

# Analiza geološki povoljnih područja za odlaganje iskorištenog nuklearnog goriva u Hrvatskoj

---

Šeb, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2018

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:552734>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij geološkog inženjerstva

**ANALIZA GEOLOŠKI POVOLJNIH PODRUČJA ZA ODLAGANJE  
ISKORIŠTENOG NUKLEARNOG GORIVA U HRVATSKOJ**

Diplomski rad

Filip Šeb  
GI295

Zagreb, 2018

**ANALIZA GEOLOŠKI POVOLJNIH PODRUČJA ZA ODLAGANJE ISKORIŠTENOG  
NUKLEARNOG GORIVA U HRVATSKOJ**

Filip Šeb

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U diplomskom radu navedena je podjela radioaktivnog otpada i definiran je pojam iskorištenog nuklearnog goriva. Objašnjena je metoda dubokog geološkog odlaganja visokoradioaktivnog otpada i iskorištenog nuklearnog goriva te su navedena obilježja matičnih stijena povoljnih za ovakvu vrstu odlagališta. Izdvojene su tri vrste povoljnih matičnih stijena koje nalazimo u Hrvatskoj (sedimentne stijene, magmatsko – metamorfne stijene i evaporitne stijene) i na temelju toga navedene su četiri potencijalno povoljne lokacije: Petrova gora, Trgovska gora, Moslavačka gora i Slavonske planine. Na temelju geoloških karata, tumača i profila izdvojene su Petrova i Trgovska gora kao jedine geološki povoljne lokacije za izgradnju dubokog geološkog odlagališta u Hrvatskoj. U slučaju da Hrvatska, iz ekonomskih, društveno – političkih ili ostalih razloga, neće biti u mogućnosti izgraditi vlastito duboko geološko odlagalište, analizirana je i mogućnost regionalnog odlagališta.

Ključne riječi: radioaktivni otpad, iskorišteno nuklearno gorivo, duboko geološko odlagalište, geološki povoljne lokacije u Hrvatskoj

Diplomski rad sadrži: 44 stranice, 29 slika i 16 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr.sc. Želimir Veinović, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Želimir Veinović, docent RGNF  
Dr.sc. Dario Perković, docent RGNF  
Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

ANALYSIS OF GEOLOGICALLY FAVOURABLE AREAS FOR DISPOSAL OF SPENT NUCLEAR  
FUEL IN CROATIA

Filip Šeb

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Mining Engineering and Geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In this master's thesis the classification of radioactive waste is explained and term of spent nuclear fuel is defined. The thesis explains the method of deep geological disposal of high radioactive waste and spent nuclear fuel. There are three classes of host rocks suitable for such repositories that can be found in Croatia (sedimentary rocks, metamorphic and magmatic rocks, evaporites). Considering on the aforementioned classes, four potentially suitable locations for such repositories are listed: Petrova gora Mts., Trgovska gora Mts., Moslavačka gora Mts. and Slavonian Mts. Based on the geological maps, interpreter and profile, Petrova and Trgovska gora are singled out as the only locations in Croatia at which the deep geological repository could be built. In case that Croatia for economic, sociopolitical or any other reasons is not able to build their own geological repository, the option to build the regional repository in cooperation with the neighbouring countries is also considered in this thesis.

Keywords: radioactive waste, spent nuclear fuel, deep geological disposal, geologically favourable locations in Croatia

Thesis contains: 44 pages, 29 figures and 16 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor

Reviewers: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor  
PhD Dario Perković, Assistant Professor  
PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor

*S punom odgovornošću izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora, doc.dr.sc. Želimira Veinovića.*

*Zahvaljujem se profesoru Želimiru Veinoviću na prilici da diplomski rad izradim pod njegovim vodstvom. Njegovi stručni komentari, korisni savjeti i primjedbe uvelike su doprinjeli izradi ovog diplomskog rada. Bilo je neprocjenjivo iskustvo učiti i surađivati s takvim mentorom.*

*Zahvaljujem se kolegama i prijateljima na podršci i nezaboravnom vremenu tijekom cijelog studija.*

*Na kraju, posebno bih se želio zahvaliti roditeljima, bratu i djevojci na podršci i razumijevanju tijekom pisanja diplomskog rada.*

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. VRSTE RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	3
3. ISKORIŠTENNO NUKLEARNO GORIVO .....	5
4. ODLAGANJE ISKORIŠTENOG NUKLEARNOG GORIVA I VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	13
4.1. GEOLOŠKI OKOLIŠI POVOLJNI ZA ODLAGANJE ING-a i VRAO-a .....	14
5. GEOLOŠKI POVOLJNE LOKACIJE ZA ODLAGANJE VRAO-A I ING-A U HRVATSKOJ .....	19
5.1. SEDIMENTNE STIJENE – PETROVA GORA .....	20
5.2. SEDIMENTNE STIJENE – TRGOVSKA GORA .....	24
5.3. MAGMATSKO – METAMORFNE STIJENE – MOSLAVAČKA GORA .....	28
5.4. MAGMATSKO – METAMORFNE STIJENE – SLAVONSKE PLANINE .....	32
6. RASPRAVA O MOGUĆNOSTI ZAJEDNIČKOG MEĐUDRŽAVNOG ODLAGALIŠTA .....	38
7. ZAKLJUČAK .....	41
8. LITERATURA .....	43

## POPIS SLIKA

Slika 2-1 Konceptualni prikaz sheme klasifikacije otpada.....	4
Slika 3-1 Nuklearni gorivni ciklus .....	5
Slika 3-2 Shematski prikaz sadržaja nuklearnog gorivnog elementa .....	7
Slika 3-3 Bazen za privremeno odlaganje istrošenog goriva u nuklearnoj elektrani .....	8
Slika 3-4 Bazen za mokro skladištenje iskorištenog nuklearnog goriva .....	9
Slika 3-5 Spremnici za suho skladištenje iskorištenog nuklearnog goriva .....	10
Slika 3-6 Duboko geološko odlagalište ING-a Onkalo .....	11
Slika 4-1 Prednosti i nedostaci kristalinskih stijena kao matičnih stijena za duboko geološko odlagalište .....	16
Slika 4-3 Prednosti i nedostaci evaporitnih stijena kao matičnih stijena za duboko geološko odlagalište.....	17
Slika 5-1 Geološka karta Hrvatske M 1:300 000 s potencijalnim lokacijama dubokog geološkog odlagališta ING-a i VRAO-a.....	19
Slika 5-2 Satelitski snimak područja Petrove gore.....	20
Slika 5-3a Geološka karta Petrove gore .....	21
Slika 5-3b Legenda geološke karte Petrove gore .....	21
Slika 5-5 Seizmička aktivnost na području Petrove gore, Trgovske gore, Moslavačke gore i Slavonskih planina.....	23
Slika 5-6 Satelitski snimak područja Trgovske gore .....	24
Slika 5-7 Satelitski snimak vojnog skladišta Čerkezovac .....	25
Slika 5-8 Geološka građa Trgovske gore .....	26
Slika 5-9 Satelitski snimak Moslavačke gore.....	28
Slika 5-10a Geološka karta Moslavačke gore .....	29
Slika 5-10b Legenda geološke karte Moslavačke gore .....	30
Slika 5-11 Profil kroz Moslavačku goru.....	30
Slika 5-12 Satelitski prikaz Slavonskih planina .....	32
Slika 5-13a Geološka karta Papuka .....	34
Slika 5-13b Legenda geološke karte Papuka .....	34
Slika 5-14 Profil kroz Papuk .....	35
Slika 5-15a Geološka karta Psunja .....	35
Slika 5-15b Legenda geološke karte Psunja.....	35

Slika 5-16a Geološka karta Krndije .....	36
Slika 5-16b Legenda geološke karte Krndije .....	36
Slika 5-17 Profil kroz Psunj .....	37
Slika 5-18 Profil kroz Krndiju .....	37
Slika 6-1 Instalirana snaga nuklearnih elektrana u državama članicama projekta SAPIERR u odnosu na europske države s većim nuklearnim programima.....	39
Slika 6-2 Količina otpada koja planira biti odlagana u duboka geološka odlagališta u zemljama članicama projekta SAPIERR u odnosu na europske zemlje s većim nuklearnim programima.....	39



## 1. UVOD

Radioaktivni otpad je svaki materijal koji više nije upotrebljiv ili nije isplativ za upotrebu, a sadrži radioaktivnu tvar u količini većoj od zakonski dopuštene. Radioaktivna tvar je ona tvar koja sadrži atome koji se sami od sebe raspadaju pri čemu se oslobađa zračenje. Pojavu takvog raspada atoma nazivamo radioaktivnost. U radioaktivnom se otpadu mogu nalaziti različite koncentracije radioaktivne tvari (Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja radioaktivnog otpada i istrošenoga nuklearnog goriva Nuklearne elektrane Krško, 2018.). Ovakav otpad nastaje kao produkt u mnogim ljudskim djelatnostima. Najviše radioaktivnog otpada stvara se radom nuklearnih elektrana i u svim fazama nuklearnog gorivog ciklusa, počevši od kopanja uranske rude pa sve do dekomisije nuklearnih postrojenja. Također, radioaktivni otpad nastaje u industriji prilikom iskopavanja, obrade te spaljivanja ugljena, prirodnog plina i fosfatnih ruda, u medicini od iskorištenih izvora ionizirajućeg zračenja koji se koriste u svrhu dijagnosticanja i liječenja, te u znanosti, također od iskorištenih izvora ionizirajućeg zračenja koji se koriste u raznim eksperimentima.

Radioaktivni otpad dijeli se ovisno o vremenu u kojem otpad ostaje radioaktivan, udjelu radioaktivnog materijala u otpadu, te o tome stvara li otpad toplinu ili ne. S obzirom na navedene karakteristike radioaktivni otpad se prema IAEA-i (International Atomic Energy Agency) od 2009. godine (IAEA, 2009b) dijeli u šest kategorija:

- Izuzeti otpad (Exempt waste, EW)
- Vrlo kratkoživi otpad (Very short lived waste, VSLW)
- Vrlo nisko radioaktivni otpad (Very low level waste, VLLW)
- Nisko radioaktivni otpad (Low level waste, LLW)
- Srednje radioaktivni otpad (Intermediate level waste, ILW)
- Visoko radioaktivni otpad (High level waste, HLW)

Podjela radioaktivnog otpada u Hrvatskoj definira se prema Uredbi o uvjetima te načinu zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih zatvorenih radioaktivnih izvora i izvora ionizirajućeg zračenja koji se ne namjeravaju dalje koristiti (NN 44/2008). Prema toj uredbi radioaktivni otpad se dijeli na:

- Izuzeti i otpušteni radioaktivni otpad
- Nisko radioaktivni kratkoživi otpad
- Nisko i srednje radioaktivni otpad (kratkoživi i dugoživi)

- Visoko radioaktivni otpad

Klasifikacija radioaktivnog otpada u Hrvatskoj preuzeta je od klasifikacije IAEA-e iz 1994., a koja je u međuvremenu 2009. izdala novi prijedlog klasifikacije koji je naveden u ranijem tekstu.

Odlaganje, skladištenje i općenito upravljanje radioaktivnim otpadom predstavlja veliki izazov čovječanstvu. Posebno je problematično pitanje kako i gdje odlagati visoko radioaktivni otpad (VRAO) i iskorišteno nuklearno gorivo (ING). S obzirom na to da VRAO i ING zadržavaju toksičnost i visoku razinu radijacije dugi niz godina, ove vrste otpada odlažu se u duboka geološka odlagališta, unutar povoljnih litoloških i stratigrafskih jedinica.

Republika Hrvatska je preuzimanjem 50 postotnog vlasništva nad Nuklearnom elektranom Krško (NEK) preuzela i obvezu zbrinjavanja 50 % radioaktivnog otpada nastalog radom elektrane. Mogućnost odlaganja VRAO-a u Hrvatskoj, nastalog uglavnom kao posljedica rada NEK, u duboka geološka odlagališta, kao i određivanje povoljnih lokacija za odlaganje VRAO-a unutar povoljnih litoloških i stratigrafskih jedinica, biti će tema ovog diplomskog rada.

## 2. VRSTE RADIOAKTIVNOG OTPADA

Kao što je već navedeno u uvodu, radioaktivni otpad se prema IAEA-i dijeli u šest kategorija kako je prikazano na slici 2-1.

**IZUZETI OTPAD (IRAO):** sadrži toliko male količine radionuklida da ne zahtijeva posebne odredbe za zaštitu od radijacije, bilo da se odlaže u konvencionalnim odlagalištima ili se reciklira. Ovakav materijal može biti izuzet iz regulatornog nadzora za zaštitu od zračenja, a nakon izuzeća više se ne smatra otpadom.

**VRLO KRATKOŽIVUĆI OTPAD (VKRAO):** sadrži samo radionuklide koji imaju vrlo kratki period poluraspada. Može biti skladišten dok koncentracija aktivnosti ne padne ispod dopuštene razine (razine izuzimanja), te nakon toga može biti tretiran kao „obični“ otpad. Ovakva vrsta otpada nastaje najviše u medicini.

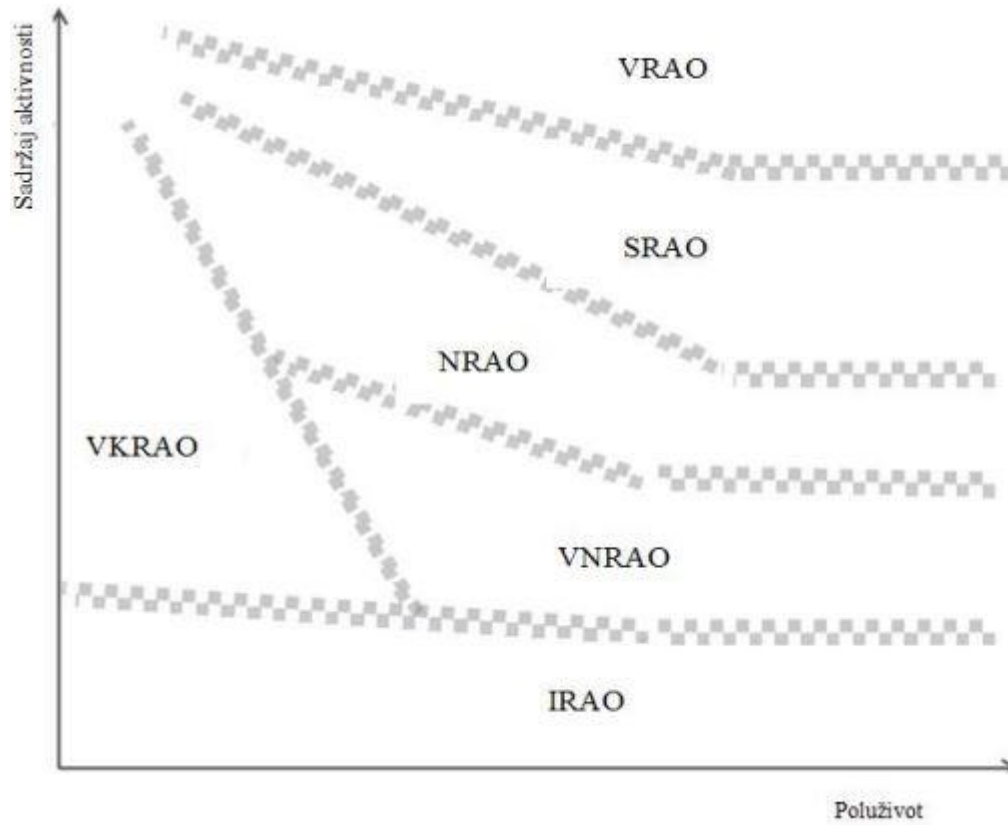
**VRLO NISKO RADIOAKTIVNI OTPAD (VNRAO):** koncentracija aktivnosti ovog otpada je nešto iznad dopuštene razine. Nastaje uglavnom kao posljedica rada ili dekomisije nuklearnih elektrana, te uslijed rudarenja i obrade određenih minerala. Pogodan je za odlaganje u površinska i pripovršinska odlagališta, s ograničenim regulatornim nadzorom, s obzirom na to da ne zahtijeva visok stupanj izolacije i višestruke barijere zbog svoje niske radioaktivnosti.

**NISKO RADIOAKTIVNI OTPAD (NRAO):** zahtijeva veću razinu izolacije u razdoblju od nekoliko stotina godina, te je pogodan za odlaganje u projektiranim pripovršinskim objektima. Može sadržavati kratkoživuće radionuklide s višim razinama aktiviteta, te dugoživuće radionuklide ali samo s razmjerno niskim aktivitetom (Veinović et al., 2014.)

**SREDNJE RADIOAKTIVNI OTPAD (SRAO):** sastoji se djelomično od dugoživećih radionuklida te zbog toga zahtijeva veću zatvorenost i izolaciju nego što se to može osigurati površinskim ili pripovršinskim odlagalištima. Ipak, ne zahtijeva, ili zahtijeva u vrlo maloj količini, nadzor zbog ispuštanja topline tijekom skladištenja i odlaganja. Može sadržavati dugoživuće radionuklide, osobito alfa emitere, koji neće radioaktivnim raspadom sniziti svoj aktivitet na razine prihvatljive za pripovršinsko odlaganje u vremenu u kojem se nad njime može provoditi institucionalni nadzor. Otpad ove klase odlaže se na dubinama od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara (Veinović et al., 2014.).

**VISOKO RADIOAKTIVNI OTPAD (VRAO):** otpad koji ima dovoljno velike koncentracije aktivnosti da generira značajne količine topline radioaktivnim raspadom. Također sadrži visoku koncentraciju dugoživućih radionuklida koju treba uzeti u obzir

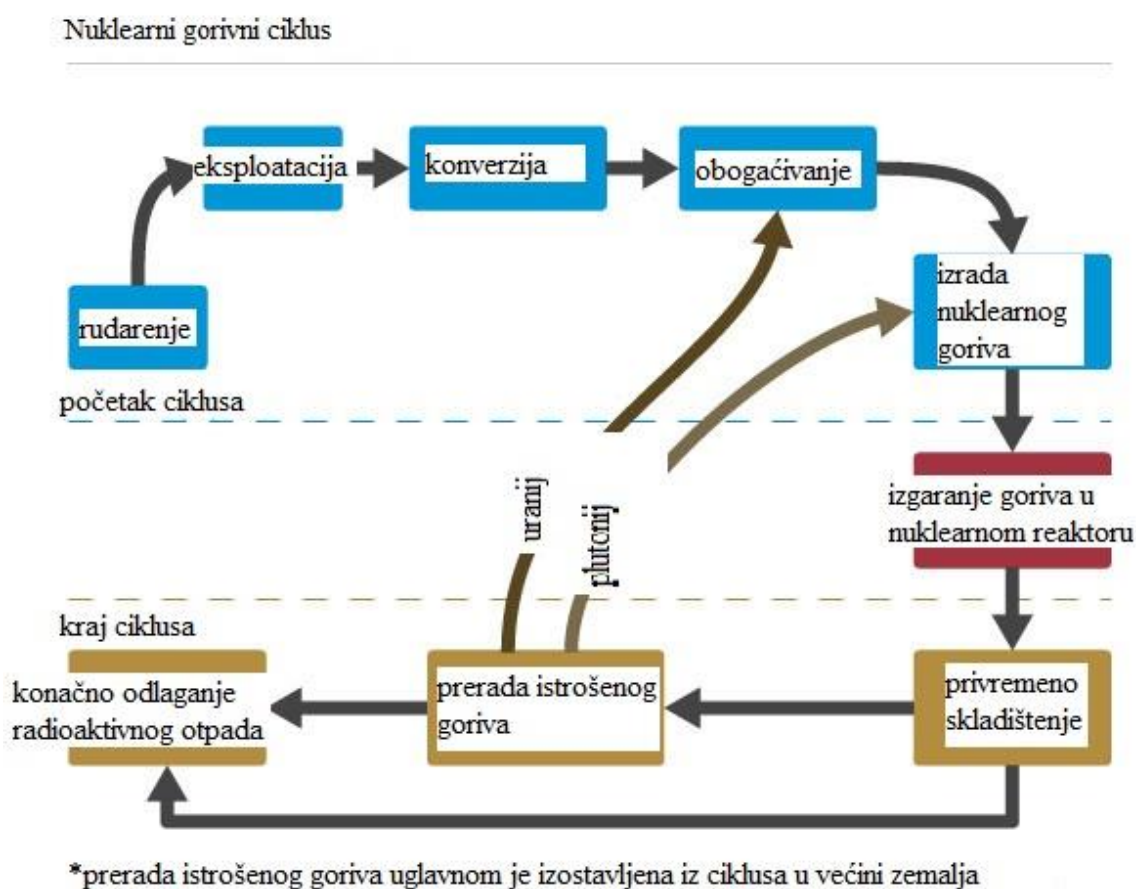
prilikom projektiranja odlagališta. VRAO se odlaže u geološko stabilnim formacijama na dubinama od nekoliko stotina metara (Veinović et al., 2014.).



Slika 2-1 Konceptualni prikaz sheme klasifikacije otpada (IAEA, 2009b)

### 3. ISKORIŠTENO NUKLEARNO GORIVO

Nuklearno gorivo je materijal koji sadrži jezgre nekih teških kemijskih elemenata kojima se može ostvariti nuklearna reakcija za oslobađanje energije. U nuklearnom gorivu takvi se procesi održavaju sami od sebe te se odvijaju lančano, prenoseći se od jedne do druge atomske jezgre i to kada se u nuklearnom reaktoru nađe dovoljna količina nuklearnog goriva raspodijeljenog na pravilan način. Nuklearni gorivni ciklus skup je aktivnosti kojima se dobiva sirovina za gorivo, izrađuje gorivo, upravlja njegovim korištenjem i brine o iskorištenom gorivu (spremanju, preradi i odlaganju radioaktivnog otpada) (Slika 3-1). Nuklearno gorivo je najgušći dostupni izvor energije.



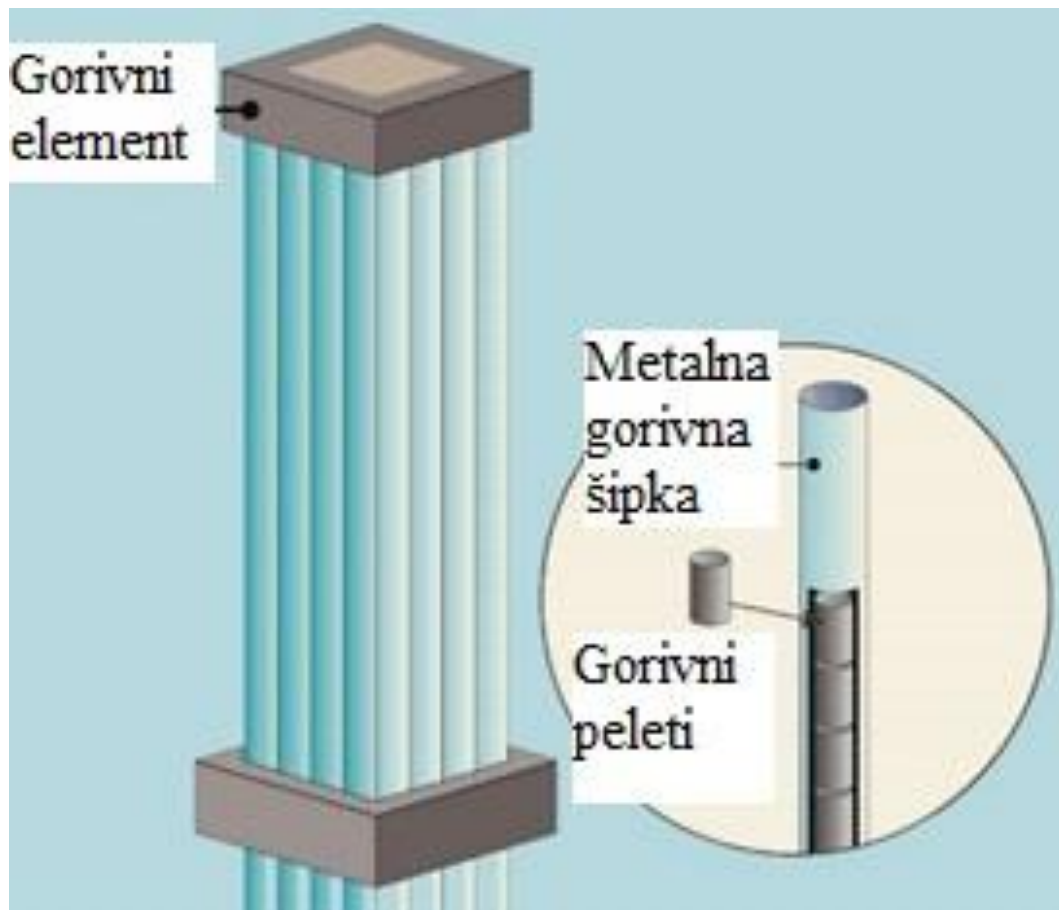
Slika 3-1 Nuklearni gorivni ciklus

([https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=nuclear\\_fuel\\_cycle](https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=nuclear_fuel_cycle))

Većina nuklearnih goriva sadrže teške fisijske elemente koji uzrokuju lančanu reakciju nuklearne fisije u nuklearnom reaktoru. U najčešća nuklearna goriva ubrajaju se tri fosilna materijala : uranij-235 ( $^{235}\text{U}$ ), plutonij-239 ( $^{239}\text{Pu}$ ) i uranij-233 ( $^{233}\text{U}$ ). Samo jedan od

njih nađen je u prirodi više nego u tragovima, a to je izotop  $^{235}\text{U}$ . On čini samo oko 0,7% prirodnog elementa uranija, stoga se taj materijal zove prirodno ili primarno nuklearno gorivo. Druga dva nuklearna goriva,  $^{239}\text{Pu}$  i  $^{233}\text{U}$ , dobivaju se u nuklearnim reaktorima. Bombardiranjem neutronima od  $^{238}\text{U}$  nastaje  $^{239}\text{Pu}$ , a od  $^{232}\text{Th}$  nastaje  $^{233}\text{U}$  - to su sekundarna nuklearna goriva, a  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  od kojih nastaju ta sekundarna goriva nazivaju se oplodnim materijalima. Izvorni materijali za nuklearno gorivo, uranij i torij, široko su rasprostranjeni u Zemljinoj kori te su veliki energetske potencijali. Njihova ukupna količina do dubine od oko 5km procijenjena je na približno  $12 \cdot 10^{12}$ t. Najveći dio tih elemenata rijetko se susreće u koncentracijama ekonomičnim za eksploataciju, međutim, moguće je iz umjereno siromašnih ruda, sa sadržajem od oko 0,1% uranija, dobiti 20 do  $30 \cdot 10^6$  tona uranija i nekoliko milijuna tona torija. Oni imaju više od deset puta veći energetske potencijal nego sve postojeće zalihe fosilnih goriva (ugljen, nafta, plin) (Wikipedia, 2013).

Nuklearno gorivo sastoji se od gorivih peleta od uranija ili smjese uranija-plutonija, promjera od 8 – 15 mm, a koji se nalaze unutar metalnih cijevi. Cijevi se grupiraju u gorivne elemente, kojima se može zasebno rukovati, što nam pojednostavljuje upravljanje količinom goriva unutar reaktora a kasnije i rukovanje iskorištenim nuklearnim gorivom (Slika 3-2).

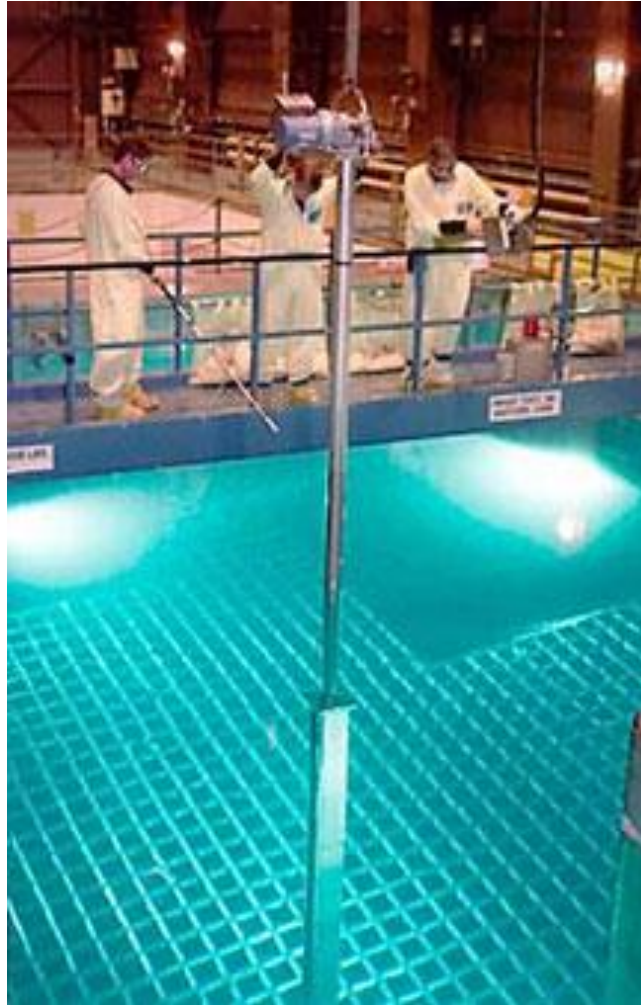


Slika 3-2 Shematski prikaz sadržaja nuklearnog gorivnog elementa

(<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/storage-spent-fuel.html>)

Rok trajanja gorivih elemenata u jezgri reaktora obično iznosi od tri do sedam godina. Nakon što se uklone iz reaktora, gorivni elementi proizvode veliku količinu topline i radijacije, posebno gama zrake i neutrone. Primjerice, godinu dana nakon izdvajanja gorivnih elemenata iz nuklearnog reaktora izmjerena radioaktivnost, na udaljenosti od jednog metra od gorivih elemenata, iznosi milijun milisiverta po satu (za primjer, prirodna radioaktivnost iznosi 3 milisiverta po godini). Izloženost ljudi ovolikoj dozi radioaktivnosti za posljedicu bi imalo smrt unutar jedne minute, stoga se s ING mora rukovati na sigurnoj udaljenosti i s posebnim oprezom (Bruno i Ewing, 2006).

Potrošenim gorivnim elementima se rukuje ispod vode koja osigurava zaštitu od radijacije i topline sve dok radijacija i topline ne padnu na razinu pri kojoj je moguće suho skladištenje iskorištenih gorivih elemenata. Minimalno razdoblje čuvanja ING u vodi iznosi od devet do dvanaest mjeseci, optimalno pet godina, nakon kojih se oni dodatno zaštićuju i mogu spremati na suho skladištenje ili i dalje čuvaju u bazenima (Slika 3-3).



Slika 3-3 Bazen za privremeno odlaganje istrošenog goriva u nuklearnoj elektrani ([https://hr.wikipedia.org/wiki/Radioaktivni\\_otpad#/media/File:Fuel\\_pool.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Radioaktivni_otpad#/media/File:Fuel_pool.jpg))

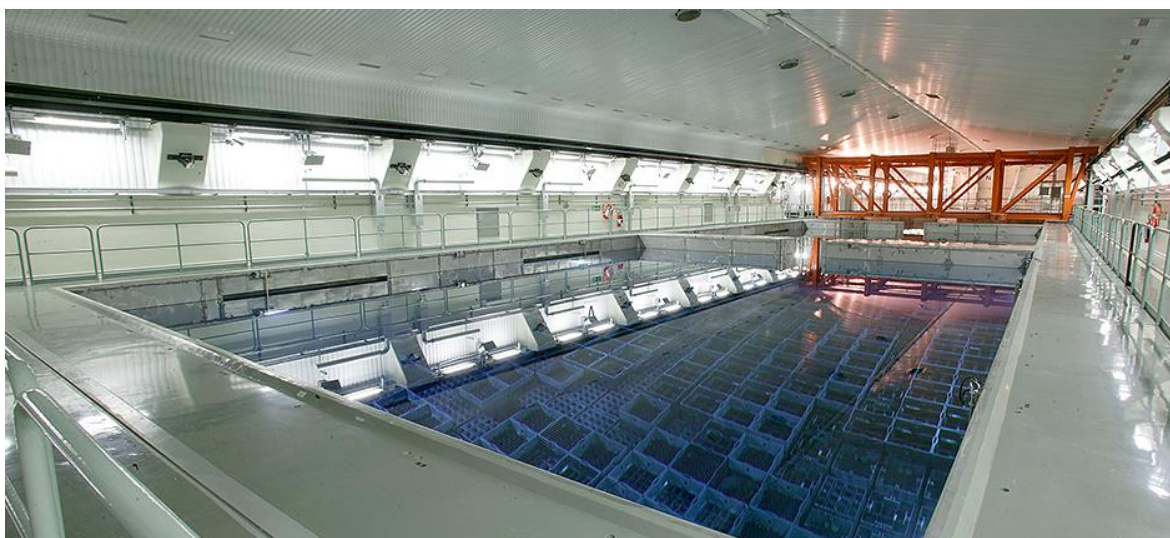
Postoje dvije različite strategije za upravljanje ING-om. Prvom metodom iz ING-a se izdvajaju korisni uranijski i plutonijski materijali koji se koriste kao novo gorivo, dok se u drugom slučaju ING jednostavno smatra otpadom i priprema za odlaganje na povoljnim lokacijama.

Ako se želi ponovo iskoristiti, ING se transportira u postrojenja za preradu gdje se gorivi elementi i gorive šipke rastavljaju na dijelove i kemijski razrađuju nakon čega kao produkt dobivamo četiri osnovna proizvoda: uranij, plutonij, visoko radioaktivni otpad i ostali otpad. Uranij i plutonij se ponovo koriste kao nuklearno gorivo, a VRAO- om treba biti rukovano na odgovarajući način (odlaganje u duboka geološka odlagališta).

Iskorišteno nuklearno gorivo također može biti odlagano u duboka geološka odlagališta, a ukoliko je odlučeno da se skladišti na površini za to postoje dvije mogućnosti: suho skladištenje u betonskim silosima i mokro skladištenje u bazenima.



Mokro skladištenje je stara metoda i vjerojatno će još dugo vremena biti u upotrebi s obzirom na to da planiranje dubokih geoloških odlagališta teče relativno sporo. Kako do sada nisu uočeni značajniji problemi s mokrim skladištenjem ING-a, neke države su produžile programe mokrog skladištenja na nekoliko desetaka pa i stotinjak godina. Ipak, vrlo je važan stalni nadzor nad ovim postrojenjima, edukacija i primjena stečenog iskustva na projektiranju budućih postrojenja (Slika 3-4).



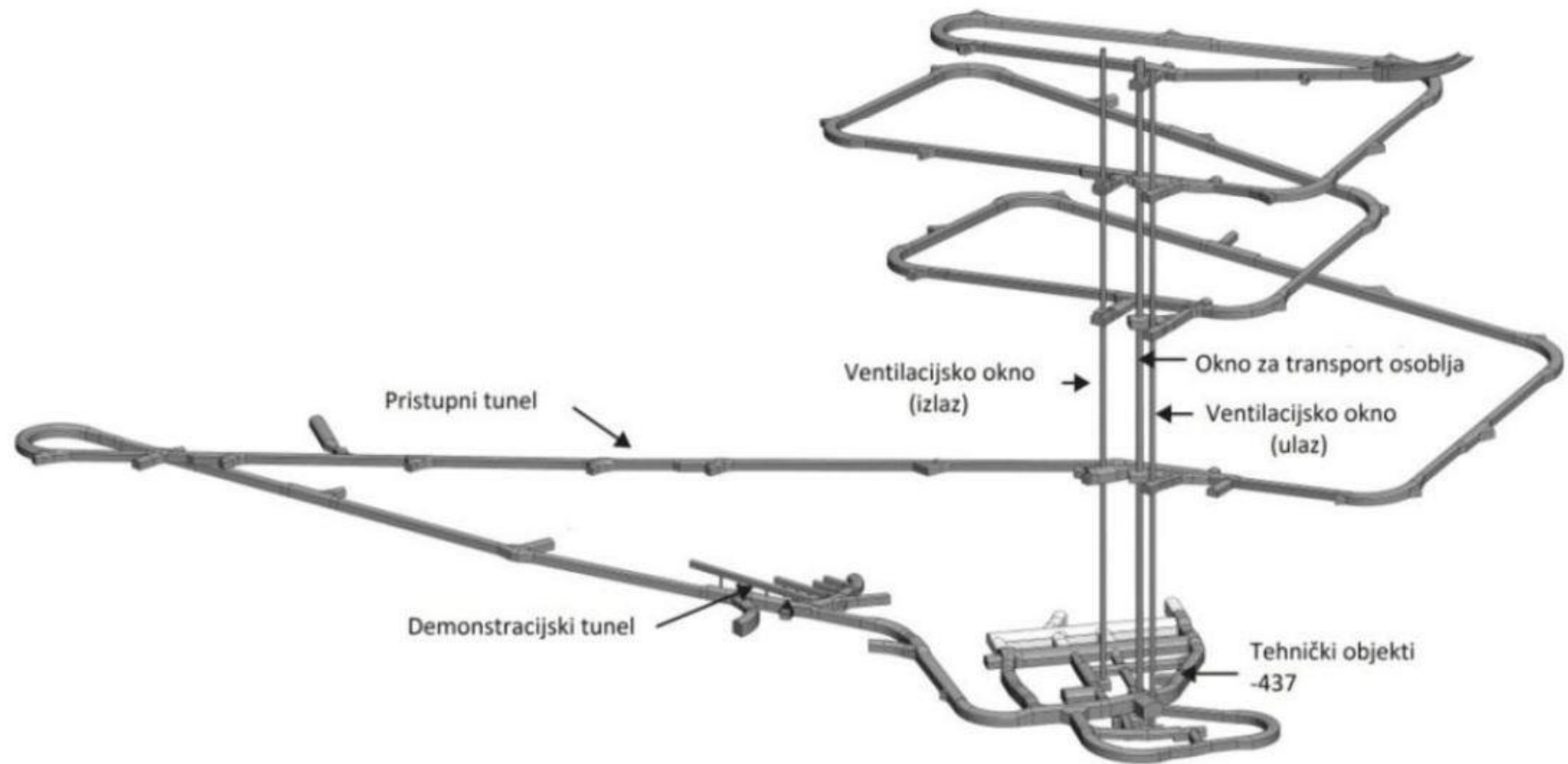
Slika 3-4 Bazen za mokro skladištenje iskorištenog nuklearnog goriva (<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>)

Suho skladištenje ING-a je mlađa tehnologija upravljanja ING-om koja je značajnije razvijena tek posljednjih 20-ak godina. S obzirom da se unutar ovih postrojenja ING sprema u betonske silose ili cijevi, te da oni nisu okruženi vodom, ovdje je puno manja mogućnost rasipanja i odvođenja topline od gorivih elemenata nego u mokrim skladištima. Ipak, prednost ove metode je u tome što izgradnja ovakvih postrojenja može biti u koracima, prema potrebnim kapacitetima, što omogućava da se izdaci podijele na duži period. Također, zbog jednostavnijeg sustava hlađenja u ovim postrojenjima puno su manji izdaci vezani za održavanje (IAEA, 2006), (Slika 3-5).



Slika 3-5 Spremnici za suho skladištenje iskorištenog nuklearnog goriva (<https://www.flickr.com/photos/nrcgov/36801710635>)

Iskorišteno nuklearno gorivo, kao što je već navedeno, može biti vrlo opasno za ljude i okolinu. Stoga veliki broj država razmatra opciju dubokog odlaganja ING-a u geološki povoljne strukture. Metode koje su do sad nabrojane osiguravaju izoliranje ING-a desetak ili maksimalno stotinjak godina, i ta postrojenja puno su više izložena prirodnim katastrofama (potresi, poplave,..) i ljudskom utjecaju (ratovi) nego duboka geološka odlagališta. Dubokim geološkim odlagalištima, u područjima povoljne litologije, strukturnih, seizmoloških i drugih obilježja, na velikim dubinama, osigurava se izolacija i potencijalni štetni utjecaj ING-a za dugi niz godina, pa čak sve dok radioaktivnost ING-a ne padne na razinu uranijske rude (Slika 3-6).



Slika 3-6 Duboko geološko odlagalište ING-a Onkalo (Leopold, 2015)

Odabir povoljne lokacije za izgradnju ovakvog dubokog odlagališta ING-a i VRAO-a u Hrvatskoj, na temelju vrsti stijena, seizmoloških, strukturnih i drugih obilježja biti će obrađen u daljnjim poglavljima.

#### 4. ODLAGANJE ISKORIŠTENOG NUKLEARNOG GORIVA I VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA

Podzemno odlaganje VRAO-a i ING-a predstavlja osiguranje geološke barijere između površinskog okoliša i potencijalno opasnih radioaktivnih elemenata. Postoji nekoliko ideja o tome kako bi ING i VRAO otpad trebali biti tretirani. Primjerice, ideja o odlaganju ING-a i VRAO-a u duboke geološke formacije ispod razine oceanskog dna, odlaganje na oceansko dno, odlaganje u ledena područja, odlaganje izvan Zemlje te uništavanje takvog otpada nuklearnim procesima. Najviše istražena i raširena je svakako ideja o odlaganju ING-a i VRAO-a u duboke geološke formacije na zemlji (NEA, 1989).

Osnovni uvjet bilo koje geološke formacije, koju smatramo povoljnom za odlaganje ING-a i VRAO-a, je njezina mogućnost da zadrži i odvoji radioaktivni otpad od ljudske okoline sve dok radioaktivnost tog otpada ne opadne na razine koje nisu štetne po čovjeka. Kako bi se povećala sigurnost takvih odlagališta pokušava se na najmanju moguću mjeru svesti neposredno rukovanje ljudi radioaktivnim otpadom, izabiru se geološke formacije koje su izolirane prirodnim izolatorima, a sve u svrhu sprječavanja kretanja radionuklida prema ljudskoj okolini. Tako se primjerice vodi računa o tome da prilikom odlaganja ne dođe do otapanja otpada u vodi kojom bi se radionuklidi mogli prenijeti do površine ili zagaditi vodonosnike. Također, otpad se sprema u posebne spremnike koji su otporni na koroziju, a oko kojih se uglavnom ugrađuje ispuna (bentonit) kojom se sprječava širenje radionuklida. Najbitniji parametar je geološka formacija sama po sebi, primarna barijera, koja mora potpuno onemogućiti prijenos radionuklida u vodonosnike i izolirati otpad od ljudskog okoliša (NEA, 1989)

Postoji pet osnovnih razloga zašto su duboka geološka odlagališta zanimljiva, kao metoda zbrinjavanja radioaktivnog otpada, praktički svakoj državi s nuklearnim programom (NEA, 1989):

1. To je gotovo potpuno pasivan sustav odlaganja otpada bez potrebe da čovjek nakon početka rada takvog odlagališta bude uključen u osiguravanje njegove sigurnosti.
2. Radioaktivni otpad ne predstavlja opasnost kada je skladišten duboko u podzemlje. Zbog dubine odlaganja (nekoliko stotina metara), mogućnost namjernog upada ljudi je praktički minimalna, a izborom odgovarajuće lokacije i mogućnost nehotečajnog upada ljudi u odlagalište svodi se na minimum.
3. Zbog relativno širokog izbora geološkog okoliša u kojima duboka geološka odlagališta mogu biti izvedena osigurana je fleksibilnost i praktičnost pri

projektiranju. Geološke jedinice koje se uzimaju u obzir prilikom razmatranja potencijalne lokacije za izgradnju dubokog podzemnog odlagališta su: halit, solne dome, gline te magmatske i metamorfne stijene.

4. Izvedba odlagališta moguća je uz postojeću tehnologiju koja se koristi u rudarstvu i građevini.
5. Iako odlaganje otpada podrazumijeva nedostatak namjere za daljnjim rukovanjem otpadom kada je on jednom odložen, ova odlagališta mogu biti projektirana na način da se otpadom može upravljati nakon zatvaranja odlagališta ili u određenim hitnim situacijama.

Geološko odlaganje otpada ne može potpuno i vječno osigurati zatvorenost i izolaciju radioaktivnog otpada. Međutim, takvim odlaganjem otpada, ako je izvedeno na dovoljnoj dubini i uz pravilno izabran geološki okoliš, osigurana je neovisnost, funkcionalnost i sigurnost odlagališta bez obzira na ljudske djelatnosti ili prirodne promjene.

#### **4.1. GEOLOŠKI OKOLIŠI POVOLJNI ZA ODLAGANJE ING-a i VRAO-a**

Stabilni geološki okoliš unutar kojeg planiramo odlaganje ING-a i VRAO-a, osim što mora gotovo potpuno onemogućiti transport radionuklida ispuštenih iz ING-a i VRAO-a, ima zadaću zaštititi projektirani sustav barijera odlagališta i omogućiti njegovo dugoročno pravilno funkcioniranje.

Osnovni kriterij za odabir lokacije je matična stijena unutar koje projektiramo odlagalište. Međutim, na izbor lokacije osim same geologije, utjecaj imaju razni društveno politički faktori, kao što su: prihvatljivost projekta od strane lokalnog stanovništva, razvijenost potrebne infrastrukture (prometna povezanost), postojeća nuklearna aktivnost, itd. Još jedan od vrlo bitnih kriterija je, umanjiti što je više moguće ljudsko djelovanje na odlagalište kroz dugi niz godina. U tom smislu, posebno treba voditi računa da se lokacija budućeg odlagališta ne podudara s područjima zanimljivim za eksploataciju minerala, fosilnih goriva, pitke vode ili geotermalne energije (Veinović et al., 2014).

Iako svi navedeni društveno – politički aspekti nikako ne smiju biti izostavljeni iz odabira lokacije dubokih geoloških odlagališta, ovaj diplomski rad prvenstveno će se baviti izborom potencijalnih lokacija dubokih geoloških odlagališta u Republici Hrvatskoj na temelju geoloških osobina istraživanog područja, odnosno na temelju povoljnih svojstava matične stijene.

Kao što je već rečeno, osnovna zadaća matične stijene unutar koje se projektira duboko geološko odlagalište ING-a i VRAO-a, je da zaštiti sustav barijera unutar odlagališta od prirodnih procesa i neželjenih ljudskih aktivnosti, omogući izgradnju i funkcioniranje odlagališta i u najvećoj mogućoj mjeri onemogući kretanje radionuklida izvan odlagališta.

S obzirom na te zahtjeve, glavne osobine, koje matična stijena mora imati, su sljedeće:

- Tektonska i seizmička stabilnost (izostanak aktivnih rasjeda i niska seizmička aktivnost)
- Dovoljna debljina, površina i dubina matične stijene
- Niska propusnost i hidraulička vodljivost
- Jednostavna struktura i litološka homogenost
- Otpornost na temperaturne promjene.

Najvažniji kriterij za odabir povoljne lokacije je da geološka okolina unutar koje planiramo odlaganje ING-a i VRAO-a mora biti stabilna dugi niz godina (10 000 – 1 000 000 godina). Zbog toga u obzir dolaze samo područja sa sporim i predvidljivim klimatskim i tektonskim promjenama. Također, jedan od važnijih uvjeta je i hidrogeologija istraživanog područja, jer podzemna voda predstavlja odličan medij za prijenos radionuklida.

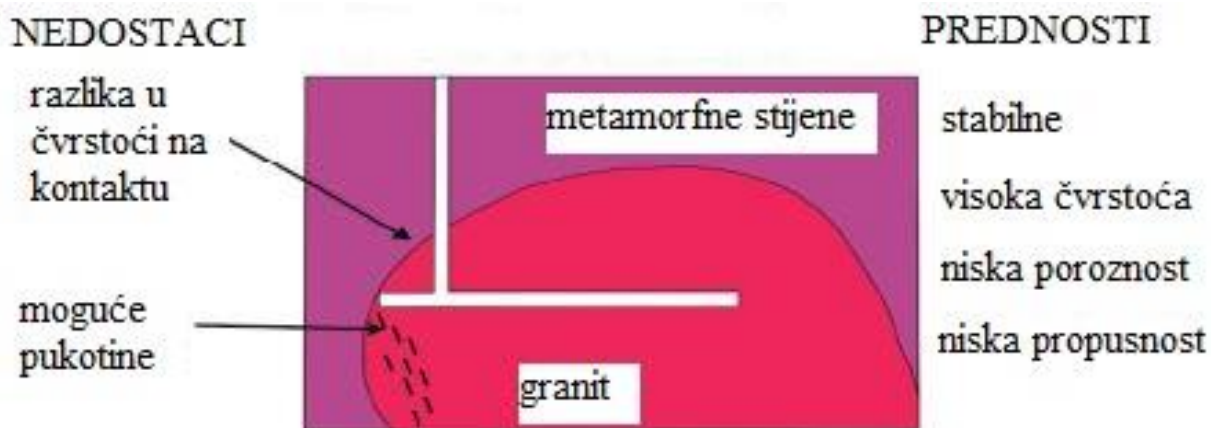
Debljina matične stijene, kako bi omogućila potrebnu izolaciju odlagališta, mora biti najmanje 100 m, i mora imati hidrauličku vodljivost manju od  $10^{-10}$  m/s. Dubina na kojoj se nalazi matična stijena mora biti barem 300 m, a odlagalište se mora nalaziti na dubini ne većoj od 1 500 m. Površina matične stijene, kako bi bila osigurana odgovarajuća izolatorska svojstva, mora biti barem  $10 \text{ km}^2$  (Veinović et al., 2014).

Tri vrste matičnih stijena zadovoljavaju navedene uvjete i u pravilu, istraživanja povoljnih okoliša za projektiranje dubokih geoloških odlagališta ING-a i VRAO-a usmjerena su na:

1. Kristalinske (čvrste) stijene; granit i gnajs
2. Sedimentne stijene; gline, lapori, vulkanski sedimenti (tufovi), pješčenjaci
3. Evaporitne stijene, sol, anhidrit.

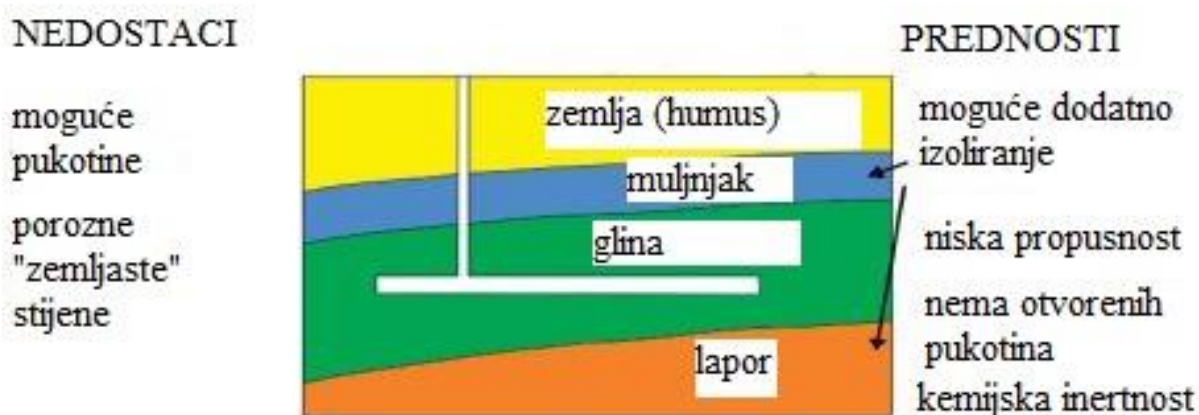
Kristalinske stijene (magnetske i metamorfne stijene), od kojih su najistraživanije granit i gnajs, pogodne su za duboka geološka odlagališta zbog male propusnosti intaktne stijene, velike kemijske stabilnosti i visoke čvrstoće intaktne stijene. Također, prilikom

iskapanja i gradnje u ovim stijenama nisu potrebne potporne konstrukcije. Uslijed tektonske aktivnosti u ovoj vrsti stijena mogu u dubini nastati pukotine koje se ne vide s površine, a predstavljaju potencijalne puteve za prijenos radionuklida kroz stijene ili do vodonosnika (Slika 4-1).



Slika 4-1 Prednosti i nedostaci kristalinskih stijena kao matičnih stijena za duboko geološko odlagalište (Borojević Šošarić i Neubauer, 2012).

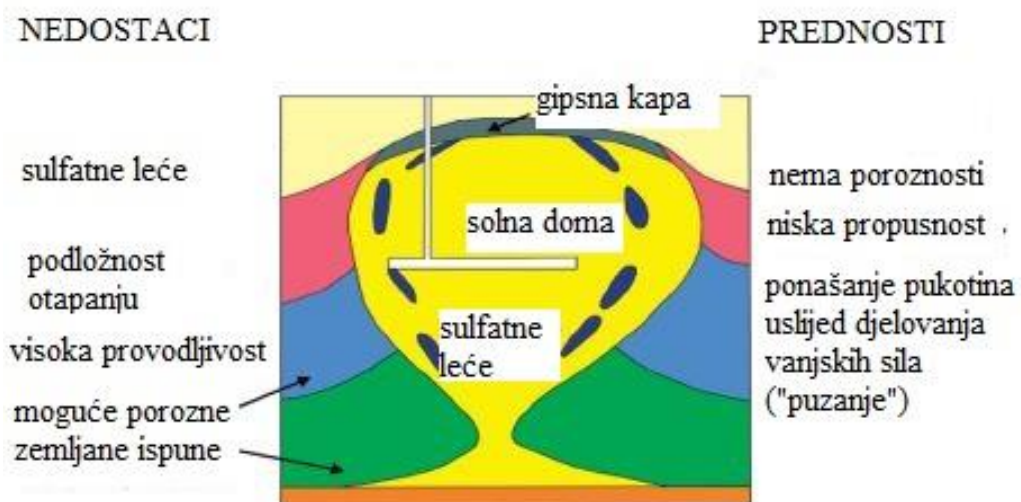
Sedimentne stijene, posebice slojevi velike debljine plastične gline, razmatrani su kao matične stijene za izgradnju dubokih geoloških odlagališta iz nekoliko razloga: niska propusnost, kvazi – plastično ponašanja uslijed djelovanja vanjskih sila, nema formiranja dugačkih pukotina. Ovakve stijene su kemijski inertne, dobro apsorbiraju katione i mehanički su stabilne do debljine od oko 1 km ukoliko ne postoje značajnije pukotine ili šupljine (slika 4-2).



Slika 4-2 Prednosti i nedostaci sedimentnih stijena kao matičnih stijena za duboko geološko odlagalište (Borojević Šošarić i Neubauer, 2012).



Evaporitne stijene obično nalazimo u toplim i suhim krajevima. Uglavnom slojeve u bazi čine karbonatne stijene (vapnenac, dolomit), zatim slijede gips i halit te na kraju Mg-K sulfati i K-kloridi koji se relativno rijetko pojavljuju. Gips je najrašireniji evaporitni materijal. Na povišenoj temperaturi, s povećanjem dubine, gips prelazi u basanit koji nije stabilan te se raspada u anhidrit. Ovi prijelazi uzrokuju smanjenje volumena stijene i do 40% i otpuštanje velikih količina vode, što dovodi do njenog raspadanja. Zbog navedenih procesa gips se smatra nepovoljnim okolišem za izgradnju dubokih geoloških odlagališta. Anhidrit se smatra dobrom stijenom za odlaganje NRAO i SRAO ukoliko su slojevi velike debljine, na dovoljnoj udaljenosti od podzemne vode i ako su u krovini i podini izolirani vodonepropusnim slojevima. Halit ostaje stabilan na velikom rasponu temperatura te se zbog toga smatra pogodnim za izgradnju dubokih geoloških odlagališta. Također, slabo je porozan, što je njegova glavna prednost, kao i pojava puzanja čak i na sobnoj temperaturi što omogućuje zatvaranje nastalih pukotina u stijenskoj masi. Nedostatak halita je u njegovoj velikoj toplinskoj vodljivosti i topljivosti u vodi, pa se preporučuje korištenje halita, u svrhu odlaganja radioaktivnog otpada, u aridnim klimama. Posebno pogodne evaporitne strukture za izradu odlagališta svih vrsta radioaktivnog otpada, pa tako i VRAO-a i ING-a, su solne dome. (Borojević Šošćarić i Neubauer, 2012). Sol, kao što je već rečeno, ima sposobnost „puzanja“ uslijed djelovanja vanjskih sila čime se postojeće pukotine zatvaraju same po sebi te zbog toga predstavlja izuzetno dobru barijeru. Također, sol ima nisku propusnost kako za tekućine tako i za plinove. Zbog rudarenja soli već dugi niz godina, mehaničko ponašanje ovih struktura je već vrlo dobro poznato i predvidljivo (Winterle et al., 2012) (Slika 4-3).

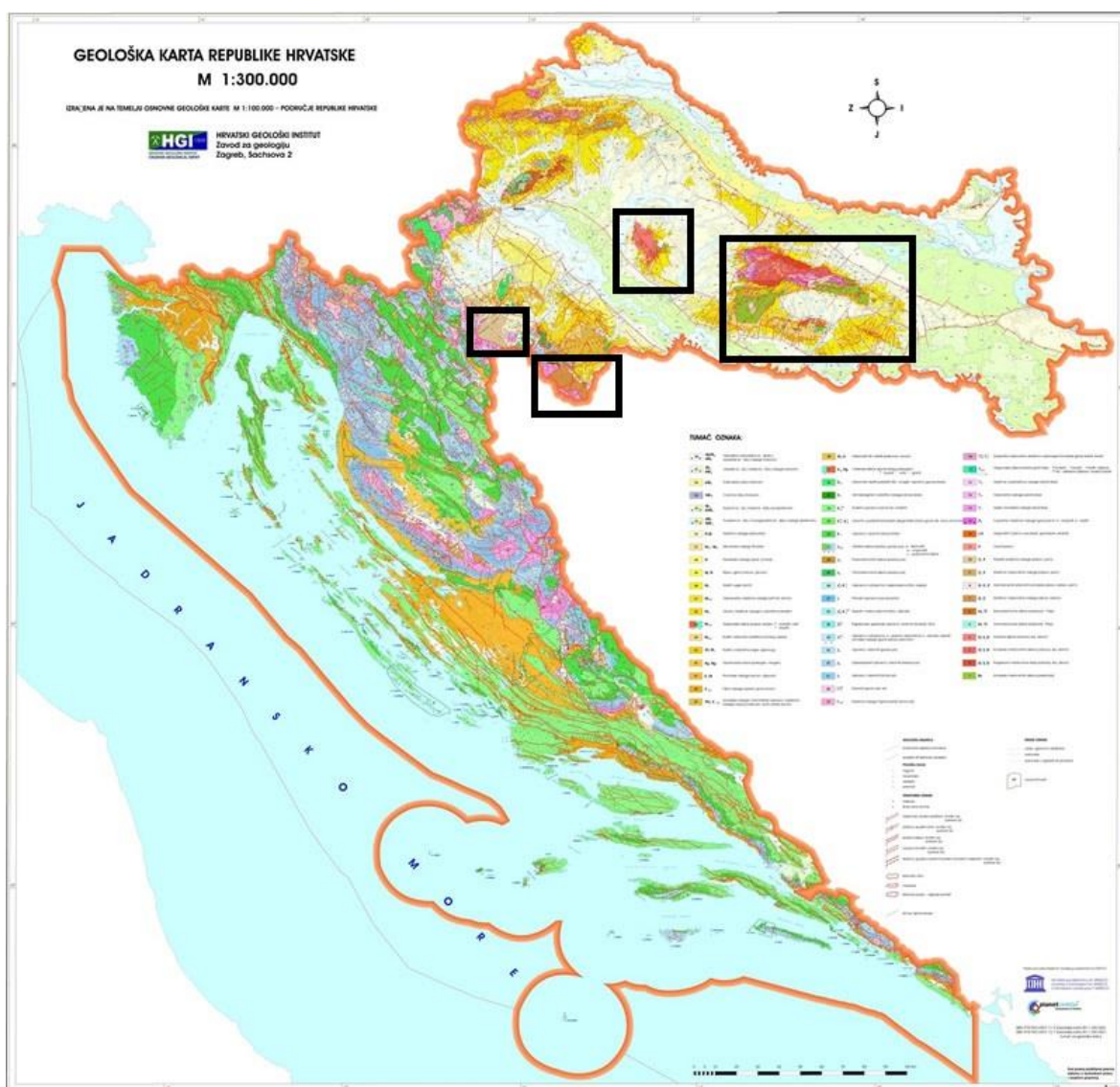


Slika 4-3 Prednosti i nedostaci evaporitnih stijena kao matičnih stijena za duboko geološko odlagalište (Borojević Šošćarić i Neubauer, 2012).

Evaporitne formacije smještene su na kopnu duž centralnog dijela karbonatne platforme i u podmorju unutar dijapirskih struktura centralnog i južnog dijela Jadranskog mora. Evaporiti na kopnu sastoje se od gipsa i anhidrita i zbog već navedenih svojstava nepogodni su kao matične stijene odlagališta VRAO-a i ING-a. Evaporiti u podmorju sastoje se od soli i anhidrita i, zbog dobrih svojstava soli, potencijalno su pogodni za odlaganje NRAO-a i SRAO-a. Međutim, lokacija ovih evaporita, u centralnom dijelu Jadranskog mora, predstavlja veliki inženjerski i logistički problem a i cijena samog odlagališta bila bi puno veća nego u slučaju gradnje na kopnu. Debele formacije sedimentnih stijena (šejlovi i filiti) nalaze se u području Petrove i Trgovske gore, dok su magmatsko – metamorfne stijene izražene u području Moslavačke gore i Slavonskih planina. (Borojević Šoštarić i Neubauer, 2012).

## 5. GEOLOŠKI POVOLJNE LOKACIJE ZA ODLAGANJE VRAO-A I ING-A U HRVATSKOJ

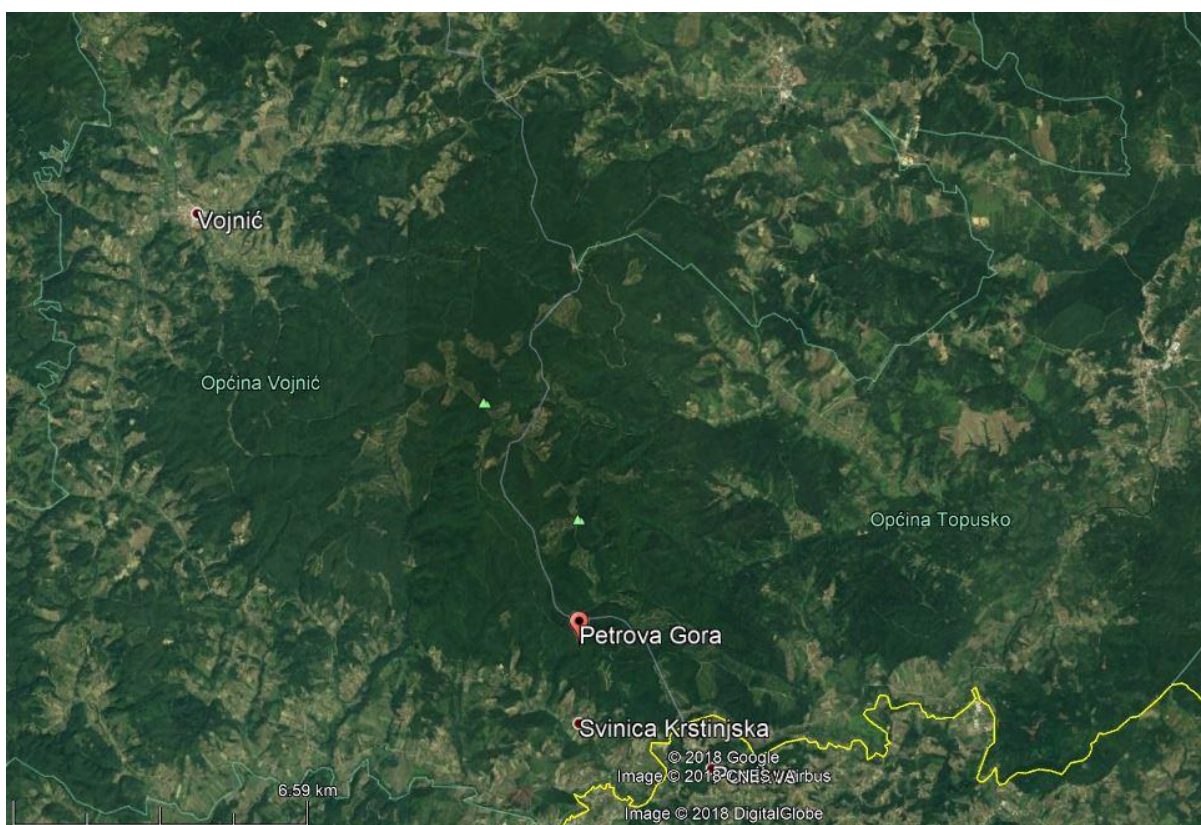
U ovom poglavlju, kao potencijalne lokacije za duboko geološko odlagalište VRAO-a i ING-a biti će razmatrane formacije sedimentnih stijena, dakle Petrova i Trgovska gora te magmatsko – metamorfne stijene Moslavačke gore i Slavonskih planina. Evaporitne formacije neće se razmatrati jer, kako je već navedeno, evaporiti na kopnu zbog svojeg sastava, podložni su velikim promjenama u volumenu stijenske mase uslijed djelovanja vode ili povišenja temperature, dok su evaporiti u podmorju previše udaljeni i bilo bi jako zahtjevno i skupo projektirati odlagalište na takvim mjestima.



Slika 5-1 Geološka karta Hrvatske M 1:300 000 s potencijalnim lokacijama dubokog geološkog odlagališta ING-a i VRAO-a ([https://www.hgi-cgs.hr/geoloska\\_karta\\_Hrvatske\\_1-300\\_000.htm](https://www.hgi-cgs.hr/geoloska_karta_Hrvatske_1-300_000.htm))

## 5.1. SEDIMENTNE STIJENE – PETROVA GORA

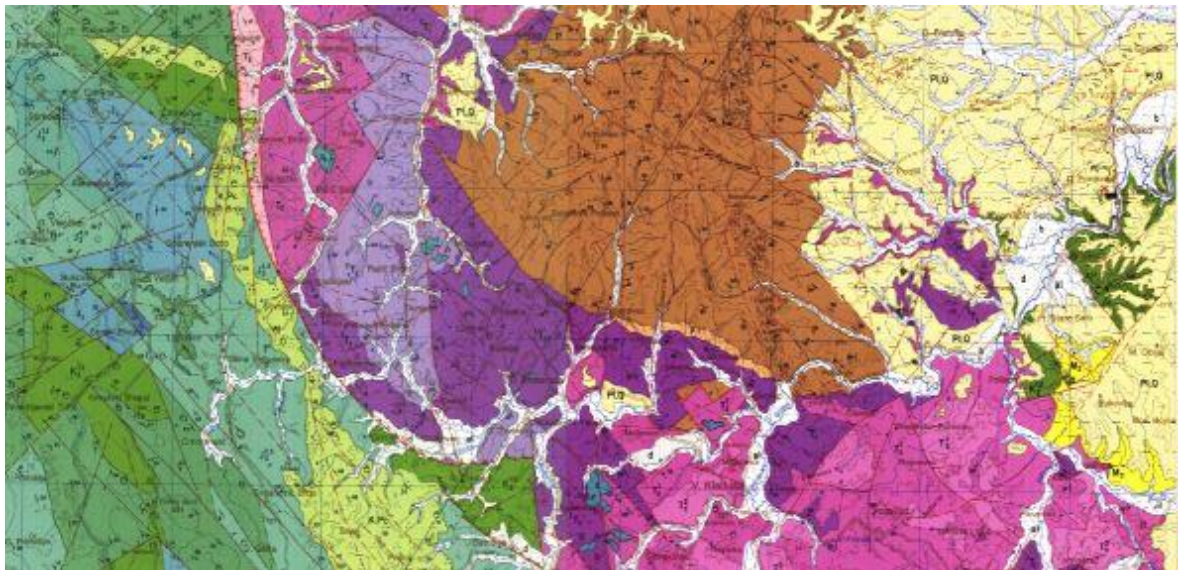
Petrova gora nalazi se u središnjoj Hrvatskoj, 50 km južno od Zagreba. Pruža se smjerom sjeveroistok – jugozapad u duljini od 25 km. To je nisko gorje, površine oko 300 km<sup>2</sup> sa najvišim vrhom Petrovcem 512 m. Područje Petrove gore je slabo naseljeno, a od većih mjesta ovdje se nalaze Vojnić i Topusko svaki s manje od 5000 stanovnika. Izrazito je šumovito područje ali dobro prometno povezano što u smislu izgradnje odlagališta geološkog otpada predstavlja veliku prednost.



Slika 5-2 Satelitski snimak područja Petrove gore

Veći dio Petrove gore izgrađen je od stijena permske starosti koje su predstavljene grauvaknim pješčenjacima, šejlovima i sitnozrnatim konglomeratima, a koji se međusobno ritmički izmjenjuju. Pred kraj sedimentacije grauvaknih pješčenjaka stvaraju se kvarcni pješčenjaci i kvarcni konglomerati koje nalazimo na južnom dijelu Petrove gore (Korolija et al., 1981) (Slika 5-3a) (Slika 5-3b) (Slika 5-4). Karbonatne stijene nisu pronađene niti u prosljocima permskih naslaga, niti kao detritus u pješčenjacima i konglomeratima, što je

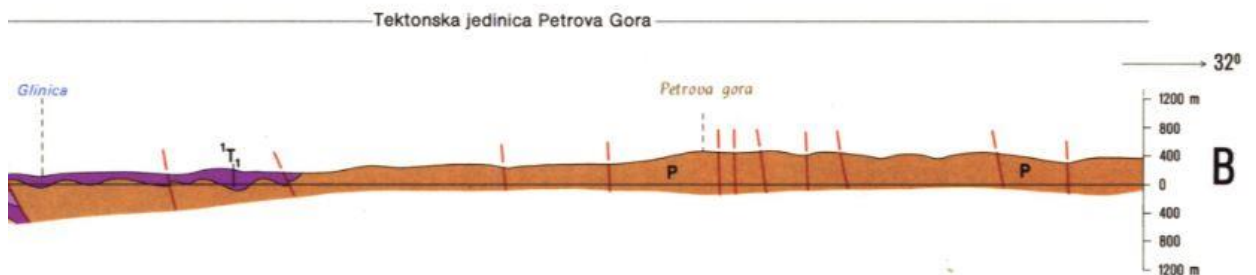
zbog topivosti, i ostalih svojstava, karbonatnih stijena, povoljno svojstvo stijena Petrove gore kao matičnih stijena potencijalne lokacije dubokog geološkog odlagališta ING-a i VRAO-a. Detritus u pješčenjacima i konglomeratima uglavnom je sastavljen od sericita i glinovitih minerala. Područje Petrove gore bogato je mineralnim sirovinama od kojih se ističu: barit (istočni rub Petrove gore), siderit (sjeverne padine vrha Petrovac), limonit (sjeverne i istočne padine Petrove gore), mangan (zapadni rub Petrove gore), keramičke gline (sjeveroistočne i istočne padine Petrove gore) (Korolija et al., 1981).



Slika 5-3a Geološka karta Petrove gore (Korolija et al., 1979)

P E R M	P,T	150	Kvarcgrauvakni pješčenjaci i gips
	P		Konglomerati
	P	?	Grauvakni i kvarcni pješčenjaci, konglomerati, šejlovi i barit

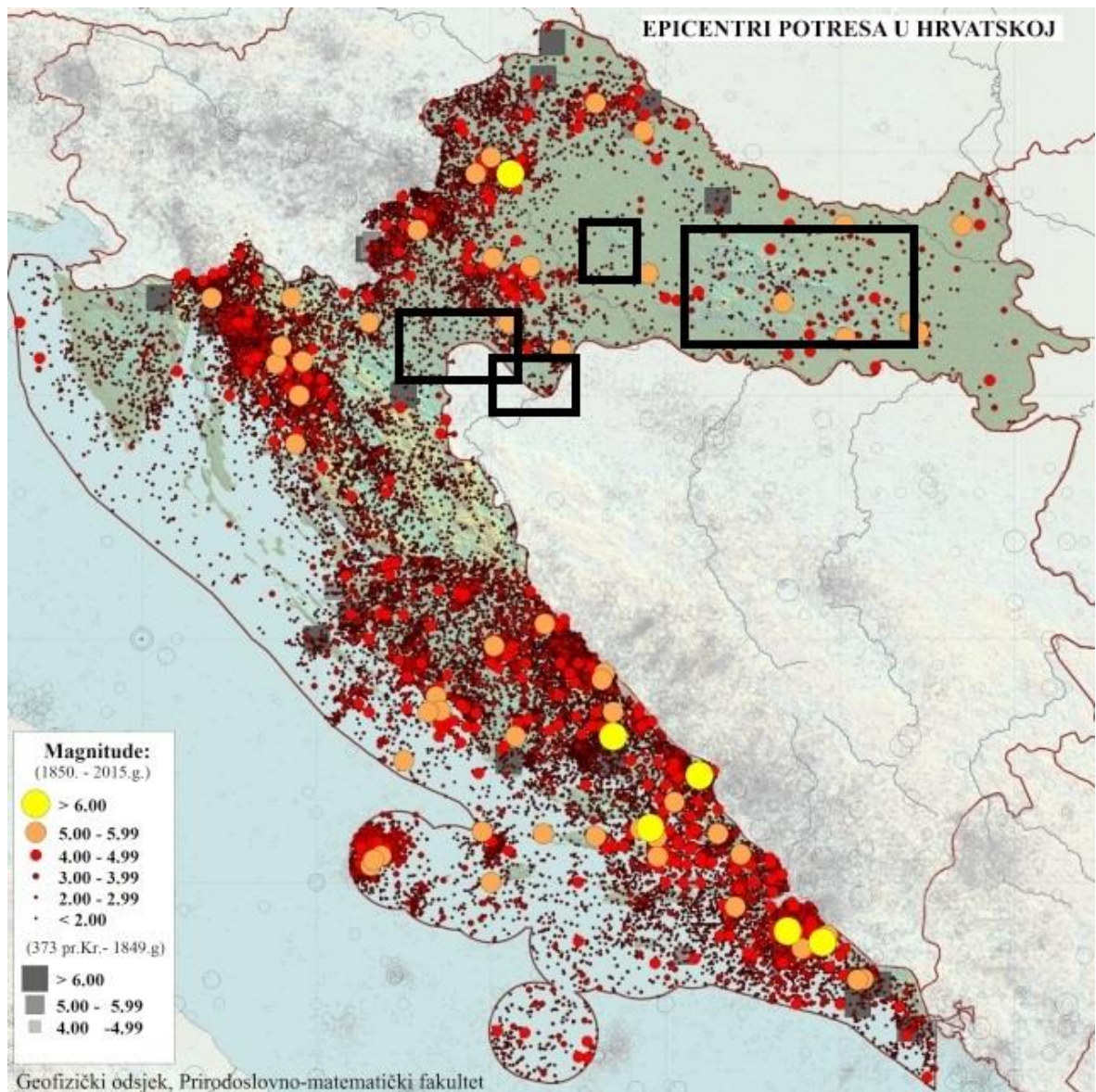
Slika 5-3b Legenda geološke karte Petrove gore (Korolija et al., 1979)



Slika 5-4 Profil kroz Petrovu goru (Korolija et al., 1979)

Kao što je već navedeno, najvažniji parametar, pri odabiru lokacije dubokog geološkog odlagališta ING-a i VRAO-a, je matična stijena odnosno svojstva matične stijene unutar koje se planira projekt odlagališta. Petrova gora je u tom smislu, prema dostupnim informacijama, povoljna kao potencijalna lokacija jer je izgrađena od permskih grauvaknih pješčenjaka, šejlova i konglomerata koji su relativno homogeni i izotropni te samim time predstavljaju dobru geološku barijeru. Područje Petrove gore je slabo seizmički aktivno (slika 5-5). Iako potresi ne bi trebali biti ograničavajući faktor za izgradnju dubokog geološkog odlagališta jer potresi štetu rade na pripovršinskim i površinskim konstrukcijama, a ovdje se radi o zahvatu na dubini od 500-1000 metara, u svakom slučaju, mala seizmička aktivnost predstavlja pozitivno obilježje potencijalne lokacije dubokog geološkog odlagališta jer može biti indikator kako u dubljim dijelovima ne postoje veći aktivni rasjedi koji bi mogli predstavljati problem za samo odlagalište.

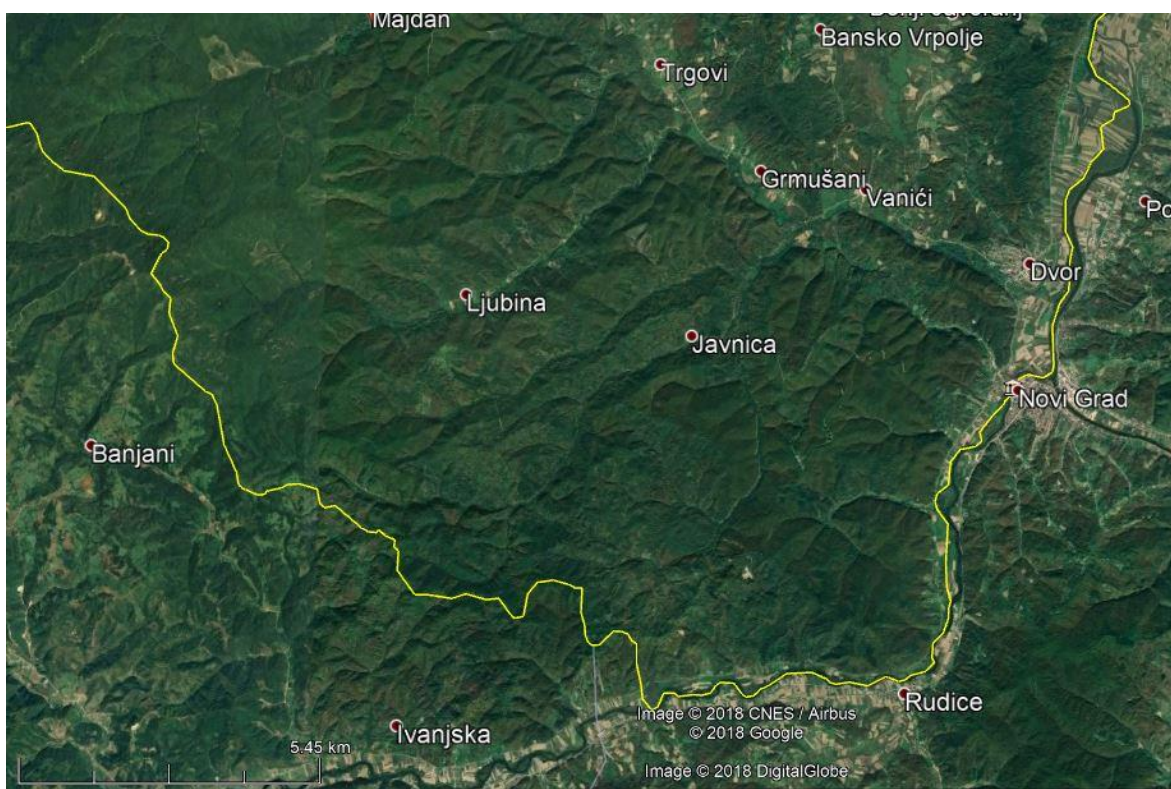
Petrova gora se zbog svojih geoloških obilježja, prema javno dostupnim informacijama, može smatrati potencijalno pogodnom lokacijom za izgradnju dubokog geološkog odlagališta ING-a i VRAO-a. Međutim, ako bi se ozbiljnije razmatralo ovo područje kao potencijalna lokacija za odlagalište, neophodno bi bilo napraviti duboka geološka ispitivanja svojstava stijena na dubinama 500-1000 metara, jer iz trenutno dostupnih profila i karata dobivamo informacije o stijenama do dubine od stotinjak metara što svakako nije dovoljna dubina za izgradnju ovakve vrste odlagališta.



Slika 5-5 Seizmička aktivnost na području Petrove gore, Trgovske gore, Moslavačke gore i Slavonskih planina (<https://www.pmf.unizg.hr/images/50016371/20122016acs.jpg>)

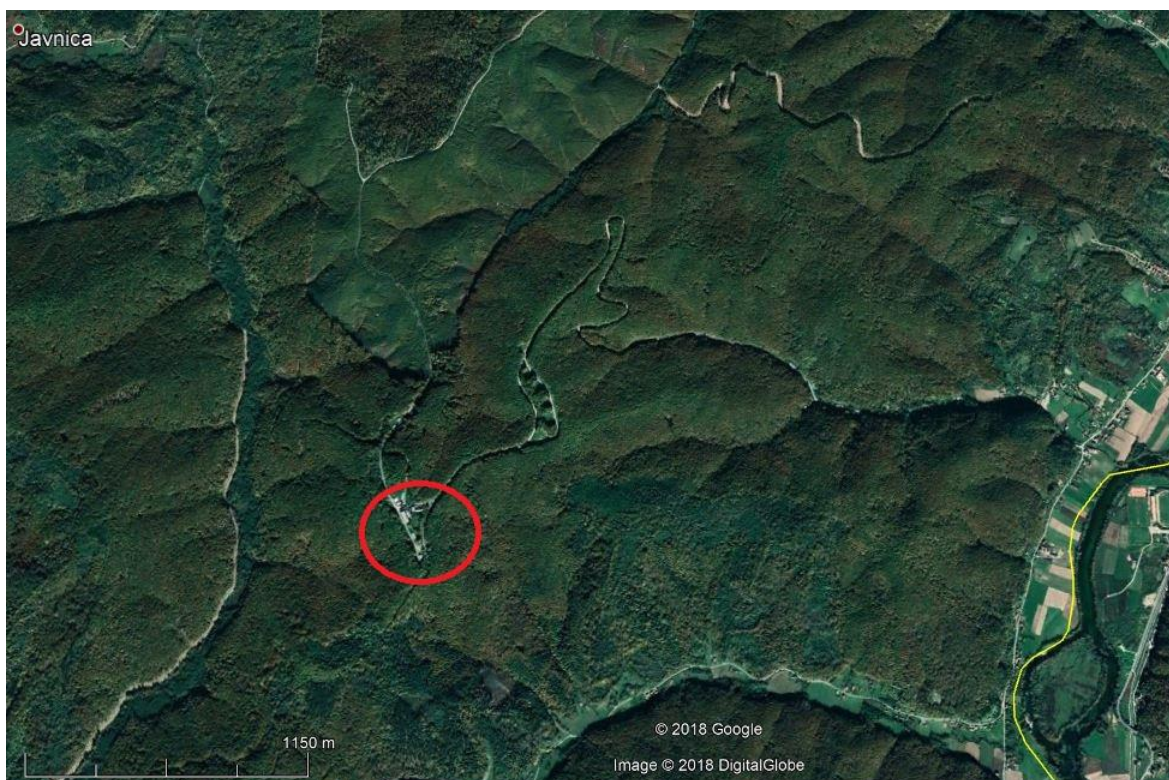
## 5.2. SEDIMENTNE STIJENE – TRGOVSKA GORA

Trgavska gora je niska planina koja u svojim najvišim dijelovima ne prelazi 600 metara nadmorske visine. Nalazi se u Sisačko – moslavačkoj županiji, 80-ak kilometara jugoistočno od Zagreba (Slika 5-6). Područje Trgavske gore je izrazito šumovito i slabo naseljeno s najvećom općinom Dvor na Uni sa otprilike 5600 stanovnika. U južnom dijelu Trgavske gore nalazi se staro vojno skladište Čerkezovac koje Oružane snage Republike Hrvatske smatraju neperspektivnim za postojeće vojne namjene te ga planiraju predati na korištenje civilnoj vlasti (Slika 5-7). S obzirom da je vojno skladište Čerkezovac izolirano od lokalnog stanovništva, a s druge strane dobro prometno povezano, ono se zbog toga može smatrati povoljnom lokacijom za odlagalište VRAO-a i ING-a.



Slika 5-6 Satelitski snimak područja Trgavske gore

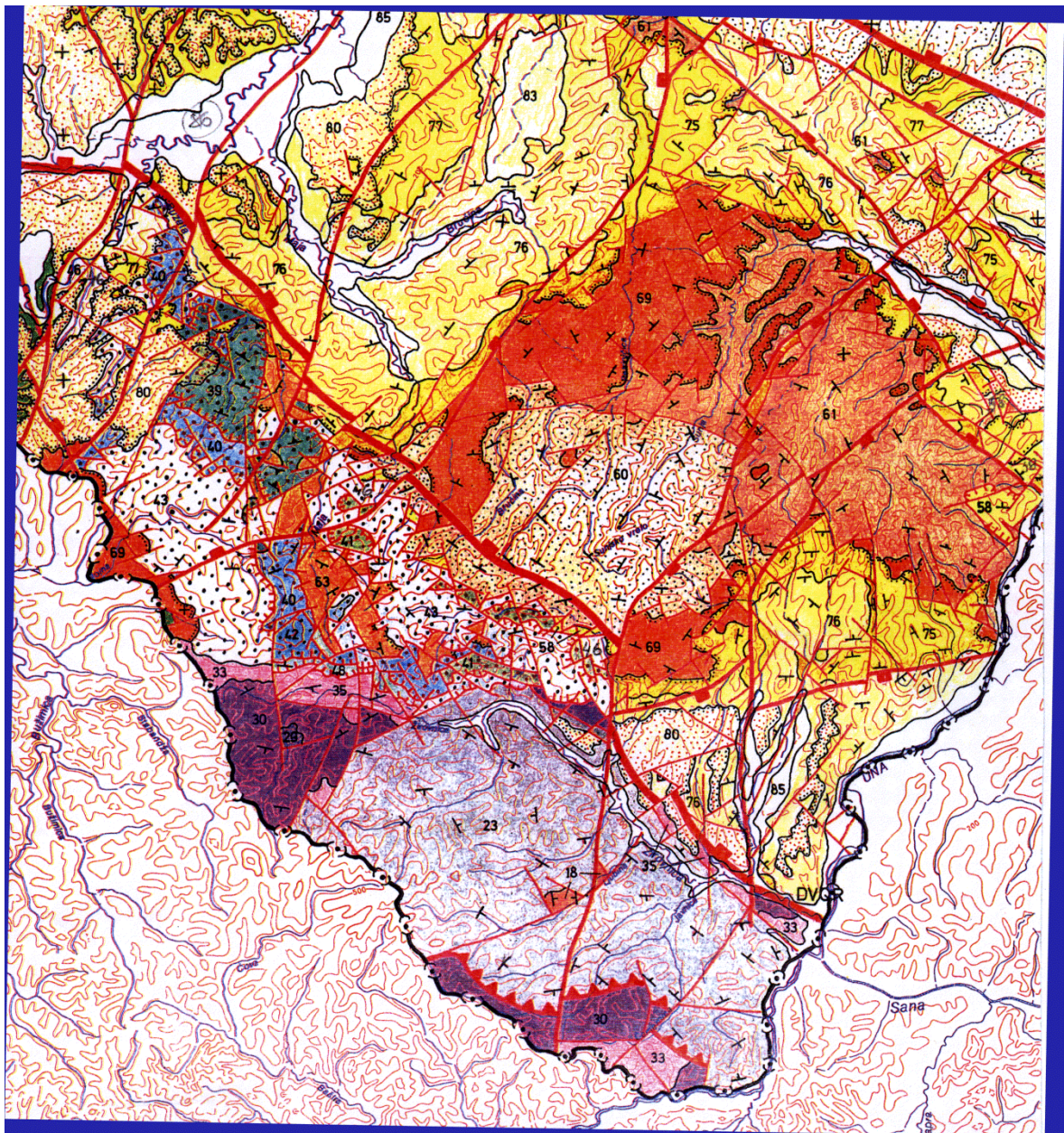




Slika 5-7 Satelitski snimak vojnog skladišta Čerkezovac

Trgovska gora je po geološkoj strukturi tektonski horst nastao brojnim normalnim rasjedima generalnog pružanja sjeverozapad – jugoistok. Rasjedi na sjeveroistoku, sjeverozapadu i zapadu odvajaju paleozojski masiv Trgovske gore od Dinarske ofiolitne zone.

Osnovnu građu ovog područja čine gornjopaleozojske naslage unutar kojih se razlikuju dvije serije. Stariju seriju čine šejlovi s alteracijama siltoznih pješčenjaka, subgrauvaka i grauvaka starosti devon – karbon, dok je mlađa serija predstavljena pješčenjacima s proslojcima šejlova donjopermske starosti. Vulkanogeno-sedimentna formacija Trgovske gore nalazi se u pojasu širokom oko 3 km od Stupnice na istoku, do Vratnika na zapadu (Slika 5-8), (Peša, 2013).



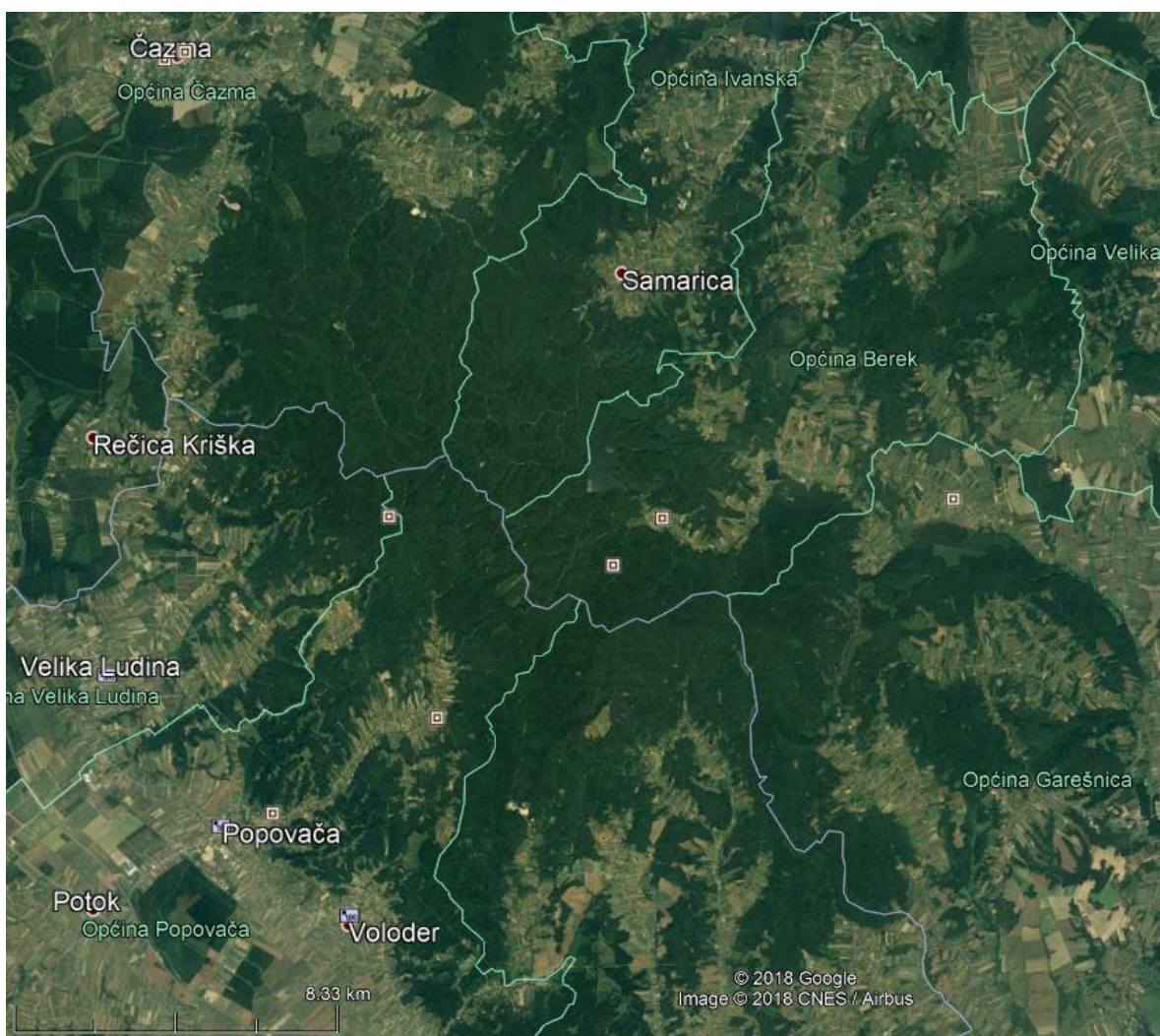
Slika 5-8 Geološka građa Trgovske gore

S obzirom da će buduće odlagalište biti građeno zbog potrebe odlaganja Hrvatskog dijela radioaktivnog otpada iz NE Krško, Trgovska gora zbog svoje blizine NE Krško predstavlja povoljnu lokaciju. Cestovnim putem NE Krško udaljena je od vojnog skladišta Čerkezovac oko 170 km a u blizini se nalazi i željeznica kojom transport također može biti obavljen. Na području vojnog skladišta Čerkezovac nalaze se vojni objekti koji bi mogli biti iskorišteni prilikom izgradnje ili korištenja budućeg odlagališta. Također, ovo područje bilo bi relativno lako osigurati od potencijalnih namjernih ili slučajnih upada u odlagalište s obzirom da je i do sada vojno skladište moralo biti dobro osigurano kao vojna infrastruktura. Prema podacima koji su dostupni o geologiji Trgovske gore, matična stijena također je povoljna za odlagalište jer gornjopaleozojske formacije predstavljaju dobre izolatore. U ovom području također nije zabilježena jača seizmička aktivnost (Slika 5-5). Međutim, trenutno nema dovoljno dubokih geoloških istraživanja kako bi bila poznata svojstva stijena, tektonika i ostali bitni parametri, na dubinama na kojima bi odlagalište bilo planirano.

Trgovska gora je već istraživana kao moguća lokacija odlagališta ili skladišta NRAO-a i SRAO-a ali je uvijek dolazilo do jakog otpora lokalnog stanovništva i stanovništva susjedne BiH koji smatraju da bi potencijalnom nezgodom radioaktivni materijal mogao ugroziti stanovništvo nizvodno od rijeke Une. Međutim, odlagališta VRAO-a i ING-a moraju biti projektirana tako da su sigurna milijun pa i više godina, na dubinama od 500-1000 m, na velikim udaljenostima od vodonosnika a pogotovo od otvorenih tokova. Edukacijom lokalnog stanovništva o projektu odlagališta VRAO-a i ING-a, te upoznavanjem s navedenim činjenicama trebalo bi se izbjeći njihovo negativno mišljenje o ovom projektu.

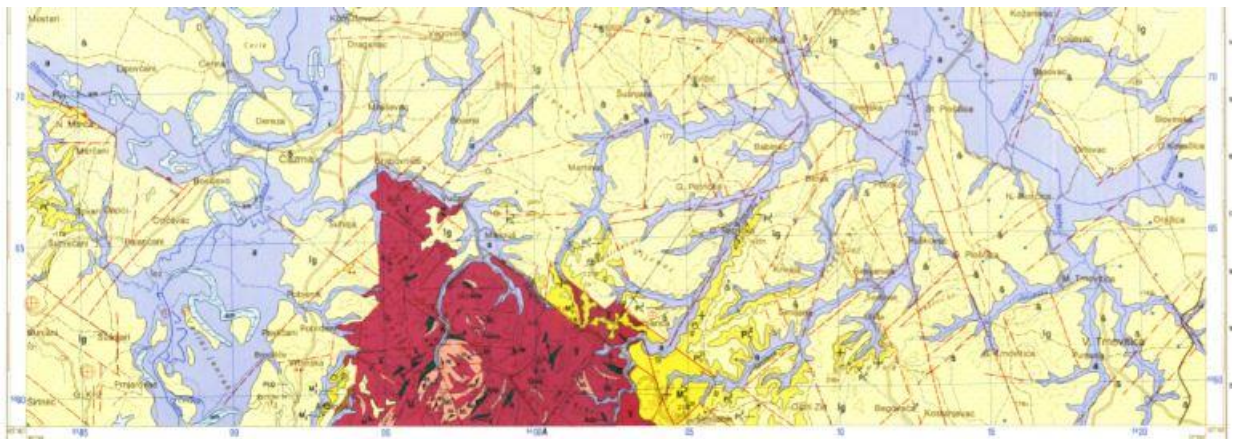
### 5.3. MAGMATSKO – METAMORFNE STIJENE – MOSLAVAČKA GORA

Moslavačka gora nalazi se u središnjoj Hrvatskoj, na granici Sisačko–moslavačke i Bjelovarsko–bilogorske županije, 50 km istočno od Zagreba, između rijeka Save i Drave te zauzima površinu od oko 180 km<sup>2</sup> (Slika 5-9). To je staro gromadno gorje bogato rudom. Moslavačka gora je također nisko gorje a najviši vrh je Humka (489 m n.v.), pružanja sjeverozapad – jugoistok. Ovo područje je također šumovito i slabo naseljeno, a veća mjesta u okolici su Čazma i Popovača.

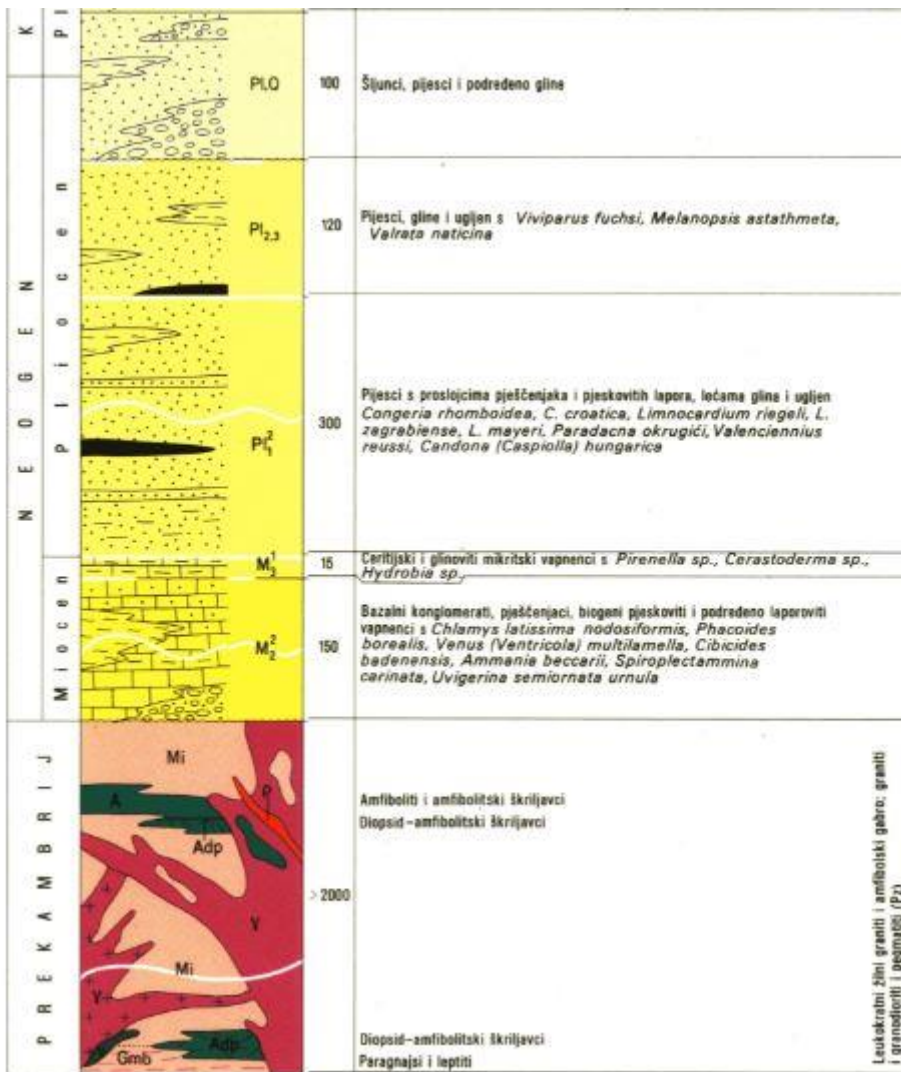


Slika 5-9 Satelitski snimak Moslavačke gore

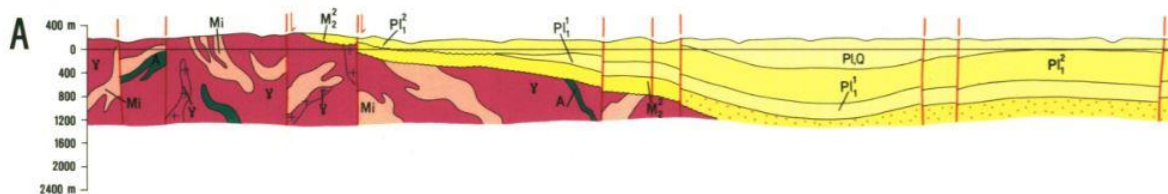
Moslavačka gora izgrađena je, većim dijelom, od granita u koji, uz uobičajene sastojke za granit ulaze andaluzit i silimanit. Metamorfni kompleks koji je samo manjim dijelom sačuvan unutar granita sastoji se od homogenih i heterogenih migmatita, različitih varijeteta amfibolita i amfibolitskih škriljavaca te paragnajsa. (Korolija i Crnko, 1986.) (Slika 5-10a) (Slika 5-10b). Kao što se može vidjeti iz profila kroz Moslavačku goru, ovo područje je tektonski dosta poremećeno, a svojstva stijena su većim dijelom heterogena (Slika 5-11). Rasjedi sežu i do dubina od preko 1200 m što bi za buduće odlagalište moglo biti opasno uslijed tektonske aktivnosti.



Slika 5-10a Geološka karta Moslavačke gore (Korolija i Crnko, 1985)



Slika 5-10b Legenda geološke karte Moslavačke gore (Korolija i Crnko, 1985)

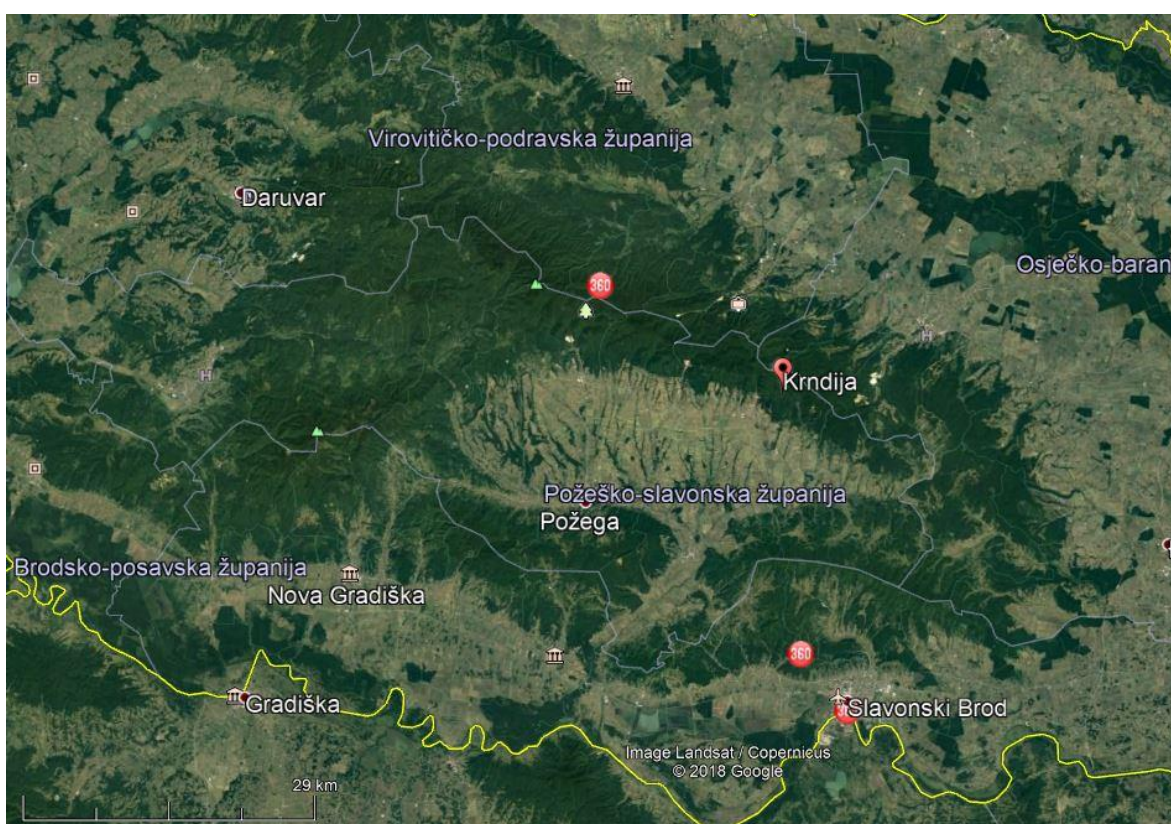


Slika 5-11 Profil kroz Moslavačku goru (Korolija i Crnko, 1985)

Moslavačka gora zbog svoje povoljne lokacije, blizine NE Krško, male gustoće naseljenosti i ostalih geografskih karakteristika predstavljala bi povoljnu lokaciju za odlagalište VRAO-a i ING-a. Međutim, iako su graniti kao matična stijena za odlagalište izuzetno povoljni jer imaju odlična izolatorska svojstva, graniti Moslavačke gore su na dijelovima izrazito heterogeni te je samim time teško predvidjeti njihova mehanička svojstva. Moslavačka gora je bogata rudama (granit, nafta) te je i s te strane nepovoljna kao lokacija za odlagalište jer bi se u budućnosti prilikom eksploatacije ruda mogla ugroziti sigurnost odlagališta. Kako je već navedeno, ovo područje sadrži brojne rasjede koji sežu do velikih dubina te oni predstavljaju potencijalnu opasnost za samo odlagalište. Također, Republika Hrvatska je 2007. godine Moslavačku goru proglasila regionalnim parkom te se ovo područje dalje ne može razmatrati kao potencijalna lokacija odlagališta VRAO-a i ING-a.

#### 5.4. MAGMATSKO – METAMORFNE STIJENE – SLAVONSKE PLANINE

Slavonske planine (Psunj, Papuk i Krndija) nalaze se 100 km istočno od Zagreba. Ove planine čine dva paralelna niza pružanja zapad – istok. Sjeverni niz čine Papuk ( 954 m n.v.) i Krndija (790 m n.v.), a južni Psunj (984 m n.v.) te Požeška (618 m n.v.) i Dilj gora ( 461 m n.v.) Između ova dva niza nalazi se požeška zavalica, dok je sjeverno nizina rijeke Drave, a južno nizina rijeke Save. Područje Slavonskih planina je šumovito te relativno loše prometno povezano. Veći gradovi u okolici su Orahovica, Daruvar i Pakrac (Slika 5-12).

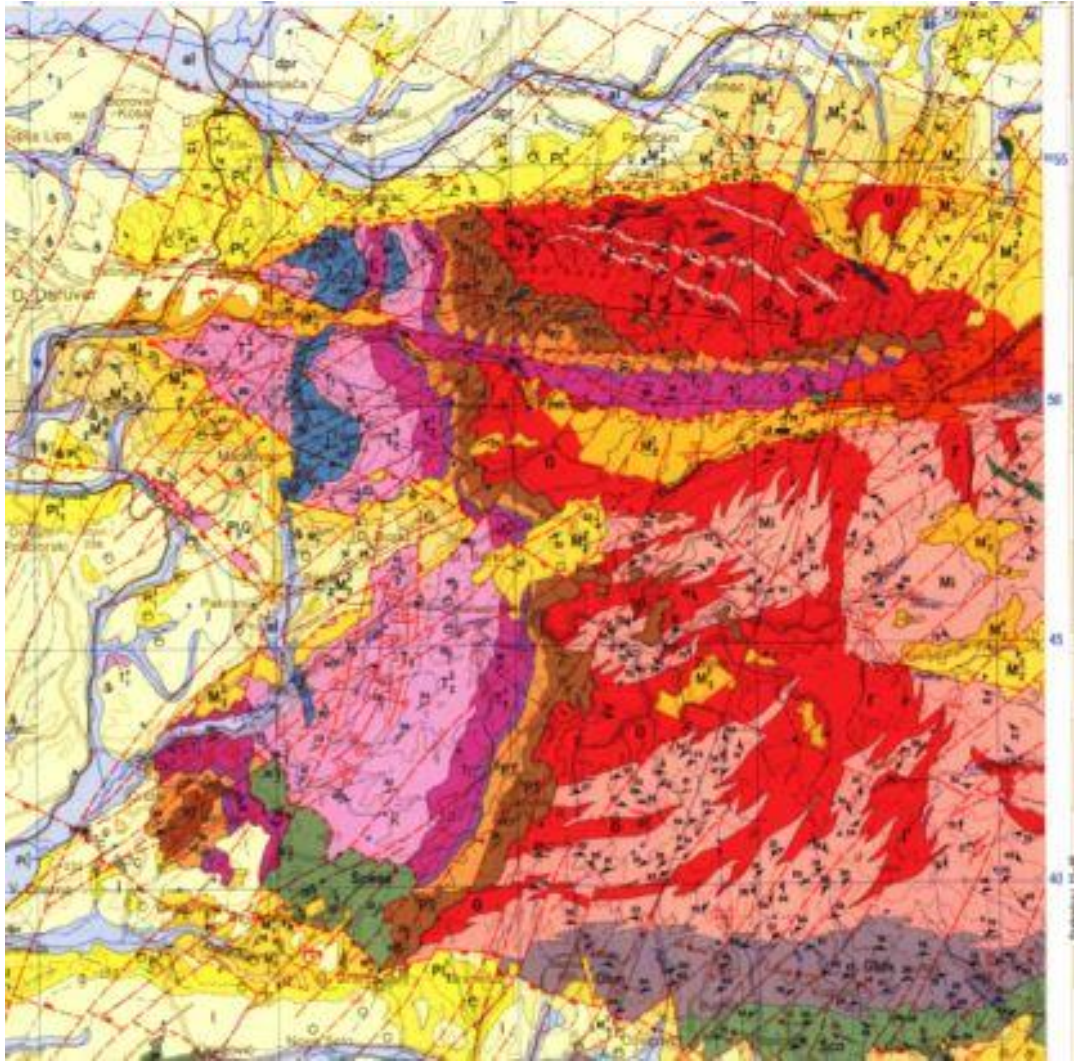


Slika 5-12 Satelitski prikaz Slavonskih planina (Papuk, Psunj i Krndija)

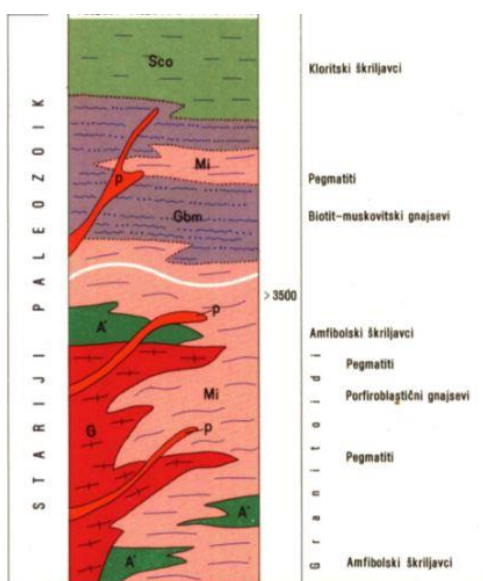
Papuk, Psunj i Krndija izgrađene su većim dijelom od stijena paleozojske i prekambrijske starosti. Središnji dio Papuka izgrađen je od granitoida, pegmatita, amfibolitskih škriljavaca i gnajseva paleozojske starosti (Slika 5-13a) (Slika 5-13b) dok je većina Psunja i Krndije izgrađena od gabra, amfibolitskih škriljavaca, klorita i gnajseva (Slika 5-15a) (Slika 5-15b) (Slika 5-16a) (Slika 5-16b). Kao što se vidi na profilima (Slika 5-14) (Slika 5-17) (Slika 5-18) stijene Slavonskih planina su heterogene. Duboko geološko



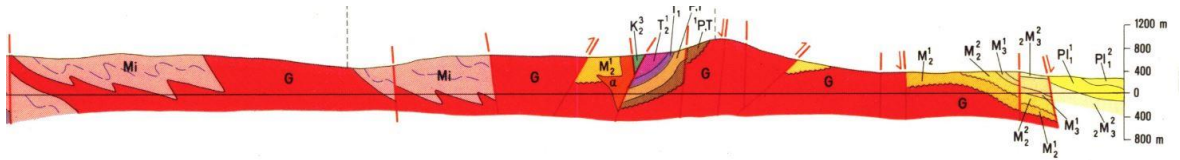
odlagalište trebalo bi se nalaziti u homogenoj i izotropnoj matičnoj stijeni dovoljno velike debljine. Ukoliko unutar matične stijene postoje leće ili intruzije drugih stijena, a što je slučaj na ovom području, to može predstavljati problem jer razlike u čvrstoći stijena na njihovom kontaktu mogu stvoriti pukotine i potencijalne puteve za prijenos radionuklida prema vodonosnicima ili prema površini.



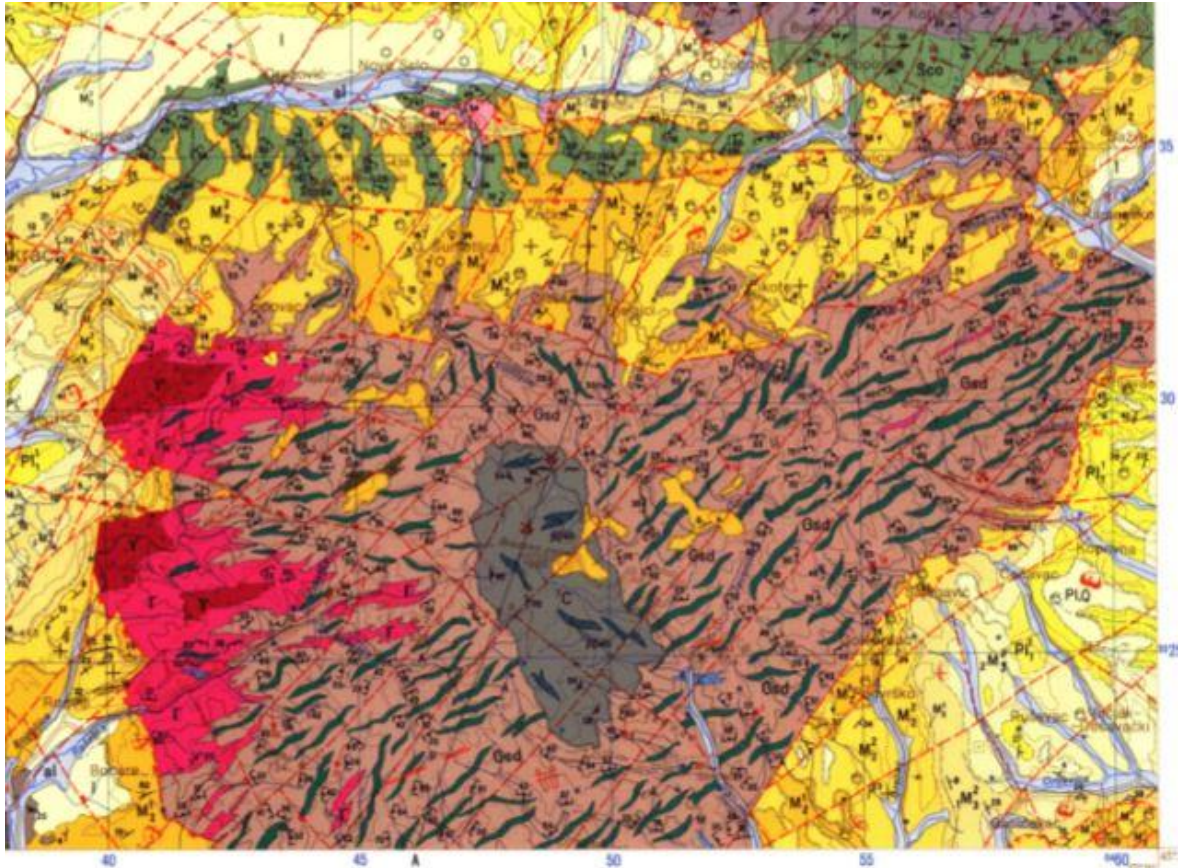
Slika 5-13a Geološka karta Papuka (Jamičić, 1989)



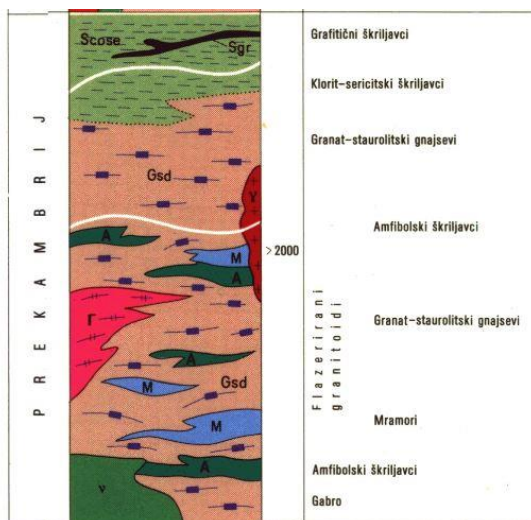
Slika 5-13b Legenda geološke karte Papuka (Jamičić, 1989)



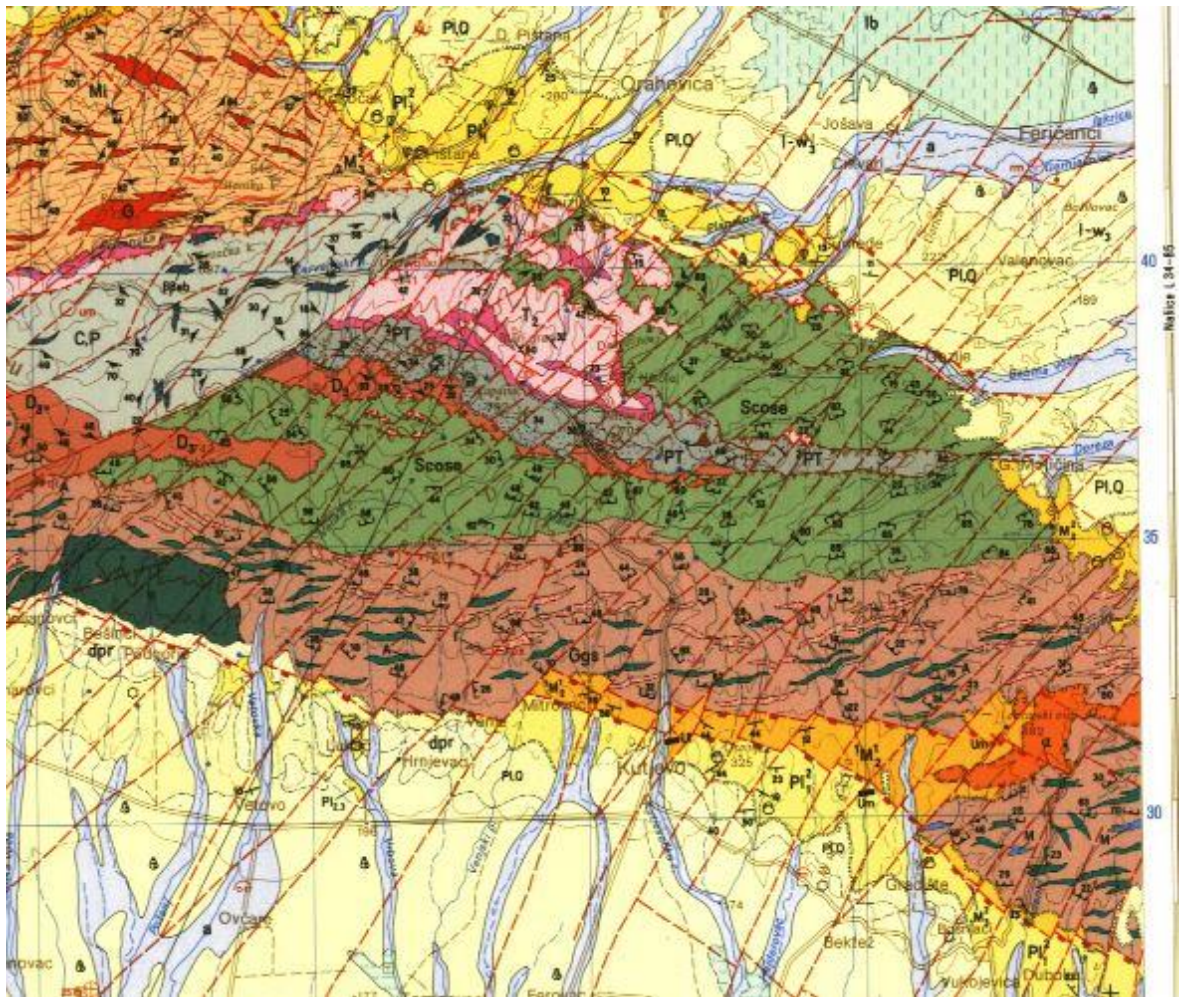
Slika 5-14 Profil kroz Papuk (Jamičić, 1989)



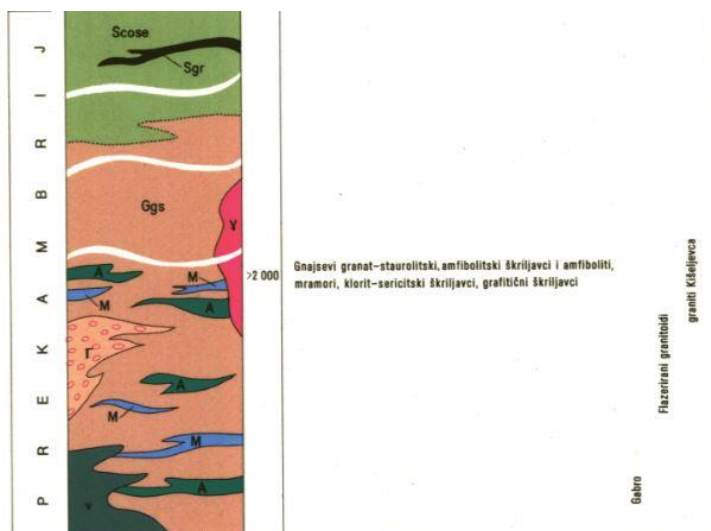
Slika 5-15a Geološka karta Psunja (Jamičić, 1989)



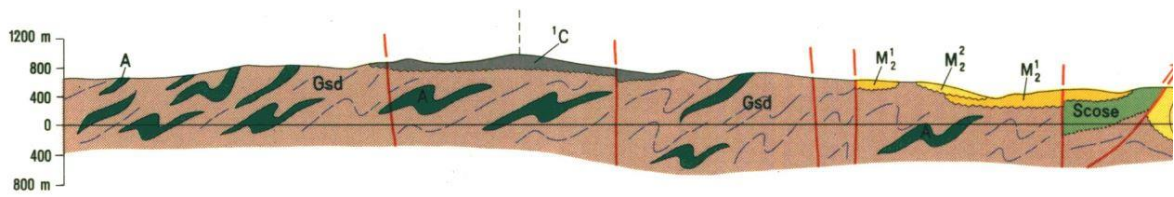
Slika 5-15b Legenda geološke karte Psunja (Jamičić, 1989)



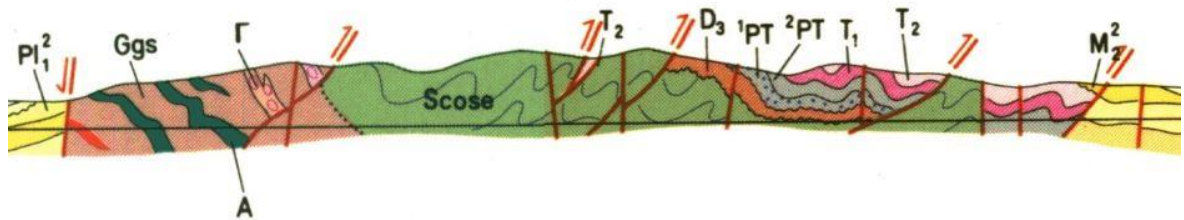
Slika 5-16a Geološka karta Krndije (Jamičić i Brkić, 1987)



Slika 5-16b Legenda geološke karte Krndije (Jamičić i Brkić, 1987)



Slika 5-17 Profil kroz Psunj (Jamičić i Brkić, 1987)

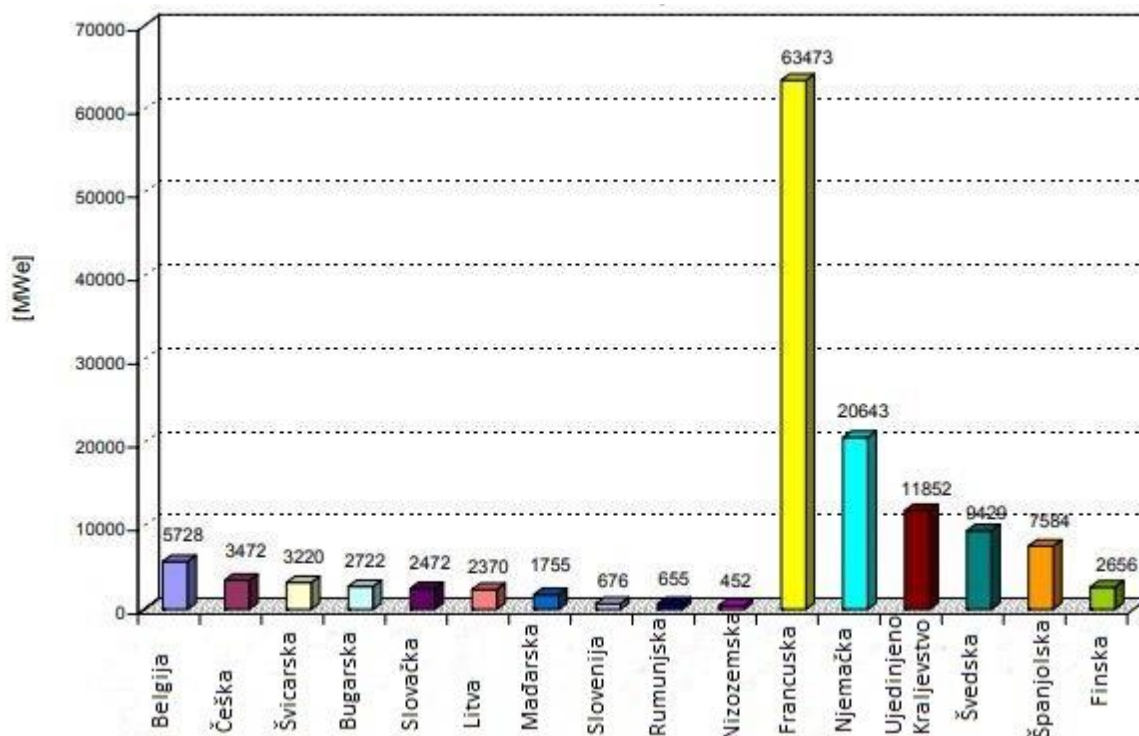


Slika 5-18 Profil kroz Krndiju (Jamičić i Brkić, 1987)

Magmatske i metamorfne stijene su pogodne kao matične stijene za izgradnju dubokog geološkog odlagališta zbog svoje niske poroznosti, niske propusnosti, visoke čvrstoće te stabilnosti prilikom iskapanja. Međutim, ukoliko su te stijene heterogene i česti su kontakti različitih metamornih i magmatskih stijena na njihovom kontaktu stvaraju se putovi za prijenos radionuklida prema površini. Stijene Slavonskih planina do dubina od 400 m, što je vidljivo po profilima, nisu homogene i zbog toga bi bilo nesigurno u njima graditi duboko geološko odlagalište ING-a i VRAO-a. Geografski položaj ovog područja također nije povoljan za odlagalište zbog njegove relativno velike udaljenosti od NE Krško i slabe prometne povezanosti što bi izgradnju odlagališta jako poskupilo.

## 6. RASPRAVA O MOGUĆNOSTI ZAJEDNIČKOG MEĐUDRŽAVNOG ODLAGALIŠTA

Većina europskih država, čak i one bez vlastitog nuklearnog programa, proizvode radioaktivni otpad iz raznih izvora koji se ne može skladištiti u površinskim i pripovršinskim objektima. Odlaganje VRAO-a i ING-a u duboka geološka odlagališta trenutno se smatra najsigurnijom metodom zbrinjavanja ovakve vrste otpada. Iako se u nekim bogatijim državama, s većim nuklearnim programima intenzivno radi na implementaciji projekata dubokih geoloških odlagališta u nacionalne strateške programe, siromašnije države, s manjim količinama radioaktivnog otpada, razmatraju mogućnost izgradnje zajedničkog odlagališta. Kako bi države, s manjim nuklearnim programima, manjom količinom otpada i samim time manjim potrebama za nacionalnim dubokim geološkim odlagalištima, iskoristile sve ekonomske pogodnosti udruživanja u svrhu izvedbe ovakvog projekta, pokrenut je, u okviru Europske komisije, projekt SAPIERR (Support Action: Pilot Initiative for European Regional Repositories). Unutar ovog projekta sudjeluje 21 organizacija iz 14 zemalja koje zajednički sudjeluju u pripremi država iz kojih dolaze na međudržavnu suradnju o ovom problemu. Treba napomenuti da ove organizacije ne predstavljaju stav države iz koje dolaze nego same sebe, ali njihov zajednički rad će svakako biti od velike važnosti u definiranju nacionalnih strategija upravljanja RAO-om. Države uključene u SAPIERR su: Austrija, Belgija, Bugarska, Hrvatska, Češka, Italija, Slovenija, Rumunjska, Mađarska, Latvija, Litva, Nizozemska, Slovačka i Švicarska (Štefula, 2006). Instalirana snaga nuklearnih elektrana kao i količina otpada koja planira biti odlagana u duboka geološka odlagališta, u zemljama članicama projekta SAPIERR u odnosu na europske zemlje s većim nuklearnim programima, prikazane su na slikama 6-1 i 6-2.



Slika 6-1 Instalirana snaga nuklearnih elektrana u državama članicama projekta SAPIERR u odnosu na europske države s većim nuklearnim programima (Štefula 2006)

DRŽAVE	OPERATIVNI REAKTORI	REAKTORI U IZGRADNJI	REAKTORI U DEKOMISIJI	ISTRAŽIVAČKI REAKTORI	KOLIČINA OTPADA
Austrija	0	0	0	3	300
Belgija	7	0	0	5	5 000
Bugarska	4	0	2	1	3 500
Hrvatska	0.5	0	0	0	200
Češka	6	0	0	5	4 000
Mađarska	4	0	0	2	1 500
Italija	0	0	4	5	4 000
Latvija	0	0	0	1	200
Litva	2	0	0	0	1 500
Nizozemska	1	0	1	3	3 000
Rumunjska	1	1	0	2	2 000
Slovačka	6	0	1	0	2 600
Slovenija	0.5	0	0	1	300
Švicarska	5	0	0	6	2 900
<b>UKUPNO</b>	<b>37</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	<b>34</b>	<b>31 000</b>

Slika 6-2 Količina otpada koja planira biti odlagana u duboka geološka odlagališta u zemljama članicama projekta SAPIERR u odnosu na europske zemlje s većim nuklearnim programima (Štefula, 2006)

Nuklearna elektrana Krško ima dozvolu za rad do 2043. godine te će nakon toga hrvatska i slovenska strana imati obvezu zbrinuti RAO nastao kao posljedica rada elektrane. Kao što je već rečeno, odlagalište VRAO-a i ING-a bio bi strateški projekt za Hrvatsku iz više razloga, međutim mogao bi biti preskup za ekonomiju poput Hrvatske s obzirom da se radi o projektu reda veličine 100 i više milijuna eura. Drugi problem gradnje dubokog geološkog odlagališta na teritoriju Hrvatske može predstavljati otpor lokalne zajednice jer je ova metoda zbrinjavanja VRAO-a i ING-a relativno nova i ljudi nisu dovoljno educirani. U ovom radu je prikazano da u Hrvatskoj postoje potencijalne lokacije na kojima se može odlagati RAO. Na prikazanim lokacijama mogao bi se odlagati i slovenski dio otpada iz NEK te bi na taj način Hrvatska mogla ekonomski još više profitirati. Slovenija je već počela istraživati potencijalnu lokaciju odlagališta u blizini NEK, u mjestu Vrbina, nizvodno od Krškog. Ova lokacija je predložena hrvatskoj strani kao potencijalna lokacija zajedničkog odlagališta, međutim hrvatska strana je to odbila jer su smatrali da se lokacija nalazi preblizu vodonosniku iz kojeg se napaja Zagreb a s druge strane, na ovoj lokaciji je predviđeno odlaganje samo otpada koji nastaje na teritoriju Slovenije dok bi Hrvatska za ostatak radioaktivnog otpada koji nastaje u institucijama u Hrvatskoj morala graditi vlastito odlagalište što svakako nije isplativa opcija.

Radioaktivni otpad iz medicinskih, istraživačkih i drugih institucija trenutno se drži u skladištima unutar tih institucija, te se tako i otpad iz NEK čuva unutar NEK-a. S obzirom da NEK ima dozvolu za rad do 2043. godine, vrijeme je da se intenzivnije krene istraživati mogućnost vlastitog odlaganja RAO-a ili, što bi za Hrvatsku bila povoljnija i izvodljivija opcija, mogućnost međudržavnog ili regionalnog odlagališta. S obzirom da su kapaciteti u kojima se trenutno RAO dovoljni, mnoge države čekaju da prođe određeni period vremena jer se aktivnost i toplina RAO-a značajno smanjuje kroz vrijeme te se time olakšava rukovanje otpadom. Drugi razlog je taj što će se s vremenom ovakav projekt biti društveno prihvatljiviji zbog bolje educiranosti stanovništva, te će se napretkom tehnologije zasigurno smanjiti cijena ovakvog zahvata što je za ekonomije veličine Hrvatske najbitnije.

Međutim, to vrijeme trebalo bi nam omogućiti kvalitetnu pripremu dokumentacije, regulaciju zakona te edukaciju stanovništva i stvaranje šireg državnog konsenzusa o mogućem projektu odlagališta na teritoriju Hrvatske ukoliko međudržavnom suradnjom neće biti moguće regionalno odlagalište graditi na teritoriju druge države ili će, ekonomski, geopolitički i iz drugih razloga, biti isplativije samostalno izgraditi duboko geološko odlagalište.



## 7. ZAKLJUČAK

Hrvatska je ugovorom iz 1970. godine postala 50 postotni vlasnik NE Krško dok je druga polovica u vlasništvu Slovenije. S obzirom na to, tijekom rada i nakon zatvaranja NEK, Hrvatska će biti dužna zbrinuti 50% radioaktivnog otpada nastalog radom elektrane. Prethodnim istraživanjima tražila se povoljna lokacija za odlaganje NRAO-a i SRAO-a dok je cilj ovog rada bio, javno dostupnim podacima i alatima, prvenstveno na temelju geologije područja (svojstava matične stijene), odrediti povoljnu lokaciju dubokog geološkog odlagališta ING-a i VRAO-a. Kao dvije moguće lokacije izdvojene su Petrova i Trgovska gora, na temelju svojih geoloških i geografskih svojstava (svojstva matične stijene, slaba naseljenost, blizina NEK, itd.). Međutim, iz dostupnih geoloških profila i karata nije bilo moguće dobiti uvid u vrste i svojstva stijena na dubinama od 500 do 1000 m na kojima se ovakva odlagališta projektiraju. Daljnjim radom trebalo bi detaljnim geološkim, geofizičkim i ostalim istraživanjima ispitati jesu li svojstva matičnih stijena na ovim dubinama pogodna za izgradnju dubokog geološkog odlagališta ING-a i VRAO-a.

Količina otpada koji Hrvatska mora zbrinuti je mala u svjetskim okvirima te će ovo odlagalište biti veličine od nekoliko stotina kvadratnih metara. Duboka geološka odlagališta projektiraju se na sigurnost u razdoblju od milijun i više godina te bi se, odgovarajućom edukacijom lokalnog stanovništva, na lokaciji gdje je odlagalište planirano, trebali izbjeći nepotrebni otpori stanovništva i predstaviti pozitivne strane ovakvog projekta u smislu gospodarskog razvoja lokalne zajednice.

Vlastito odlagalište trebao bi biti strateški projekt Republike Hrvatske jer se njime uvelike olakšava raspolaganje radioaktivnim otpadom, a prilikom izgradnje zapošljava se veliki broj, geoloških, građevinskih, rudarskih i drugih tvrtki što s gospodarske strane također predstavlja strateški projekt. Međutim, s obzirom na količinu otpada koju Hrvatska mora zbrinuti, treba razmotriti mogućnost zajedničkog regionalnog odlagališta s državama u okviru projekta SAPIERR ili na temelju nekih drugih međudržavnih ugovora. Ovakva opcija regionalnog odlagališta Hrvatskoj bi s ekonomske strane bila najprihvatljivija te bi se sudjelovanjem Hrvatske u izgradnji, odnosno djelomičnim vlasništvom u odlagalištu, izbjegle naknade koje bi bili dužni plaćati ukoliko bi otpad izvezili u nacionalno odlagalište na teritoriju neke druge države.

U svakom slučaju, u što kraćem roku potrebno je pokrenuti daljnja istraživanja potencijalnih lokacija odlagališta radioaktivnog otpada jer se izgradnjom takvog

odlagališta spriječava ovisnost države o izvozu otpada, što će sigurno biti skuplja opcija, potiče se razvoj lokalnih zajednica te gospodarstvo cijele države.

## 8. LITERATURA

Borojević Šošćarić, S., Neubauer, F., 2012. Principle rock types for radioactive waste repositories. Rudarsko – geološko – naftni zbornik. Vol. 24, str. 11 – 18.

Bruno, J., Ewing, R., 2006. Spent nuclear fuel. Elements. 2 (6), str. 343-349

IAEA, 2006. Storage and Disposal of Spent Fuel and High Level Radioactive Waste, Vienna.

IAEA, 2009(b). IAEA safety standards: Classification of radioactive waste, Vienna.

Jamičić, D.(1989): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 List Daruvar L 33-95. – Geološki zavod Zagreb, (1975.-1988.), Savezni geološki zavod, Beograd.

Jamičić, D., Brkić, M.(1987): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 List Orahovica L 33-96. – Geološki zavod, OOUR za geologiju i paleontologiju, Zagreb (1971.-1986.), Savezni geološki zavod, Beograd.

Korolija, B., Crnko, J.(1985): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 List Bjelovar L 33-82. – Geološki zavod Zagreb (1975.-1985.), Savezni geološki zavod, Beograd.

Korolija, B., Crnko, J.(1986): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 Tumač za List Bjelovar L 33-82. – Geološki zavod Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd, 40 str.

Korolija, B., Živaljević, T. & Šimunić, A.(1979): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 List Slunj L 33-104. – Geološki zavod Zagreb, Institut za geologiju Sarajevo (1968.-1972.), Savezni geološki zavod, Beograd.

Korolija, B., Živaljević, T., Šimunić, A.(1981.): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. Tumač za List Slunj L 33-104. – Geološki zavod Zagreb, Institut za geologiju Sarajevo, Savezni geološki institut, Beograd, 42 str.

Leopold, R., 2015. Odabir lokacije odlagališta radioaktivnog otpada. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko – geološko – naftni fakultet, 58 str.

Peša, M., 2013. Trgovska gora kao potencijalna lokacija za odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada. Diplomski rad, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 73 str.

Štefula, V., 2006. Support Action: Pilot Initiative for European Regional Repositories. Bruxelles. European Commission.

Veinović, Ž., Kovačević Zelić, B., Domitrović, D., 2014. Deep geological disposal of spent nuclear fuel and high level waste – Current state and future challenges, University of Zagreb, Faculty of mining, geology and petroleum engineering, Croatia.

#### **Popis internetskih izvora:**

Wikipedia, 2013. Nuklearno gorivo URL: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Nuklearno\\_gorivo](https://hr.wikipedia.org/wiki/Nuklearno_gorivo) (23.3.2013.)

NEA, 1989. The disposal of high-level radioactive waste. URL: <https://www.oecd-nea.org/brief/brief-03.html> (20.7.2018.)

Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva Nuklearne elektrane Krško, 2018. URL: <http://www.fond-nek.hr/hr/pitanje/1.-sto-je-radioaktivni-otpad-5> (22.7.2018.)

