provides an overview on the problem of site selection for NW repository and implementation of exploratory works. The paper describes the concept of a deep geological repository and the application of multiple barriers for NW isolation. Suitable types of host rocks including geological and hydrogeological conditions in the selected geological formation are discussed. It also describes the methods and necessary conditions for shallow disposal of low and intermediate level NW. Possibilities for a preliminary assessment of the safety of NW repository are also discussed. It provides an overview of the situation in Croatia regarding the current problem of site selection for a future storage and disposal site of low and intermediate level nuclear waste.

Keywords: nuclear waste disposal, selection of disposal site, safety assessment of deep geological repository.

Received: 09.11.2016 / Accepted: 01.12.2016

Published online: 14.12.2016

Pregledni rad / Review paper

1. UVOD

Radioaktivni otpad (RAO) nastaje u različitim fazama nuklearnog ciklusa koji započinje eksploatacijom ruda urana i njihovim kemijskim oplemenjivanjem odnosno obogaćivanjem, proizvodnjom i reprocesiranjem nuklearnog goriva za pokretanje nuklearnih reaktora, proizvodnjom nuklearnog oružja, radom nuklearnih reaktora i trošenjem nuklearnog goriva, rastavljanjem odsluženih reaktora i oružja, u znanstvenim institutima koji se bave nuklearnim istraživanjima, primjenom izvora zračenja u medicini, industriji itd. Nuklearne elektrane su glavni proizvođači RAO-a. Treba reći da se strogo uzevši prema definiciji RAO-a u takav otpad ne svrstavaju prirodno radioaktivni materijali (npr. rudnička jalovina) kao ni istrošeno nuklearno gorivo (ING) iz nuklearnih reaktora.

Problematika odlaganja RAO u mnogome je slična problematici odlaganja opasnih, visoko toksičnih otpada, ali ima određene specifičnosti. Količine RAO-a su relativno male u odnosu prema količinama konvencionalnih otpada.

Glavni cilj odlaganja je sigurno uskladištiti i izolirati RAO od biosfere odnosno onemogućiti njegove štetne utjecaje na zdravlje čovjeka i okoliš. Zbog specifičnih svojstava koje RAO posjeduje, osobito visoko radioaktivni otpad (VRAO), njegovo odlaganje zahtjeva poseban pristup i odgovarajuća, visoko pouzdana

tehnička rješenja. Zbog velikog broja međudjelujućih procesa koji su uključeni u proces odlaganja RAO, sustavi odlaganja i zaštite su vrlo kompleksni, a mogućnosti za sanaciju okoliša u slučaju nuklearnih havarija su vrlo ograničene. Osim toga, potreban životni vijek dubokog geološkog odlagališta VRAO mjeri se desecima tisuća godina, a to znatno nadilazi zahtjeve klasičnih građevinskih i okolišnih projekata (Gens i Thomas 2006).

Cilj ovog rada je prikazati različite strategije odlaganja RAO, svjetska iskustva i praksu te neke geotehničke aspekte problematike odlaganja. U radu će se dati osvrt na problematiku određivanja lokacije odlagališta RAO i provedbu istražnih radova. Opisat će se koncept višestrukih barijera za izolaciju RAO i prikladni tipovi matičnih stijena za smještaj odlagališta te geološki i hidrogeološki uvjeti koji trebaju biti osigurani. Osim toga prikazat će se i mogućnosti za preliminarnu procjenu sigurnosti odlagališta RAO.

Na kraju rada daje se i osvrt na situaciju s RAO-om u Hrvatskoj i aktualni problem nepostojanja definitivne lokacije za skladištenje i odlaganje niskog i srednje radioaktivnog otpada.

2. PRIPREMA RAO ZA SKLADIŠTENJE I ODLAGANJE

RAO najvećim dijelom nastaje u nuklearnim elektranama i postrojenjima za proizvodnju i reprocesiranje nuklearnog goriva. Osim toga određene manje količine RAO nastaju i u istraživačkim institutima, industriji i medicini, te vojnoj industriji.

Grubu podjelu RAO u svrhu njegovog zbrinjavanja moguće je napraviti na temelju aktivnosti i udjela radionuklida u otpadu te njihovom vremenu poluraspada. RAO se tako najčešće svrstava u sljedeće razrede:

a) Nisko radioaktivni otpad, skrać. NRAO (eng. Low Level Waste, LLW) – sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada, male specifične aktivnosti i zanemarivim udjelom radionuklida s dugim vremenom poluraspada. Ovakav otpad obično se zbrinjava u površinskim ili plitkim podzemnim odlagalištima.

b) Srednje radioaktivni otpad, skrać. SRAO (eng. Medium or Intermediate Level Waste, MLW ili ILW) – može imati znatnu radioaktivnost i sadržavati kratkoživeće, ali i dugoživeće radionuklide. Ako sadrži zanemariv udio dugoživećih radionuklida zbrinjava se na isti način kao i NRAO. U protivnom bi se trebao odlagati u dubokim geološkim odlagalištima.

c) Visoko radioaktivni otpad, skrać. VRAO (eng. High Level Waste, HLW) – sadrži veliki udio dugoživećih radionuklida u obliku fisijskih produkata i transuranijskih elemenata koji se stvaraju u jezgri reaktora. Osim visoke razine radioaktivnosti VRAO proizvodi značajne količine topline te zahtijeva izolaciju i hlađenje što znatno komplicira njegovo odlaganje. VRAO treba biti konačno odložen u dubokim i stabilnim geološkim odlagalištima.

S obzirom na volumen ukupno nastalog RAO u svijetu, na NRAO otpada čak 90% proizvedenog otpada, SRAO oko 7% i VRAO svega 3% ukupnog volumena ili oko 10 tisuća t/god (Mc Combie i dr. 2000). Međutim, radioaktivnost VRAO čini 95% ukupne radioaktivnosti, a NRAO ima tek 1% radioaktivnosti. NRAO obično čine kontaminirani alati i radna odjeća, a SRAO metalni otpad iz postrojenja nuklearne elektrane, filtri od procesa pročišćavanja radioaktivne vode i dr.

Treba razlikovati skladištenje od odlaganja radioaktivnog otpada. Pod skladištenjem se podrazumijeva privremeno čuvanje RAO u prikladno izoliranom i nadziranom prostoru kroz kraće ili dulje vrijeme koje prethodi njegovom konačnom odlaganju. ING se tako prvo skladišti u bazenu s vodom, neposredno uz reaktor, a zatim u suhom skladištu koje se obično nalazi na prostoru nuklearne elektrane. Vrijeme skladištenja ING-a se planira na razdoblje od više desetaka godina. Tijekom skladištenja ING se hladi, a radioaktivnost mu znatno opada čime se olakšava njegovo konačno zbrinjavanje. Nakon 40 godina radioaktivnost ING-a opada na tisućinku početne vrijednosti (WNA 2016), ali radi se još uvijek o vrlo visokim razinama radioaktivnosti. Kratkoživeći radioaktivni otpad može se skladištiti dok mu aktivnost ne opadne toliko da se smije kontrolirano ispuštati u okoliš ili odlagati kao običan otpad. Odlaganje podrazumijeva trajno zbrinjavanje RAO pri kojem se RAO izolira od biosfere korištenjem niza inženjerskih barijera uključujući i geološku formaciju.

Prije samog skladištenja i odlaganja RAO se podvrgava prikladnim postupcima obrade i kondicioniranja. Predobrada uključuje sakupljanje i razvrstavanje otpada u skladu s mogućnostima naknadnog odlaganja, te dekontaminaciju i eventualno manju kemijsku promjenu. Obrada RAO uključuje različite postupke kao npr. kompaktiranje, spaljivanje, isparavanje, filtriranje i odvajanje, kojima je cilj promjena svojstava i sastava otpada radi smanjenja volumena i povećanja sigurnosti i ekonomičnosti skladištenja i odlaganja. Kondicioniranje RAO uključuje postupke imobiliziranja i pakiranja (slika 1).



Slika 1. Kontejner s metalnim dvjestolitarskim bačvama za pakiranje RAO u odlagalištu Olkiluoto u Finskoj.



Slika 2. Metalni spremnici za istrošeno nuklearno gorivo u budućem odlagalištu VRAO i ING u Finskoj.

Imobilizacija tekućeg otpada podrazumijeva njegovu solidifikaciju (zalijevanje) u betonsku ili bitumensku matricu odnosno ako se radi o VRAO vitrifikaciju (ostakljivanje) u staklenu matricu. Imobilizirani RAO se zatim smješta u čelične bačve ili druge posebno konstruirane spremnike s debelim stjenkama. Na slici 1 prikazan je kontejner s čeličnim dvjestolitarskim bačvama koje se koriste za pakiranje nisko i srednje radioaktivnog otpada u odlagalištu Olkiluoto u Finskoj.

Na **slici 2** prikazani su metalni spremnici za pakiranje istrošenog nuklearnog goriva koji će se koristiti u budućem dubokom geološkom odlagalištu za VRAO Onkalo u Finskoj. Na **slici 2** lijevo je prikazan čelični spremnik u koji se smješta 12 gorivnih elemenata, a desno na istoj slici prikazan je vanjski zaštitni spremnik od bakra koji obuhvaća čelični spremnik.

3. ODLAGANJE RAO

Odabir lokacije budućeg odlagališta RAO je dugotrajan i skup proces na koji utječu brojni čimbenici. U početnoj fazi potrage za lokacijom budućeg odlagališta nastoji se primjenom različitih isključivih kriterija, koji se prvenstveno odnose na geološke (litologija, tektonika, seizmika i dr.), hidrogeološke i hidrološke uvjete, eliminirati široka područja obzirom na postavljene kriterije. U sljedećoj fazi nastoji se rangirati potencijalne lokacije korištenjem različitih usporedbenih kriterija. Ako je na raspolaganju više potencijalnih lokacija, među kriterijima koji utječu na odabir, najvažniji bi trebao biti kriterij prirodne pogodnosti terena za lociranje odlagališta i izolaciju otpada radi sprječavanja širenja onečišćenja u okoliš.

Proces odabira lokacije bi trebala usmjeravati „struka“, ali on mora biti transparentan, javan i demokratičan, tako da uključuje sve dionike procesa, od Vlade i političkih stranaka do šire javnosti i naravno lokalne zajednice. Od samog početka treba jasno postaviti ciljeve, tehničke i druge zahtjeve te kriterije, koji će se primjenjivati tijekom procesa odabira lokacije. Osim tehničkih čimbenika na konačan odabir lokacije odlagališta prevladavajući utjecaj ipak imaju politika i stav društvene zajednice.

Na odabranoj lokaciji/lokacijama budućeg odlagališta istražnim radovima treba utvrditi sve relevantne značajke matične stijene i ostatka geosfere. Program istražnih radova je potrebno smisljeno planirati, obično po fazama, te voditi, nadzirati i prilagođavati tijekom samih radova ovisno o rezultatima istraživanja.

Rezultati istraživanja bi trebali potvrditi značajke matične stijene kao i šire geosfere koje se od njih očekuju. Istražni radovi za lokaciju budućeg odlagališta RAO su slični rudarskim istraživanjima, ali ipak imaju bitne specifičnosti. Ovdje je glavni naglasak na detaljnoj geološkoj karakterizaciji strukture matične stijene i njene propusnosti. Mehanička svojstva stijene, iako značajna, ovdje ipak imaju manji prioritet. Istražni radovi obično uključuju bušenje dubokih bušotina s kontinuiranim jezgrovanjem nabušenih stijena te terenske pokuse vodopropusnosti. Istražnim programom treba favorizirati nerazorne tehnike ispitivanja tj. geofizičke metode (seizmika, geoelektrika, georadar i dr.) kako se ne bi otvarali novi, preferencijalni putevi za kasniju migraciju onečišćenja (Gens i Thomas 2006). Detaljna karakterizacija matične stijene bit će omogućena tek nakon izgradnje pristupnih okana i horizontalnih prostorija odlagališta. Istražni radovi su vrlo skupa investicija u koju se kreće s neizvjesnim ishodom. Primjera radi, Njemačka je počevši od 1979. investirala 1,5 milijardi Eura u istraživanja ležišta soli u Gorlebenu (WNA 2016) da bi se utvrdilo je li ta lokacija sigurna za buduće duboko

geološko odlagalište. Gorleben se još uvijek smatra samo potencijalnom lokacijom odlagališta VRAO (WNA 2016).

Dubina budućeg odlagališta s jedne strane ovisi o vrsti RAO i regulatornim zahtjevima za dugoročnu sigurnost, a s druge o specifičnim značajkama lokacije i projektiranog sustava za odlaganje. Razlikujemo tako površinska (na površini terena) i plitka odlagališta (dubine do nekoliko desetaka metara) te duboka geološka odlagališta u stabilnim, slabopropusnim formacijama koja se planiraju graditi na dubinama od nekoliko stotina metara od površine terena. Pojedine zemlje razmatraju odlaganje svih vrsta RAO, uključujući i NRAO, u duboka geološka odlagališta jer smatraju da će se veći troškovi odlaganja kompenzirati s povećanjem sigurnosti za ljude i okoliš (Gens i Thomas 2006).

U svijetu se danas razmatraju dvije mogućnosti dubokog geološkog odlaganja. Prva i vjerojatno realnija mogućnost je izrada kopanog ili rudarskog podzemnog odlagališta, a druga je odlaganje RAO u duboke bušotine izbušene s površine terena.

Slika 3 prikazuje tipični koncept kopanog odlagališta koji prvo podrazumijeva izradu dubokih okana do dubine matične stijene koja može iznositi i nekoliko stotina metara. Dubina pristupnih okana kontrolirana je naravno lokalnim geološkim uvjetima. Na razini matične stijene zatim se izrađuju horizontalne prostorije (tuneli) koje služe za pristup do odlagališnog prostora. Spremnike s RAO-om moguće je odlagati u horizontalne ili vertikalne prostorije koje se kopaju ili buše iz pristupnih tunela. Prostor između matične stijene i spremnika se ispunjava prikladnim brtvjenim materijalom (npr. bentonitna ispunja).

Sigurnost dubokog geološkog odlagališta primarno ovisi o prirodnim značajkama matične stijene. Dok inženjersku barijeru možemo izgraditi prema projektnim specifikacijama, na prirodne značajke geološke barijere ne možemo bitnije utjecati. Zbog toga je vrlo važno posvetiti dužnu pažnju izboru lokacije odlagališta i njenoj karakterizaciji odnosno provesti odgovarajuće istražne radove.

Matična stijena treba pružiti stabilne hidrauličke, mehaničke i geokemijske uvjete u prostoru budućeg odlagališta. Da bi se ti uvjeti ispunili, geološka formacija bi trebala imati dovoljnu debljinu, dubinu i protezanje, tektonsku stabilnost (daleko od aktivnih rasjeda) i nisku seizmičku aktivnost, jednostavnu građu i litološku homogenost, nisku vodopropusnost i niske hidrauličke gradijente, te odgovarajuća svojstva retencije radionuklida (Gens i Thomas 2006).

Geološke formacije koje najčešće ispunjavaju navedene uvjete su eruptivne stijene, glinovite stijene (plastične gline i glinenci) i ležišta kamene soli (Gens i Thomas 2006).

Eruptivne stijene (npr. graniti) karakterizira slaba propusnost (pod uvjetom niske ispucalosti), visoka kemijska stabilnost, niska ekonomska vrijednost stijene, kao i značajna čvrstoća. Iskop je zato relativno jednostavan i zahtijeva minimalnu podgradu, ali neprikladna tehnika iskopa može uzrokovati stvaranje novih pukotina koje nemaju mogućnost samozacjeljenja. Ove vrste matičnih stijena se razmatraju u mnogim europskim zemljama (Češka, Finska, Švedska, Francuska, Španjolska,

Švicarska, Ukrajina) kao i drugdje (Kanada, Kina, Indija) (Whiterspoon 1996).

Glinovite stijene koje su interesantne za duboko geološko odlaganje kreću se u širokom rasponu od plastičnih gлина do glinenaca. Njihovo ponašanje u vezi pronosa radionuklida je posve drugačije od eruptivnih stijena. Plastične gline imaju sposobnost samozacijeljenja pukotina koje se mogu pojaviti tijekom gradnje (Barnichon i Volckaert 2002) ili u drugim fazama eksploatacije odlagališta. Pukotine u glinencima pak mogu ostati otvorenim kroz dugi vremenski period. Glinovite stijene općenito karakteriziraju niska vodopropusnost i značajna svojstva usporavanja pronosa otopljenih tvari. Njihova čvrstoća nije velika te je zbog toga potrebna značajna količina podgrade tijekom iskopa i gradnje podzemnih prostorija. U glinencima može biti problematična pojava pukotina tijekom iskopa. Njihov kapacitet samozacijeljenja je nepouzdan, a mahom ovisi o udjelu bubrivih minerala i njihovom stupnju cementacije. Glinovite stijene su također osjetljive na kemijske promjene kao npr. pojavu oksidacije tijekom ventilacije odlagališta. Ovi tipovi stijena se razmatraju za potrebe dubokog geološkog odlaganja u Bjelorusiji, Belgiji, Francuskoj, Mađarskoj, Španjolskoj i Švicarskoj (Whiterspoon 1996).

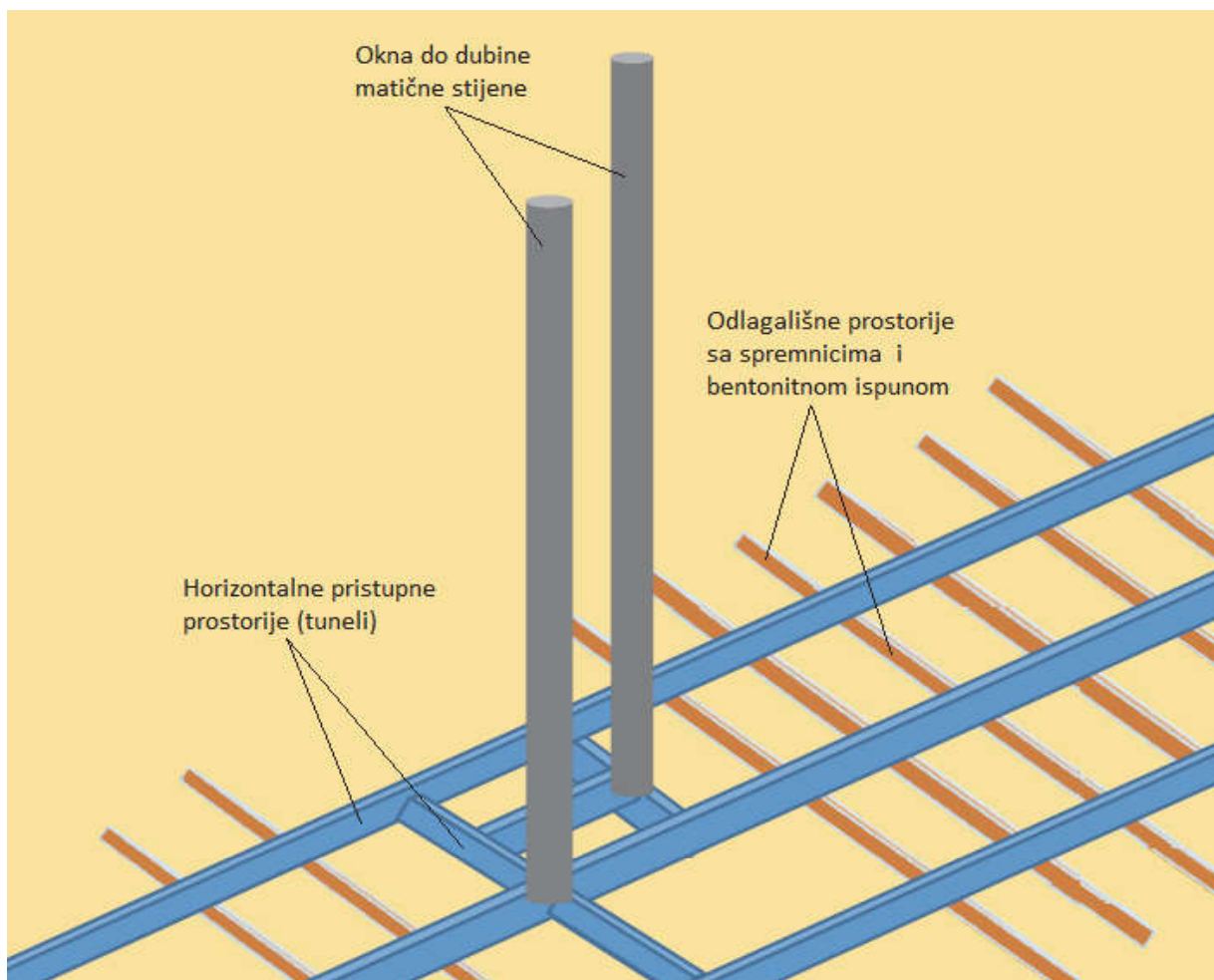
Kamena sol također ima vrlo nisku propusnost, a zbog značajnog puzanja (povećavanje deformacija pri kon-

stantnom opterećenju) sol vjerojatno ima sposobnost samozacijeljenja (Gens i Thomas 2006). Odlagalište građeno u ležištima kamene soli je vrlo osjetljivo na eventualne prodore svježe vode zbog opasnosti izluživanja soli. Osim toga, podzemne prostorije u kamenoj soli mogu zahtijevati ugradnju podgrade. Zemlje koje istražuju ovu mogućnost su Njemačka, Bjelorusija, Danska, Nizozemska i Ukrajina (Whiterspoon 1996).

Da bi se osigurao zahtijevani stupanj izolacije RAO, projekti dubokih geoloških odlagališta općenito usvajaju koncept višestrukih barijera. Dvije glavne komponente takvog koncepta su inženjerski barijerni sustav (IBS) i prirodna (geološka) barijera.

IBS podrazumijeva čvrstu matricu otpada (npr. vitrificirani RAO), metalni spremnik i odgovarajući materijal ispunne koji se nalazi u prostoru između spremnika i matične stijene. Prirodnu barijeru čine matična stijena i ostatak geosfere sa sustavom podzemne vode koji okružuju odlagalište (Gens i Thomas 2006).

Izvorno se promišljalo da bi svaki element inženjerskog barijernog sustava trebao biti projektiran tako da pruži dovoljnu izolaciju sam po sebi, tako da bi do značajnog ispuštanja radionuklida u okoliš moglo doći tek nakon što svi elementi sustava zakažu. Takav pristup je prerestriktivan i vjerojatno nemoguć za ostvariti. Razumnije je razmatrati ukupno djelovanje svih elemenata barijernog sustava (Gens i Thomas 2006).



Slika 3. Koncept dubokog geološkog odlagališta RAO.

Postojeći koncepti višestrukih barijera za duboka odlagališta VRAO općenito predviđaju bentonitnu ispunu u prostoru između spremnika i matične stijene. Vitrificirana matrica otpada tj. staklo bi trebalo imati visoku otpornost na radioaktivno djelovanje i koroziju. Sljedeći element barijernog sustava je metalni spremnik (slika 2) koji bi trebao jamčiti dugotrajnu izolaciju RAO od nekoliko tisuća godina. Produkti koji nastaju korozijom spremnika bi trebali osigurati povoljne kemijske uvjete za izolaciju otpada u ovakvom sustavu. Da bi sustav bio što dugovječniji u nekim projektima predviđa se korištenje spremnika od bakra ili titana za koje se procjenjuje da mogu izolirati RAO i nekoliko desetaka tisuća godina (Gens i Thomas 2006).

Bentonitna ispunna (barijera) ispunjava nekoliko važnih funkcija u sustavu dubokog odlagališta. Kao prvo ograničava dotok vode zbog vrlo niske hidrauličke provodljivosti. Značajno usporava pronos otopljenih tvari zbog niskog koeficijenta difuzije i dodatnog visokog kapaciteta sorpcije. Osigurava povoljne kemijske uvjete za dugotrajnu izolaciju RAO te posjeduje sposobnost samozacijeljenja pukotina i prslina koje bi eventualno mogle nastati zbog mehaničkog poremećaja (Gens i Thomas 2006).

Prirodnu barijeru čini prvenstveno odabrana matična stijena u koju je smješteno odlagalište te ostatak geosfere. Ostatak geosfere koji okružuje odlagalište i matičnu stijenu idealno bi trebao osigurati vrlo dugo vrijeme procjeđivanja podzemne vode na putu do biosfere uz značajnu sposobnost usporavanja i razrjeđivanja ispuštenih radionuklida (preko sorpcije i matične difuzije) te dugoročnu stabilnost hidrogeoloških uvjeta. Trebalo bi napomenuti da usporavanje pronosa radionuklida smanjuje problem zbog raspada radioaktivnog materijala.

Gradnja odlagališta obično uključuje iskop vertikalnih pristupnih okana i mreže horizontalnih pristupnih prostorija (tunela). Iz horizontalnih pristupnih prostorija buše se vertikalne ili horizontalne prostorije koje su namijenjene za odlaganje RAO.

Velika dubina odlagališta danas ne predstavlja problem za raspoložive tehnologije iskopa i gradnje podzemnih prostorija. Međutim, projekt i gradnja odlagališta VRAO ima određene specifičnosti koje se ne javljaju u konvencionalnim, rudarskim ili građevinskim projektima. Na primjer, metode iskopa i podgrađivanja podzemnih prostorija mogu imati veliki utjecaj na poremećaj i oštećenja (nastanak pukotina) stijenske mase u neposrednoj blizini podzemnog otvora koja općenito ne trebaju imati bitnog značaja za mehaničku stabilnost prostorije, ali otvaraju nove, preferencijalne puteve za pronos radionuklida u budućem odlagalištu koje svakako treba izbjeći (Gens i Thomas 2006).

Smanjenje negativnog utjecaja iskopa na stijenu odnosno sprječavanje njenog oštećivanja može se postići tako da se konvencionalne tehnike bušenja i miniranja zamjene tehnikama strojnog iskopa kao što je npr. TBM (Tunnel Boring Machine) tj. iskop kriticom. Isto tako, ranom ugradnjom odgovarajuće podgrade kao i korištenjem ekspanzivne ispune moguće je spriječiti ili umanjiti poremećaje i oštećenja stijene koja se javljaju zbog preraspodjele naprezanja u okolini podzemnog otvora. Treba imati na umu da će u odlagalištu kroz dugo

vrijeme postojati snažni izvori topline (VRAO) tako da će ispunna (npr. bentonit) i okolna matična stijena biti izloženi termalno-hidrauličko-mehaničkim djelovanjima.

Desaturacija stijene sušenjem, do koje dolazi tijekom iskopa i eksploatacije odlagališta, može biti problematična jer može uzrokovati promjenu strukture i pojavu pukotina u matičnoj stijeni odnosno povećanje njene propusnosti u zoni oko podzemne prostorije. Sušenje stijene može biti posljedica provjetravanja (ventilacije) prostorija, ali i kasnije zbog pojave visokog usisa u nezasićenoj bentonitnoj ispuni. Potreba za kontrolom ventilacije tijekom iskopa i gradnje mora biti prepoznata jer može dovesti i do kemijskih promjena u nekim stijenama uslijed oksidacije osjetljivih minerala (npr. pirit).

U fazi konačnog zatvaranja dubokog odlagališta potrebno je zabrtviti i ispuniti pristupne prostorije i okna tako da se onemoguće putevi migracije radionuklida. Pri tome je potrebno osigurati nisku propusnost ugrađenih brtvenih čepova, dugoročnu mehaničku stabilnost podzemnih prostorija, dodatna mjesta za sorpciju radionuklida te mehaničku zaštitu od neželjenog ljudskog pristupa (npr. teroristi).

Problemi koji se javljaju pri odlaganju NRAO i SRAO razlikuju se od odlaganja VRAO i znatno ih je lakše riješiti. Osnovna razlika je u tome da NRAO i SRAO ne emitiraju značajne količine topline jer su u njima uglavnom prisutni kratkoživi radionuklidi čija je aktivnost niska do umjerena. Međutim, za razliku od VRAO, ovi otpadi mogu proizvoditi znatne količine plina koji je posljedica raspada organske materije i korozije metala u otpadu ili metalnih spremnika pa o tome treba voditi računa pri odlaganju. U pogledu zahtjeva za odlaganje, NRAO i SRAO su tako više slični konvencionalnom opasnom otpadu tako da se i odlažu na sličan način kao potonji. Odlaganje ovih otpada je uglavnom površinsko ili plitko podzemno, a prati ga također ugradnja višestrukih barijera i odgovarajućeg drenažnog sustava.

S geotehničkog aspekta problematika odlaganja NRAO i SRAO odnosi se na potrebu dobrog poznavanja hidrogeoloških uvjeta lokacije, zadovoljenje mehaničke stabilnosti odlagališta te izvedbu temeljnih i pokrovnih barijernih i drenažnih sustava. Otpad se nastoji odlagati iznad razine podzemne vode i izvan zone plavljenja, a posebno treba izbjegavati situacije pri kojima bi razina podzemne vode oscilirala u zoni odloženog otpada. Otpad može biti odložen i ispod razine podzemne vode pod uvjetom da je okolno tlo vrlo niske vodopropusnosti.

U nekim slučajevima odlagališta NRAO i SRAO se smještaju uz postojeća nuklearna postrojenja kao npr. Drigg (Velika Britanija), Centre de la Manche (Francuska), Rokkasho (Japan), Olkiluoto (Finska)), dok druge zemlje razmatraju mogućnost izgradnje zajedničkih odlagališta.

Za razliku od dubokih geoloških odlagališta koja su za sada u svijetu samo u fazi istraživanja, plitka odlagališta za NRAO i SRAO, na dubinama većim od 50 metara, su već u eksploataciji dugi niz godina. U Švedskoj je 1989. izgrađeno odlagalište u gnajsima na dubini od 60 metara ispod Baltičkog mora. U Finskoj, na otočiću Olkiluoto, izgrađeno je odlagalište u granitima na dubini od 60 do 100 metara ispod površine i pušteno u rad 1992. NRAO i

SRAO se smješta u iskopane silose promjera 24 m i visine 34 m (slika 4).

Varijantu površinskog odlagališta predstavlja zidana betonska građevina koja može biti plitko ukopana ili sagrađena iznad površine terena. Odlagalište se sastoji od kazeta koje se redom popunjavaju spremnicima s otpadom. Odloženi spremnici s otpadom zaliju se betonom (betonski monolit) što predstavlja standardizirano rješenje odlaganja otpada srednje i niske aktivnosti. Takva monolitna struktura odlagališta se obično prekriva s nekoliko slojeva prirodnih i geosintetičkih materijala.



Slika 4. Silos s odloženim spremnicima RAO u odlagalištu Olkiluoto u Finskoj.

Kao materijali za izradu pokrova uglavnom se koriste različiti zemljani materijali i geosintetičke folije (geomembrana). Time se dodatno formira još jedna inženjerska barijera. Nužno je osigurati dobru drenažu za prikupljanje oborina i površinskih voda kako bi se spriječio njihov prodor u odlagalište.

Neke zemlje odabrale su varijantu dubokog geološkog odlaganja za NRAO i SRAO kao npr. odlagalište u nekadašnjem rudniku soli u Morsleben u Njemačkoj. To odlagalište je pušteno u rad još davne 1981. i zatvoreno 1998. U to vrijeme je korištenje napuštenog rudnika za potrebe odlaganja RAO ocjenjeno kao tehnički i ekonomski prihvatljivo rješenje. Međutim, kako se radi o starom rudniku, ležište soli je znatno poremećeno rudarskim radovima te se s vremenom pojavio problem stabilnosti ležišta. Zbog znatnih deformacija i opasnosti od većih prodora vode u prostor odlagališta, Njemačka je utrošila oko 2,2 milijarde Eura na radove sanacije (WNA 2016).

3. PROCJENE SIGURNOSTI ODLAGALIŠTA

Cilj procjene sigurnosti odlagališta je kvantitativno demonstrirati sposobnost odlagališta za sigurnu i učinkovitu izolaciju VRAO izvan biosfere kroz vrlo duga vremenska razdoblja.

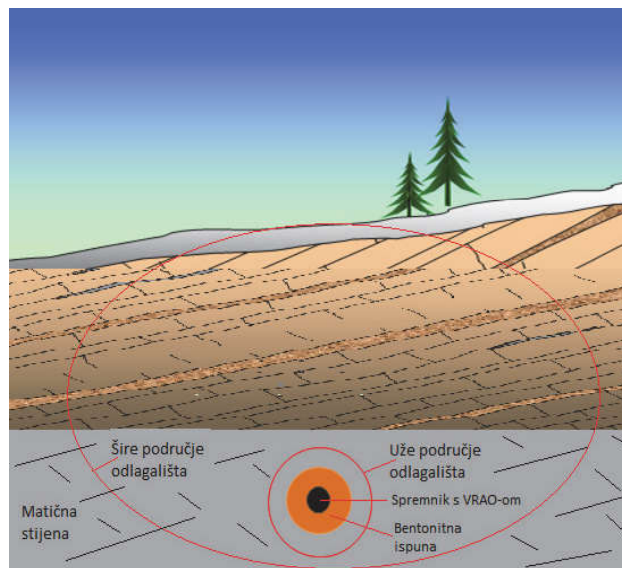
Pod pretpostavljenim scenarijima djelovanja čimbenika unutar odlagališta i izvan njega, rezultat procjene bi trebao pokazati da će promjene efektivnih vrijednosti zračenja (uslijed oslobađanja pojedinih radionuklida) kao i ukupne doze zračenja biti niže od dopuštenih vrijednosti

koje su ustanovljene važećom regulativom o zaštiti okoliša. Takvo stanje bi se trebalo zadržati kroz čitavo vremensko razdoblje, reda veličine 10.000 – 1.000.000 godina, unutar kojeg su dugoživi radionuklidi toksični i opasni po zdravlje čovjeka i okoliš.

Procjena sigurnosti na temelju numeričke analize ponašanja dubokog geološkog odlagališta predstavlja tako vrlo kompleksan zadatak zbog činjenice da takav sustav uključuje veliki broj različitih materijala, čimbenika i međudjelujućih procesa koji se pojavljuju i razvijaju kroz enormno duga vremenska razdoblja u kojim se mogu odigrati i različiti scenariji pod utjecajem promjenjivih vanjskih čimbenika (Gens i Thomas 2006). Sve njih naravno nije moguće opisati jedinstvenim, sveobuhvatnim numeričkim modelom. Potrebno je definirati i odgovarajuće opisati samo one čimbenike i procese u predviđivim scenarijima koji imaju znatnog utjecaja na ponašanje odlagališta odnosno definirati zbir glavnih čimbenika i procesa koji čine takozvani referentni sustav.

Takav sustav je moguće podijeliti na uže i šire područje (slika 5) koji se opisuju i analiziraju zasebno.

Uže područje odlagališta uključuje spremnik, bentonitnu ispunu i dio matične stijene koji se nalaze pod izravnim utjecajem odloženog VRAO. Jasnu granicu između užeg i šireg područja odlagališta nije moguće definirati. Ponašanje vitrificirane matrice VRAO i metalnog spremnika tijekom procesa korozije se obično razmatra zasebno (znanost o materijalima).



Slika 5. Uže i šire područje dubokog geološkog odlagališta RAO.

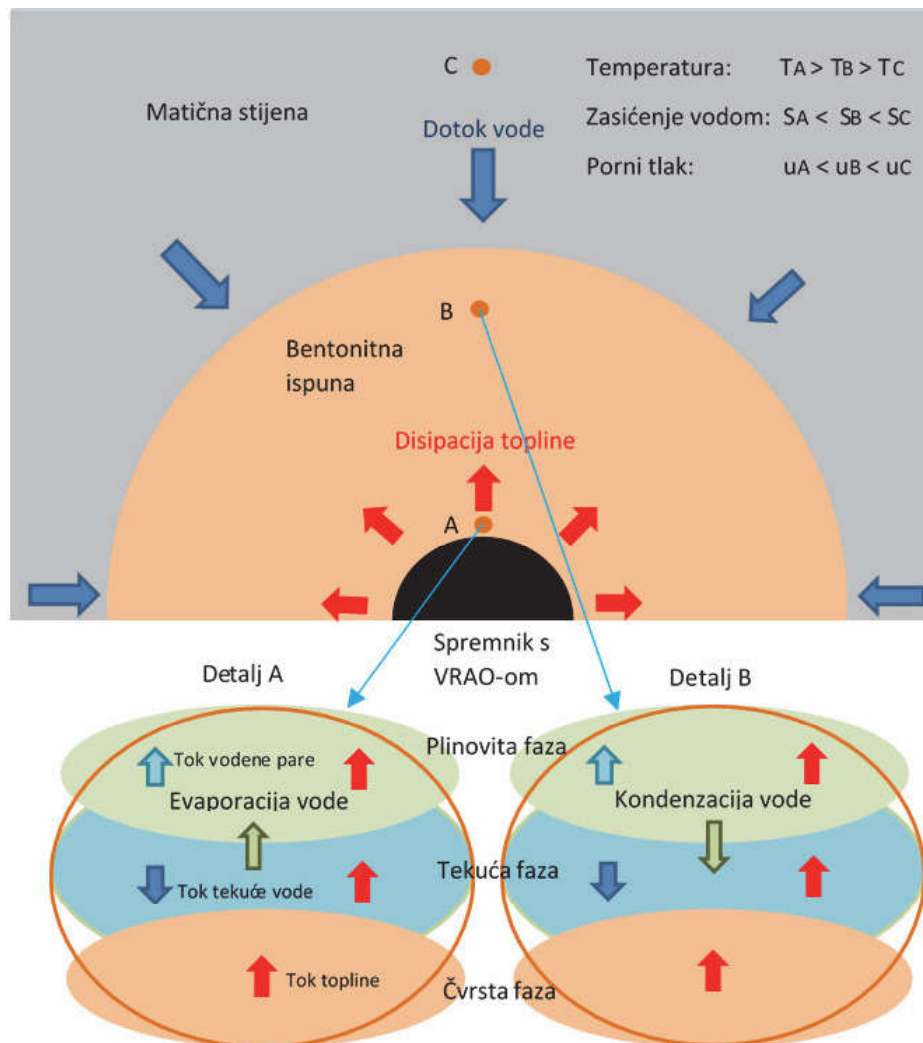
Šire područje odlagališta obuhvaća matičnu stijenu i ostatak geosfere (sve litološke jedinice) do površine terena koja se nalazi u kontaktu s biosferom.

Bentonitna ispuna, koja čini tzv. inženjersku brtvenu barijeru, ugrađuje se u podzemnoj prostoriji između spremnika s VRAO-om i okolne matične stijene, a inicijalno se nalazi u nezasićenom stanju što znači da su tu prisutne sve tri faze materije: čvrsta (bentonit i ostala mineralna ispuna), tekuća (voda s otopljenim tvarima) i plinovita (zrak, plinovi i vodena para). Ponašanje takvog višefaznog sustava je vrlo kompleksno, a naročito u

uvjetima promjene temperature zbog isijavanja topline iz odloženog VRAO.

Ispuna je od unutarnje granice (kontakt spremnika i ispune) izložena toku topline koji se širi kroz sve tri faze

materije prema matičnoj stijeni, a u suprotnom smjeru, javlja se dotok tekuće vode iz matične stijene zbog postojanja usisa (negativnog purnog tlaka) u ispuni (slika 6).



Slika 6. Procesi disipacije topline i hidratacije bentonitne ispune u užem području odlagališta VRAO.

Disipacija topline ovisi o toplinskoj provodljivosti ispune odnosno o njenom zasićenju vodom i poroznosti. Zbog grijanja ispune uz spremnik postoji i tok vodene pare kroz plinovitu fazu u smjeru tečenja topline odnosno suprotno od smjera dotoka tekuće vode koji predstavlja dio kružnog kretanja vode. Ispuna se uz unutarnju granicu steže zbog grijanja i evaporacije vode, a uz vanjsku (kontura matične stijene) bubri zbog hidratacije bentonita.

U konačnici, ispuna bi trebala biti zasićena vodom što će rezultirati bubrenjem bentonita i značajnim tlačnim naprežanjem na matičnu stijenu. Ovakvo ponašanje ispune opisuje se složenim termo-hidro-mehaničkim spregom koji su razvijali brojni istraživači kao npr. Gawin i dr. 1995; Olivella i dr. 1994; Olivella i dr. 1996; Thomas i He, 1995. Razvoj i kalibracije ovih modela (npr. Gens i dr. 2009; Garitte i dr. 2014) temelje se na rezultatima međunarodnih znanstvenih istraživanja koja se intenzivno

provode u zadnjih 20-tak godina u podzemnim stijenskim laboratorijima kao što su npr. Mont Terri i Grimsel u Švicarskoj, Äspö Hard Rock u Švedskoj i dr.

Brzina propadanja vitrificirane matrice VRAO i metalnog spremnika uslijed korozije te topljivost matrice VRAO u vodi kontroliraju brzinu oslobađanja radionuklida u tzv. užem području odlagališta (Gens i Thomas, 2006). Radionuklidi koji su otopljeni u vodi mogu migrirati kroz odlagalište uslijed mehanizama advekcije i difuzije.

Advekcijom nazivamo proces pronosa onečišćenja otopljenog u podzemnoj vodi koji je posljedica tečenja podzemne vode pod djelovanjem hidrauličkog gradijenta. Kao i protok podzemne vode, advekcija isključivo ovisi o hidrauličkim svojstvima poroznog medija kao što su provodljivost, efektivna poroznost i hidraulički gradijent, a ne ovisi o fizikalno-kemijskim svojstvima onečišćenja.

Difuzija je proces pronosa onečišćenja zbog gradijenta koji je posljedica različite koncentracije tog spoja u podzemnoj vodi, a ne zbog hidrauličkog potencijala. Difuzija tako predstavlja glavni mehanizam širenja onečišćenja u uvjetima niske propusnosti poroznog medija. Zbog vrlo male propusnosti bentonitne ispune i posljedično male brzine tečenja, proces difuzije je odgovoran za pronos radionuklida kroz brtvenu barijeru. Osim toga, brzina pronosa radionuklida je uvjetovana i geokemijskim utjecajima barijere i matične stijene tj. procesima usporavanja pronosa kao što su adsorpcija radionuklida na površinu čvrstih čestica, procesi taloženja iz otopine i dr. Modele pronosa radionuklida u užem području odlagališta koji se oslanjanju na THM model ponašanja barijere razvijali su Guimaraes i dr. 1999; Gens i dr. 2002; Thomas i dr. 2002. Poboljšanja ovih modela koja uključuju i kemijske reakcije (hidroliza, oksidacija, redukcija, taloženje i dr.) u bentonitnoj ispuni (tzv. termo-hidro-mehaničko-kemijski spreg) razvili su: Gens i dr. 2010; Zheng i dr. 2010. Rezultat takvih numeričkih simulacija za uže područje odlagališta je prognoza brzine otpuštanja radionuklida u šire područje odlagališta tj. izlaz numeričkog modela užeg područja postaje ulazna veličina za model pronosa radionuklida širim područjem.

Modeliranje pronosa radionuklida širim područjem odlagališta oslanja se na hidrogeološki model procjeđivanja podzemne vode koji uključuje matičnu stijenu i sve ostale litološke jedinice do granice s biosferom (Gens i Thomas 2006). Zbog toga je vrlo važna kvalitetna hidrogeološka karakterizacija šireg područja odlagališta. Njome treba odrediti: hidrauličku provodljivost stijena, efektivnu poroznost koja sudjeluje u tečenju podzemne vode, eventualno postojanje preferencijalnih puteva kretanja vode (pukotinska poroznost), hidrauličke gradijente i dr. Radionuklidi koji su otopljeni u vodi ili su adsorbirani na druge otopljene tvari i ovdje su podložni procesima advekcije i difuzije kao i fizikalnim i kemijskim interakcijama sa stijenama kojima prolaze, te procesima disperzije i usporavanja pronosa (Gens i Thomas 2006).

5. ZBRINJAVANJE RAO U RH

Hrvatska (RH) je kao članica Europske unije preuzela odgovornost za uspostavu nacionalnog sustava za sigurno zbrinjavanje RAO, koji nastaje na njenom teritoriju. Isto tako, RH je kao suvlasnik polovine Nuklearne elektrane Krško (NEK), koja se nalazi u susjednoj Sloveniji, preuzela obavezu zbrinjavanja polovine količine RAO iz NEK na svom teritoriju.

RH trenutno ima dva mala skladišta u kojima se čuva manja količina (7,5 m³) institucionalnog RAO i oba skladišta su sada zatvorena odnosno ne mogu više zaprimati otpad. Prihvat prvih količina RAO iz NEK-a se planira već za 2023., a razgradnja NEK-a za 2043. Pri tome RH još uvijek nema definitivnu lokaciju bilo centralnog skladišta ili odlagališta. ING odnosno ukupno 2283 gorivna elementa koji će se iskoristiti do kraja životnog vijeka NEK-a planiraju se skladištiti na lokaciji elektrane predvidivo do kraja stoljeća. RH nakon toga mora preuzeti brigu i za polovinu gorivnih elemenata.

Proces izbora lokacije odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada u RH započeo je 1988. i trajao do 1997.

Višekriterijskom analizom tj. primjenom izlučnih i usporedbenih kriterija vrednovan je čitav teritorij RH te su izdvojene ukupno 34 potencijalne lokacije odlagališta RAO (Schaller 1997). Primjenom tzv. izlučnih kriterija vrednovana su sljedeća svojstva lokacija: sigurnost od poplave, ugroženost od potresa, udaljenost od aktivnih rasjeda, litološka i geomorfološka svojstva, hidrogeologija, gustoća naseljenosti, zahtjevi nacionalne obrane, rudarska eksploatacija, zaštita prirodne i kulturne baštine. Korišteni usporedbeni kriteriji (ukupno 28 kriterija) mogu se svrstati u šest skupina: 1) prijevoz RAO, 2) meteorologija i hidrologija, 3) geologija i seizmologija, 4) demografija, 5) namjena i korištenje prostora i 6) zaštita okoliša.

Među potencijalnim lokacijama, navedenim procesom izbora 1997. su izdvojene četiri preferentne lokacije s približno ujednačenim karakteristikama. To su: Trgovska gora, Moslavačka gora, Papuk i Psunj. Nakon toga, proces izbora je praktično mirovao dugi niz godina da bi pred dvije godine bila izdvojena samo jedna preferentna lokacija na Trgovskoj gori ili preciznije Čerkezovac u vlasništvu Hrvatske vojske. Međutim, izboru ove lokacije se jako protivi lokalna zajednica. Blizina rijeke Une i granice s Bosnom i Hercegovinom koriste se kao glavni argumenti protiv izbora te lokacije.

S druge strane, Slovenija je odabrala lokaciju Vrbina u blizini NEK za odlaganje NRAO i SRAO. Ova lokacija je smještena u zagrebačkom vodonosniku i poplavnom području. Po prethodnim kriterijima ovakva lokacija u RH ne bi se razmatrala ni kao potencijalna. Odlagalište u Vrbini se uglavnom oslanja na inženjerski barijerni sustav što podrazumijeva veći rizik po okoliš. Na toj lokaciji uskoro će se izgraditi dva silosa kapaciteta 9400 m³ u koje će Slovenija odložiti svoj dio nisko i srednje radioaktivnog otpada iz NEK-a kao i ostali RAO iz Slovenije. Lokalna zajednica je prihvatila ovaj projekt odlagališta u Vrbini uz uvjet da joj se plaća ekološka renta od 5 milijuna Eura godišnje (WNA 2016). Na ovoj lokaciji moguće bi bilo izgraditi i dodatne silose za hrvatski dio otpada iz NEK-a. Međutim, protivnici ovog rješenja navode da je ono financijski nepovoljno za RH (procijenjeni trošak oko pola milijarde Eura) i da se njime neće moći riješiti postojeće i buduće količine RAO u RH.

Hrvatska je nažalost izgubila puno dragocjenog vremena i sada mora brzo riješavati problem skladištenja i odlaganja nisko i srednje RAO. Na sreću, potencijalne lokacije odlagališta su kvalitetno definirane i ne treba kretati ispočetka. Odabrano rješenje mora biti prihvatljivo za lokalnu zajednicu i po mogućnosti ono bi trebalo omogućavati i rješavanje budućih obveza RH prema odlaganju VRAO i ING iz NEK-a. Ekonomska logika nalaže udruživanje sa slovenskom stranom radi smanjivanja ukupnih troškova u zbrinjavanju RAO za obje strane, ali tu se nažalost ne mogu isključiti ili zanemariti brojni drugi čimbenici. U interesu RH je da bude uključena u sve aktivnosti oko NEK-a i da tako kontrolira čitav proces njene razgradnje i zbrinjavanja ukupne količine RAO iz elektrane koja se nalazi u njenoj neposrednoj blizini. U slučaju bilo kakve havarije u elektrani ili u zonama skladištenja ING-a i RAO-a Hrvatska je nažalost neposredno ugrožena.

Za efikasno rješavanje ovih problema možda bi bilo uputno da RH potraži pomoć u zemljama koje su takve

probleme uspješno rješile kao npr. Finska. Finska iz vlastitih nuklearnih reaktora osigurava oko 30% potrebne električne energije. Ona je odavno rješila problem odabira lokacije i odlaganja nisko i srednje radioaktivnog otpada (Olkiluoto u radu od 1992.), a kao prva u svijetu rješit će i problem odlaganja ING-a i VRAO u duboko geološko odlagalište Onkalo koje bi s radom trebalo započeti već 2020. Stav društvene zajednice u Finskoj, kako one šire tako i lokalne (u okolini odlagališta), prema nuklearnoj energiji i odlaganju RAO je općenito pozitivan (WNA 2016). Razlozi tomu su vjerojatno: dobra informiranost stanovništva na polju nuklearne energije i RAO, transparentnost politike i demokratičnost u donošenju odluka, pozitivna domaća iskustva i općenito postojanje povjerenja javnosti u rad kompanija koje se bave proizvodnjom nuklearne energije i gospodarenjem RAO. Finska ima potrebna znanja, vještine i tehnologiju koje su uspješno razvijali u zadnjih 30-tak godina. Primjera radi, češka agencija "Czech Radioactive Waste Repository Authority" (SURA) je ove godine potpisala četverogodišnji ugovor s finskim partnerima za konzultantske usluge u procesu odabira lokacije odlagališta, te koncepta i projekta budućeg češkog odlagališta RAO.

Uz takvu potporu je vjerojatno moguće ubrzati proces izbora lokacije, izbjeći krive korake, smanjiti troškove i što je vrlo važno zadobiti povjerenje lokalne zajednice kada se pokaže da će na budućem projektu odlagališta biti uključen partner koji ima sva potrebna znanja i iskustva te da će se na projektu primjenjivati samo sigurna i već provjerena tehnička rješenja. Osim toga, lokalna zajednica mora biti dobro informirana o svim aspektima odlaganja RAO i rizicima koje ono nosi kao i tehničkim rješenjima kojima se rizici svode na minimum. Lokalna zajednica mora vidjeti koristi od postojanja odlagališta na svom području u vidu mogućnosti novog razvoja financiranog iz ekološke rente i novih mogućnosti zapošljavanja na njenom području, uostalom kao i u slovenskom primjeru.

6. ZAKLJUČAK

Jedan od najvažnijih koraka u procesu zbrinjavanja RAO je odabir prirodno povoljne lokacije odlagališta. Osnovna zadaća odlagališta je sigurno izolirati radioaktivni materijal od okoliša, odnosno spriječiti eventualnu emisiju radionuklida u biosferu. To se postiže obradom i kondicioniranjem otpada te ugradnjom višestrukih slabopropusnih barijera između radioaktivnog otpada i okolnog geološkog medija. Sigurnost odlagališta se značajno povećava ako okolna geološka formacija ima odgovarajuća svojstva niske vodopropusnosti i usporavanja širenja radionuklida u okoliš, te tektonsku stabilnost i nisku seizmičku aktivnost.

Međutim, odabir lokacije budućeg odlagališta RAO je dugotrajan i skup proces na koji utječu brojni čimbenici. Proces odabira lokacije bi trebala usmjeravati „struka“, ali on mora biti transparentan, javan i demokratičan, tako da uključuje sve dionike procesa. Lokalna zajednica mora biti potpuno informirana i educirana u ovoj problematici, ali i odgovarajuće motivirana da bi prihvatila ideju odlagališta RAO-a u svojoj okolini. Pri tome je vrlo važno stjecanje povjerenja u budući projekt odlagališta što se može postići

uključivanjem konzultanta sa znanjem i dokazanim iskustvom u poslovima projektiranja, gradnje i eksploatacije odlagališta niskog i srednje radioaktivnog otpada.

Problemi koji se javljaju pri odlaganju NRAO i SRAO razlikuju se od odlaganja VRAO i znatno ih je lakše riješiti. U pogledu zahtjeva za odlaganje, NRAO i SRAO su tako više slični konvencionalnom opasnom otpadu tako da se i odlažu na sličan način kao potonji. Odlaganje ovih otpada je uglavnom površinsko ili plitko podzemno. Provjerena i sigurna tehnička rješenja za takva odlagališta postoje i mogu biti realizirana od domaćih stručnjaka, ali nije na odmet da investitor angažira konzultanta s dokazanim iskustvom.

Mogućnosti procjene sigurnosti odlagališta ovise o našoj sposobnosti da predvidimo sve moguće scenarije kao i ponašanje relevantnih čimbenika pod takvim scenarijima u budućem odlagalištu i širem okolišu, o dosegnutoj razini znanja koja dobivamo iz istraživanja ponašanja barijernog sustava i okolne stijene koja se provode pokusima 1:1 u podzemnim laboratorijima (npr. Mont Terri i dr.), o kvaliteti i kvantiteti istražnih radova koja se obave na budućem odlagalištu i dr.

7. LITERATURA

Gens, A., Thomas, H.R. (2006): Nuclear Waste. Ch. 7 in TC5 Report: Environmental Geotechnics. Edited by International Technical Committee No. 5 of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

Mc Combie, Pentz DL, Kurzeme M, Miller I. (2000): Deep geological repositories: A safe and secure solution to disposal of nuclear wastes, GeoEng2000, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne. Technomic Publishing, Lancaster Pa, 1. pp. 686-691.

WNA (2016): World Nuclear Association, [http:// world-nuclear.org/information-library/country-profiles/...](http://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/)

Whiterspoon, P. (ed.) (1996): Geological problems for radioactive waste isolation: second world-wide review. Report LBNL-38915, UC-814, University of California, USA.

Barnichon JD, Volckaert G. (2002): Hydro-mechanical coupling in the Boom Clay (Mol URL, Belgium): Recent in-situ observations, predictions and perspectives. Hydromechanical and Thermohydromechanical Behaviour of Deep Argillaceous Rock (Hoteit, N. et al. eds), A:A. Balkema, Lisse. pp. 285-294.

Gawin, D., Baggio, P. and Schrefler, B.A. (1995): Coupled heat, water and gas flow in deformable porous media. Int. J. Num. Meth. Fluids. 20: 967-987.

Olivella, S., Carrera, J., Gens A. and Alonso, E.E. (1994): Non-isothermal Multiphase Flow of Brine and Gas through Saline media. Transport in Porous Media. 15: 271-293.

Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. and Alonso, E.E. (1996): Numerical Formulation for a Simulator (Code bright) for the Coupled Analysis of Saline Media. Engineering Computations. 13: 87-112.

Thomas, H.R. and He, Y. (1995): An analysis of coupled heat, moisture and air transfer in a deformable unsaturated soil, Géotechnique. 45: 667-689.

Gens, A., Sánchez, M., Guimaraes, L. do N., Alonso, E.E., Loret, A., Olivella, S., Villar, M.V., Huertas, F. (2009): A full-scale in situ heating test for high-level nuclear waste disposal: observations, analysis and interpretation. Géotechnique 59:377-399.

Garitte, B., Gens, A., Vaunat, J., Gilles, A. (2014): Thermal Conductivity of Argillaceous Rocks: Determination Methodology Using In Situ Heating Tests. Rock Mech Rock Eng. 47: 111.

Guimaraes, L. N., Gens, A. and Olivella, S. (1999): THM and reactive coupling in unsaturated porous media. 7th Int. Symp. Numerical Models in Geomechanics, Graz, Austria. pp. 303-308.

Gens, A., Guimaraes, L. do N., Garcia-Molina, A., Alonso, E.E. (2002): Factors controlling rockclay buffer interaction on a radioactive waste repository. *Engineering Geology*. 64: 297-308.

Thomas, H.R., Cleall, P.J. and Hashm, A.A. (2002): Thermal/hydraulic/chemical/ mechanical (THCM) behaviour of partly saturated soil. *Computer Methods and Advances in Geomechanics* (Desai et al., eds), A.A. Balkema, Rotterdam. 1, pp. 756-763.

Gens A, Guimaraes L, Olivella S, Sanchez M (2010): Modelling thermo-hydro-mechano-chemical interactions for nuclear waste disposal. *J Rock Mech Geotech Eng*. 2:97-102.

Zheng, L., Samper, J., Montenegro, L, Fernandez, A.M. (2010): A coupled THMC model of a heating and hydration laboratory experiment in unsaturated compacted FEBEX bentonite. *J Hydrol*. 386(1-4):80-94.

Schaller, A. (1997): Izbor mjesta odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj, APO novosti, Agencija za posebni otpad, Zagreb.