Odlaganje radioaktivnog otpada

Nađ, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

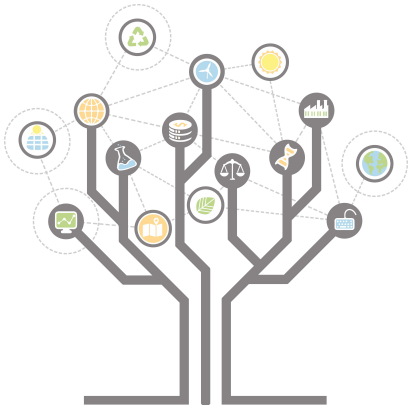
2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:147925

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Odlaganje radioaktivnog otpada

Nađ, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:147925

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-10**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

LUCIJA NAĐ

ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

LUCIJA NAĐ

ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

ZAVRŠNI RAD

KANDIDAT:

LUCIJA NAĐ

MENTOR:

Doc.dr.sc. BORIS KAVUR

VARAŽDIN, 2016.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnica: LUCIJA NAĐ

Matični broj: 2297 - 2013./2014.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Radioaktivni otpad (RAO)
3. Duboko geološko odlaganje
4. Odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada
5. Zaključak
6. Popis literature
7. Popis slika
8. Popis i objašnjenje kratica

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 20.02.2016.

Rok predaje: 02.09.2016.

Mentor:

Doc.dr.sc. Boris Kavur

REPUBLIKA HRVATSKA
GEOTEHNIČKI FAKULTET
VARAŽDIN
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Predsjednica Odbora za nastavu:

Doc.dr.sc. Sanja Kovač

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod

Odlaganje radioaktivnog otpada

(naslov završnog rada)

Rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc.dr.sc. Borisa Kavura.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 02.09.2016.

Lucija Nađ

Sažetak

Ime i prezime autora: Lucija Nađ

Naslov rada: Odlaganje radioaktivnog otpada

U radu su opisani problematika i mogućnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada (RAO). U uvodnom dijelu je definiran cilj rada, a u drugom poglavlju su prikazani izvori i tipovi RAO, nuklearni procesi, pojava radioaktivnosti i učinci ionizirajućeg zračenja te procesi koje prethode odlaganju: priprema, obrada i kondicioniranje RAO.

U radu se razlikuju tri kategorije otpada: nisko (NRAO), srednje (SRAO) i visoko (VRAO) radioaktivni otpad. Uvjeti i tehnički zahtjevi kod odlaganja, VRAO s jedne strane te NRAO i SRAO s druge strane, se znatno razlikuju. Tako su u trećem poglavlju prikazane mogućnosti i problematika dubokog geološkog odlaganja VRAO, a u četvrtom, problematika plitkog, površinskog i pripovršinskog načina odlaganja NRAO i SRAO. Obrađene su postojeće strategije i problematika odlaganja RAO s naglaskom na geotehničke aspekte u pogledu: određivanja lokacije odlagališta, primjene koncepta višestrukih barijera za izolaciju RAO, prikladnih tipova stijena te geoloških i hidrogeoloških uvjeta koji su nužni za smještaj odlagališta RAO, definiranja istražnih radova, načina gradnje odlagališta, metoda iskopa i kritičnih poremećaja i oštećenja matične stijene te mogućnosti procjene sigurnosti odlagališta RAO.

Ključne riječi:

Odlaganje radioaktivnog otpada, duboko geološko odlaganje, plitko odlaganje, pripovršinsko odlaganje.

SADRŽAJ RADA

1. UVOD.....7

2. RADIOAKTIVNI OTPAD (RAO).....9

2.1. Izvori i tipovi RAO.....9

2.2. Nuklearni procesi, radioaktivnost i učinci ionizirajućeg zračenja.....12

2.3. Priprema, obrada, kondicioniranje i odlaganje RAO.....18

3. DUBOKO GEOLOŠKO ODLAGANJE RAO.....22

3.1. Mogućnosti dubokog odlaganja i prikladne vrste stijena.....22

3.2. Koncept višestrukih barijera.....26

3.3. Odabir lokacije i provedba istražnih radova.....29

3.4. Gradnja odlagališta i oštećenja matične stijene.....30

3.5. Procjena sigurnosti dubokog geološkog odlagališta.....33

4. ODLAGANJE NISKO I SREDNJE RADIOAKTIVNOG OTPADA.....38

5. ZAKLJUČAK.....45

6. POPIS LITERATURE.....46

7. POPIS SLIKA.....48

8. POPIS I OBJAŠNJENJE KRATICA.....50

1. UVOD

Radioaktivni otpad (RAO) nastaje u različitim fazama nuklearnog ciklusa koji započinje eksploatacijom ruda koje sadrže materijale za nuklearni proces fisije, a to je najčešće uran, zatim kemijskim oplemenjivanjem odnosno obogaćivanjem ruda urana, proizvodnjom nuklearnog goriva za pokretanje nuklearnih reaktora i 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. [1]. Nuklearne centrale za proizvodnju električne energije su glavni proizvođači RAO. Krajem 2005. god. u svijetu je prema izvješću IAEA bilo aktivno 443 nuklearna reaktora [2]. Količine RAO su ipak relativno male u odnosu na količine konvencionalnih otpada.

Problematika odlaganja RAO u mnogome je slična problematici odlaganja opasnih, visoko toksičnih otpada, ali ipak ima svoje specifičnosti. 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. Mogućnosti za sanaciju okoliša u slučaju nuklearnih havarija, vrlo su ograničene. Osim toga, potreban životni vijek dubokog geološkog odlagališta VRAO se mjeri desecima tisuća godina, a to znatno nadilazi zahtjeve klasičnih građevinskih i okolišnih projekata [2].

Cilj rada je obraditi postojeće strategije i problematiku odlaganja RAO s naglaskom na geotehničke aspekte u pogledu: određivanja lokacije dubokih geoloških, ali i plitkih odlagališta, koncepti višestrukih barijera za izolaciju RAO, prikladni tipovi stijena te geološki i hidrogeološki uvjeti koji su nužni za smještaj odlagališta, istražni radovi, načini gradnje odlagališta, metode iskopa, kritična poremećenja i oštećenja matične stijene uzrokovana iskopom i relaksacijom naprezanja oko podzemnog otvora, te mogućnosti procjene sigurnosti odlagališta RAO.

Republika Hrvatska (RH), kao članica Europske unije, preuzela je odgovornost za uspostavu nacionalnog sustava za sigurno zbrinjavanje RAO, koji nastaje na njenom teritoriju. Isto tako, RH je kao suvlasnik polovine (50%) nuklearne elektrane Krško, koja se nalazi u susjednoj Sloveniji, preuzela obavezu zbrinjavanja odgovarajuće količine tamo nastalog RAO na svom teritoriju. Radi provedbe relevantnih direktiva europske unije i drugih međunarodnih propisa i ugovora, RH je donijela Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti [3] kao i Strategiju zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva [4].

U Republici Hrvatskoj se uz pomoć Strategije [4] nastoji upotpuniti nacionalni sustav zbrinjavanja radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva, kojom se, u Europskoj uniji, uspostavljaju ujednačeni standardi za njihovo odgovorno i sigurno zbrinjavanje [5]. Za sada ne postoji konačna odluka o lokaciji odlagališta RAO u RH. Odlaganje RAO koji dolazi iz ostalih izvora u RH isto tako nije riješeno. Ova tema se zbog toga nameće vrlo aktuelnom.

2. RADIOAKTIVNI OTPAD

2.1. Izvori i tipovi RAO

Da bi se odredilo svojstvo otpada (opasan, neopasan ili inertan) potrebno je napraviti karakterizaciju otpada. Karakterizacija otpada obuhvaća određivanje svojstava, porijekla i mjesta nastanka otpada s obzirom na sastav otpada, granične vrijednosti koncentracija (opasnih tvari i opasnih svojstava otpada), određivanje grupe, podgrupe i vrste otpada prema Katalogu otpada te određivanje otpada sukladno kategorizaciji za prekogranični promet otpadom.

Radioaktivni otpad pripada posebnoj vrsti industrijskog opasnog otpada koji nije predviđen za daljne korištenje. Industrijski otpad je onaj otpad koji nastaje u procesu proizvodnje i nije više pogodan za vraćanje u proizvodni proces a sastoji se od raznovrsnih stabilnih i nestabilnih elemenata organskog i neorganskog porijekla.

Radioaktivni otpad nastaje u mnogim ljudskim djelatnostima, u svima gdje radioaktivnost ima primjenu kao što su energetika, industrija, medicina i znanost. Najviše otpada stvara se radom nuklearnih elektrana i u svim fazama nuklearnog gorivnog ciklusa, počevši od kopanja uranske rude do razgradnje nuklearnih postrojenja. U industriji radioaktivni otpad predstavljaju istrošeni gromobrani i detektori dima, kao i svi ostali uređaji koji nisu u upotrebi a sadrže radioaktivne izvore. Nakon toga u medicini, kao primjena izvora ionizirajućeg zračenja u svrhu dijagnosticiranja i liječenja te u znanosti pri izvođenju eksperimenata [5].

Klasifikaciju radioaktivnog otpada moguće je napraviti na osnovi udjela radioaktivnog materijala u otpadu. Međunarodno su općenito prihvaćene sljedeće kategorije [5]:

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, a obično se zbrinjava u površinskim odlagalištima.

b) **Srednje radioaktivni otpad**, skrać. **SRAO** (eng. Medium or Intermediate Level Waste, MLW ili ILW) – sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada i obično se zbrinjava u površinskim odlagalištima. Ako sadrži i radionuklide s dugim vremenom poluraspada (eng. Long-Lived radionuclides, LL-ILW) zbrinjava se na isti način kao VRAO u dubokim, podzemnim (geološkim) odlagalištima.

c) **Visoko radioaktivni otpad**, skrać. **VRAO** (eng. High Level Waste, HLW) – sadrži veliki udjel dugoživućih radionuklida u obliku fisijskih produkata i transuranijskih elemenata koji se stvaraju u jezgri reaktora, a zbrinjavaju se u dubokim podzemnim odlagalištima.

Na slici (1) prikazana je približna volumna klasifikacija nisko, srednje te visoko radioaktivnog otpada. Iako VRAO čini svega 4% ukupnog volumena, a to je otrpilike 10 000 t/god [6] njegova radioaktivnost čini 95% sveukupne radioaktivnosti. Nasuprot njemu je NRAO koji čini 90% volumena ukupnog proizvedenog otpada u svijetu, ali pri tome sadrži samo 1% radioaktivnosti.



Slika 1. Klasifikacija i volumeni RAO [5]

Dodatno, nisko i srednje radioaktivni otpad možemo podijeliti s obzirom na agregatna stanja na [5]:

a) plinoviti – radioaktivni plinovi koji se do raspadanja čuvaju u posebnim spremnicima
b) tekući – tekućine kontaminirane radionuklidima; za smanjenje volumena koristi se filtriranje, isparavanje i sušenje u bačvi (zagrijavanjem bačve ispari voda)
c) kruti – kontaminirane otpadne tvari (plastika, papir, krpe, osobna zaštitna oprema, alati i filterski ulošci).

Materijali i tvari koji pripadaju nisko i srednje radioaktivnom otpadu su zaštitna odjeća, kontaminirani metalni otpad, zapakirani pepeo od spaljivanja otpada u inozemstvu, otpad od procesa čišćenja radioaktivne vode (talog nakon isparavanja, ionski izmjenjivači, filtri). Otpad koji je nastao eksploatacijom ruda u procesima iskopavanja, obrade i korištenja ugljena, prirodnog plina i fosfatnih ruda. Opasni i visokoaktivni otpad koji nastaje u reaktorima nuklearnih elektrana je ponajprije iskorišteno nuklearno gorivo (ING), odnosno visokoaktivni otpad koji preostaje nakon njegove eventualne prerade. Osim toga visoko radioaktivnom otpadu pripadaju gorivi elementi i jako radioaktivne tekućine [5].

2.2. Nuklearni procesi, radioaktivnost i učinci ionizirajućeg zračenja

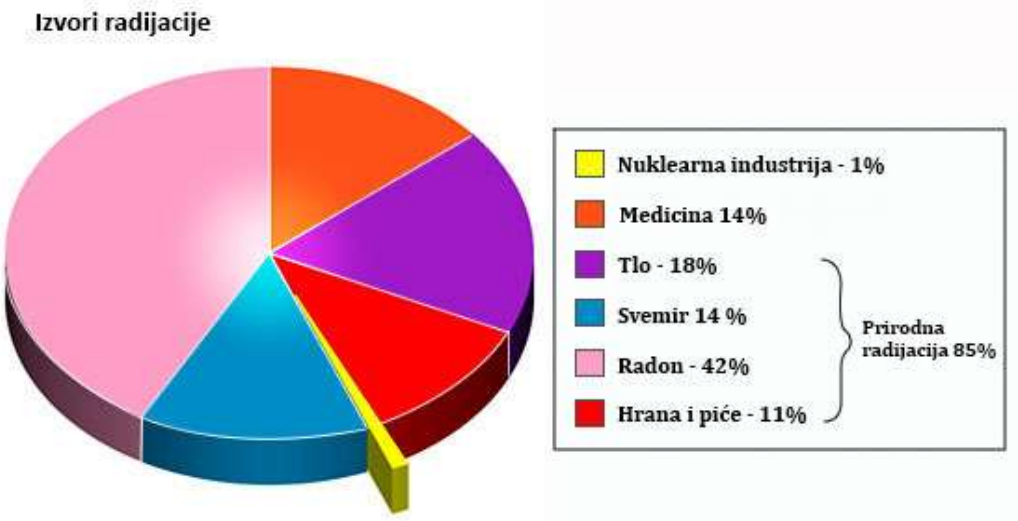
Fisija i fuzija su dva glavna nuklearna procesa. U nuklearnoj fisiji, teška jezgra U-235 hvata spori neutron te se raspada na dva nova atoma uz otpuštanje velikih količina energije. Takva vrsta reakcije u kontroliranim uvjetima je temelj proizvodnje energije. U nuklearnoj fuziji, dvije lake jezgre vodika se spajaju da bi formirale tešku helijevu jezgru pri čemu se oslobađa velika količina energije. Za razliku od procesa fisije, fuziju za sada nije moguće kontrolirati raspoloživom tehnologijom u svrhu korisnog korištenja oslobođene energije. Prema zadnjim istraživanjima (2003) IAEA pokazuje da od ukupne proizvodnje električne energije u svijetu 16% se odnosi na nuklearnu energiju. Ovaj omjer proizvodnje je konstantan od osamdesetih godina dvadesetog stoljeća. Zanimljivo jest što porast proizvodnje nuklearne energije nije razlog izgradnje novih postrojenja već povećana iskoristivost postrojenja. Uz sve veću svijest i zabrinutost o klimatskim promjenama i emisijama stakleničkih plinova, nuklearna energija se vratila kao potencijalan izvor energije budućnosti [2].

Radioaktivnost je često povezana s korištenjem nuklearne energije, ali je također i prirodni fenomen [2]. Iako ne razmišljamo o tome, radioaktivnost je sastavni dio našeg okoliša, odnosno jedan od okolišnih uvjeta. Radioaktivnost, kojoj smo svakodnevno izloženi, ima izvor u kozmičkim zrakama, radioaktivnosti iz tla (i zraka), građevinskih materijala, pa čak i u svim onim tvarima koje unosimo u organizam (jelo i piće). Postoji oko 60 radionuklida koji su glavni izvori prirodne radioaktivnosti [5].

Prvi koji je otkrio prirodnu radioaktivnost je bio Henri Becquerel 1896. godine. On je zaključio da zapravo postoji štetan i negativan utjecaj na zdravlje čovjeka i okoliš. Becquerel je otkrio da uranijeve soli emitiraju nevidljivo zračenje koje djeluje na fotografsku ploču kroz zaštitni papir slično rendgenskim zrakama te da pod utjecajem toga zračenja elektroskop gubi naboj. Primijetio je da uranijeve soli stalno u mraku fluoresciraju. Daljnjim ispitivanjem, Becquerel je pronašao da zračenje koje izazivaju uranijevi spojevi ionizira zrak (ionizirajuće zračenje), izaziva fluorescenciju i prolazi kroz papir, pločice aluminija i bakra. Kroz zatvoreni spremnik ono djeluje na fotografsku ploču, a djeluje i na našu kožu i klice raznih biljaka [5].

Radioaktivnost je naziv za svojstvo nekih vrsta atomskih jezgri da se same od sebe (spontano) mijenjaju ili dijele, i pri tome odašilju (emitiraju) čestice i prodorne elektromagnetske valove. Vrste jezgri koje su radioaktivne (kaže se i da su nestabilne) nazivaju se radionuklidima, a emitirane čestice i elektromagnetski valovi nazivaju se radioaktivnim zračenjem. Takve spontane promjene nestabilnih jezgri tradicionalno se nazivaju radioaktivnim raspadima [5].

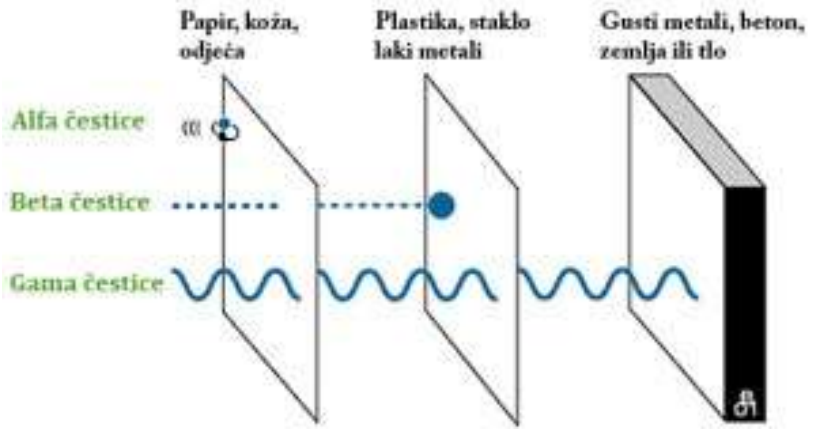
Na slici 2 u postocima su prikazani izvori prirodne radijacije, koja čini veći postotak radioaktivnosti te radioaktivnost iz medicine i nuklearne industrije koja ne čini veći dio radioaktivnosti, ali je mnogo štetnija.



Slika 2. Prikaz izvora radijacije [5]

Radioaktivno zračenje je ionizirajuće zračenje (kao što je i kozmičko i rendgensko zračenje, pa čak i ultraljubičasto zračenje). Ionizirajuće zračenje izbija elektrone iz atoma i molekula, zbog čega u tvarima nastaju pozitivno i negativno nabijene čestice (molekule ili njihovi dijelovi) – koje se nazivaju ionima. Dok kemijska reaktivnost iona uzrokuje oštećenja u živim tkivima [5].

S obzirom na raspad atoma razlikujemo alfa (α), beta (β), gama (γ) i neutronsko zračenje (n) (slika 3).



Slika 3. Sposobnost prodora alfa, beta i gama zračenja [5]

Zajednička osobina radioaktivnim izotopima je ionizirajuće zračenje. Radioaktivni izotopi su određeni regulativom kojom se uzimaju u obzir sljedeći parametri: specifična aktivnost beta i gama emitera (A_{sp}, s/γ), specifična aktivnost alfa emitera (A_{sp}, α), površinska aktivnost beta i gama emitera (A_{sp}, s/γ) i površinska aktivnost alfa emitera (A_{sp}, α). Prema našoj regulativi, radioaktivnim se otpadom smatraju oni materijali, onečišćeni radioaktivnim izotopima, kod kojih je premašena jedna od sljedećih vrijednosti [7]:

- A_{sp}, s/γ ≥ 1 x 10^8 Bq/m^3,
- A_{sp}, α ≥ 1 x 10^7 Bq/m^3,
- A_{sp}, s/γ ≥ 5 x 10^3 Bq/m^2,
- A_{sp}, α ≥ 5 x 10^2 Bq/m^2.

Alfa (α) raspad je emitiranje alfa čestica, tj. jezgre atoma helija (2 protona i 2 neutrona). Zbog svoje relativno velike mase, nije prodorno te u zraku ima domet svega nekoliko centimetara. Alfa čestice može zaustaviti već i list papira. Alfa radioaktivni izvori stoga ne predstavljaju ozbiljne opasnosti kao vanjski radioaktivni izvori. Opasne su alfa čestice koje dođu u čovjekovo tijelo (interna kontaminacija), jer alfa čestica ima veliku snagu ionizacije [5].

Beta (β) raspad je emitiranje beta čestica, tj. elektrona. Beta zračenje je prodornije nego alfa zračenje i u zraku ima domet od nekoliko metara. Zaustaviti ga može već tanki sloj aluminijske folije [5].

Gama-radioaktivnost prijelaz je između stanja više pobuđenosti atomske jezgre u stanje niže pobuđenosti ili u osnovno stanje, a elektromagnetsko zračenje visoke frekvencije koje se pritom emitira naziva se gama-zračenje. Gama zračenje je jako prodorno zračenje. Potreban je štit od nekoliko centimetara olova (ili oko pet puta deblji beton) da bi se intenzitet gama zračenja iz radioaktivnog izvora umanjio oko sto puta (ovisno o izvoru) [5].

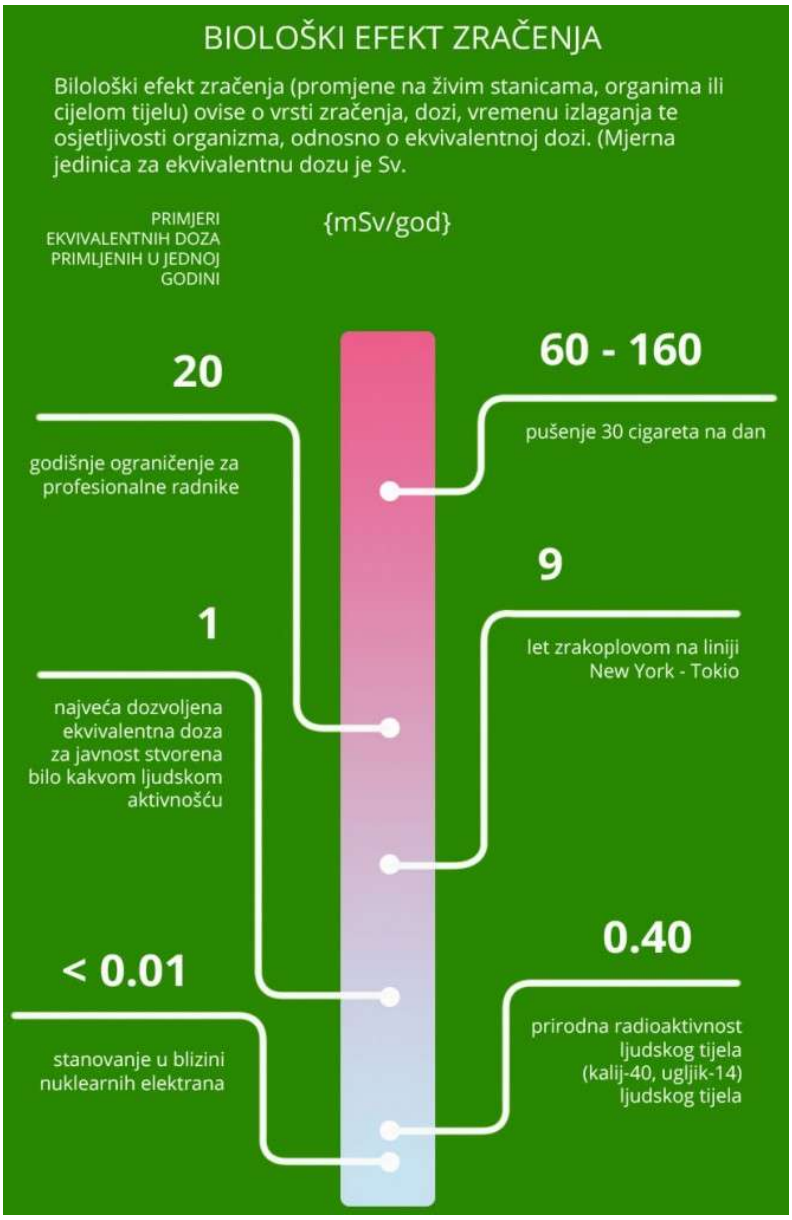
Neutronsko zračenje (n) je emitiranje neutrona koje se pojavljuje kod nekih nuklearnih reakcija, kao što je fisija u nuklearnom reaktoru [5].

Vrijeme poluraspada radionuklida definirano kao vremenski period u kojem se raspadne polovica početnog broja radioaktivnih jezgri. Mjerna jedinica za radioaktivnost materijala je bekerel (Bq), a označava broj raspada u jednoj sekundi (1Bq=1raspad u sekundi) [5].

Iako ne mora biti produkt radioaktivnog raspada, ono što zaista može imati utjecaj na ljudsko zdravlje jest ionizirajuće zračenje koje ima dovoljno energije da u međudjelovanju s kemijskom tvari ionizira tu tvar. Izravne posljedice djelovanja ionizirajućeg zračenja na živi svijet većinom su zakašnjele i teško ih je povezati s uzrokom. Posljedice ozračivanja, bez osjetilne veze s uzrokom zapažaju se tek nakon nekog vremena, od nekoliko sati do nekoliko dana ili čak godina, što ovisi o vrsti i svojstvima tog zračenja. Otuda je razumljiv čovjekov strah, a poznavanje osnovnih svojstava ionizirajućeg zračenja, međudjelovanja zračenja s tvari, a posebno djelovanja zračenja na živa bića izrazito je važno [5].

Pri istraživanju bioloških učinaka ionizirajućeg zračenja potrebno je poznavati (slika 4) [5]:

- jakost ionizirajućeg zračenja
- količinu apsorbirane energije ionizirajućeg zračenja
- način mjerenja biološko-kemijskih promjena po apsorpciji zračenja.



Slika 4. Biološki efekt zračenja [5]

Ionizirajućem zračenju možemo biti izloženi na dva načina [5]:

- unutarnje (izvor zračenja je u živom organizmu, te se to naziva interna kontaminacija),
- vanjsko (izvor zračenja je izvan tijela te može biti ozračeno cijelo tijelo ili samo određeni dio tijela).

Učinci zračenja na čovjeka javljaju se u različitim oblicima i s različitim vremenskim zakašnjenjima. Gledajući na to na kojoj se osobi pojavljuju učinci zračenja, te učinke dijelimo na somatske učinke i genetske učinke [5].

Somatski učinci pojavljuju se na ozračenoj osobi. Koji će se oblik somatskoga učinka pojaviti, ovisi o vremenskom intervalu ozračenja i prostornoj raspodjeli zračenja po tijelu. Značajne simptome, što ih ionizirajuće zračenje uzrokuje na ozračenoj osobi možemo dijeliti na bolesti zračenja, slabost, povraćanje, ispadanje kose, crvenilo na koži i promijenjena krvna slika. A sindromi zračenja mogu biti molekularni, živčani, krvni i probavnog trakta [5].

Genetski učinci zračenja pojaviti će se kod potomaka. Vjerojatnost za pojavu linearno je ovisna o apsorbiranoj dozi ionizirajućega zračenja. Pojavljuju se kao mutacije (pozitivne, negativne). Vjerojatnost pojave mutacija zbog zračenja nadopunjuje se s vjerojatnošću za prirodne, spontane mutacije [5].

Štetne učinke zračenja na čovjeka dijelimo i na [5]:

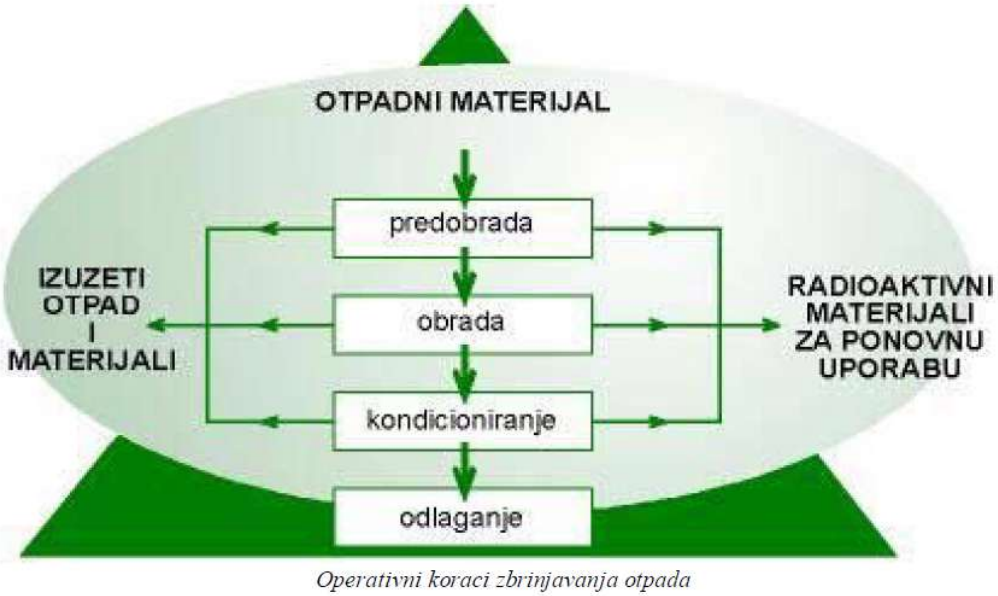
- Stohastičke učinke - značajno je da vjerojatnost za njihov nastanak i njihovo određivanje ovisi o primljenoj dozi (po cijelom području skale mjerenja doze). U to se ubrajaju npr. genetski učinci, razni oblici raka, itd.
- Determinističke učinke – značajno jest da postoji prag doze, ispod kojeg se ne uočavaju takve pojave. Iznad praga je ozbiljnost determinističkih učinaka ovisna o primljenoj dozi. U to se ubraja npr. akutni radijacijski sindrom.

2.3. Priprema, obrada, kondicioniranje i odlaganje RAO

Radioaktivni materijali koji se koriste u različitim primjenama postaju, nakon nekog vremena, djelomično ili potpuno neupotrebljivi, ali često i dalje zadrže veliki dio radioaktivnosti koju su imali (ili stekli) za vrijeme uporabe (npr. istrošeni izvori zračenja ili iskorišteno nuklearno gorivo). Ako ih se ne može (ili ne isplati) preraditi za ponovnu ili daljnju uporabu, odnosno ako nakon prerade preostanu neupotrebljive radioaktivne tvari, dobiva se radioaktivni otpad. Njegova će se radioaktivnost s vremenom smanjivati, te može postati neznatnom već za nekoliko dana ili mjeseci, ali ovisno o vrsti aktivnih atoma koje sadrži otpad može ostati opasno radioaktivan još mnogo godina (pa i mnogo tisuća godina) [7].

Procesu odlaganja radioaktivnog otpada prethode slijedeće faze (slika 5) [1]:

1. Priprema otpada za odlaganje
2. Predobrada radioaktivnog otpada
3. Obrada radioaktivnog otpada
4. Kondicioniranje radioaktivnog otpada
5. Odlaganje radioaktivnog otpada



Slika 5. Operativni koraci zbrinjavanja otpada [1]

Dugogodišnja praksa odlaganja otpada u svijetu urodila je međunarodnim dogovorom koji ističe dva pristupa kao najbolje opcije odlaganja radioaktivnog otpada. Za NRAO i SRAO prikladno je plitko i pripovršinsko odlaganje te duboko geološko odlaganje za sve vrste radioaktivnog otpada, posebno VRAO [7].

Predobrada radioaktivnog otpada početni je korak koji se sastoji od sakupljanja i razvrstavanja otpada, te dekontaminacije i manjeg kemijskog prilagođavanja, a može uključivati i vrijeme privremenog skladištenja. Osobito je važna jer je u pravilu upravo tada najbolja prilika za moguće izdvajanje materijala za recikliranje, kao i otpada koji nije potrebno smatrati radioaktivnim. Osim toga, poželjno je i razvrstati radioaktivni otpad primjereno kasnijim mogućnostima odlaganja (npr. za površinsko ili za duboko odlagalište) [7].

Obrada radioaktivnog otpada sastoji se od operacija kojima je svrha povećati sigurnost ili ekonomičnost pohranjivanja otpada promjenom njegovih svojstava. Temeljni koncepti obrade su smanjivanje obujma otpada, uklanjanje radionuklida i promjena sastava otpada. Tipične operacije kojima se to postiže uključuju spaljivanje gorivog otpada ili prešanje suhog otpada (smanjivanje volumena), isparavanje ili propuštanje tekućeg otpada kroz filtere i ionske izmjenjivače (uklanjanje radionuklida) te izdvajanje kemijskih sastojaka npr. precipitacijom ili flokulacijom (promjena sastava). Za dekontaminaciju tekućeg otpada često treba kombinirati nekoliko spomenutih postupaka, a u procesu može nastati sekundarni otpad (filteri, mulj, itd.) [7].

Kondicioniranje radioaktivnog otpada čine operacije kojima se otpad prevodi u oblik prikladniji za rukovanje, prijevoz, skladištenje i odlaganje. To su operacije imobiliziranja i pakiranja. Uobičajeni postupci imobilizacije tekućeg otpada su zalijevanje u bitumensku ili betonsku matricu (solidifikacija) za otpad manje radioaktivnosti, odnosno u staklenu matricu (vitrifikacija ili ostakljivanje) za visokoaktivni otpad. Imobilizirani i drugi kruti otpad obično se pakira u spremnike različitih vrsta, od standardnih dvjestolitarskih čeličnih bačvi, do posebno konstruiranih spremnika s debelim stjenkama, ovisno o vrstama i koncentraciji radionuklida, uz eventualno zapunjavanje materijalima odgovarajućih svojstava [7].

Odlaganje je konačno smještanje otpada u odlagalište, bez namjere da se iz njega ikada vadi i bez nužnog oslanjanja na dugoročno nadgledanje i održavanje odlagališta. Uz prethodnu obradu i kondicioniranje, sustav prirodnih i izgrađenih višestrukih barijera oko otpada u odlagalištu pruža jamstvo da će se bilo kakvo ispuštanje radionuklida u okoliš odvijati prihvatljivom sporošću. Ima barijera koje osiguravaju potpunu izolaciju otpada u nekom vremenskom razdoblju, poput metalnih spremnika, kao i takvih koje usporavaju prodor radionuklida u okoliš, poput materijala kojim se zapunjava odlagalište ili stijene u kojoj je izgrađeno [7]. Odlagališta se mogu nalaziti na površini ili na različitim dubinama ispod zemlje, a posebnu skupinu čine duboka odlagališta u geološki stabilnim i nepropusnim slojevima, namijenjena visokoaktivnom otpadu (kakvih za sada još nema u redovitom pogonu).

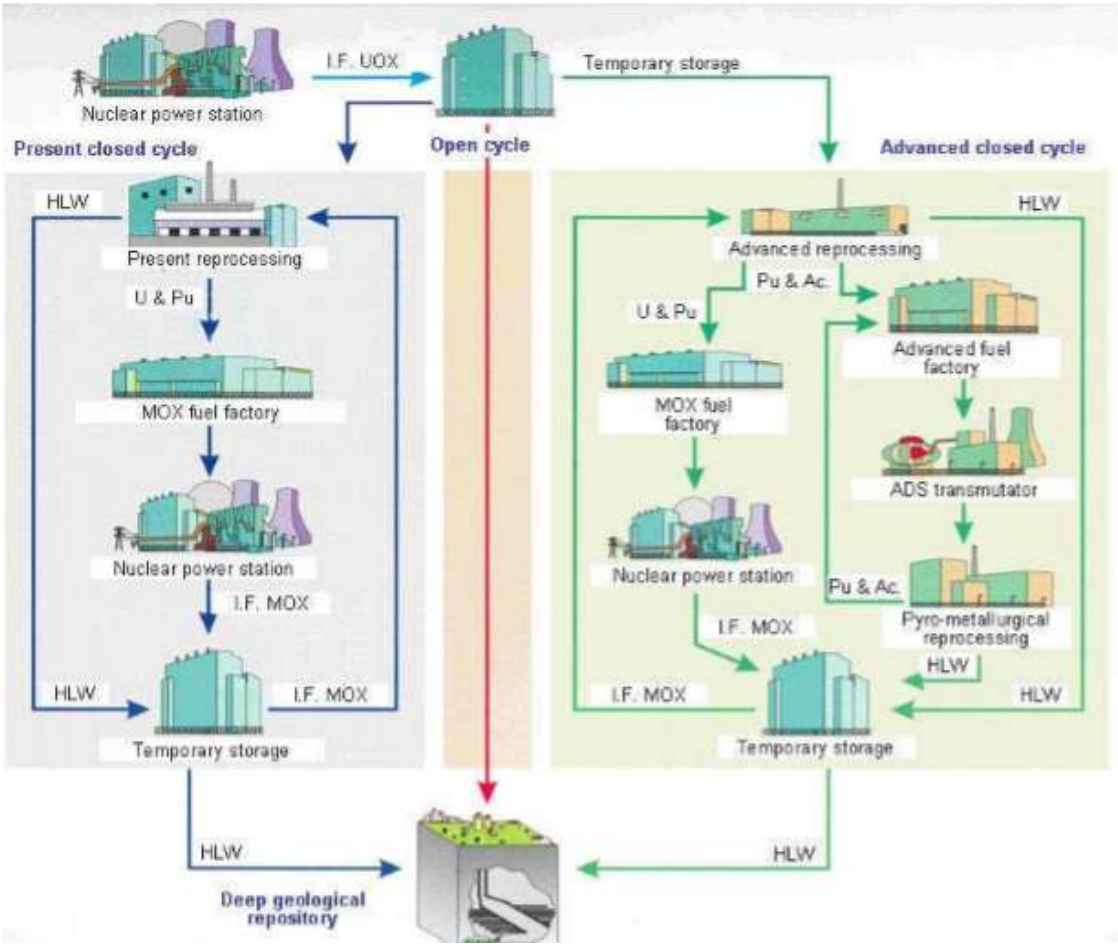
Treba razlikovati pojam skladištenja, koji označava privremeno čuvanje radioaktivnog otpada (pri čemu je osigurana zaštita okoliša), kako bi se na primjer olakšala obrada, kondicioniranje i odlaganje te umanjila aktivnost otpada. Jedan takav primjer je skladištenje iskorištenog nuklearnog goriva. Njegovo skladištenje i odlaganje je zahtjevno i s toga se treba adekvatno riješiti [7].

U pogledu gospodarenja iskorištenim nuklearnim gorivom (ING) u svijetu se danas razlikuju tri strategije ili ciklusa koji su prikazani na slici (6) [2].

Otvoreni ciklus (eng. Open cycle) smatra ING otpadom koji se direktno odlaže. Ipak, prije samog odlaganja ING se privremeno skladišti radi hlađenja u vremenu od 40 do 50 godina kako bi se ujedno smanjila radioaktivnost, a također i pružilo dovoljno vremena za gradnju odgovarajućeg odlagališta. Neke zemlje planiraju povećati vremenski period skladištenja ING na 50 do 100 godina [2].

Zatvoreni ciklus (eng. Present closed cycle) ne smatra ING otpadom već ga ponovo procesira da bi se izdvojile radioaktivne komponente, primarno uran i plutonij. Tako nastaje MOX gorivo koje se ponovo koristi u nuklearnim reaktorima. Takva vrsta reprocesiranja proizvodi velike količine otpada, a jedan dio predstavlja VRAO tekućina koja treba biti propisno kondicionirana (najčešće vitrifikacija) prije odlaganja [2].

Napredni zatvoreni sustav (eng. Advanced closed cycle) je još uvijek u istraživačko-razvojnoj fazi. U ovom slučaju planira se uz izdvajanje urana i plutonija odvojiti i sve ostale dugoživuće fisijske produkte. Ideja je upotrijebiti transmutaciju da bi se dugoživući i jako toksični radionuklidi transformirali u nove produkte s manjom masom i kraćim vijekom trajanja reducirajući tako njihovu toksičnost [2].



Slika 6. Ciklusi nuklearnog goriva [2]

Kratkovječni radioaktivni otpad može se skladištiti dok mu aktivnost ne opadne toliko da se smije kontrolirano ispuštati u okoliš ili odlagati kao običan otpad. Iako se za najveći dio radioaktivnog otpada planira izoliranje u odlagalištu ili barem odležavanje u skladištu, neki otpadni radioaktivni plinovi i tekućine mogu se i odmah kontrolirano ispuštati u okoliš (unutar dopuštenih granica radioaktivnosti), što se također smatra postupkom odlaganja [2].

3. DUBOKO GEOLOŠKO ODLAGANJE RAO

3.1. Mogućnosti dubokog odlaganja i prikladne vrste stijena

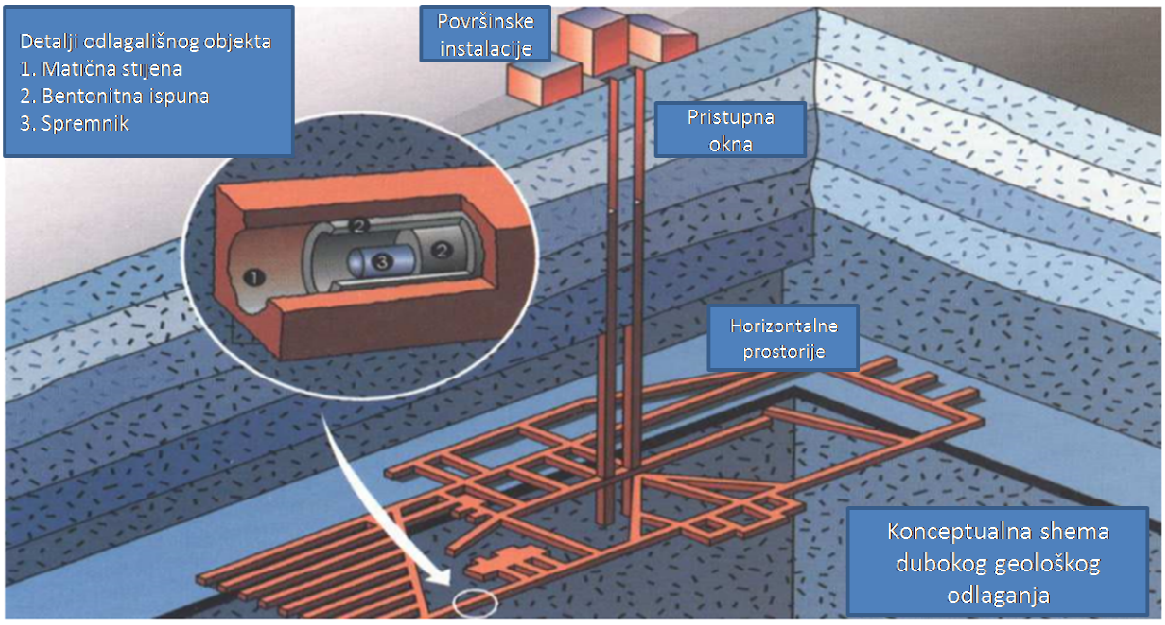
Pod dubokim geološkim odlaganjem podrazumijeva se smještanje RAO u podzemne prostorije izgrađene duboko u prikladnim geološkim formacijama, bez namjere da se od tamo ikada vadi, te bez oslanjanja na dugoročni nadzor ili održavanje [7].

Dubina na kojoj će se graditi odlagalište ovisi o specifičnim značajkama lokacije, značajkama projektiranog sustava za odlaganje, prirodi otpada i regulatornim zahtjevima za dugoročnu sigurnost. Općenito se smatra da će buduća geološka odlagališta biti građena na dubinama od 250 do 1 500 m [7].

Glavni cilj dubokog geološkog odlaganja je maknuti RAO iz čovjekove okoline i osigurati da zračenja radionuklida ostanu ispod propisanih granica [4]. Neke zemlje razmatraju odlaganje svih vrsta RAO, uključujući i NRAO, u duboka geološka odlagališta jer smatraju da će se veći troškovi odlaganja kompenzirati s povećanjem sigurnostiza ljude i okoliš [2].

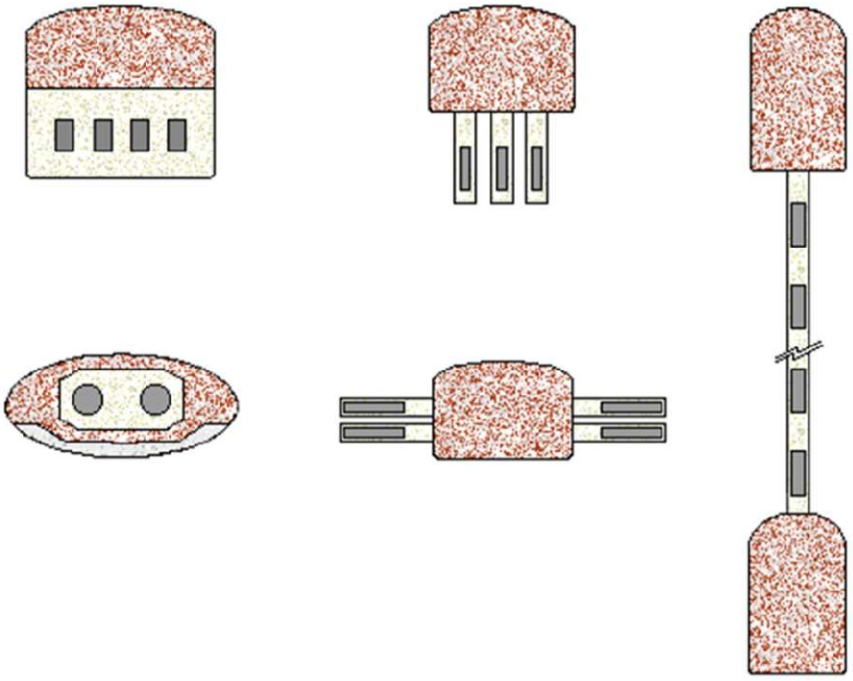
Danas se u svijetu razmatraju dvije mogućnosti dubokog geološkog odlaganja. Prva i realnija mogućnost je izrada kopanog ili rudarskog podzemnog odlagališta, a druga je odlaganje RAO u duboke bušotine izbušene s površine terena. U ovom radu razmatrat će se problematika samo kopanih odlagališta.

Slika 7 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.



Slika 7. Koncept dubokog geološkog odlagališta RAO (modificirano iz [2])

Na slici 8 prikazane su mogućnosti odlaganja spremnika s RAO-om u horizontalne ili vertikalne prostorije koje se kopaju ili buše iz pristupnih tunela [2]. Prostor između matične stijene i spremnika se ispunjava prikladnim brtvenim materijalom.



Slika 8. Mogućnosti odlaganja spremnika s RAO-om u podzemna odlagališta [2]

Sigurnost odlagališta RAO primarno ovisi o prirodnim značajkama matične stijene [2]. 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 [2] odnosno provesti odgovarajuće istražne radove.

Glavni funkcionalni zahtjevi za geološku barijeru su [2]:

- štititi inženjerske barijere osiguravajući stabilne hidrauličke, mehaničke i geokemijske uvjete,
- vrlo spor i stabilan protok podzemne vode u okolini odlagališta,
- usporavanje pronosa radionuklida,
- omogućiti jednostavnu izgradnju i sigurno funkcioniranje odlagališta,
- spriječiti ulazak ljudi u odlagalište (nakon zatvaranja odlagališta).

Da bi se ti zahtjevi ispunili, geološka matična formacija bi trebala imati [2]:

- dovoljnu debljinu, dubinu i protezanje da izolira odlagalište od potencijalnih prirodnih razornih procesa ili od neželjene ljudske intruzije,
- tektonsku stabilnost (daleko od aktivnih rasjeda) i nisku seizmičku aktivnost,
- malu strukturnu kompleksnost,
- litološku homogenost,
- nisku vodopropusnost i niski hidraulički gradijent,
- odgovarajuća svojstva retencije radionuklida.

Stijene koje najčešće ispunjavaju uvjete za geološku matičnu formaciju su: eruptivne stijene, glinovite stijene (plastične gline i glinenci) i ležišta kamene soli [2].

Eruptivne stijene karakteriziraslaba propusnost (pod uvjetom niske ispucalosti), visoka kemijska stabilnost, niska ekonomska vrijednost, kao i značajna čvrstoća. Iskop je zato relativno jednostavan i zahtijeva minimalnu podgradu, ali neadekvatna tehnika iskopa može uzrokovati stvaranje novih pukotina koje nemaju mogućnost samozacijeljenja. Ova vrsta stijene je razmatrana od strane mnogih zemlja u Europi (Češka, Finska, Švedska, Francuska, Španjolska, Švicarska, Ukrajina) kao i drugdje (Kanada, Kina, Indija) [8].

Glinovite stijene koje su interesantne za geološko odlaganje kreću se u širokom rasponu od plastičnih glina 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 [9] 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. Prednost glinovitih stijena je što nemaju ekonomsku vrijednost. 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 [2]. Glinovite stijene su također osjetljive na kemijske promjene kao npr. pojavu oksidacije tijekom ventilacije odlagališta [2]. Ovi tipovi stijena se razmatraju za potrebe dubokog geološkog odlaganja u Bjelorusiji, Belgiji, Francuskoj, Mađarskoj, Španjolskoj i Švicarskoj [8].

Kamena sol također ima vrlo nisku propusnost, a zbog puzanja (povećavanje deformacija pri konstantnom opterećenju) sol vjerojatno ima sposobnost samozacijeljenja [2]. Sol ima ekonomsku vrijednost. Odlagalište građeno u ležištima kamene soli je vrlo osjetljivo na eventualne prodore svježe vode (izluživanje soli). Osim toga, podzemne prostorije u kamenoj soli mogu zahtijevati ugrađivanje podgrade. Zemlje koje istražuju ovu mogućnost su Njemačka, Bjelorusija, Danska, Nizozemska i Ukrajina [8].

Osim navedenih istražuju se i neki drugi tipovi stijena kao npr. nezasićeni vulkanski tufovi (Yucca Mountain, Nevada, SAD) [8].

3.2. Koncept višestrukih barijera

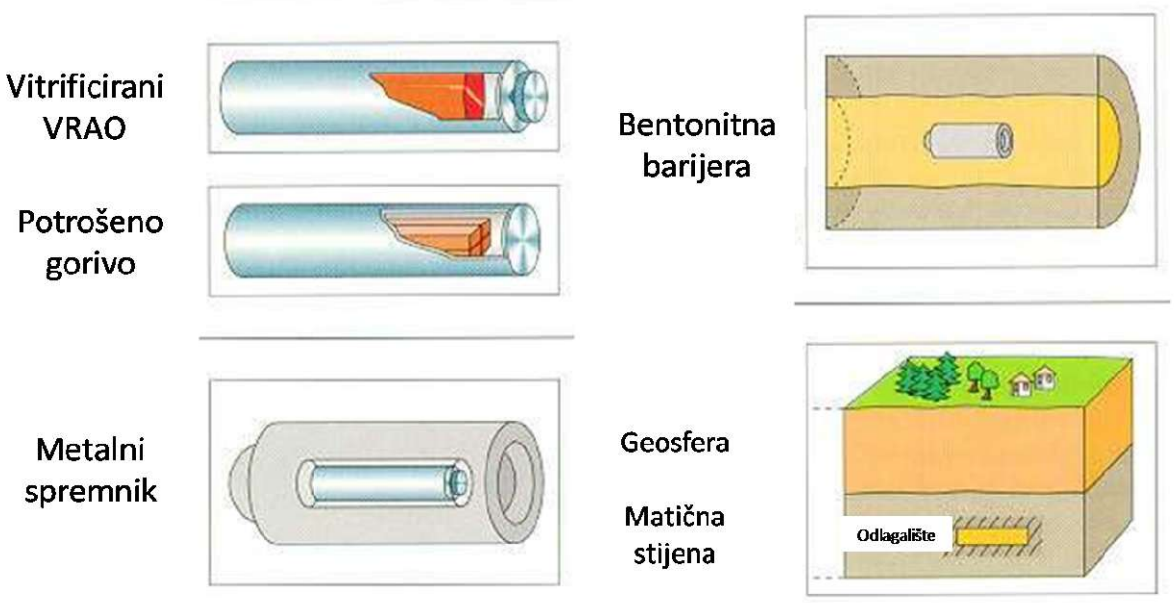
Da bi se osigurao zahtijevani stupanj izolacije RAO, projekti dubokih geoloških odlagališta općenito usvajaju koncept višestrukih barijera [2]. Dvije glavne komponente takvog koncepta su inženjerski barijerni sustav (IBS) i prirodna (geološka) barijera.

IBS podrazumijeva čvrstu matricu otpada (npr. vitrificirani RAO), metalni spremnik i odgovarajući materijal ispune 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 [2].

Izvorno se razmišljalo 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 [2].

Slika 9 prikazuje koncept višestrukih barijera za duboko odlagalište VRAO. U prikazanom primjeru koristi se bentonitna ispuna u prostoru između spremnika i matične stijene. Vitrificirana matrica otpada tj. staklo bi trebalo imati visoku otpornost na radioaktvno djelovanje i koroziju. Sljedeći element barijernog sustava je metalni spremnik koji bi trebao jamčiti dugotrajnu izolaciju RAO od nekoliko tisuća godina (slika 10). Produkti koji nastaju korozijom spremnika bi trebali osigurati povoljne kemijske uvjete za izolaciju otpada u ovakvom sustavu. Da bi sustav bio što dugovječnijiu nekim projektima predviđa se korištenje spremnika od bakra ili titana za koje se procjenjuje da mogu izolirati RAO i nekoliko desetaka tisuća godina [2].

Bentonitna ispuna (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 [2].



Slika 9. Koncept višestrukih barijera dubokog geološkog odlagališta VRAO (modificirano iz [2])



Slika 10. Metalni spremnik za VRAO i ING [1]

Prirodnu barijeru čini prvenstveno odabrana matična stijena u koju je smješteno odlagalište te ostatak geosfere. Matična stijena bi trebala pružiti povoljne geokemijske uvjete za izolaciju RAO, uvjete niske vodopropusnosti odnosno vrlo spor i ograničen dotok vode u prostor odlagališta, te mehaničku i geološku stabilnost. 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 matrične difuzije) te dugoročnu stabilnost hidrogeoloških uvjeta. Trebalo bi napomenuti da usporavanje pronosa radionuklida smanjuje problem zbog raspada radioaktivnog materijala [2].

3.3. Odabir lokacije i provedba istražnih radova

Odabir lokacije budućeg odlagališta RAO je dugotrajan proces na koji utječu brojni čimbenici. U početnoj fazi potrage za lokacijom budućeg odlagališta nastoji se primjenom različitih isključnih kriterija, koji se prvenstveno odnose na hidrogeološke, hidrološke i geološke (litologija, tektonika, seizmika i dr.) uvjete, eliminirati široka područja korištenjem GIS tehnologije obzirom na postavljene kriterije [1]. U slijedećoj 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 [1]. Proces odabira lokacije bi trebala usmjeravati „struka“, ali on mora biti transparentan, javan i demokratičan, tako da uključuje sve dionike procesa [1]. 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 [1].

Na odabranoj lokaciji/lokacijama budućeg odlagališta istražnim radovima treba utvrditi sve relevantne značajke matične stijene i ostatka geosfere [1]. Program istražnih radova je potrebno smisleno planirati, obično po fazama, te voditi, nadzirati i prilagođavati tijekom samih radova ovisno o rezultatima istraživanja [1].

Rezultati istraživanja bi trebali potvrditi značajke matične stijene kao i šire geosfere koje se od njih očekuju (vidi poglavlje 3.1). Istražni radovi za lokaciju budućeg odlagališta RAO su slični rudarskim istraživanjima, ali ipak imaju bitne specifičnosti [2]. Ovdje je glavni naglasak na detaljnoj geološkoj karakterizaciji strukture matične stijene i njene propusnosti [2]. 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 [2]. Detaljna karakterizacija matične stijene bit će omogućena izgradnjom pristupnih okana i horizontalnih prostorija odlagališta.

3.4. Gradnja odlagališta i oštećenja matične stijene

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 ne predstavlja problem za danas raspoložive tehnike i 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 velikog utjecaja 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 [2].

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, slika 11). 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 [2]. Treba imati na umu da će u odlagalištu kroz dugo vrijeme postojati snažni izvori topline (VRAO) tako da će ispuna (npr. bentonit) i okolna matična stijena biti izloženi termalno-hidrauličko-mehaničkim djelovanjima [2].

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) [2].

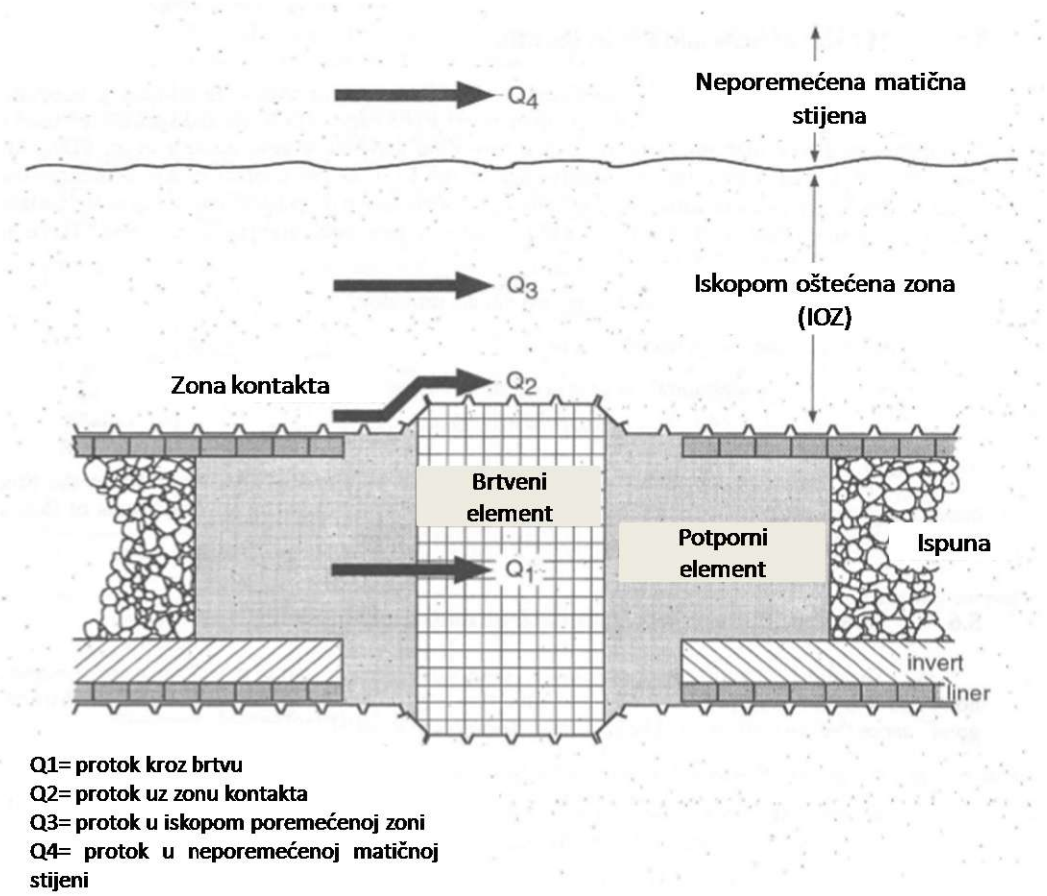


Slika 11. Strojni iskop tunela (TBM)

U fazi konačnog zatvaranja odlagališta potrebno je zabrtviti i ispuniti pristupne prostorije i okna tako da se onemoguće putevi za migraciju 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).

Slika 12 prikazuje konceptno rješenje brtvenog čepa ugrađenog u horizontalnoj pristupnoj prostoriji s mogućim putevima procjeđivanja vode i pronosa radionuklida. Brtve se nastoji dublje usjeći u stijenu kako bi se presjekli eventualno postojeći putevi kroz pukotine nastale u blizini otvora. Problematika ponašanja ovakvih brtvi slična je onima koji se javljaju kod IBS-a odnosno ispune oko spremnika s otpadom, ali sa značajnom razlikom da se ovdje ne očekuju visoke temperature. Bentonitne brtve su

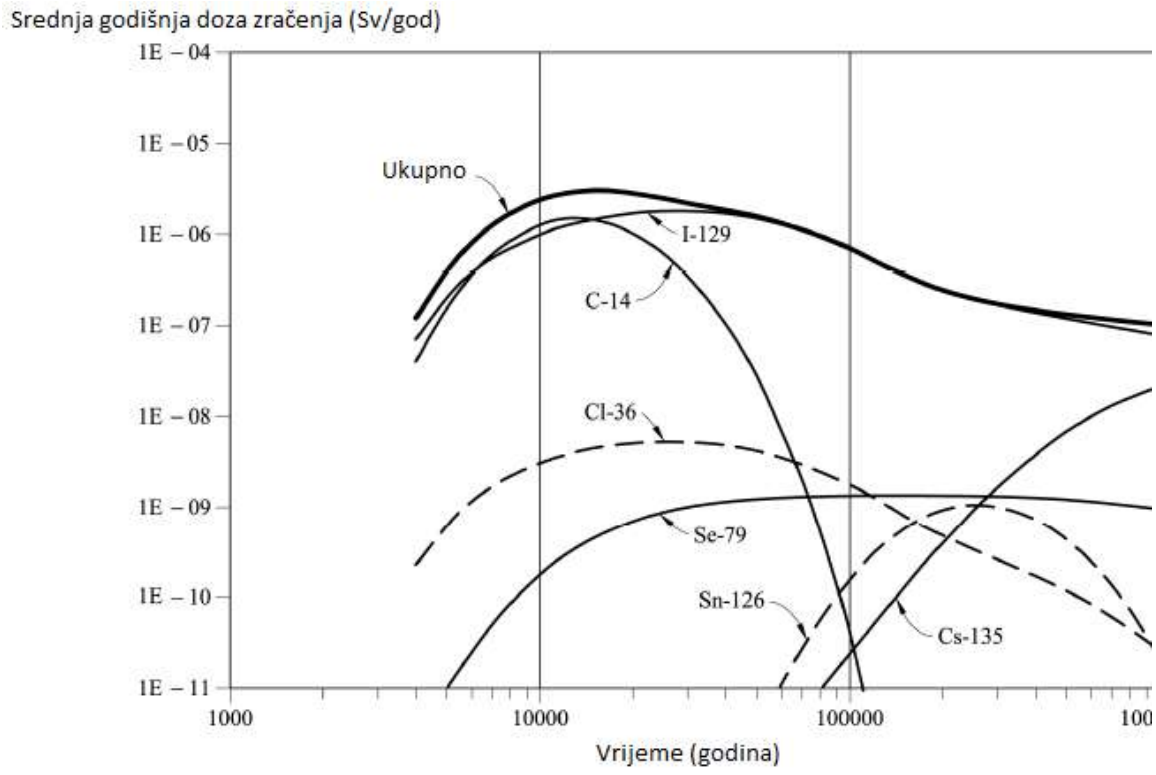
trenutno preferirana opcija ali se razmatraju i drugi materijali kao što su beton i bitumen [2].



Slika 12. Konceptno rješenje brtvenog čepa za horizontalnu pristupnu prostoriju (modificirano iz [2])

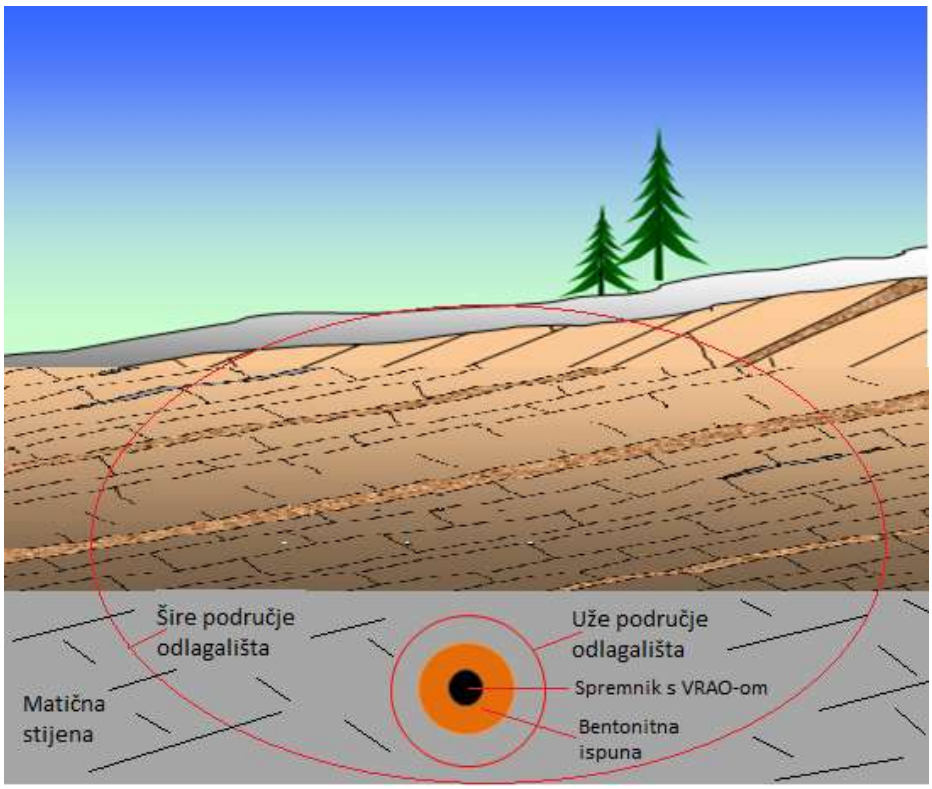
3.5. Procjena sigurnosti dubokog odlagališta

Cilj procjene sigurnosti odlagališta je kvantitativno demonstrirati sposobnost odlagališta za sigurnu i učinkovitu izolaciju VRAO izvan biosfere kroz vrlo duga vremenska razdoblja (reda veličine 10^4 – 10^6 godina) unutar kojih su dugoživući radionuklidi toksični i opasni po zdravlje čovjeka i okoliš [2]. Procjena sigurnosti treba pokazati da će razine zračenja koje bi odlagalište eventualno moglo ispuštati u okoliš biti ispod dopuštenih vrijednosti koje su ustanovljene važećom regulativom o zaštiti okoliša. Rezultat procjene sigurnosti nekog odlagališta može se prikazati pomoću vremenskog dijagrama (slika 13) izračunatih krivulja promjene srednjih godišnjih efektivnih vrijednosti zračenja uslijed oslobađanja pojedinih radionuklida kao i ukupne efektivne doze zračenja kao u primjeru koncepta španjolskog odlagališta VRAO [10].



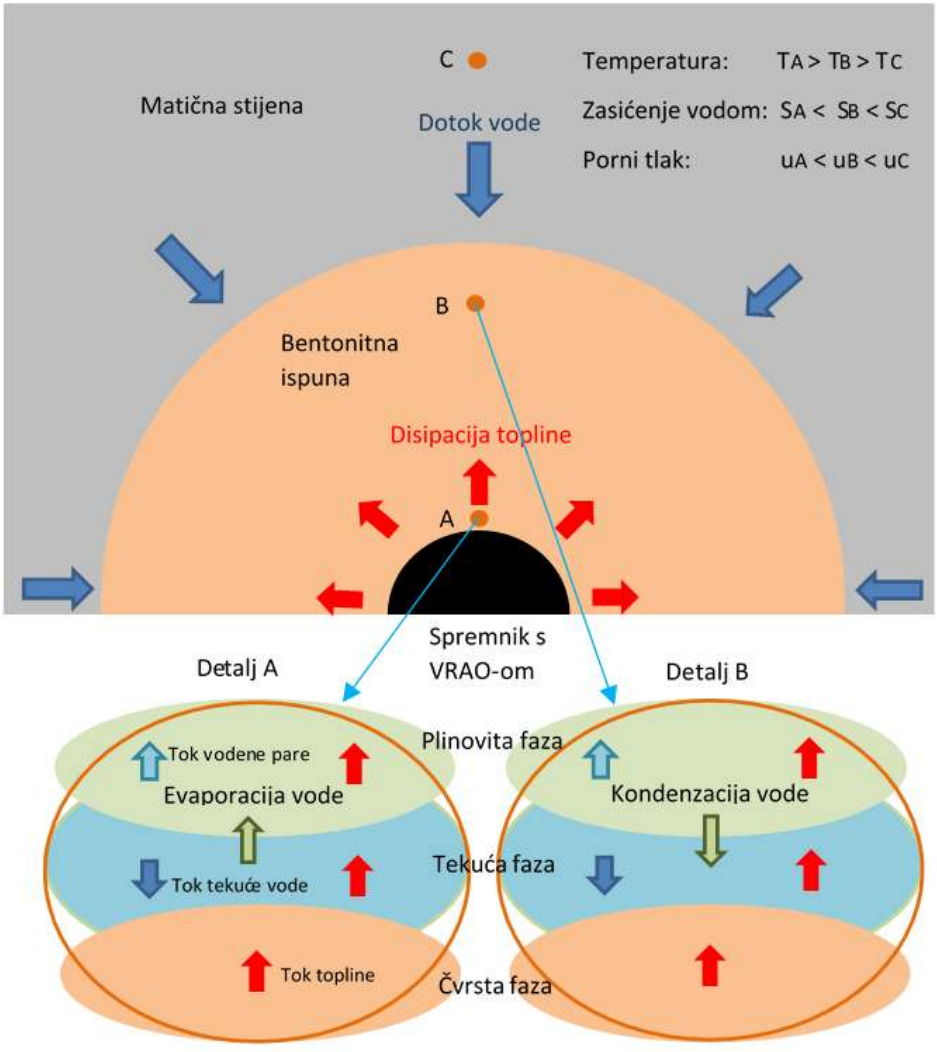
Slika 13. Izračunate srednje godišnje doze zračenja za koncept španjolskog odlagališta VRAO (modificirano iz [11])

Procjena sigurnosti na temelju numeričke analize ponašanja dubokog geološkog odlagališta predstavlja 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 [2]. Sve njih naravno nije moguće opisati jedinstvenim, sveobuhvatnim numeričkim modelom. Potrebno je definirati i odgovarajuće opisati samo one čimbenike i procese u predvidivim 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 14) koji se opisuju i analiziraju zasebno. Uže područje odlagališta uključuje spremnik, bentonitnu ispunu i dio matične stijene koji se nalaze pod direktnim 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). Šire područje odlagališta obuhvaća matičnu stijenu i ostatak geosfere (sve litološke jedinice) do površine terena koja se nalazi u kontaktu s biosferom.



Slika 14. Uže i šire područje dubokog geološkog odlagališta RAO [1]

Bentonitna ispuna, koja čini tzv. inženjersku brtvenu barijeru, ugrađuje se u podzemnoj prostoriji između spremnika s VRAO-omi 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 [1].



Slika 15. Procesi disipacije topline i hidratacije bentonitne ispune u užem području odlagališta VRAO [1]

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 pornog tlaka) u ispuni (slika 15) [1]. 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 [1]. Ispuna se uz unutarnju granicu steže zbog grijanja i evaporacije vode, a uz vanjsku (kontura matične stijene) bubri zbog hidratacije bentonita [1]. U konačnici, ispuna bi trebala biti zasićena vodom što će rezultirati bubrenjem bentonita i značajnim tlačnim naprezanjem na matičnu stijenu. Ovakvo ponašanje ispune opisuje se složenim termo-hidro-mehaničkim spregom (engl. thermo-hydro-mechanical coupling, THMC) koji su razvijali brojni istraživači kao npr. [11,12,13,14].

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 [2]. Radionuklidi koji su otopljeni u vodi mogu migrirati kroz odlagalište uslijed mehanizama advekcije i difuzije [1]. 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 [1]. 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 [1]. 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. [2]. Modele pronosa radionuklida u užem području odlagališta koji se oslanjanju na THM model ponašanja barijere razvili su [15,6,17]. 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 [2]. Zbog toga je vrlo važna kvalitetna hidrogeološka karakterizacija šireg područja odlagališta kojom 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 u vidu koloida ili su adsorbirani na druge otopljene tvari i ovdje su, kao i prethodno u užem području, podložni procesima advekcije i difuzije kao i fizikalnim i kemijskim interakcijama sa stijenama kojima prolaze, te procesima disperzije i usporavanja pronosa [2].

4. ODLAGANJE NISKO I SREDNJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

Problemi koji se javljaju pri odlaganju NRAO i SRAO razlikuju se od odlaganja VRAO i znatno ih je lakše riješiti [2]. Osnovna razlika je u tome da NRAO i SRAO ne emitiraju značajne količine topline jer su u njima uglavnom prisutni kratkoživući radionuklidi čija je aktivnost niska do umjerena. 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 u glavnom površinsko ili pripovršinsko uz primjenu koncepta 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 funkcionalnih, 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, ako je okolno tlo vrlo niske vodopropusnosti [2].

Zbrinjavanje nisko radioaktivnog otpada (NRAO) i srednje radioaktivnog otpada (SRAO) počinje već na mjestu nastanka, a proizvođač otpada vodi evidenciju o njegovu nastanku, količinama, karakteristikama i aktivnosti [7]. Prije konačnog odlaganja, otpad se skladišti ili u privremenom skladištu na lokaciji proizvođača ili u posebno izgrađenim skladištima za NRAO i SRAO uz primjenu mjera sigurnosti i monitoring. Otpad se provjerava i po potrebi prepakira, kondicionira i/ili obrađuje te konačno transportira u odlagalište.

Kratkovječni nisko radioaktivni otpad može se skladištiti dok mu aktivnost ne opadne toliko da se smije kontrolirano ispuštati u okoliš, reciklirati ili odlagati kao običan otpad u skladu s propisima o gospodarenju otpadom [5].

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 [1].

Načineodlaganja NRAO i SRAO možemo podijeliti na plitko i pripovršinsko (podzemno) odlaganje.

Pri plitkom odlaganju otpad se smješta na površinu ili vrlo blizu površine. Plitka se odlagališta koriste u mnogim zemljama više od 30 godina, najčešće za NRAO. Kako je najjednostavnije bilo koristiti obične plitke rovove u tlu, na tom su pristupu djelovala mnoga prva odlagališta. Očigledno je zašto su najveći uspjesi s tim pristupom postignuti na lokacijama koje su bile na suhim područjima. U suhim uvjetima malo je ili zanemarivo protjecanje podzemnih voda kroz ukopani otpad pa ne postoji opasnost od širenja radionuklida vodom u okoliš [7].

Uspješan primjer plitkog odlaganja je odlagalište Beatty u Nevadi (slika 16), koje je sada zatvoreno. Sličan se način odlaganja planira izgradnjom postrojenja u Ward Vallyu, u pustinji Mojave (Sjeverna Amerika), gdje je razina podzemnih voda čak 200 metara ispod razine tla.

U vlažnijoj klimi takav je pristup manje uspješan. Štoviše, u nekim osobitim okolnostima (plavljenje rovova zbog neodgovarajućeg izbora lokacije ili neodgovarajuća drenaža) radionuklidi se mogu širiti prema dolje, a ovisno o vrsti stijena i bočno izvan rovova. Tako radionuklidi iz otpada mogu dospjeti u vodotokove i u podzemnu vodu [7].



Slika 16. Odlagalište otpada u Beatty, Nevada [18]

Pripovršinska odlagališta ispod su razine tla, ali na relativno manjim dubinama. Njihova izvedba uključuje zonu neporemećene stijene ili sedimenta iznad odlagališta koja fizički dijele odloženi otpad od površine terena. Osim što se time koriste prednosti pogodnih hidrogeoloških i geokemijskih svojstava prirodnih geoloških formacija, takav pristup znatno smanjuje rizik od nenamjernog upada ljudi. Sve izgrađene inženjerske barijere u pripovršinskim odlagalištima slične su onima koje se grade oko spremnika za plitka odlaganja [7].

Pripovršinska odlagališta, na dubinama većim od 50 metara, već su prihvaćena i rade u nekoliko zemalja. U Švedskoj, pokraj Forsmarka, izgrađeno je 1989. jedno takvo odlagalište (SFR) u gnajsu na dubini od 60 metara ispod Baltičkog mora. Ono je predviđeno za odlaganje NRAO i SRAO. U Finskoj, na otočiću Olkiluoto, izgrađene su dvije nuklearke i odlagalište za NRAO i SRAO koje je pušteno u rad 1992. godine. Otpad je razvrstan prema aktivnosti, pakiran u spremnike i kontejnere (slika 17) koji se smještaju u betonom obložene silose iskopane u granitu, na dubini od 60 do 100 metara ispod površine (slika 18). Promjer silosa je 24 m, a visina 34 m [3].



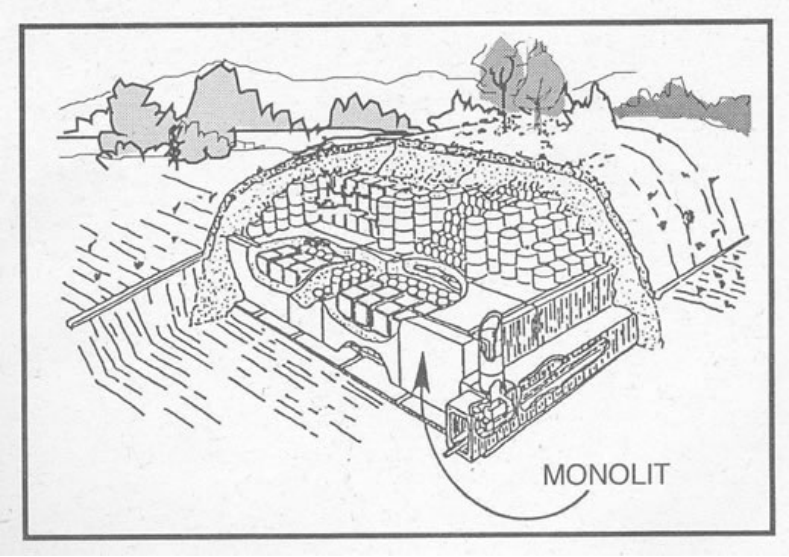
Slika 17. Kontejner sa spremnicima za RAO u odlagalištu Olkiluoto, Finska [1]



Slika 18. Pogled usilos s odloženim RAO u odlagalištu Olkiluoto, Finska [1]

Najjednostavnije površinsko odlagalište je običan plitki rov u kojem se otpad prekriva slojem tla. Danas je uobičajeno da se u takvom plitkom odlagalištu postavi odgovarajuća inženjerska barijera na dno i bokove, te da zemljani pokrov sadrži jedan nepropusni sloj s drenažnim kanalima. Radioaktivni se otpad obično obrađuje prije odlaganja i dodatno izolira u nepropusnim spremnicima i betonskim kontejnerima [5].

Druga varijanta površinskog odlagališta je zidana betonska građevina, plitko ukopana ili sagrađena iznad površine terena (slika 19). Građevina se sastoji od prostorija (slika 20) koje se redom popunjavaju spremnicima s otpadom. Kada se neka prostorija popuni, zatvara se, a prije toga spremnici s otpadom se mogu zaliti betonom ili ispuniti drugim materijalom za popunu i stabilizaciju. Metalni spremnici s radioaktivnim otpadom polažu se na armirano-betonsku podlogu i zatrpavaju šljunkom, pijeskom i glinom. Varijanta odlagališta poznata kao betonski monolit predstavlja standardizirano rješenje odlaganja otpada srednje i niske aktivnosti [5]. Razlika je u tome što su metalni spremnici s radioaktivnim otpadom smještaju u armirano-betonske kontejnere koji se po određenom rasporedu polažu na armirano-betonsku podlogu opremljenu drenažnim sustavom. Nakon popune predviđenog prostora, omeđenog oplatom i ojačanog armaturom, armirano-betonski kontejneri ograđuju se betonskim zidom čime se dobiva monolitna struktura koja se obično prekriva s nekoliko slojeva prirodnih i umjetnih materijala [5].



Slika 19. Površinsko odlagalište s monolitnom strukturom [18]

Kao materijali za izradu pokrova uglavnom se koriste različiti šljunkoviti, pjeskoviti i glinoviti prirodni materijali s lokacije i sintetičke folije visokih hidroizolacijskih svojstava (geomembrana). Time se dodatno formira još jedna inženjerska barijera. Slojevi pijeska i šljunka koriste se za drenažu, tj. prikupljanje oborina i površinskih voda kako bi se spriječio njihov prodor u odlagalište i omogućila kontrola

kvalitete. Odlagalište se vizualno uklapa u okoliš ozelenjavanjem površinskog sloja humusa (slika 21) [5].



Slika 20. Površinsko odlagalište za NRAO i SRAO u El Cabrilu, Španjolska [2]



Slika 21. Površinsko odlagalište za NRAO i SRAO u Aubu, Francuska [2]

Neke zemlje odabrale su varijantu dubokog geološkog odlaganja za NRAO i SRAO. Odvođenje nastalog plina iz takvog otpada je puno teže riješiti kad je otpad odložen na velikoj dubini. Na slici 22 prikazan je odloženi otpad u nekadašnjem rudniku soli u Morslebenu u Njemačkoj.



Slika 22. Duboko podzemno odlagališteza NRAO i SRAO u nekadašnjem rudniku kamene soliu Morslebenu, Njemačka [18]

5. ZAKLJUČAK

Osnovna zadaća odlagališta radioaktivnog otpada je izolirati radioaktivni materijal od okoliša, odnosno spriječiti emisiju radioaktivnih nuklida u biosferu. To se postiže kondicioniranjem otpada, postavljanjem višestrukih barijera između radioaktivnog otpada i okolnog geološkog medija, te odabirom što prikladnije geološke strukture u koju će otpad biti pohranjen.

Za sada se ING privremeno skladišti u posebnim skladištima s obzirom da za VRAO još ne postoje odlagališta, dok su za NRAO i SRAO već izgrađena i operativna (Finska, Francuska, Njemačka, Španjolska). Problem nije samo pronaći lokaciju odlagališta nego i napraviti pouzdano i sigurno tehničko rješenje odlaganja. Budući da se od dubokog geološkog odlaganja očekuje da VRAO bude sigurno izoliran tisućama godina, s vremenom se može javiti problem pronosa radionuklida koji može ugroziti biosferu i koji svakako trebamo spriječiti.

S današnjom tehnologijom koja je u konstantnom razvoju te stvaranjem novih vrsta materijala možemo očekivati i bolja tehnička rješenja za zbrinjavanje radioaktivnog otpada u budućnosti. No, kakvo će se odlagalište radioaktivnog otpada sagraditi u nekoj državi, ovisi o vrsti, količini RAO, lokalnim geološkim uvjetima, o mogućnosti skladištenja, isplativosti prerade i kondicioniranju RAO te kakva je u konačnici energetska strategija države.

6. POPIS LITERATURE

[1] Kavur, B. Materijali za kolegij Geotehničko-ekološki zahvati. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet u Varaždinu, ak. god. 2015/16.

[2] Gens, A., Thomas, H.R. 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). June 2006.

[3] Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Narodne novine. 2013. Broj 141. [23.11.2013.]

[4] Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva. Narodne novine. 2014. Broj 125. [17.10.2014.]

[5] Zbrinjavanje radioaktivnog otpada. Dostupno na: http://radioaktivniotpad.org/. Datum pristupa: 10.06.2016.

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

[7] Radioaktivni otpad. Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Radioaktivni otpad. Datum pristupa: 20.05.2016.

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

[9] Barnichon JD, Volckaert G. 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, 2002. pp. 285-294.

[10] Astudillo J. El almacenamiento geológico profundo de los residuos radiactivos de alta actividad. ENRESA, Madrid, 2001. 200 pp.

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

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

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

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

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

[16] Gens, A., Guimaraes, L. do N., Garcia-Molina, A. and Alonso, E.E. Factors controlling rockclay buffer interaction on a radioactive waste repository. Engineering Geology, 2002a. 64, 297-308.

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

[18] Odlagalište otpada u Beatty, Nevada. Dostupno na: http://lasvegassun.com/news/ 2015/oct/23/nuclear-repository-fire-shines- light-on nevadas-wa/. Datum pristupa: 10.06.2016.

[19] Nemis. Radioaktivni otpad. Dostupno na: http://www.nemis.hr/. Datum pristupa: 11.06.2016.

7. POPIS SLIKA

Slika 1. Klasifikacija i volumeni RAO [5]

Slika 2. Prikaz izvora radijacije [5]

Slika 3. Sposobnost prodora alfa, beta i gama zračenja [5]

Slika 4. Biološki efekt zračenja[5]

Slika 5. Operativni koraci zbrinjavanja otpada [1]

Slika 6. Ciklusi nuklearnog goriva [2]

Slika 7. Koncept dubokog geološkog odlagališta RAO(modificirano iz [2])

Slika 8. Mogućnosti odlaganja spremnika s RAO-om u podzemna odlagališta [2]

Slika 9. Koncept višestrukih barijera dubokog geološkog odlagališta VRAO (modificirano iz [2])

Slika 10. Metalni spremnik za VRAO i ING [1]

Slika 11. Strojni iskop tunela (TBM)

Slika 12. Konceptno rješenje brtvenog čepa za horizontalnu pristupnu prostoriju¸ (modificirano iz [2])

Slika 13. Izračunate srednje godišnje doze zračenja za koncept španjolskog odlagališta VRAO (modificirano iz [10])

Slika 14. Uže i šire područje dubokog geološkog odlagališta RAO [1]

Slika 15. Procesi disipacije topline i hidratacije bentonitne ispune u užem području odlagališta VRAO [1]

Slika 16. Odlagalište otpada u Beatty, Nevada [18]

Slika 17. Kontejner sa spremnicima za RAO u odlagalištu Olkiluoto, Finska [1]

Slika 18. Pogled u silos s odloženim RAO u odlagalištu Olkiluoto, Finska [1]

Slika 19. Površinsko odlagalište s monolitnom strukturom [19]

Slika 20. Površinsko odlagalište za NRAO i SRAO u El Cabrilu, Španjolska [2]

Slika 21. Površinsko odlagalište za NRAO i SRAO u Aubu, Francuska [2]

Slika 22. Duboko podzemno odlagališteza NRAO i SRAO u nekadašnjem rudniku kamene soliu Morslebenu, Njemačka [19]

8. POPIS I OBJAŠNJENJE KRATICA

IAEA - Međunarodna agencija za atomsku energiju (eng. International Atomic Energy Agency)

IBS - Inženjerski barijerni sustav

ING - Iskorišteno nuklearno gorivo

MOX - Mixed oxide fuel

NRAO - Nisko radioaktivni otpad

RAO - Radioaktivni otpad

RH - Republika Hrvatska

SRAO - Srednje radioaktivni otpad

THMC - Termo-hidro-mehanički spreg (eng. Thermo-hydro-mechanical coupling)

TBM - Tunnel Boring Machine

VRAO - Visoko radioaktivni otpad