

# Isključujući kriteriji za odabir lokacije dubokog geološkog odlagališta

---

**Habek, Kristina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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:169:300484>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-05-02**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij rudarstva

**ISKLJUČUJUĆI KRITERIJI ZA ODABIR LOKACIJE DUBOKOG GEOLOŠKOG  
ODLAGALIŠTA**

Diplomski rad

Kristina Habek

R-230

Zagreb, 2020.



KLASA: 602-04/20-01/159  
URBROJ: 251-70-11-20-2  
U Zagrebu, 21.09.2020.

**Kristina Habek, studentica**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/159, UR. BROJ: 251-70-03-20-2 od 08.05.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

### ISKLUČUJUĆI KRITERIJI ZA ODABIR LOKACIJE DUBOKOG GEOLOŠKOG ODLAGALIŠTA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu izv. prof. dr. sc. Dario Perković, izvanredni profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentor dr.sc. Želimir Veinović, docent.

**Voditelj**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dario  
Perković

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite**

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i  
studente**

**Komentor**

Doc. dr. sc. Želimir Veinović

(titula, ime i prezime)

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

## ISKLUČUJUĆI KRITERIJI ZA ODABIR LOKACIJE DUBOKOG GEOLOŠKOG ODLAGALIŠTA

KRISTINA HABEK

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

### SAŽETAK

Radioaktivni otpad je produkt korištenja radioaktivnih materijala u medicini, industriji i istraživanjima. Odlagališta radioaktivnog otpada se projektiraju prema posebnim zahtjevima, od kojih je najsloženiji odabir lokacije. Odabir lokacije za duboko geološko odlagalište iskorištenog nuklearnog goriva i visoko radioaktivnog otpada osobito je zahtjevan proces. Odlaganje u dubokim geološkim odlagalištima podrazumijeva odlaganje otpada u posebnim spremnicima u geološku sredinu pogodnih uvjeta u pogledu geološke stabilnosti, hidrogeologije, geokemije i utjecaja mehaničkog i termičkog opterećenja koja će osigurati dugotrajno sigurno zbrinjavanje ove vrste otpada. U ovom radu su izdvojeni preporučeni isključujući kriteriji Međunarodne agencije za atomsku energiju, Republike Finske, Savezne Republike Njemačke i Republike Hrvatske u vidu sigurnosnih, geoloških i težinskih kriterija za odabir lokacije dubokog geološkog odlagališta. Navedeni kriteriji su, pomoću GIS tehnologije, primijenjeni na teritorij Republike Hrvatske. Rad će poslužiti kao polazna točka u daljnjim istraživanjima, kombinacijom GIS-a i višekriterijske analize, za mogućnost određivanja lokacije za duboko geološko odlagalište u Republici Hrvatskoj.

Ključne riječi: GIS tehnologija, radioaktivni otpad, duboko geološko odlagalište, isključujući kriteriji

Diplomski rad sadrži: 67 stranica, 12 tablica, 25 slika, 8 priloga i 41 referencu.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Dario Perković

Komentor: Doc. dr. sc. Želimir Veinović

Ocjenjivači: Izv. prof. dr. sc. Dario Perković  
Doc. dr. sc. Želimir Veinović  
Doc. dr. sc. Bojan Matoš

Datum obrane: 22. rujna, 2020.

EXCLUSION CRITERIA FOR SITTING OF DEEP GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITIES

KRISTINA HABEK

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering  
Department of Mining Engineering and Geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

ABSTRACT

Radioactive waste is a product of use of radioactive materials in medicine, industry and research. Radioactive waste repositories are designed according to special requirements, the most complex of which is site selection. Selecting a site for a deep geological repository of spent nuclear fuel and high level radioactive waste is a particularly demanding process. Disposal in deep geological repositories means the disposal of waste in special containers in a geological environment of suitable conditions in terms of geological stability, hydrogeology, geochemistry and the impact of mechanical and thermal load that will ensure long-term safe disposal of this type of waste. The paper singles out the recommended exclusion criteria of the International Atomic Energy Agency, the Republic of Finland, the Federal Republic of Germany and the Republic of Croatia in the form of safety, geological and weighting criteria for the site selection of the deep geological repository. These criteria were applied to the territory of the Republic of Croatia using GIS technology. The paper will serve as a starting point in further research, using a combination of GIS and multicriteria analysis, of the possibility of determining the location for a deep geological repository in the Republic of Croatia.

Keywords: GIS technology, radioactive waste, deep geological disposal, exclusion criteria

Thesis contains: 67 pages, 12 tables, 25 figures, 8 enclosures and 41 references.

Original in: Croatian

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

Mentor: PhD Dario Perković, Associate Professor

Co-mentor: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor

Reviewers: PhD Dario Perković, Associate Professor  
PhD Želimir Veinović, Assistant Professor  
PhD Bojan Matoš, Assistant Professor

Date of defense: September 22, 2020

# SADRŽAJ

|       |                                                       |    |
|-------|-------------------------------------------------------|----|
| 1.    | Uvod .....                                            | 1  |
| 2.    | Radioaktivni otpad (RAO) .....                        | 2  |
| 2.1   | Istrošeno nuklearno gorivo (ING).....                 | 5  |
| 2.2   | Visokoradioaktivni otpad (VRAO).....                  | 7  |
| 3.    | Duboka geološka odlagališta .....                     | 8  |
| 4.    | Regulatorna osnova .....                              | 13 |
| 4.1   | Postojeća regulativa Republike Hrvatske .....         | 14 |
| 4.2   | Postojeća regulativa Savezne Republike Njemačke ..... | 19 |
| 4.2.1 | Sigurnosni zahtjevi .....                             | 20 |
| 4.2.2 | Geološki kriteriji.....                               | 20 |
| 4.2.3 | Težinski kriteriji .....                              | 21 |
| 4.3   | Postojeća regulativa Republike Finske .....           | 26 |
| 4.3.1 | Sigurnosni zahtjevi .....                             | 26 |
| 4.3.2 | Geološki kriteriji.....                               | 26 |
| 4.3.3 | Okolišni kriteriji .....                              | 30 |
| 4.3.4 | Transport otpada .....                                | 31 |
| 4.4   | Postojeća svjetska regulativa (preporuke IAEA-e)..... | 32 |
| 4.4.1 | Geološki kriteriji.....                               | 33 |
| 4.4.2 | Okolišni kriteriji .....                              | 36 |
| 4.4.3 | Uvjeti izgradnje .....                                | 38 |
| 4.4.4 | Transport otpada .....                                | 38 |
| 4.4.5 | Zaštita okoliša.....                                  | 39 |
| 5.    | Geografski informacijski sustav (GIS).....            | 40 |
| 5.1   | Ulaz podataka u GIS .....                             | 43 |
| 5.2   | Obrada ulaznih podataka .....                         | 45 |
| 5.3   | Tematsko modeliranje.....                             | 53 |
| 6.    | Zaključak .....                                       | 63 |
| 7.    | Literatura .....                                      | 64 |

## POPIS SLIKA

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 2-1 Klasifikacija otpada s obzirom na vrijeme poluraspada (IAEA, 2018) .....                                                                                                    | 4  |
| Slika 2-2 Prikaz gorivnog elementa s gorivnim šipkama (Foro Nuclear, 2020) .....                                                                                                      | 6  |
| Slika 2-3 Vitrificirani VRAO (British Glass, 2019).....                                                                                                                               | 7  |
| Slika 3-1 Pad radiotoksičnosti kao rezultat radioaktivnog raspada prikazan kao funkcija vremena za ING i VRAO (Uroić, 2019).....                                                      | 8  |
| Slika 3-2 Sustav višestrukih barijera (NWMO, 2015) .....                                                                                                                              | 12 |
| Slika 3-3 DGO na kanadskom primjeru (NWMO, 2015) .....                                                                                                                                | 12 |
| Slika 4-1 Švedski model odlaganja VRAO (McEwen i dr., 2012) .....                                                                                                                     | 15 |
| Slika 4-2 Finski model (Posiva Oy, 2012) .....                                                                                                                                        | 32 |
| Slika 5-1 Prikaz rasterskih i vektorskih podataka u GIS-u (Perković, 2018).....                                                                                                       | 41 |
| Slika 5-2 Osnovna geološka karta RH.....                                                                                                                                              | 44 |
| Slika 5-3 Primjer postojećih bijelih rubova između listova Ogulin, Slunj, Otočac i Bihać (prema Velić i dr., 1981; Korolija i dr., 1979; Velić i dr., 1974; Polšak i dr., 1976) ..... | 45 |
| Slika 5-4 Primjer bijelih praznina na listovima Crikvenica i Ogulin (prema Šušnjar i dr., 1970; Velić i dr., 1981).....                                                               | 47 |
| Slika 5-5 Pozicija neželjene boje unutar <i>Layer Properties</i> izbornika .....                                                                                                      | 48 |
| Slika 5-6 Rezultat uklanjanja bijelih rubova na primjeru listova Crikvenica i Ogulin (prema Šušnjar i dr., 1970; Velić i dr., 1981) .....                                             | 49 |
| Slika 5-7 Unošenje koordinata otprije očitanih s karte.....                                                                                                                           | 51 |
| Slika 5-8 Razvlačenje rasterske slike preko vektora na primjeru karte predneogenske podloge .....                                                                                     | 52 |
| Slika 5-9 Georeferencirana karta predneogenske podloge (Cvetković i dr., 2019) .....                                                                                                  | 53 |
| Slika 5-10 Crvenim poligonima označeni spilitizirani dijabazi označeni na OGK100 s $\beta\beta$ na primjeru lista Sinja (Papeš i dr., 1982) .....                                     | 55 |
| Slika 5-11 Atributne informacije pomoću kojih pobliže definiramo vrstu i područje pojavljivanja na primjeru Sinja (Papeš i dr., 1982) .....                                           | 56 |
| Slika 5-12 Prikaz pogodnih magmatskih i metamorfnih stijena prema osnovnim geološkim kartama (OGK) u mjerilu 1:100 000 područja RH.....                                               | 57 |
| Slika 5-13 Prikaz pogodnih magmatskih i metamorfnih stijena prema osnovnim geološkim kartama (OGK) u mjerilu 1:100 000 područja RH s povećanim prikazom područja Sinja                | 58 |
| Slika 5-14 Pojavljivanje evaporita prema osnovnim geološkim kartama (OGK) u mjerilu 1:100 000 na području RH.....                                                                     | 59 |
| Slika 5-15 Karta predneogenske podloge s označenim temeljnim gorjem i krovinskim mezozojskim kompleksima pogodnih za odlaganje VRAO i/ili ING (prema Cvetković i dr., 2019).....      | 60 |
| Slika 5-16 Strukturna karta gornjeg karbonatnog kompleksa (preuzeta iz Saftić i dr., 2019 i prilagođena na hrvatski jezik).....                                                       | 61 |
| Slika 5-17 Karta pojavljivanja dijabira na području RH prema Saftić i dr. (2019).....                                                                                                 | 62 |

## POPIS TABLICA

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 3-1 Glavne barijere EBS-a i njihove funkcije (Miśkiewicz i dr., 2015).....             | 11 |
| Tablica 4-1 Udio nuklearne energije u ukupnom energetsom sektoru država (IEA, 2020)<br>.....   | 13 |
| Tablica 4-2 Eliminacijski kriteriji za odlagalište NRAO i SRAO (Vlada RH, 1992).....           | 16 |
| Tablica 4-3 Usporedbeni kriteriji za odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada .....    | 17 |
| Tablica 4-4 Isključujući kriteriji za odabir dubokog geološkog odlagališta .....               | 19 |
| Tablica 4-5 Težinska skupina 1 .....                                                           | 24 |
| Tablica 4-6 Težinska skupina 2 .....                                                           | 25 |
| Tablica 4-7 Težinska skupina 3 .....                                                           | 25 |
| Tablica 4-8 Maksimalna moguća doza ispuštanja u prosjeku od 1000 godina (Posiva Oy, 2012)..... | 27 |
| Tablica 4-9 Tektonske i topografske strukture matičnih stijena u Finskoj.....                  | 29 |
| Tablica 4-10 Podjela na klase s obzirom na okolišne kriterije.....                             | 31 |
| Tablica 5-1 Opis: x i y vrijednosti koordinata lista Koprivnica .....                          | 50 |

## POPIS PRILOGA

|                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------|
| Prilog 1 Ocjena prijenosa radioaktivnih tvari kretanje podzemne vode u IPP-u |
| Prilog 2 Ocjena konfiguracije tijela stijene                                 |
| Prilog 3 Ocjena procjene prostorne karakterizacije                           |
| Prilog 4 Ocjena tendencije stvaranja puteva fluidima                         |
| Prilog 5 Ocjena zadržavanja retencije u IPP-u                                |
| Prilog 6 Ocjena zaštite IPP-a od prekomjernog opterećenja krovinom           |
| Prilog 7 Kategorije magmatskih i metamorfnih stijena na području RH          |
| Prilog 8 Skup svih pogodnih područja za odlaganje VRAO i ING na području RH  |



# 1. UVOD

Radioaktivni otpad je nusprodukt upotrebe radioaktivnog materijala u procesima nuklearne fisije ili nuklearne tehnologije, poput nuklearnih elektrana, istraživačkih i medicinskih centara (Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020a). Radioaktivni izvori se koriste za sterilizaciju hrane i medicinskih instrumenata, u medicini za dijagnosticiranje i liječenje pacijenata, u industriji se koriste u detektorima dima i gromobranima (Veinović, 2018). Korištenje radionuklida u različite svrhe dovodi do stvaranja otpada, a kako bi se osiguralo da taj otpad ne utječe na ljude i okoliš, bilo sada, bilo u budućnosti, sve zemlje imaju odgovornost njegovog sigurnog zbrinjavanja. Reguliranje sigurnosti zbrinjavanja je od nacionalne odgovornosti, koja može nadmašivati državne granice, zbog čega je izrazito bitna međunarodna suradnja u poboljšanju globalne sigurnosti izmjenom iskustava i rezultata istraživanja u cilju sprečavanja nesreća, odgovora na hitne situacije i umanjivanja štetnih posljedica. Nema jedinstvenog rješenja za odlaganje visokoradioaktivnog otpada (VRAO), no u cilju zaštite ljudskog zdravlja i okoliša stručnjaci su složni u jednom, visokoradioaktivni otpad će se odlagati daleko od ljudi, na mjestu gdje je ljudski utjecaj i interakcija najmanje moguć, a prirodni (geološki) uvjeti optimalni. Jedno od rješenja je odlaganje u dubokom geološkom odlagalištu, koje uključuje odlaganje spremnika s radioaktivnim otpadom u geološku sredinu pogodnih uvjeta u pogledu geološke stabilnosti, hidrogeologije, geokemije i utjecaja mehaničkog i termičkog opterećenja.

Ovim radom se prikazuje mogućnost korištenja GIS tehnologije u svrhu pronalaska pogodne lokacije s obzirom na te pogodne, isključujuće kriterije. Upravo zbog jednostavnog pregleda i lakog korištenja prethodno izrađenih GIS karata, javnost bi pomoću ovih informacija mogla lakše sudjelovati u odlučujućim odlukama.

Cilj je pronalazak područja u kojem će VRAO ostati neporemećen, bez doticaja s vanjskim svijetom, oslanjajući se na prirodnu izolaciju geološke sredine, koja je stabilna barem sto tisuća godina.

## 2. RADIOAKTIVNI OTPAD (RAO)

Radioaktivnost je prirodan fenomen, tj. svojstvo nekih tvari da se spontano dijele ili mijenjaju pri čemu emitiraju čestice i elektromagnetske valove, zajedničkog naziva radioaktivno zračenje (Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020a). Prirodni izvori radijacije su dio okoliša, svakodnevno smo izloženi radioaktivnom djelovanju kozmičkih zraka, građevinskih materijala, radioaktivnosti iz tla, te unosom pića i jela. Radijacija i radioaktivne tvari imaju mnoge korisne primjene, a danas kao glavni izvor umjetnih radioaktivnih elemenata služe nuklearni reaktori i akceleratori (Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020a).

Radioaktivni otpad ili proizvodi se definiraju kao radioaktivni materijali koji su nastali u procesu proizvodnje (procesuiranjem tvari koje sadrže radionuklide prirodnih uranijevih i torijevih nizova) (Besednik, 2018) ili korištenjem nuklearnog goriva ili drugih materijala koji su postali radioaktivni zbog izloženosti zračenju emitiranom tijekom navedenog procesa, isključujući radioizotope koji su nastali u završnoj fazi proizvodnje i koji se mogu koristiti u znanstvene, medicinske (korištenjem radionuklida u dijagnostičke i terapijske svrhe u medicinskim ustanovama), poljoprivredne, trgovačke ili industrijske svrhe (Sabor RH, 1998).

Najveće količine radioaktivnog otpada nastaju kao posljedica aktivnosti svake od faza nuklearnoga gorivog ciklusa; manje količine stvaraju industrija i znanstvenoistraživačke ustanove (Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020a). Sve države koje koriste radioaktivne materijale i doprinose stvaranju radioaktivnog otpada moraju osigurati njegovo upravljanje na siguran način s obzirom na pripadajuću razinu radioaktivnosti i u skladu s nacionalnim propisima, često utemeljenim na ili u skladu s IAEA (Međunarodna agencija za atomsku energiju, engl. *International Atomic Energy Agency*) standardima sigurnosti.

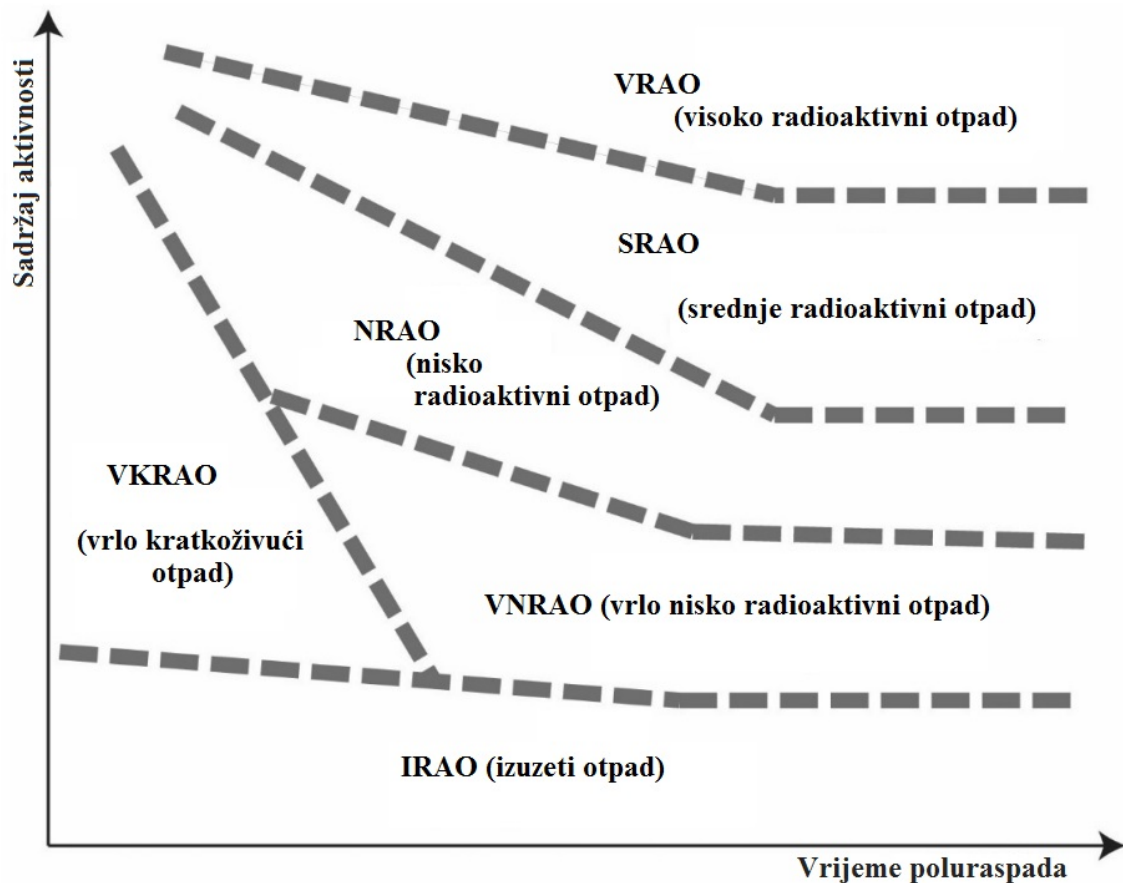
Aktivnosti vezane uz sigurno gospodarenje radioaktivnim otpadom, posebice njegovo zbrinjavanje su različite s obzirom na vrstu RAO-a. Kako se radioaktivnost različitih vrsta RAO-a razlikuje, IAEA predlaže klasifikaciju u šest klasa, koja razvrstava otpad prema potrebnom načinu zbrinjavanja i odlaganja radi omogućavanja dugoročne sigurnosti (Slika 2-1). RAO se dijeli s obzirom na sadržaj aktivnosti i vrijeme poluraspada, pri čemu su označene nekvantitativne granice između različitih klasa, a prije odlučivanja o klasi kojoj pripada je potrebno uzeti u obzir posebne čimbenike:

1. Izuzeti otpad (IRAO): Otpad koji je izuzet od obveze regulatornog nadzora za potrebe zaštite od zračenja, a sadrži radioaktivne izotope specifičnih aktivnosti koje

su jednake ili niže od propisanih graničnih vrijednosti. Zbrinjava se otpuštanjem iz regulatornog nadzora, jednom izuzet iz nadzora, više se ne smatra radioaktivnim otpadom;

2. Vrlo kratkoživi radioaktivni otpad (VKRAO): Otpad koji sadrže radionuklide vrlo kratkog vremena poluraspada (vrijeme poluraspada je kraće od 100 dana). Zbrinjava se na određeno vrijeme (do nekoliko godina, kada se koncentracija aktivnosti smanji na razine jednake ili niže od propisanih graničnih vrijednosti) te se izdvaja iz regulatornog nadzora, nakon čega se bez nadzora može odlagati, koristiti ili ispustiti (Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, 2018);
3. Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO): Otpad koji ne zadovoljava nužno kriterije izuzetog otpada, ima veće koncentracije aktivnosti od VKRAO, ali zbog svoje niske radioaktivnosti je pogodan za odlaganje u površinska i pripovršinska odlagališta s ograničenim regulatornim nadzorom (Veinović i dr., 2015). Zbrinjava se na određeno vrijeme (do nekoliko godina, kada se koncentracija aktivnosti smanji na razine jednake ili niže od propisanih graničnih vrijednosti) te se izdvaja iz regulatornog nadzora, nakon čega se bez nadzora može odlagati, koristiti ili ispustiti (Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, 2018);
4. Nisko radioaktivni otpad (NRAO): Otpad koji može sadržavati kratkoživuće radionuklide s višim razina aktiviteta (vrijeme poluraspada je kraće od 30 godina), a sadržava ograničene koncentracije dugoživućih radionuklida s relativno niskim aktivitetom. Proizvodnja topline je niža od  $2 \text{ kW/m}^3$ . Zahtjeva pouzdanu i otpornu izolaciju u razdoblju od nekoliko stotina godina i pogodan je za odlaganje u pripovršinskim i površinskim odlagalištima (IAEA, 2018);
5. Srednje radioaktivni otpad (SRAO): Otpad koji zbog sadržaja dugoživućih radionuklida zahtjeva veći stupanj zaštite i izolacije od odlaganja u pripovršinskim objektima. SRAO ne zahtjeva nadzor ispuštene topline (ili zahtjeva u vrlo maloj količini) 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 (Leopold, 2015). Zahtjeva odlaganje na dubinama od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara ispod površine (IAEA, 2006);
6. Visoko radioaktivni otpad (VRAO): Otpad dovoljno visoke aktivnosti da radioaktivnim raspadom generira značajnu količinu topline, sadrži vrlo visoku

koncentraciju dugoživićih radionuklida koju treba uzeti u obzir pri projektiranju odlagališta. Odlaganje se vrši u dubokim, geološki stabilnim formacijama na dubini od nekoliko stotina metara ispod površine (IAEA, 2018).



Slika 2-1 Klasifikacija otpada s obzirom na vrijeme poluraspada (IAEA, 2018)

Većina industrijskih procesa rezultira stvaranjem otpada kojim se treba sigurno upravljati. Rad nuklearnih reaktora, kao i pripadnih gorivih ciklusa (proizvodnja uranija, obogaćivanje, proizvodnja goriva i prerada), stvara radioaktivni materijal kojim se treba upravljati kao radioaktivnim otpadom. Ciklus goriva u nuklearnim elektranama proizvodi više vrsta radioaktivnog otpada:

1. **istrošeno nuklearno gorivo (ING)**: nuklearno gorivo koje ne može ekonomično održavati lančanu reakciju, i u kojem su se nagomilali produkti raspada (Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020b), nastaje radom nuklearnih reaktora svih vrsta. ING predstavljaju gorive elemente uklonjene iz reaktora koji ne mogu održati spontanu nuklearnu reakciju (Uroić, 2019). Skladišti se u bazenu

za istrošeno gorivo u kojem se nalazi borna voda, radi kontinuiranog hlađenja i zaštite od zračenja. Nakon što se ING dovoljno ohladi, može se izvaditi iz bazena i početi suho skladištiti, u spremnicima<sup>1</sup>, u posebnim skladištima zaštićenim od nesreća ili prirodnih nepogoda,

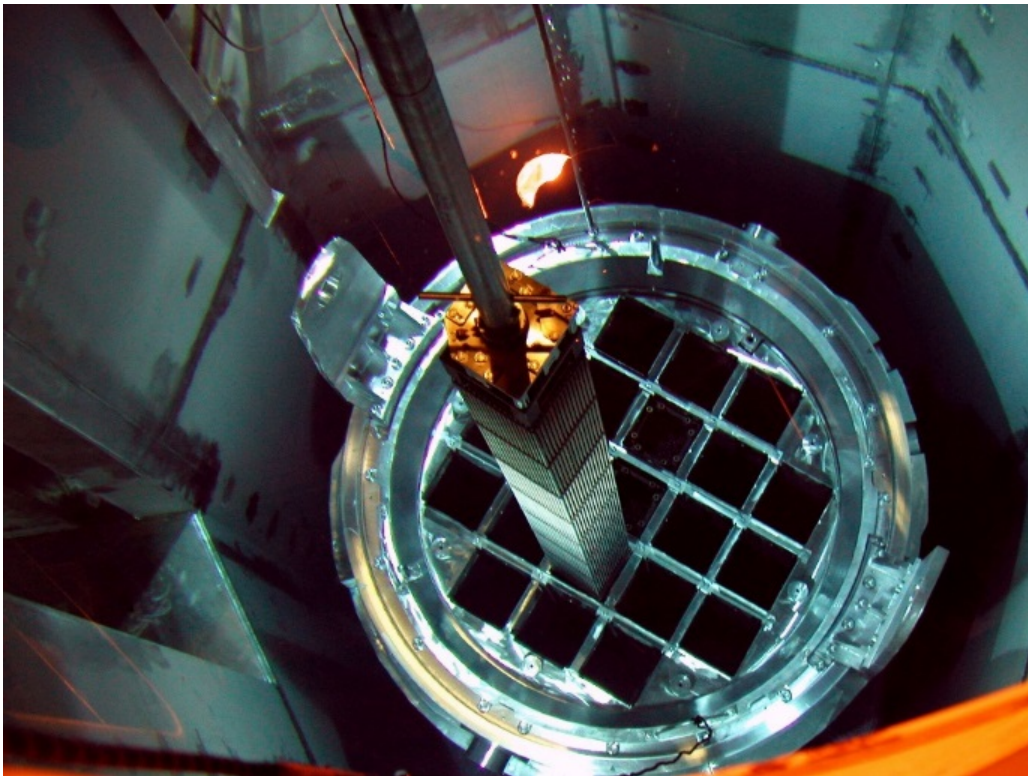
2. visokoradioaktivni otpad nastao kemijskom preradom ING,
3. vrlo nisko, nisko i srednje radioaktivni otpad nastao tokom rada reaktora, preradom, dekomisijom, dekontaminacijom i ostalim aktivnostima u gorivnom ciklusu (IAEA, 2012).

## 2.1 Istrošeno nuklearno gorivo (ING)

ING se sastoji od gorivnih elemenata uklonjenih iz reaktora koji sadrže fisibilne materijale, koji se u budućnosti možda neće klasificirati kao otpad. Mogućnost povrata ING i izdvajanja fisibilnih materijala (uranija i plutonija) je misao vodilja za odlaganja ING-a. Različite vrste nuklearnih reaktora koriste različita goriva u vidu dimenzija gorivnih elemenata, sastava i vrste obloge (Slika 2-2). Gorivo je najčešće u obliku uranijeva oksida (UOX) ili spoja uranijeva i plutonijeva oksida (MOX), ali neki reaktori iskorištavaju metalne gorive elemente, poput Magnox reaktora (Uroić, 2019). S obzirom na to, konačna svojstva ING-a se mogu značajno razlikovati, posebice u pogledu aktivnosti radionuklida i proizvodnji topline. Važna značajka prilikom zbrinjavanja ING-a je količina stvaranja topline koja može varirati od svega par kilovata pa do 12 kW po spremniku u kojem se nalazi otpad (IAEA, 2009).

---

<sup>1</sup> Spremnik – zavisno od odabranog koncepta, može biti od čelika, bakra ili titanija, a obično se radi o relativno tankostijenom spremniku, s obzirom da debele stjenke ne bi toliko značile dodatnu sigurnost, koliko veliki trošak (Veinović i dr., 2015).



Slika 2-2 Prikaz gorivnog elementa s gorivnim šipkama (Foro Nuclear, 2020)

Tokom reprocesiranja ING-a, uranij i plutonij se izdvajaju od ostalih radioaktivnih elemenata, tj. aktinoida i produkata fisije te se mogu koristiti za daljnju proizvodnju novog goriva. Ostatak materijala se smatra visoko radioaktivnim, dugoživućim tekućim otpadom koji se najčešće vitrificira radi lakšeg i sigurnijeg baratanja. Obloga nuklearnog goriva, zajedno s drugim otpadom nastalih reprocesiranjem (npr. NRAO i SRAO nastao obradom otpadnih voda) je također kandidat za geološko odlaganje.

Tri vrste otpada nastaju reprocesiranjem:

- (a) VRAO koji se najčešće obrađuje vitrificacijom (toplinska aktivnost je veća od 2W/l)(Slika 2-3)
- (b) manje aktivni VRAO nastao tokom reprocesiranja ING-a kao npr. prazne šipke, razdjelnici i netopljive komponente, koje sadrže visoke razine dugoživućih radionuklida, generiraju manju količinu topline (toplinska aktivnost manja od toplinske aktivnosti VRAO-a)
- (c) komponente koje sadrže radioaktivne elemente bez značajne toplinske aktivnosti (NRAO i SRAO)



Slika 2-3 Vitrificirani VRAO (British Glass, 2019)

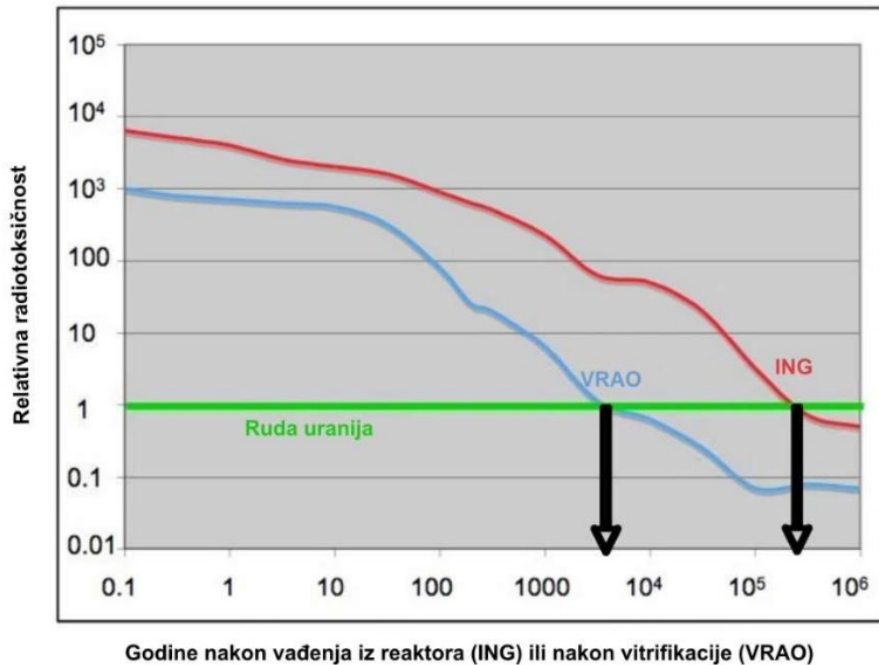
## 2.2 Visokoradioaktivni otpad (VRAO)

VRAO je otpad koji sadrži dovoljno visoke aktivnosti da radioaktivnim raspadom generira značajnu količinu topline, a sadrži visoku koncentraciju dugoživićih radionuklida koji zahtijevaju višu razinu izolacije u odnosu na SRAO. Generira velike količine topline zbog raspada fisijskih produkata zbog čega se godinama hladi u bazenima za istrošeno gorivo prije suhog skladištenja i kasnijeg odlaganja (IAEA, 2014). VRAO nastaje kao produkt neprerađenog istrošenog goriva i kao fisijski produkti dobiveni preradom ING-a (Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020c). Radi smanjenja radioaktivnosti, ING se privremeno odlaže u bazenu za istrošeno gorivo (u periodu od 3 do 50 godina) na lokaciji nuklearne elektrane ili u suhim betonskim ili željeznim spremnicima.

Nakon reprocesiranja ING-a, nastali VRAO se kondicionira preradom tekućeg otpada u čvrsti oblik (kemijskim procesuiranjem, najčešće vitrifikacijom u posebnu vrstu borosilikatnog stakla) te imobilizacijom otpada (fizičkom izolacijom materijala koristeći posebne spremnike) nakon čega se pohranjuje u specijalna skladišta do konačnog odlaganja u duboka geološka odlagališta na dubini od 300 do 1000m.

### 3. DUBOKA GEOLOŠKA ODLAGALIŠTA

Istraživanjem mnogih mogućnosti koje pružaju sigurno i ekološki prihvatljivo rješenje za konačno odlaganje RAO-a, duboko geološko odlaganje je jedna od najsigurnijih metoda odlaganja. Radioaktivnost RAO-a se s vremenom smanjuje, tako da se odlaganje otpada koji sadrži kratkoživeće radionuklide (VNRAO, NRAO i SRAO koji sadrži kratkoživeće radionuklide) može obaviti u pripovršinskom i površinskom odlagalištu na dubinama od nekoliko desetaka metara. Kad je riječ o RAO koji sadrži dugoživeće radionuklide (VRAO i SRAO koji sadrži dugoživeće radionuklide), preferiran način odlaganja je u dubokom geološkom odlagalištu (DGO), izolacijom materijala od okoline pomoću prirodnih i umjetno napravljenih barijera bez obveze aktivnog održavanja koja bi se prenijela na buduće generacije. Samo odlagalište zbog prisustva dugoživećih radionuklida se projektira tako da bude sigurno sljedećih minimalno 100 000 godina, a projektira se na rok od 1 000 000 godina. Vrijeme poluraspada potrebno da se radioaktivnost odlagališta svede na razinu prirodne radioaktivnosti uranijeve rude iznosi 10 000 godina (Slika 3-1), što je zadovoljavajuća razina sigurnosti ukoliko dođe do dolaska radionuklida u okolinu.



Slika 3-1 Pad radiotoksičnosti kao rezultat radioaktivnog raspada prikazan kao funkcija vremena za ING i VRAO (Uroić, 2019).



Projektiranje i izgradnja odlagališta RAO-a je dugoročni projekt čija implementacija ovisi o cijelom nizu sudionika, o brzini i točnosti izvedbe istražnih radova, itd. pa često traje desecima godina. Nakon izgradnje, odlagalište RAO-a se sastoji od nekoliko faza djelovanja:

1. Aktivna ili institucionalna faza – punjenje RAO (do 40 godina)
2. Zatvaranje odlagališta (5 – 10 godina)
3. Aktivni industrijski nadzor (100 godina)
4. Pasivni industrijski nadzor (150 godina)

Odlagalište RAO-a djeluje kao takvo do trenutka kada aktivnost odloženog RAO-a padne na razinu prirodne radioaktivnosti (Veinović i dr., 2015)

Uvjeti koji moraju biti ispunjeni za izolaciju RAO-a:

- (a) predobrada i obrada RAO-a, što uključuje smanjenje volumena i smanjenje radioaktivnih komponenti, ukoliko je riječ o tekućem RAO, primjenjuju se metode precipitacije, sedimentacije, ionske izmjene, termalne evaporacije, itd.,
- (b) otpad mora biti u obliku koji će spriječiti ispiranje i disperziju radionuklida
- (c) odlaganje mora biti ekološki prihvatljivo (Miśkiewicz i dr., 2015)
- (d) inženjerske barijere moraju osigurati zadržavanje radionuklida
- (e) geološka građa (magmatske i metamorfne slabopropusne stijene osiguravaju manju brzinu transporta radionuklida)
- (f) dubina odlagališta (300–1000 m), osigurava produljenje puta migracije radionuklida

Svako odlagalište radioaktivnog otpada je opremljeno sustavom višestrukih barijera koje pružaju zaštitu od ispuštanja radioaktivnih tvari iz odlagališta i njihove daljnje migracije. Postoji mogućnost popuštanja umjetno konstruiranih barijera pri čemu se smanjuje sposobnost zadržavanja radionuklida (Posiva Oy, 2012), pri čemu do važnosti dolazi dobar izbor prirodne barijere, jer će ona onemogućiti daljnju migraciju radionuklida. Pretpostavlja se da ovakav sustav višestrukih barijera na odgovarajući način izolira utjecaj otpada na biosferu, a njihova će učinkovitost ovisiti o interakciji prirodnih i umjetnih barijera.

Sustav višestrukih barijera se sastoji se od prirodnih geoloških prepreka koju pruža matična stijena i umjetnih, projektiranih sustava barijera PBS (*Engineered Barrier System*). Ovisno o vrsti RAO-a, sigurnosni sustavi se mogu međusobno razlikovati. PBS sadrži različite podsustave ili komponente, poput oblika u kojem se otpad nalazi ili različitih vrsta

otpada, spremnika, tampona i ispuna<sup>2</sup>. PBS bi trebao funkcionirati kao integrirani sustav i osigurati odgovarajuće fizičko-kemijske uvjete kako bi sve barijere mogle ispuniti svoje predviđene funkcije (Koskinen, 2014). Kako bi se osigurala učinkovitost PBS-a, mnogi se prirodni sorbenti poput glina, bentonita ili zeolita kao i sintetski (npr. sintetski zeoliti) primjenjuju za smanjenje migracije radionuklida iz kontaminiranih lokacija (IAEA, 2013). Mogu se koristiti kao tamponi, ispune ili brtveni materijali u odlagalištu (Tablica 3-1).

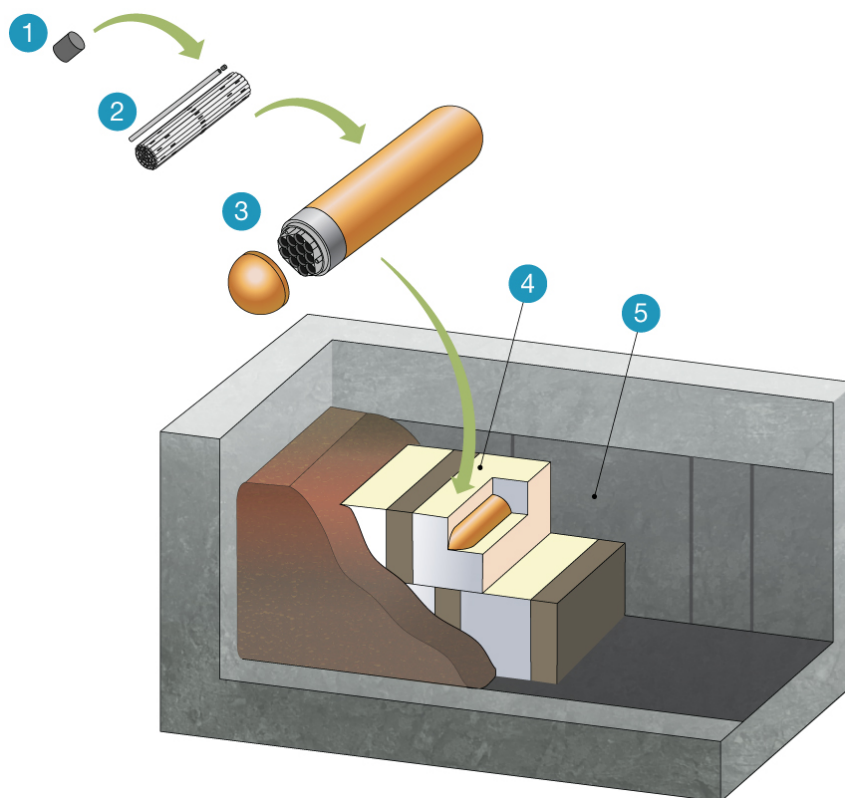
Kanadski primjer pakiranja i odlaganja VRAO u DGO koristeći sustav višestrukih barijera (Slika 3-2) počinje s prvom barijerom, metalnom oblogom (1) za gorivo u obliku peleta ili tableta čemu se dodaje uranij dioksid, a podvrgava se visokim temperaturama radi dobivanja otporne keramike visoke gustoće, slabe (do nikakve) topljivosti u vodi, izrazito nereaktivne na visokim temperaturama, što ga čini jednim od najizdržljivijih materijala. Niz gorivnih tableta se smješta u gorivnu šipku, a skup više gorivnih šipki se zove gorivni element (2). Gorivni element se sastoji od antikorozivne legure cirkonija, a uloga svakog elementa je izoliranje gorivnih tableta. Sljedeća barijera je bakreni spremnik s umetkom od lijevanog željeza (3), osiguravaju vodonepropusnost te mehaničku stabilnost i kemijsku inertnost. Bakreni spremnici se zalijevaju bentonitnom glinom, materijalom koji pruža izvrsnu izolaciju od podzemne vode, služi kao prirodna brtva i izolacija uslijed eventualnog prodora vode, kada počne bubriti i omogućava zatvaranje i zacjeljivanje pora u stijeni. Bentonit je vrlo stabilan i kemijski inertan. Nakon što se spremnici odlože u bentonitnu glinu, pristupni hodnici se također zatvaraju s bentonitnom glinom, a sve se zatvara izradom betonske pregrade. Finalnu barijeru čine pogodna svojstva matične stijene, a projektira se na dubini od 300 do 1000 m, koja omogućava dodatnu zaštitu od prirodnih nepogoda, toka podzemne vode ili ljudske intruzije, a također produljuje i usporava put radionuklidima radi sprječavanja njihovog odlaska u okolinu (Slika 3-3).

---

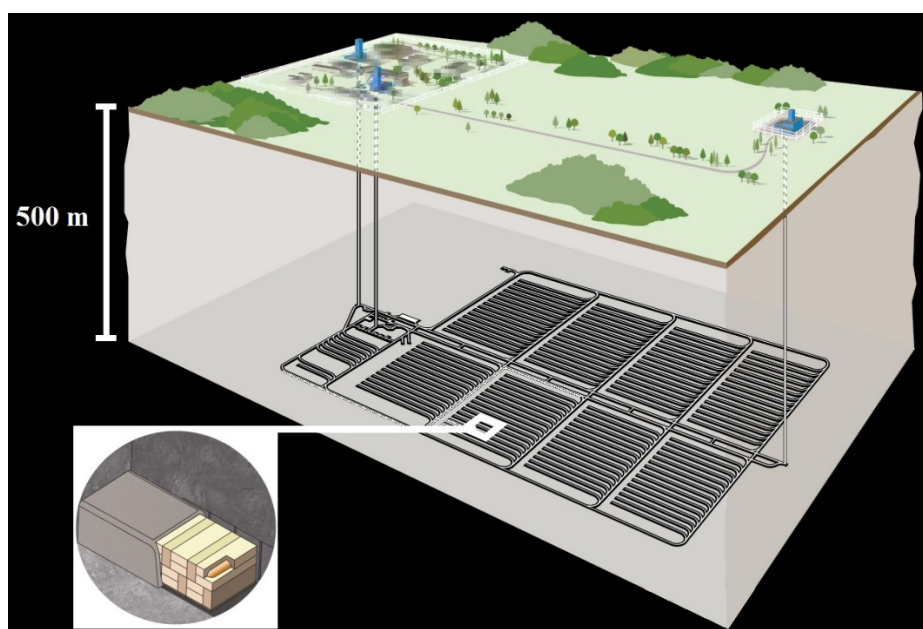
<sup>2</sup> Ispuna – predstavlja materijal koji će popuniti iskopani prostor između stijene i spremnika. Zavisno od tipa stijene, obično se predviđa uporaba bentonitne gline (montmorilonit), osim u slučaju odlaganja u solne dome, kad bi ispuna trebala biti usitnjena sol (Veinović i dr., 2015)

Tablica 3-1 Glavne barijere EBS-a i njihove funkcije (Miśkiewicz i dr., 2015)

| EBS                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Barijera                                                                                                                                  | Funkcija                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Oblik otpada</b> (solidifikacija cementiranjem, asfaltiranjem, vitrificiranjem, u obliku organskog polimera ili keramičkog materijala) | Solidifikacija RAO-a u cilju sprječavanja ispuštanja, disperzije, i propuštanja radioaktivnih elemenata.                                                                                                                       |
| <b>Spremnik</b> (bakreni i željezni metalni te betonski spremnici)                                                                        | Izolacija otpada, zaštita od mehaničkih oštećenja, vremenskih ekstrema i kontakta s vodom.                                                                                                                                     |
| <b>Ispuna</b> (gline, mješavine glina, cement, stijenski materijal)                                                                       | Ograničenje infiltracije vode, sorpcije radionuklida, kontrola ispusta plinova, ostavljanje mogućnosti povrata otpada. Ograničenje ispuštanja radionuklida iz otpada u geosferu u slučaju propuštanja ili oštećenja spremnika. |
| <b>Strukturni materijali i obloge</b> (cement, armirani cement, pregrade od gline, asfalta ili organske pregrade)                         | Osiguravanje fizičke stabilnosti strukture odlagališta, dodatna zaštita otpada, posebice od utjecaja vremenskih ekstrema, sprječava ispuštanja radionuklida iz otpada u geosferu.                                              |
| <b>Odvodnja</b> (kombinacija glinenih i asfaltnih pokrova ili konvencionalni keramički ili betonski odvodi)                               | Upravljanje podzemnom i procjednom vodom, posebice u institucionalnoj fazi odlaganja.                                                                                                                                          |
| <b>Čep</b>                                                                                                                                | Prekriva površinski sloj betona, onemogućuje infiltraciju podzemne vode u prostor odlagališta, sprječava koroziju te ispuštanje radionuklida u okolinu.                                                                        |



Slika 3-2 Sustav višestrukih barijera (NWMO, 2015)



Slika 3-3 DGO na kanadskom primjeru (NWMO, 2015)

## 4. REGULATORNA OSNOVA

Napretkom tehnologije i sve većom ovisnošću moderne civilizacije o električnoj energiji, potrebe za njome se svaki dan sve više povećavaju. Jedna od najčišćih tehnologija dobivanja električne energije je nuklearna energija, koja pruža stabilan izvor električne energije pri čemu ne dolazi do proizvodnje stakleničkih plinova. Na svjetskoj razini, jedna trećina svih potreba za energijom dolazi iz nuklearnih izvora, dok je u Francuskoj ovisnost o nuklearnoj energiji izrazito velika jer čak 70% svojih potreba crpe iz nuklearnih izvora (Tablica 4-1).

Tablica 4-1 Udio nuklearne energije u ukupnom energetsom sektoru država (IEA, 2020)

| Država           | %    | Država    | %    |
|------------------|------|-----------|------|
| Nizozemska       | 4,4  | Finska    | 32,4 |
| Japan            | 4,6  | Češka     | 34,6 |
| Njemačka         | 11,7 | Slovenija | 35,9 |
| Kanada           | 14,0 | Švicarska | 36,1 |
| Hrvatska         | 17,0 | Belgija   | 37,5 |
| Velika Britanija | 18,8 | Švedska   | 41,6 |
| SAD              | 19,3 | Mađarska  | 50,1 |
| Španjolska       | 20,4 | Slovačka  | 54,4 |
| Južna Koreja     | 26,8 | Francuska | 71,7 |

Svaka zemlja koja koristi nuklearne izvore mora imati reguliran način zbrinjavanja nuklearnog otpada. Finska je trenutno jedina zemlja na svijetu koja ima odlagalište ING-a, a početak će puniti ING (ne i VRAO) na lokaciji Onkalo 2023. godine.

## 4.1 Postojeća regulativa Republike Hrvatske

Potreba za zbrinjavanjem RAO u Republici Hrvatskoj (RH) je proizašla zbog problema prihvatljivog načina rješavanja pitanja odlaganja otpada nastalog u nuklearnoj elektrani Krško (NEK) te zbog dugogodišnjeg korištenja radioaktivnih tvari i izvora (Čerškov Klika, 1998). Prema postojećim sporazumima između RH i Republike Slovenije (RS), svaka država je dužna zbrinuti pola RAO-a nastalog tijekom rada i razgradnje NEK. Problem odlaganja RAO u RH se pristupilo 1979. godine kada je započeo odabir lokacije, no tek su 1992. godine definirane metode i kriteriji odabira lokacije, no bitno je naglasiti kako se kriteriji za odabir lokacije odnose samo na NSRAO, ne i na ING te VRAO.

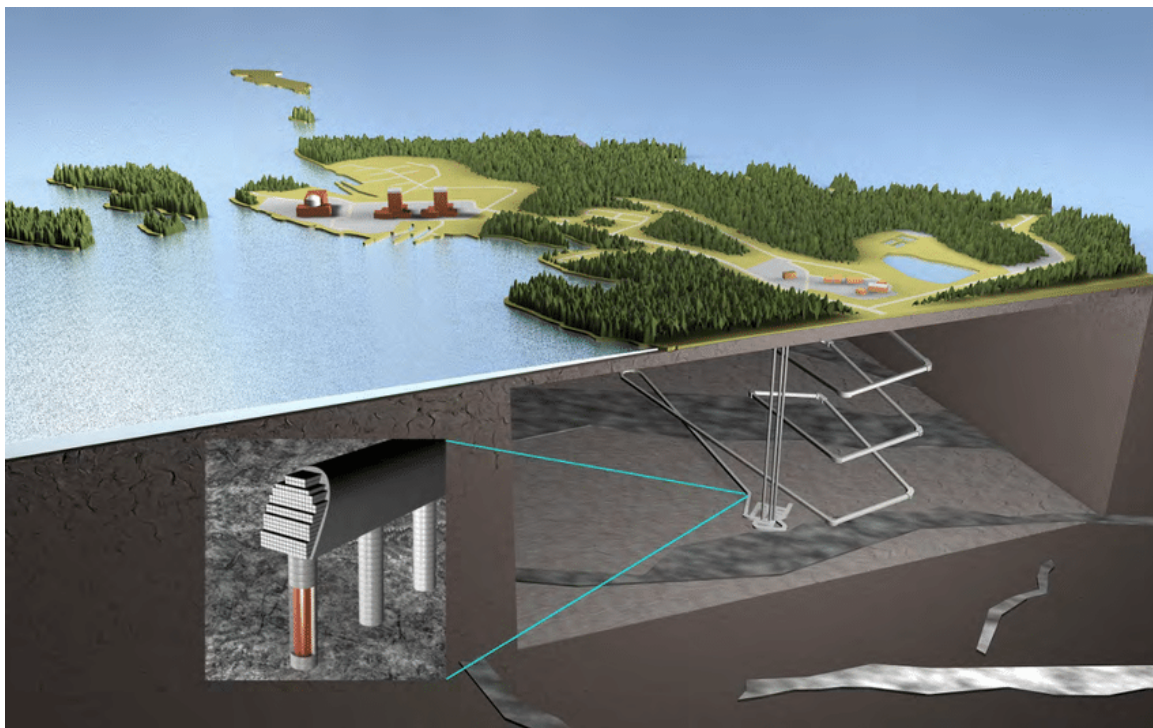
U dokumentu *Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva* (u daljnjem tekstu: Strategija) se zbrinjavanje VRAO temelji na pretpostavci osnutka središnjeg Centra za zbrinjavanje radioaktivnog otpada (CZRAO), pri čemu se usvaja uspostavljanje dugoročnog skladišta do 2023. godine. Preferentna lokacija za uspostavljanje CZRAO je Čerkezovac (općina Dvor na području Trgovinske gore). Navode se opće smjernice za zbrinjavanje radioaktivnog otpada sada zatvorenog skladišta radioaktivnog otpada Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI) te skladišta radioaktivnog otpada Instituta Ruđer Bošković (IRB).

Radnje vezane za karakterizaciju i odabir lokacije dubinskog geološkog odlagališta se ne planiraju u sljedećih 30 godina, kao što je odlučeno u Strategiji: oko 2050. godine započet će postupci izbora lokacije za odlaganje VRAO-a u dubokoj geološkoj formaciji. Izbor lokacije provodit će se u Republici Hrvatskoj ili Republici Sloveniji. Također, kroz sve to vrijeme RH će aktivno sudjelovati u projektima vezanim za međunarodno odlagalište. Na tako odabranoj lokaciji odlagao bi se i visoko radioaktivni otpad proizveden tijekom razgradnje (dekomisije) NEK (Sabor RH, 2014).

Od 19. prosinca 2018. godine, tijelo državne uprave zaduženo za radiološku i nuklearnu sigurnost je *Ministarstvo unutarnjih poslova Republike Hrvatske* (MUP), čime se preuzela nadležnost od *Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost*, koji je definirao način zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora *Pravilnikom o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora s obzirom na njegova svojstva* (u daljnjem tekstu: Pravilnik).

Iako u Strategiji nije obrađena tema odabira lokacije odlaganja VRAO, iz tog dokumenta je dobiven podatak da je koncept izrade odlagališta baziran na generičkoj razini, prema švedskom modelu (KBS-3V, Slika 4-1) na dubini od 500m, na još nepoznatoj lokaciji

unutar teritorija RH ili RS. Odlagalište bi krenulo s radom 2068., odnosno 2088., ovisno o produljenu pogonskog vijeka nuklearne elektrane Krško.



Slika 4-1 Švedski model odlaganja VRAO (McEwen i dr., 2012)

Iako ne postoje konkretni isključujući ili sigurnosni kriteriji za RH, možemo iskoristiti eliminacijske kriterije (Tablica 4-2) za odlaganje NRAO i SRAO navedene u *Zaključku o utvrđivanju kriterija za izbor lokacija za termoelektrane i nuklearne objekte* (Vlada RH, 1992).

Tablica 4-2 Eliminacijski kriteriji za odlagalište NRAO i SRAO (Vlada RH, 1992)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sigurnost od plavljenja; eliminiraju se svi prirodni poplavni prostori bez obzira da li su zaštićeni ili ne.                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Seizmotehnik i<br>seizmologija.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Seizmotehnik, eliminiraju se područja s maksimalnim mogućim intenzitetom potresa IX i višeg stupnja MCS ljestvice.                                                                                                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Neotehnik, eliminiraju se prostori u zoni nominiranih aktivnih rasjeda.                                                                                                                                                                            |
| Litološke i geomorfološke karakteristike; eliminiraju se područja s pojačanom erozijom prouzrokovanom litološkim sastavom ili dinamičnim reljefom; izgrađenih od stijena nestabilnih u prirodnim uvjetima i prigodom građevinske aktivnosti. Eliminiraju se područja s klizištima i tereni skloni odronjavanju, ako ugrožavaju vanjske objekte odlagališta (ovisno o njegovoj geometriji). |                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Hidrogeologija – zaštita vodonosnika; eliminiraju se područja zaštite izvorišta pitke vode prema <i>Pravilniku o zaštitnim mjerama i uvjetima za određivanje zona sanitarne zaštite izvorišta vode za piće</i> . U cilju zaštite voda lokacija odlagališta ne smije biti u područjima s značajnijim vodonosnicima bilo kojeg tipa.                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Gustoća naseljenosti; eliminiraju se područja kod kojih je kumulativna gustoća naseljenosti u radijusu od 20 km veća od 80 stanovnika na km <sup>2</sup> .                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Posebne namjene; eliminiraju se prostori posebne namjene i njihove zaštitne zone.                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Eksplatacija ruda i minerala; eliminiraju se područja u zoni sadašnje ili buduće eksploatacije ruda, minerala, plina, nafte, ugljena i sl.                                                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Zaštita prirodne baštine; eliminiraju se prostori nacionalnih parkova, nominiranih parkova prirode i ostalih značajnih rezervata prirode.                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Zaštita kulturne baštine; eliminiraju se prostori kulturnih dobara upisanih u Listu svjetske kulturne i prirodne baštine; prostori kulturnih dobara koja su po ukupnosti svojih vrijednosti od izuzetnog i velikog značaja za društvenu zajednicu. |

Usporedbeni kriteriji (Tablica 4-3) za odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada grupirani su prema prevladavajućim karakteristikama u 4 skupine:

- tehničko-tehnološki aspekti (A),
- sigurnost objekta (B),
- sigurnost i prihvatljivost uže lokacije (C),
- prihvatljivost šire lokacije (D).



Tablica 4-3 Usporedbeni kriteriji za odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada

| (A) TEHNIČKO-TEHNOLOŠKI ASPEKTI             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geologija<br>seizmologija                   | Seizmotektonika i seizmika – seizmička aktivnost; povoljnije su lokacije u predjelima manjeg maksimalno očekivanog intenziteta potresa.                                                                                                                                                              |
|                                             | Inženjerska geologija – mehanika tla i temeljenje; što su nepovoljniji prirodni uvjeti na lokaciji (veći nagib terena, površinski sloj tla lošijih geomehaničkih karakteristika s manjim dozvoljenim opterećenjem), lokacija je lošija.                                                              |
| (B) SIGURNOST OBJEKTA                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Meteorološki<br>i<br>hidrološki aspekti     | Hidrološki aspekti – sigurnost od plavljenja; povoljnije su lokacije izvan dosega gorskih tekućica, te u područjima s odsutnošću, odnosno slabijim razvojem ili rizikom erozijskih procesa.                                                                                                          |
|                                             | Meteorološki aspekti – ekstremne pojave; povoljnije su lokacije s manjim intenzitetom i količinom padalina.                                                                                                                                                                                          |
| Geologija<br>seizmologija                   | Seizmotektonika i seizmika – neotektonska aktivnost; povoljnije su lokacije u neotektonski manje aktivnim zonama.                                                                                                                                                                                    |
|                                             | Litologija i geomorfologija; povoljnije su lokacije izgrađene od glina, glinovitih lapora ili sedimenata koji predstavljaju mješavinu glina i silta, uz uvjet da nisu podložni klizanju i eroziji, zatim od kompaktnih magmatita i metamorfita (graniti, gnajsovi).                                  |
| Zaštita okoline                             | Stanje tla – kemijska agresivnost; povoljnije su lokacije u područjima gdje prevladavaju tla niske kemijske agresivnosti.                                                                                                                                                                            |
| (C) SIGURNOST I PRIHVATLJIVOST UŽE LOKACIJE |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Transport                                   | Doprema NSRAO; povoljnije su lokacije čiji položaj u odnosu na položaj nuklearnih elektrana i postojeći prometni sustav osiguravaju najveću moguću sigurnost. Za transport NSRAO ne koriste se najkvalitetnije i najkraće prometnice, već one na kojima je opasnost (vjerojatnost) nesreće najmanja. |
| Meteorološki<br>i<br>hidrološki aspekti     | Hidrološki aspekti – udaljenost površinskih tokova. Povoljnije su lokacije udaljenije od stalnih i povremenih površinskih tokova ili akumulacija.                                                                                                                                                    |
|                                             | Meteorološki aspekti – disperzija. Povoljnije su lokacije za koje je pretpostavljena disperzija prizemnog sloja atmosfere veća.                                                                                                                                                                      |
| Geologija<br>seizmologija                   | Hidrogeologija; povoljnije su lokacije s manjim zalihama podzemne vode, a uvjeti infiltracije i podzemnog tečenja takvi da smanjuju mogućnost transporta radionuklida.                                                                                                                               |
| Demografija                                 | Demografski aspekti; povoljnije su lokacije s manjom gustoćom naseljenosti i lošijim demografskim prilikama u naseljima u radijusu 5 km od lokacije.                                                                                                                                                 |
| Namjena<br>korištenje<br>prostora           | Naselja; povoljnije su lokacije u čijem je radijusu od 5 km manji broj naselja i manji broj naselja s izraženijim središnjim i radnim funkcijama.                                                                                                                                                    |
|                                             | Turizam; povoljnije su lokacije u čijem je radijusu 5 km manji broj turističkih središta te manji broj postojećih i planiranih turističkih smještajnih kapaciteta.                                                                                                                                   |

|                                  |   |                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                  |   | Poljoprivreda; povoljnije su lokacije u čijem je radijusu od 5 km niži biljno–proizvodni potencijal tla, manja prikladnost za stočarstvo i veća udaljenost od visoko produktivnih kultura.                                                              |
|                                  |   | Šumarstvo; povoljnije su lokacije u čijem je radijusu od 5 km manje sporednih šumskih proizvoda: jestivih gljiva i ljekovitog bilja.                                                                                                                    |
|                                  |   | Industrija i rudarstvo, povoljnije su lokacije u čijem je radijusu do 5 km manji broj industrijskih središta manje osjetljive industrije.                                                                                                               |
|                                  |   | Infrastruktura; povoljnije su lokacije gdje je priključak na infrastrukturne instalacije (vodovod, elektro–energetska mreža) bolji.                                                                                                                     |
|                                  |   | Posebne namjene; povoljnije su lokacije koje, s aspekta obrane; nemaju ograničenja ni posebnih zahtjeva.                                                                                                                                                |
| Zaštita okoline                  |   | Zaštita prirodne baštine; povoljnije su lokacije gdje je u radijusu 5 km manji broj zaštićenih i evidentiranih lokaliteta i koji su manjeg značenja.                                                                                                    |
|                                  |   | Zaštita kulturne baštine, povoljnije su lokacije gdje je u radijusu 5 km manji broj zaštićenih i evidentiranih lokaliteta i objekata i manjeg su značaja.                                                                                               |
|                                  |   | Stanje tla – biljna proizvodnja; povoljnije su lokacije gdje je u radijusu 5 km manji udio visokopogodnih tala za biljnu proizvodnju.                                                                                                                   |
|                                  |   | Biološko–ekološke vrijednosti; povoljnije su lokacije koje su biološki manje vrijedne ili manje osjetljive.                                                                                                                                             |
|                                  |   | Radiološki aspekti postojećeg stanje; povoljnije su lokacije gdje je u radijusu od 5 km manja migracija podzemnih voda u tlima i bioakumulacija radionuklida u organizmima.                                                                             |
| (D) PRIHVATLJIVOST ŠIRE LOKACIJE |   |                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Namjena korištenje prostora      | i | Naselja; povoljnije su lokacije gdje je u radijusu 5-20 km manji broj naselja s izraženijim središnjim i radnim funkcijama i manji broj većih naselja.                                                                                                  |
|                                  |   | Turizam; povoljnije su lokacije kod kojih je u radijusu do 20 km manji broj turističkih središta višeg ranga, manji broj postojećih i planiranih turističkih smještajnih kapaciteta te ako ovi kapaciteti imaju kraće vrijeme korištenja u toku godine. |
| Zaštita okoline                  |   | Zaštita prirodne baštine; povoljnije su lokacije gdje je u radijusu do 20 km manji broj vrijednih zaštićenih i evidentiranih objekata prirodne baštine.                                                                                                 |
|                                  |   | Zaštita kulturne baštine; povoljnije su lokacije s manjom zastupljenošću posebno vrijednih zaštićenih i evidentiranih cjelina i objekata kulturne baštine.                                                                                              |

## 4.2 Postojeća regulativa Savezne Republike Njemačke

Njemačko rješenje za izradu dubokog geološkog odlagališta VRAO i ING se zasniva na nizu isključujućih kriterija koji moraju ispunjavati minimalne i sigurnosne uvjete. Predmet preliminarnih sigurnosnih pregleda je procjena sigurnih elemenata kod kojih se može očekivati sigurno skladištenje radioaktivnog otpada, koristeći prednosti geološke lokacije, na temelju pretpostavke o količini, vrsti i svojstvima radioaktivnog otpada. Zbog sigurnosti se postavlja granična temperatura od 100°C na vanjskoj površini spremnika, sve dok se istraživanjem ne utvrde najveće moguće temperature. Sadržaj preliminarnih sigurnosnih ispitivanja uključuje i procjenu u kojoj se mjeri može očekivati mogućnost dodatnog odlaganja većih količina NRAO i SRAO na dotičnom području.

Područje nije pogodno za duboko geološko odlagalište ako zadovoljava barem jedan od sljedećih isključujućih kriterija prikazanih u Tablici 4-4:

Tablica 4-4 Isključujući kriteriji za odabir dubokog geološkog odlagališta

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Veliki vertikalni pomaci                               | Očekuje se tektonsko izdizanje prosjeka većeg od 1mm godišnje tokom razdoblja od jednog milijuna godina.                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Aktivne zone rasjeda                                   | U planinskim područjima koja su razmatrana kao moguće lokacije, postoje geološki aktivni rasjedi koji mogu utjecati na sustav odlagališta i njegove barijere.                                                                                                                                                                                                |
|                                                        | Područja aktivnih rasjeda uključuju zone rasjeda, pukotina ili lomova u stijenskim naslagama gornje Zemljine kore, poput rasjeda s značajnim pomakom stijenske mase, kao i područja sa stratigrafskim hijatusom, u kojima su kretanja dokazani s velikom vjerojatnošću u razdoblju od Rupelija <sup>3</sup> do danas, tj. unutar zadnjih 34 milijuna godina. |
|                                                        | Područja s tektonskim ili aseizmičnim procesima, tj. procesima koji se ne mogu povezati s tektonskim procesima ili se ne mogu pripisati seizmičkoj aktivnosti i koje mogu dovesti do posljedica sličnim onih tektonskim poremećajima se neće razmatrati.                                                                                                     |
| Utjecaji prethodnih trenutnih rudarskih aktivnosti ili | Promatrano inkluzivno planinsko područje (IPP) je toliko oštećeno prethodnom ili trenutnom rudarskom aktivnošću da se negativni utjecaji na naprezanje ili permeabilnost stijenske mase na planiranom planinskom području mora sanirati.                                                                                                                     |
|                                                        | Postojeće stare bušotine ne smiju utjecati na funkciju barijera odlagališta.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

<sup>3</sup> Rupelija – stratigrafski kat srednjeg oligocena u Europi, obuhvaća vremenski raspon od prije 38 do 33 milijuna godina (Perić, 2007).

|                        |                                                                                         |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Seizmička aktivnost    | Lokalna seizmička opasnost je veća nego u potresnoj zoni 1 s obzirom na EN 1998-1:2011. |
| Vulkanska aktivnost    | Postojanje vulkana iz kvartarnog doba ili se vulkanska aktivnost očekuje u budućnosti.  |
| Starost podzemnih voda | U promatranim IPP-ima podzemna voda mora biti dokazano mlada voda <sup>4</sup> .        |

#### 4.2.1 Sigurnosni zahtjevi

Sigurnosni zahtjevi/kriteriji definiraju razinu zaštite koju treba postići. Sigurnosni zahtjevi se razmatraju i određuju na temelju zaštite od ionizirajućeg zračenja, zahtjeva za povratom/oporabom i sanacijom te zahtjeva za sigurnosnim konceptom skladišta u fazi rada i nakon zatvaranja, uključujući njegovu postupnu optimizaciju.

#### 4.2.2 Geološki kriteriji

Za duboko geološko odlaganje visokoradioaktivnog otpada razmatrat će se kamene soli, gljinci i kristalinske stijene<sup>5</sup>. Potrebni zahtjevi:

- (a) Permeabilnost – permeabilnost  $k_f$  mora biti manja od  $10^{-10}$  m/s, ukoliko to nije moguće odrediti, mora biti pokazano da tipovi stijena od kojih se sastoji odabrana lokacija imaju permeabilnost manju od  $10^{-10}$  m/s – ispunjavanje ovog kriterija se može dokazati istraživanjem slojeva koji prekrivaju skladišni prostor, tj. otkrivke;
- (b) Debljina IPP-a – sustav IPP-a mora biti najmanje 100 metara debljine, ukoliko je riječ o magmatskoj ili metamorfnoj stijeni manje debljine, sigurnost se može dokazati interakcijom stijene domaćina s geotehničkim i tehničkim barijerama. Dopuštena je podjela na nekoliko takvih manjih područja unutar sustava skladišta;
- (c) Minimalna dubina IPP-a – površina IPP-a mora biti najmanje 300 metara ispod površine terena. U područjima u kojima se mogu očekivati egzogeni procesi poput intenzivne erozije čiji neposredni učinci mogu narušiti integritet IPP-a, površina IPP-a mora biti dublja od očekivane najveće dubine utjecaja; ako se IPP nalazi u kamenoj

<sup>4</sup> Mlada voda – voda koja se samo kratko vrijeme nalazila u podzemlju, nije dovoljno prirodno pročišćena jer nije prošla kroz sve sedimente i nalazi se najbliže zemljinoj površini. U nju može prodrijeti najviše nečistoća i bakterija s zemljine površine i površinskih voda stoga nije sigurna za ljudsku konzumaciju (Slunjski, 2018).

<sup>5</sup> Kristalinska ili kristalasta stijena – eruptivna (magmaška) ili metamorfna stijena koja se u potpunosti sastoji od relativno velikih mineralnih zrna (kristala ili fragmenata kristala), npr. plutonske stijene, eruptivne (magmaške) stijene bez staklastog materijala ili metamorfne stijene (Perić, 2007).

solu u nagnutim ili izrazito strmim skladištima, sloj soli iznad IPP-a mora biti debljine najmanje 300 metara;

- (d) Područje skladišta koje obuhvaća IPP mora imati proširenje na jednom dijelu koje omogućuje skladištenje spremišta; u prostoru skladište moraju se nalaziti pristupni hodnici potrebni za provođenje mjera za kasniju uporabu spremnika ili za kasnije otvaranje tunela za uporabu;
- (e) Očuvanje učinka barijera; ne smiju postojati saznanja ili podatci koji dokazuju da integritet IPP-a nije podoban tijekom razdoblja od milijun godina, posebno se treba poštivati usklađenost geoznanstvenih minimalnih zahtjeva za propusnost, debljinu i opseg IPP-a.

#### **4.2.3 Težinski kriteriji**

Na temelju geoznanstvenih težinskih kriterija procjenjuje se postoji li ukupna povoljna geološka situacija na nekom području. Težinski kriteriji uglavnom služe za eliminiranje velikih područja koja su potencijalno pogodna za odlagalište, pod uvjetom da ona već ne proizlazi iz primjene sigurnosnih i minimalnih kriterija, i na temelju rezultata preliminarnih ispitivanja sigurnosti. Također se mogu koristiti za usporedbu područja koja se sa sigurnosnog stajališta smatraju jednakovrijednim.

##### **Kriterij 1 – ocjena prijenosa radioaktivnih tvari kretanjem podzemne vode u IPP-u**

Prijenos radioaktivnih tvari kretanjem podzemne vode i difuzijom u IPP bi trebao biti što niži. Svojstva ovog kriterija relevantna za procjenu su prevladavajući protok podzemne vode u IPP-u, opskrba podzemnom vodom i brzina difuzije. Sve dok odgovarajući pokazatelji za određenu lokaciju nisu prikupljeni, odgovarajuća stijena domaćin se može upotrijebiti kao težinski kriterij. Svojstva ovog kriterija relevantna za procjenu su prikazana u Prilogu 1.

##### **Kriterij 2 – ocjena konfiguracije tijela stijene**

Najmanja debljina stijena koje imaju ulogu barijere mora biti takva da osigura sigurnu inkluziju radionuklida tokom perioda od milijun godina, a očekivani inkluzijski kapacitet treba biti što veći i pouzdano predvidljiv; ocjena se dobiva na temelju podataka u Prilogu 2.

##### **Kriterij 3 – ocjena procjene prostorne karakterizacije**

Prostorna karakterizacija ključnih geoloških barijera koje izravno ili neizravno osiguravaju sigurno zadržavanje radioaktivnog otpada, posebno IPP-a ili skladišnog prostora, trebala bi

biti što je moguće pouzdanija. Svojstva važna za procjenu su određivanje relevantnih vrsta stijena i njihovih svojstava kao i utjecaj tih svojstava prikazani u Prilogu 3.

#### **Kriterij 4 – ocjena procjene dugoročne postojanosti uvjeta**

Sigurnosna geološka obilježja važna za dugoročnu postojanost povoljnih uvjeta se tokom promatranih najdužih geoloških razdoblja u prošlosti ne smiju značajno mijenjati.

Ocjenjuju se:

- (a) kao povoljne ako nije bilo značajnih promjena određene karakteristike više od deset milijuna godina;
- (b) kao uvjetno povoljne ako se takve promjene nisu dogodile prije više od milijun godina, ali manje od deset milijuna godina;
- (c) kao nepovoljna ako se takva promjena dogodila u posljednjih milijun godina.

#### **Kriterij 5 – ocjena povoljnih mehaničkih svojstva stijenske mase**

Tendencija stvaranja mehanički inducirane sekundarne permeabilnosti u IPP-u bi trebala biti najmanja moguća. Potrebne karakteristike:

- (a) Kao glavni geomehanički nosivi element, stijenska masa može apsorbirati opterećenja uslijed transporta i rada bez konstrukcijskog širenja, osim osiguranja kontura, s podnošljivim deformacijama;
- (b) Ne smije se očekivati mehanički inducirana sekundarna permeabilnost izvan zone neizbježnog omekšavanja koja je omekšala oko šupljina spremnika.

#### **Kriterij 6 – ocjena tendencije stvaranja puteva fluidima**

Naklonost IPP-a za stvaranje puteva fluidima mora biti najmanja moguća. Karakteristike važne za procjenu su promjenjivost permeabilnosti stijenske mase, učinkovitost sprječavanja nastanka puteva koristeći barijere, zacjeljivanje pukotina i, radi usporedbe, duktilnost stijene, prikazane u Prilogu 4.

#### **Kriterij 7 – ocjena procjene nastanka plina**

U uvjetima konačnog skladištenja, nastanak plina mora biti najmanji moguć, čiji je pokazatelj prisutnost vode u skladištu, pri čemu se svojstvo karakterizira s obzirom na vrijednosnu grupu:

1. povoljno – suho (niska prisutnost vode u odlagalištu);
2. uvjetno povoljno – vlažna i zbijena stijena (propusnost  $< 10^{-11}$  m/s);
3. nepovoljno – mokro (visoka prisutnost vode u odlagalištu).

### **Kriterij 8 – ocjena temperaturne tolerancije**

Formacije stijenske mase na koje utječu promjene temperature kao rezultat skladištenja radioaktivnog otpada trebaju biti takve da promjene svojstava stijena i termodinamička naprezanja unutar stijena ne dovode do gubitka čvrstoće i stvaranja sekundarnih propusnosti na području odlagališta. Pokazatelji temperaturne tolerancije su tendencija stvaranja sekundarne permeabilnosti izazvane toplinom što uzrokuje njihovo širenje te temperaturna stabilnost stijene domaćina.

### **Kriterij 9 – ocjena zadržavanja retencije<sup>6</sup> u IPP-u**

Stijenske barijere IPP-a bi trebale imati najveći mogući kapacitet retencije dugoročno relevantnih radionuklida (Prilog 5). Pokazatelji su:

1. sorpcijski kapacitet stijena ili koeficijenti sorpcije za relevantne radionuklide;
2. najveći mogući sadržaj konsolidirane gline s velikom reaktivnom površinom kao što su minerali gline, kao i hidroksidi željeza i mangana te oksihidrati<sup>7</sup>;
3. najveća moguća ionska jakost podzemne vode geološke barijere;
4. maksimalna širina otvora pukotina koja mora biti u rasponu nanometara.

### **Kriterij 10 – ocjena hidrokemijskih uvjeta**

Kemijski sastav minerala duboke vode i temeljne stijene IPP-a bi trebao imati pozitivan učinak na zadržavanje radionuklida čak i nakon unošenja spremnika i obloga te ne bi trebao kemijski djelovati na materijal tehničkih i geotehničkih barijera. Pokazatelji za to su:

1. kemijska ravnoteža između stijene domaćina IPP-a i dubokih podzemnih voda sadržanih u njima;
2. neutralni do blago alkalni uvjeti (pH 7 do 8) u području duboke vode;
3. okruženje koje smanjuje anaerobnost u području duboke vode;
4. najmanji mogući sadržaj koloida i kompleksirajućih sredstava<sup>8</sup> u dubokoj vodi;
5. niska koncentracija karbonata u dubokoj vodi.

### **Kriterij 11 – ocjena zaštite IPP-a od prekomjernog opterećenja krovinom**

---

<sup>6</sup> Retencija – količina vode iz ukupne mase atmosferskih padalina koja nije udaljena u obliku površinskog tečenja ili isparavanjem (Perić, 2007)

<sup>7</sup> Oksihidrat – kemijski spoj oksida i vode

<sup>8</sup> Kompleksirajuće ili usložnjavajuće sredstvo – spoj koji s metalnim ionima u otopini stvara složene ione (Martinez i dr., 2015)

Zbog svoje debljine, strukture i sastava, krovina bi trebala pridonijeti zaštiti IPP-a od izravnih ili neizravnih učinaka egzogenih procesa što je duže moguće (Prilog 6). Pokazatelji su:

1. opseg IPP-a koji se isprepliće s podzemnim vodama i stijenama koje sprječavaju eroziju, te njihova raspodjela i debljina u otkrivci;
2. nedostatak strukturne stabilnosti u otkrivci, što može rezultirati oštećenjem IPP-a.

## Kriterij 12 - planiranje težinskih znanstvenih kriterija

Planersko-znanstveno vrijednosni kriteriji dijele se u tri skupine s obzirom na težinske faktore, od kojih je težinska skupina 1 najpovoljnija (Tablica 4-5), skupina 2 uvjetno povoljna (Tablica 4-6), a skupina 3 (Tablica 4-7) najmanje podobna.

Tablica 4-5 Težinska skupina 1

| Kriteriji                                           | Bodovanje grupa                                |                                                                                                    |                                                                               |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|                                                     | Povoljno                                       | Uvjetno povoljno                                                                                   | Nepovoljno                                                                    |
| Udaljenost od postojećih stambenih površina         | Udaljenost > 1000 m                            | Udaljenost 500 – 1000 m                                                                            | Udaljenost < 500 m                                                            |
| Emisije (npr. emisije buke ili onečišćujućih tvari) | Razina ispod granične vrijednosti <sup>9</sup> | U određenim fazama premašuju se granične vrijednosti, ali unutar granice tolerancije <sup>10</sup> | Granične vrijednosti su premašene u određenim fazama                          |
| Izvori pitke vode blizu površine tla                | Ne                                             | Korištenje potencijalno mogućeg ili potencijalno izvedivog izvora                                  | Postojeći izvori, razvijanje alternativnog izvora moguće samo uz veliki napor |
| Poplavna područja                                   | Ne                                             | —                                                                                                  | —                                                                             |

<sup>9</sup> Granična vrijednost – granična razina onečišćenosti ispod koje, na temelju znanstvenih spoznaja, ne postoji (ili je najmanji mogući) rizik štetnih učinaka na ljudsko zdravlje i/ili okoliš u cjelini i jednom kada je postignuta ne smije se prekoračiti (Sobota, 2016)

<sup>10</sup> Granica tolerancije – postotak granične vrijednosti za koji ona može biti prekoračena pod za to propisanim uvjetima (Sobota, 2016)



Tablica 4-6 Težinska skupina 2

| Kriteriji                                                                                             | Bodovanje grupa |                                                                   |                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                       | Povoljno        | Uvjetno povoljno                                                  | Nepovoljno                                                                    |
| Zaštita i očuvanje prirode u skladu sa sekcijom 23 i 32 njemačkog Federalnog zakona o zaštiti prirode | Ne              | –                                                                 | –                                                                             |
| Značajna kulturna dobra                                                                               | Ne              | –                                                                 | –                                                                             |
| Duboki izvori pitke vode                                                                              | Ne              | Korištenje potencijalno mogućeg ili potencijalno izvedivog izvora | Postojeći izvori, razvijanje alternativnog izvora moguće samo uz veliki napor |

Tablica 4-7 Težinska skupina 3

| Kriteriji                                                                                      | Bodovanje grupa                                    |                                                                                            |                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                | Povoljno                                           | Uvjetno povoljno                                                                           | Nepovoljno                                                                         |
| Postrojenja koja podliježu zakonu o kontroli emisije                                           | U postrojenju neće doći do akcidenta <sup>11</sup> | Postojeći sustavi unutar postrojenja u kojima bi moglo doći do nesreće se mogu premjestiti | Postojeći sustavi s rizikom od nesreće se ne mogu premjestiti                      |
| Eksploatacija mineralnih sirovina, uključujući hidrauličko frakturiranje                       | Nema nalazišta                                     | Postojeća nalazišta se ne koriste/nepovoljni uvjeti za eksploataciju                       | Postojeća eksploatacija ili eksploatacija u planu/povoljni uvjeti za eksploataciju |
| Iskorištavanje geotermalnih ležišta                                                            | Nema potencijala                                   | –                                                                                          | Postojeća ili planirana upotreba                                                   |
| Iskorištavanje podzemnih lokacija za skladištenje komprimiranog zraka, CO <sub>2</sub> , plina | Nema potencijala                                   | –                                                                                          | Postojeća ili planirana upotreba                                                   |

<sup>11</sup> Akcidenti - nesreće koje svojim posljedicama prelaze okvire postrojenja (processa) u kojem je nesreća nastala (Sobota, 2016)

### 4.3 Postojeća regulativa Republike Finske

Republika Finska je 1978. godine krenula s nacionalnim programom zbrinjavanja RAO iz nuklearnih elektrana u Loviisi i Olkiluotui i osnovala GTK (Finski geološki institut, fin. *Geologian tutkimuskeskus*), nacionalni program izbora lokacije za DGO. OECD/NEA (Organisation for Economic Co-operation and Development/ The Nuclear Energy Agency) je 1977. godine prvi puta objavila međunarodne preporuke za odlaganje ING (NEA, 1977), što uključuje odlaganje u solne dome, glinovite sekvencije<sup>12</sup>, kristalinične stijene i vulkanoklastične sedimente.

Cilj GTK-a je analiza i usporedba geoloških faktora prema preporukama NEA-e, uzimajući u obzir čitavo područje Republike Finske. Općenito preferirane granitne stijene (uključujući i granodiorite, gnajsove, itd.) i područja u kojima se nalaze su, s obzirom na njihovu čvrstoću i pojavljivanje u velikim čvrstim blokovima, prevladali pri sužavanju izbora lokacije.

#### 4.3.1 Sigurnosni zahtjevi

Lokacija mora zadovoljiti sljedeće parametre:

- (a) geološka sredina ne dozvoljava ispuštanje dugo-živućih radionuklida izvan dopuštenih graničnih vrijednosti;
- (b) tehnička izvedivost projektiranja i izvedbe odlagališta;
- (c) odlagalište će se držati ekološki prihvatljivih smjernica tokom izgradnje i nakon zatvaranja (bitno je uzeti u obzir utjecaj dodatnog prometa s obzirom na lokalno stanovništvo, veličine prostora za odlaganje jalovine, itd.) neće utjecati na okoliš;
- (d) razvoj odlagališta na odabranoj lokaciji će imati odobrenje javnosti;
- (e) cijena istraživanja, projektiranja, izgradnje, zatvaranja i naknadnog monitoringa neće biti previsoka.

#### 4.3.2 Geološki kriteriji

Popis geoloških kriterija s obzirom na lokaciju i raspored potencijalno pogodne sredine za izgradnju dubokog geološkog odlagališta:

1. Topografija – površinske osobine koje bi mogle imati utjecaj na hidraulički gradijent se ne smatraju bitnim na dubini potencijalnog geološkog odlagališta (500 m).

---

<sup>12</sup> Sekvenca – geografski odvojeni niz velikih jedinica (kompleksa) stijena koje su se istaložile pri uzajamno povezanim facijesnim uvjetima (Perić, 2007)

- Rasjedi, prijelomi, pukotine i napukline predstavljaju ograničenja u sigurnosnom pogledu te se smatra kako je topografija bitan faktor u istraživanju odabira lokacije;
2. Stabilnost temeljne stijene – baltički štit je tektonski stabilan, a tektonske aktivnosti su zanemarive, pomak temeljne stijene uslijed glacijacije je vezan uz stare pukotinske zone, takve zone se moraju izbjegavati pri odabiru područja istraživanja;
  3. Konačna dubina odlaganja – pri odabiru lokacije je pretpostavljeno da će odlagalište biti smješteno na dubini od otprilike 500m zbog sposobnosti zadržavanja radionuklida iz biosfere. Tablica 4-8 prikazuje ograničenja za specifične radionuklide i njihovog ispuštanja u okoliš, pri čemu se ograničenja odnose na svaki individualni radionuklid, a zbroj svih omjera u jednom retku mora biti manji od jedan. Njihovo ispuštanje se može izračunati na temelju prosjeka u sljedećih 1000 godina;

Tablica 4-8 Maksimalna moguća doza ispuštanja u prosjeku od 1000 godina (Posiva Oy, 2012)

| <b>Radionuklidi</b>                             | <b>Maksimalna doza ispuštanja u prosjeku od 1 000 godina</b> |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Dugoživući izotopi Ra, Th, Pa, Pu, Am i Cm      | 0.03                                                         |
| Se-79; Nb-94; I-129; Np-237                     | 0.1                                                          |
| C-14; Cl-36; Cs-135; dugoživući izotopi uranija | 0.3                                                          |
| Sn-126                                          | 1                                                            |
| Tc-99; Mo-93*                                   | 3                                                            |
| Zr-93                                           | 10                                                           |
| Ni-59                                           | 30                                                           |
| Pd-107                                          | 100                                                          |

4. Veličina geološke formacije izabrane lokacije – stijena domaćin se sastoji od odgovarajuće velikih, dovoljno homogeniziranih stijena;
5. Homogenost – masivi granita se smatraju dovoljno homogenim da se to ne smatra limitirajućim faktorom pri odabiru odgovarajućih lokacija;

6. Tip stijene – lokacije koje će se dalje istraživati su one u kojima pronalazimo kristalinične i gnajnsne strukture. Kristalinične stijene imaju veliku sposobnost retencije radionuklida i limitiranje njihovog raspršenja u biosferu. Pored kristaliničnih stijena, pretpostavlja se da će se većina lokacija za potencijalno odlagalište nalaziti na područjima koja se sastoje od granitnih stijena (npr. porfirni i sitnozrnasti graniti, granitograjsevi, grandioriti, itd.), tako da se tip stijena za analizu sužava na: intruzivne bazične stijene (poput gabra, diorita, amfibolita, itd.), kisele efuzivne/intruzivne magmatske stijene (graniti, granito-gnajsovi, itd.), specifične granitne stijene (rapakivi granit), zone pojavljivanja škriljavih stijena, granulitni kompleksi te poznate ne-metamorfizirane stijene;
7. Rasjedi i pukotine – vrsta i učestalost pukotina u temeljnoj stijeni se smatraju bitnim faktorima u odnosu na stabilnost odlagališta i podzemni tok. GTK stavlja naglasak na istraživanje područja izvan rasjednih zona, no tek nakon detaljnog istraživanja strukture i tektonike područja se može pouzdano predvidjeti hoće li u tom području doći do neočekivanih tektonskih pomaka (Tablica 4-9). Rasjedi i pukotine se klasificiraju u sljedeće skupine:
- a) Klasa 1: Širina rasjedane zone<sup>13</sup> je otprilike 1km, a pripadajuća duljina zone je nekoliko stotina kilometara;
  - b) Klasa 2: Širina rasjeda se mjeri u stotinama metara. Duljina rasjedne zone varira od 5 km do nekoliko desetaka kilometara. Rasjedne zone graniče s blokom matične stijene odabrane kao „ciljano područje“ (približne veličine 100-200 km<sup>2</sup>);
  - c) Klasa 3: Rasjedne zone se nalaze unutar „ciljanog područja“ u širini od nekoliko metara do stotinjak metara. Rasjedna zona često graniči s blokom manje poremećene stijenske mase u odnosu na okolno područje (veličine otprilike 5-10 km<sup>2</sup>);
  - d) Klasa 4: Mora biti manji broj pukotina te pukotinskih sustava unutar istražnog područja;

---

<sup>13</sup> Lineament – svojstvo stijene koje ukazuje na postojanje rasjeda, pukotina i napuklina (Florinsky, 2016)

Tablica 4-9 Tektonske i topografske strukture matičnih stijena u Finskoj

| Porijeklo                | Strukturne osobine                                                                                                                                                                      |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Plastične deformacije    | Intuzije, škriljavost, boranje                                                                                                                                                          |
| Pukotine ili deformacije | Pukotinski klivaž <sup>14</sup> , pukotinske zone (pukotine, rasjedi, zone drobljenja)                                                                                                  |
| Trošenje i erozija       | Riječno korito, doline, gore, nasipi, karakteristike povezane s ledenjačkom aktivnošću, brežuljci, planine i druge značajne padine, morske litice, područja jakog trošenja ili klizanja |

8. Dijapirske strukture – geološki dokazi ukazuju da su granitne dome stabilne strukture koje se ne gibaju u odnosu na okolne stijene tog područja;
9. Poroznost temeljne stijene – udio vode u temeljnim kristaliničnim ili metamorfnim stijenama je izrazito nizak (poroznost neistrošene stijene je u principu manja od 1%), što je povezano s pukotinama i trošenjem te će se lokacije s visokim udjelom frakturiranih i istrošenih stijena izbjegavati;
10. Sorpcija – pretpostavka GTK-a je da intruzivne bazične stijene (gabri, amfiboliti, neki škriljavci, itd.) imaju bolji kapacitet sorpcije od kiselih stijena (graniti, kvarciti, itd.);
11. Prirodni resursi – mnogi tipovi stijena sadrže minerale od ekonomske važnosti, za različite tipove stijena se zna da imaju rudni potencijal. Oboje je isključeno iz studije. Najpovoljniji tip stijena za odlaganje bi trebao biti posve dostupan i bez predviđene specifične koristi u skoroj budućnosti;
12. Erozija – tokom zadnje ledenjačke djelatnosti erozija je bila manja od 10m i smatra se da erozija uzrokovana jednom ili više glacijacijama nema bitan utjecaj na sigurnost odlagališta i ne uzima se u obzir u procesu odabira.

Pretpostavlja se da male, ali značajne topografske varijacije predstavljaju prisutnost pukotinskih zona u matičnoj stijeni ispod krovine. To se također smatralo važnim s obzirom na stabilnost matične stijene, masenog protoka i količine podzemne vode. Izrađuje se geokemijski model bušotina. Topografske varijacije u Finskoj su jako male (manje od 100m) pa se smatra da će tok podzemne vode na dubini od 500m biti relativno nizak.

Izvori podzemne vode povezani s pukotinskim zonama, tj. dijelovi stijenske mase gdje je protok vode dovoljno velik da se može crpiti putem bušotina ili bunara se smatraju

<sup>14</sup> Pukotinski klivaž – tip klivaža koji se javlja u deformiranim, ali samo slabo metamorfoziranim stijenama i koji je karakteriziran tijesno priljubljenim pukotinama i pukotinama lučenja (Perić, 2007)

prirodnim resursom koji će imati značajnu važnost u budućnosti. Smatra se da se velike pukotinske zone trebaju izbjegavati iz nekoliko razloga:

- (a) omogućuju skraćanje put od odlagališta do površine;
- (b) najvjerojatnije će biti povezani s budućim tektonskim pomacima, iz bilo kojeg izvora, uključujući post glacijalne rasjede
- (c) osiguravaju jedini izvor podzemne vode u matičnoj stijeni (s obzirom da su to jedini dijelovi stijenske mase dovoljno protočni);
- (d) mineralizacija vrijedne mineralne sirovine je najvjerojatnije povezan s tim zonama

### **4.3.3 Okolišni kriteriji**

Najvažniji okolišni faktori su ljudska aktivnost, gustoća naseljenosti (koja treba biti što manja), bez ograničavajućih faktora ili aktivnosti koje bi ograničile lokaciju odlagališta, da nema izvora podzemne vode (Tablica 4-10). Sa stajališta transporta, preporuča se izbjegavanje naseljenih područja i područja s mostovima manje nosivosti, prednost bi bila ukoliko lokacija ima što manje različitih vlasnika, tj. da ima samo jednog vlasnika te da je naseljeno područje unutar dovoljno male udaljenosti zbog smještaja radnika.

Prednost je ukoliko se područje sastoji od temeljne stijene i šumskog zemljišta niske obradivosti, jer postojanje obradive površine komplicira mogućnost istraživanja.

Gustoća naseljenosti bi trebala biti što manja, a okolnosti koje su se uzele u obzir pri izboru lokacije za skladištenje i dubinsko geološko odlagalište su:

- (a) potrebno je otprilike 40ha za izgradnju i dobra povezanost s postojećim cestovnim pravcima;
- (b) u krugu od 1km ne smiju postojati naseljena područja, škole, bolnice ili starački domovi;
- (c) mogućnost naseljavanja ili izgradnje naselja s pripadajućim ograničenja mora biti isključena;

Tablica 4-10 Podjela na klase s obzirom na okolišne kriterije

| Klasa | Opis                                                                                                                                           | Broj područja                                         |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1     | Vrlo mala gustoća naseljenosti, bez glavnih cesta s velikim protokom prometa, dobre ceste, bez kućanstava u blizini, bez kultiviranih područja | Klasa 1 i 2<br>ukupno<br>uključuju<br>162<br>područja |
| 2     | Nema zgrada, nema velikih kultiviranih područja, iako kultivacija postoji, mala veličinom. Prihvatljivo niska naseljenosti i slab transport    |                                                       |
| 3     | Velika gustoća naseljenosti, izrazito korištene ceste ili ceste ne postoje, zakonski zaštićeno područje, područje je izvor vode                | 165                                                   |

Preporučena najmanja udaljenost od naseljenog područja je 5km, a jednake restrikcije su primijenjene i za duboko geološko odlagalište, no prednost bi bila kada bi u fazi izgradnje postojalo naseljeno područje u dovoljnoj udaljenosti, za smještaj dovoljnog broja zaposlenika.

#### 4.3.4 Transport otpada

Najvažniji faktor pri odabiru načina transporta je ograničenje nosivosti nekih mostova i cesta. Željeznički transport se smatra najpovoljnijom opcijom, jer nema ograničenja u pogledu težine tereta kao u cestovnom prometu. S obzirom na isplativost transporta željeznicom, transport je podijeljen u 3 klase:

- Klasa 1: Udaljenost od željeznice je manja od 10km;
- Klasa 2: Udaljenost od željeznice je 10-30km;
- Klasa 3: Udaljenost od željeznice je veća od 30km.

U Finskoj, područja tražene veličine su većinski u vlasništvu države ili privatnih tvrtki (poput drvnih kompanija). S obzirom na to, dijele se na klase:

- Klasa 1: Područje je u potpunosti ili većinski u vlasništvu države ili privatnih kompanija. Mali broj zemljovlasnika;
- Klasa 2: Područje je u djelomično u vlasništvu države ili privatne kompanije i djelomično u vlasništvu privatnih pojedinaca;
- Klasa 3: Područje je u potpunosti u vlasništvu fizičkih osoba.

2001. godine je odabrana lokacija Olkiluoto na jugozapadnoj obali Finske, gdje će se, prema trenutnim planovima, započeti odlagati RAO oko 2023. godine. Otok Olkiluoto se istraživao 25 godina da bi u potpunosti dokazala njegovu sigurnost. Sastoji se od dva različita tipa stijena: stijene visokog stupnja metamorfoze uključujući gnajs s različitim stupnjevima

migmatizacije<sup>15</sup> i eruptivne, magmatske stijene uključujući pegmatitne granite i dijabazne žice. Smješten je na Baltičkom štitu sa slabom učestalošću potresa, od 1880-ih godina nije bilo potresa jačeg od  $M = 5$ , a nalazi se u zoni slabe seizmičke aktivnosti.

Odabran je švedski model odlaganja KBS-3V, prilagođen finskim uvjetima (Slika 4-2).



Slika 4-2 Finski model (Posiva Oy, 2012)

Ključne značajke odabira otoka Olkiluoto su minimalna tektonska aktivnost, debljina dobre i kvalitetne stijene za projektiranje DGO, slab protok podzemne vode, redukcijski uvjeti i drugi povoljni podzemni uvjeti na promatranoj dubini. U blizini otoka i na samom otoku nisu pronađeni nikakvi prirodni resursi, što smanjuje rizik ljudske intruzije.

#### 4.4 Postojeća svjetska regulativa (preporuke IAEA-e)

IAEA je specijalizirana agencija za međunarodnu suradnju na području korištenja nuklearnih izvora koja broji 151 zemlju članicu, uključujući RH. Dokument *Siting of Geological Disposal Facilities* (IAEA, 1994) je jedan od temeljnih dokumenata koji govori o odlaganju RAO-a, a u kojem su izdane detaljne smjernice za izbor najoptimalnije lokacije za odlaganje RAO-a.

<sup>15</sup> Migmatizacija – proces postanka migmatita



Cilj odlaganja radioaktivnog otpada je pasivna izolacija otpada na način da ne uzrokuje nepotrebno izlaganje radijaciji bilo ljudi bilo okoliša, sada ili u budućnosti, koji se može postići izolacijom radioaktivnih materijala u sustav zbrinjavanja koji je lociran, dizajniran, konstruiran, i kojim se upravlja na način da se svaki potencijalni hazard za ljudsko zdravlje drži prihvatljivo niskim kroz traženi vremenski period.

Generalno je zaključeno da je pogodniji koncept zbrinjavanja ING-a i VRAO-a u duboke, stabilne geološke formacije. Sigurnost koncepta se ne oslanja na kontinuiranu institucijsku kontrolu nakon zatvaranja odlagališta (u smislu održavanja i nadzora) čime se smanjuje teret za buduće generacije.

Izrazito važna aktivnost u svezi odlaganja VRAO-a i drugih tipova dugoživućeg otpada je odabir odgovarajuće lokacije za duboko odlaganje. Takva lokacija treba imati povoljne karakteristike prirodnog ograničavanja (širenja radionuklida) za razmatrane tipove otpada i mora biti povoljna za implementaciju svih potrebnih inženjerskih barijera čime bi se spriječilo ili usporilo potencijalno kretanje radionuklida iz odlagališnog sustava do dohvatljivog okoliša.

#### **4.4.1 Geološki kriteriji**

Geološka okvir odlagališta treba biti pogodan za cjelokupnu karakterizaciju te imati geometrijske, fizičke i kemijske karakteristike koje zajedno umanjuju mogućnost transporta radionuklida iz tijela odlagališta u okoliš. Dubina i dimenzije stijene domaćina trebaju biti dostatni za prihvrat odlagališta i osigurati odgovarajuću udaljenost od geoloških diskontinuiteta koji mogu stvoriti brze puteve transporta radionuklida, kao što su brečaste zone rasjeda na rubovima (bokovima) solnih doma (dijapira). Ujednačene stijenske formacije u relativno jednostavnim geološkim postavkama smatraju se poželjnima radi lakše karakterizacije i predviđanja njihovih svojstava. Poželjne su formacije s malo velikih strukturnih diskontinuiteta ili potencijalnih puteva za transport radionuklida čiji utjecaj na učinkovitost odlagališta se može lako odrediti. Stijena domaćin ne smije biti podložna utjecaju budućih geodinamičkih promjena (klimatskih promjena, neotektonike, seizmičnosti, vulkanizma, dijapirizma) tako da navedena svojstva na neprihvatljiv način ostvare utjecaj na izolacijska svojstva cjelokupnog odlagališnog sustava.

Mehanička svojstva stijene domaćina trebaju biti povoljna za sigurnu izgradnju, rad i zatvaranje odlagališta i za osiguranje dugotrajne stabilnosti geološke barijere koja okružuje odlagalište. Moraju se uzeti u obzir termička i termomehanička svojstva stijene domaćina zbog topline koju generira otpad.. Zavisno od mogućnosti nastanka plinova od strane

odlagališnih sustava, svojstva transporta plina (propusnosti na plin) geoloških barijera također treba uzeti u obzir u procjeni učinkovitosti odlagališta.

Potrebni podatci: regionalni i lokalni strukturni i stratigrafski podatci (svojstva) stijena, sedimentata i tala te njihova kemijska i fizička svojstva, uključujući mehanička i, gdje je potrebno, termička svojstva.

Buduće klimatske promjene (eksterna geodinamika) u obliku interglacijalnih i glacijalnih ciklusa mogu rezultirati fundamentalnim promjenama u Zemljinoj hidrosferi, kao što su fluktuacije razine mora, promjene u procesima erozije/sedimentacije, tranzicije visokih glacijalni ili periglacijalnih uvjeta te varijacije u površinskoj i podzemnoj hidrološkoj ravnoteži. Unutrašnje geodinamičke aktivnosti kao što su pomicanja tla vezana uz potrese, slijeganje i izdizanje tla, vulkanizam i dijapirizam mogu također izazvati promjene u procesima i uvjetima u Zemljinoj kori. Oba tipa događaja, koji u nekim slučajevima mogu biti povezani, mogu utjecati na cjelokupni sustav odlaganja kroz poremećaje u cjelovitosti lokacije ili promjenama intenziteta i puteva toka podzemne vode. Preliminarnu procjenu predvidivosti i efekata ovih fenomena treba provesti za traženi vremenski period u ranom stadiju procesa određivanja lokacije. Lokacija treba biti u geološkim i geografskim uvjetima gdje geodinamički procesi ili događaji neće s velikom vjerojatnošću voditi k neprihvatljivom otpuštanju radionuklida.

Potrebni podatci:

- (a) Klimatska povijest (lokalna i regionalna) i očekivani budući trendovi na regionalnoj i čim više globalnoj razini;
- (b) Tektonska povijest i okvir geoloških postavki na lokalnoj i regionalnoj razini i povijesna seizmičnost;
- (c) Dokazi aktivnih (tijekom kvartara i po mogućnosti kasnog tercijara) neotektonskih procesa, kao što su izdizanje, tonjenje, prevrtanje, nabiranje, rasjedanje;
- (d) Svaka prisutnost rasjeda u geološkom okružju, njihova lokacija, dužina, dubina i informacije o vremenu zadnjih aktivnosti;
- (e) In situ regionalna područja naprezanja;
- (f) Procjena karakteristika maksimalnih fizički mogućih potresa na lokaciji na temelju seizmotektonike;
- (g) Procjena geotermalnog gradijenta i dokazi o termalnim izvorima;
- (h) Dokazi vulkanske aktivnosti (tijekom kvartara i po mogućnosti kasnog tercijara);
- (i) Dokazi dijapirizma.

Navedeni podatci vjerojatno neće biti raspoloživi na razini istraživanja područja, međutim, treba ih prikupiti kao rezultate karakterizacije lokacije i potvrđivanja programa.

Hidrogeološke karakteristike i postavke geološke sredine trebaju težiti ograničenju toka podzemne vode unutar odlagališta i podržati sigurnost izoliranja otpada u traženom vremenskom periodu.

Procjena mehanizma kretanja podzemne vode, kao i analiza smjera i brzine toka, bit će važni ulazni podatci za sigurnosnu analizu svake lokacije, jer je najvjerojatniji način oslobađanja radionuklida kroz tok podzemne vode. Geološka sredina mora biti sposobna ograničiti tok do, kroz i od odlagališta doprinijet će sprečavanje neprihvatljivog oslobađanja radionuklida. Takvi putevi se trebaju ograničiti u stijeni domaćinu odlagališta tako da zaštitne funkcije sustava geoloških i inženjerskih barijera ostanu odgovarajuće. Kapacitet razrjeđenja hidrogeološkog sustava može također biti važan i treba ga ocijeniti. Lociranje treba optimizirati na način da su povoljniji dugi i spori putevi procjeđivanja vode od odlagališta prema okolišu.

Moguće posljedice po hidrogeologiju koje će nastati od procesa izazvanih odlaganjem RAO-a (npr. termički i radijacijski efekti, porast hidrauličke propusnosti uslijed iskopa bušenjem i miniranjem itd.) također treba uzeti u obzir.

Potrebni podatci:

- (a) Dovoljno detaljna hidrogeološka procjena lokalnih i regionalnih jedinica, karakterizacija i identifikacija akvifera i nepropusne podine i krovine;
- (b) Identifikacija i karakterizacija glavnih lokalnih i regionalnih hidrogeoloških jedinica (lokacija, veličina i međusobna ovisnost);
- (c) Punjenje i pražnjenje glavnih lokalnih i regionalnih hidrogeoloških jedinica (lokacija i bogatstvo vodom);
- (d) Hidrogeološke karakteristike stijene domaćina (distribucija i poroznost, hidraulička provodljivost i hidraulički gradijenti);
- (e) Tok podzemne vode (prosječne brzine tečenja i prevladavajući smjerovi) za sve akvifere u geološkoj sredini;
- (f) Fizičke i kemijske karakteristike podzemne vode i stijene domaćina u geološkoj sredini;

Fizikalno-kemijske i geokemijske karakteristike geološke i hidrogeološke sredine trebaju ograničiti otpuštanje radionuklida iz odlagališta do dostupnog okoliša;

Odabir stijene domaćina i geološkog okoliša koji imaju odgovarajuće geokemijske karakteristike i dobra svojstva usporenja za dugoživeće radionuklide, je od osobite važnosti kod odlaganja dugoživućeg otpada. U formacijama gdje se tečenje podzemne vode odvija kroz pore i pukotine, usporenje mineralima iz stijenskog matriksa i na površini stijene može biti važno da osigura zadovoljavajuću dugoročnu funkcionalnost odlagališnog sustava. Procesi zadržavanja ili usporavanja koji upravljaju brzinom i količinom migracije radionuklida uključuju procese poput: disperzije, difuzije, precipitacije, sorpcije, ionske zamjene i kemijske interakcije. Sposobnost podzemne vode da transportira radionuklide može biti važna i treba ju uzeti u obzir.

Potrebni podatci: informacije neophodne za procjenu potencijala migracije radionuklida do bliskog okoliša trebaju uključiti opis geokemijskih i hidrochemijskih uvjeta stijene domaćina, okolnih geoloških i hidrogeoloških jedinica i njihovih sustava toka. Ove informacije trebaju uključivati:

- (a) Mineraloške i petrološke sastave geološke sredine i njihova geokemijska svojstva;
- (b) Kemiju podzemne vode.

Raspon kemijskih i fizikalno-kemijskih interakcija između oblika otpada, spremnika i materijala ispune te odlagališne sredine, također treba biti procijenjen. Kako bi se procijenila migracija radionuklida do bliskog okoliša radi interakcije sustava stijena-voda-spremnik koju sijedi korozija spremnika i izlučivanje radionuklida iz otpada, potrebno je sakupiti informacije o:

- (a) Kemijskom, radiokemijskom i mineraloškom sastavu stijene (uključujući materijale ispune pukotina);
- (b) Sorpcijskom kapacitetu minerala i stijena za ionske vrste važnih radionuklida;
- (c) Sadržaju radionuklida i kemijskom sastavu podzemne vode, uključujući pH i Eh;
- (d) Efektima radijacije i topline raspadanja na stijenu i kemizam podzemne vode;
- (e) Efektima organskih, koloidnih i mikrobioloških materijala;
- (f) Strukturi pora i karakteristikama površine minerala stijene (uključujući pukotine);
- (g) Efektivnoj brzini difuzije radionuklida u stijenskoj masi;
- (h) Topivosti i specijaciji radionuklida.

#### **4.4.2 Okolišni kriteriji**

Određivanje lokacije za odlagalište treba provesti uzimajući u obzir stvarnu i potencijalnu ljudsku aktivnost na ili u blizini lokacije, kao i utjecaj takvih aktivnosti na DGO, koje trebaju biti svedene na minimum.

U procjeni stijene domaćina za odlagalište, u obzir treba uzeti vrijedne ili potencijalno vrijedne alternativne primjene stijene domaćina kao npr. u svrhu izrade podzemnih skladišta (spremnika plina i sl.). Prednost treba dati lokacijama u područjima u kojima je najmanja vjerojatnost da će stijena domaćin biti eksploatirana u ovu svrhu.

Površinske karakteristike koje mogu voditi poplavljanju odlagališta kao posljedica havarije na postojećim ili budućim vodenim tijelima, treba dobro razmotriti i ocijeniti s obzirom na:

- (a) Podatke o povijesnim i nedavnim aktivnostima bušenja ili rudarskim aktivnostima u blizini lokacije;
- (b) Podatci o pojavama energetske i mineralnih sirovina u području oko lokacije;
- (c) Ocjena stvarnog potencijala buduće uporabe površinske i podzemne vode na lokaciji;
- (d) Lokacije budućih i planiranih otvorenih vodenih tijela (akumulacijska jezera i sl.).

Pri odabiru odgovarajućih lokacija, uporabu i vlasništvo nad zemljištem treba uzeti u obzir u svezi mogućeg budućeg razvoja i regionalnog prostornog planiranja u području od interesa.

- (a) Postojeći zemljišni resursi i korištenje i jurisdikcija nad njima;
- (b) Prostorni planovi za područje od interesa.

Lokacija mora biti odabrana na način da ukupni društveni učinak izgradnje odlagališta na lokaciji bude prihvatljiv. Područja koja imaju odgovarajuću infrastrukturu ili društvene sadržaje za prihvaćanje odlagališta ili područja koja bi imala osobitu korist od ekonomskih i industrijskih aktivnosti stvorenih izgradnjom radom odlagališta, mogu imati prioritet.

Prioritet trebaju imati lokacije udaljene od područja visoke naseljenosti sposobne prihvatiti očekivane promjene u infrastrukturi i s dovoljno raspoložive radne snage. Kako bi se mogao procijeniti utjecaj razvoja odlagališta na određenu lokaciju, potrebni su sljedeći podaci:

- (a) Sastav populacije, gustoća, raspodjela i trendovi;
- (b) Raspodjela zaposlenosti i trendovi u industrijskom sektoru;
- (c) Javne službe i infrastruktura;
- (d) Ponude i zahtjevi za smještajem;
- (e) Ekonomska osnova i očekivanja u regiji.

### 4.4.3 Uvjeti izgradnje

U skladu s odgovarajućom rudarskom regulativom vezanom za primjenu optimiziranog plana površinskih objekata i podzemnih radova i izrade svih iskopa; radovi na iskopu moraju biti provedeni na način da ne izazivaju promjene na susjednim stijenama što bi predstavljalo neprihvatljive periferne puteve iz odlagališta u okoliš. Jedna od ideja korištenja je korištenje iskopanog materijala kao materijala za zapunjavanje u predloženom sustavu odlaganja, a tamo gdje to nije provedivo, potrebno je osigurati odgovarajuća jalovišta kojima bi se iskopani materijal uklopio u prirodni okoliš. Blizinu odgovarajućim nalazištima agregata ili vode za potrebe izgradnje odlagališta i okolnih objekata također treba uzeti u obzir.

Sustav odlaganja treba biti dovoljno dubok tako da je potrebno provoditi samo minimalna ograničenja ili nadzor nad površinskim ili pripovršinskim aktivnostima. Treba izbjegavati površinske karakteristike koje mogu utjecati na dizajn i izgradnju površinskih i podzemnih objekata. Potrebni podatci:

- (a) Detaljni geološki i hidrogeološki podatci o stijeni domaćinu i njegovoj krovini;
- (b) Topografija lokacije i okolnog područja;
- (c) Povijest plavljenja područja;
- (d) Definiranje područja klizišta, potencijalno nestabilnih zakosa ili materijala niske posmične čvrstoće ili visokog likvefakcijskog<sup>16</sup> potencijala.
- (e) Potencijalno negativni uvjeti tijekom izvođenja rudarskih radova (visoka temperatura stijene, visoke koncentracije plinova);
- (f) Povijesna seizmičnost područja.

### 4.4.4 Transport otpada

Lokacija mora biti odabrana na način da izlaganje javnosti radijaciji i utjecaj transporta otpada na okoliš na lokaciji budu svedeni na prihvatljive vrijednosti. Transport radioaktivnog otpada do geoloških odlagališta uključuje izlaganje javnosti ionizirajućem zračenju, potrošnju goriva i dodaje produkte izgaranja goriva (transportnih sredstava) atmosferi. Ovi utjecaji će porasti s povećanjem udaljenosti na koju otpad treba transportirati. Transport otpada do odlagališta može također biti značajan faktor u pridobivanju povjerenja javnosti i prihvatanja lokacije odlagališta.

---

<sup>16</sup> Likvifikacija – transformacija (pretvorba) slabo zbijenog sedimenta u fluidnu (žitku) masu zbog podvodnog klizanja ili odronjavanja, tj. pretvaranje rahlog tla iz čvrstog stanja u tekuće (žitko) kao posljedica porasta pornog tlaka (tlaka pornog fluida) i smanjenja efektivnog naprezanja (Perić, 2007)

U nekim slučajevima bit će potrebno konstruirati nove ili unaprijediti postojeće prometnice. Prioritet imaju lokacije koje zahtijevaju kraće transportne udaljenosti i ograničenu količinu dodatnih radova te gdje pristupne rute ne moraju prelaziti težak teren.

#### **4.4.5 Zaštita okoliša**

Lokacija mora biti odabrana na način da kvaliteta okoliša bude adekvatno zaštićena te da se potencijalno negativni utjecaji svedu na prihvatljivu mjeru, uzimajući u obzir tehničke, ekonomske, društvene (socijalne) i okolišne faktore. Od mogućih negativnih utjecaja koje geološko odlagalište može ostvariti na okoliš, treba spomenuti slijedeće:

- (a) Degradacija okoliša uslijed rudarskih radova, iskopa i drugih industrijskih radova na interesnom području.
- (b) Utjecaj na područja od značajne vrijednosti za javnost;
- (c) Degradacija javnih rezervi vode;
- (d) Utjecaj na biljni i životinjski svijet, osobito ugrožene vrste.

Kako bi se odredio potencijalni utjecaj na kvalitetu okoliša, podatci trebaju uključivati:

- (a) Lokacije nacionalnih parkova, parkova prirode i povijesna područja;
- (b) Postojeće izvore površinske i podzemne vode;
- (c) Postojeće terestrijalne i akvatičke biljne i životinjske vrste.

## 5. GEOGRAFSKI INFORMACIJSKI SUSTAV (GIS)

Geografski informacijski sustav (GIS) je skup programskih alata za prikupljanje, upravljanje i analizu raznih vrsta prostornih podataka. GIS tehnologija je novija interdisciplinarna znanost i jedna od najdinamičnijih tehnologija današnjice koja omogućuje točnu i preciznu, a prije svega kvalitetnu analizu nekog dijela našeg planeta (Perković, 2018). Prikupljeni podatci se mogu analizirati i njima se može upravljati radi dobivanja novih izlaznih podataka u grafičkom obliku.

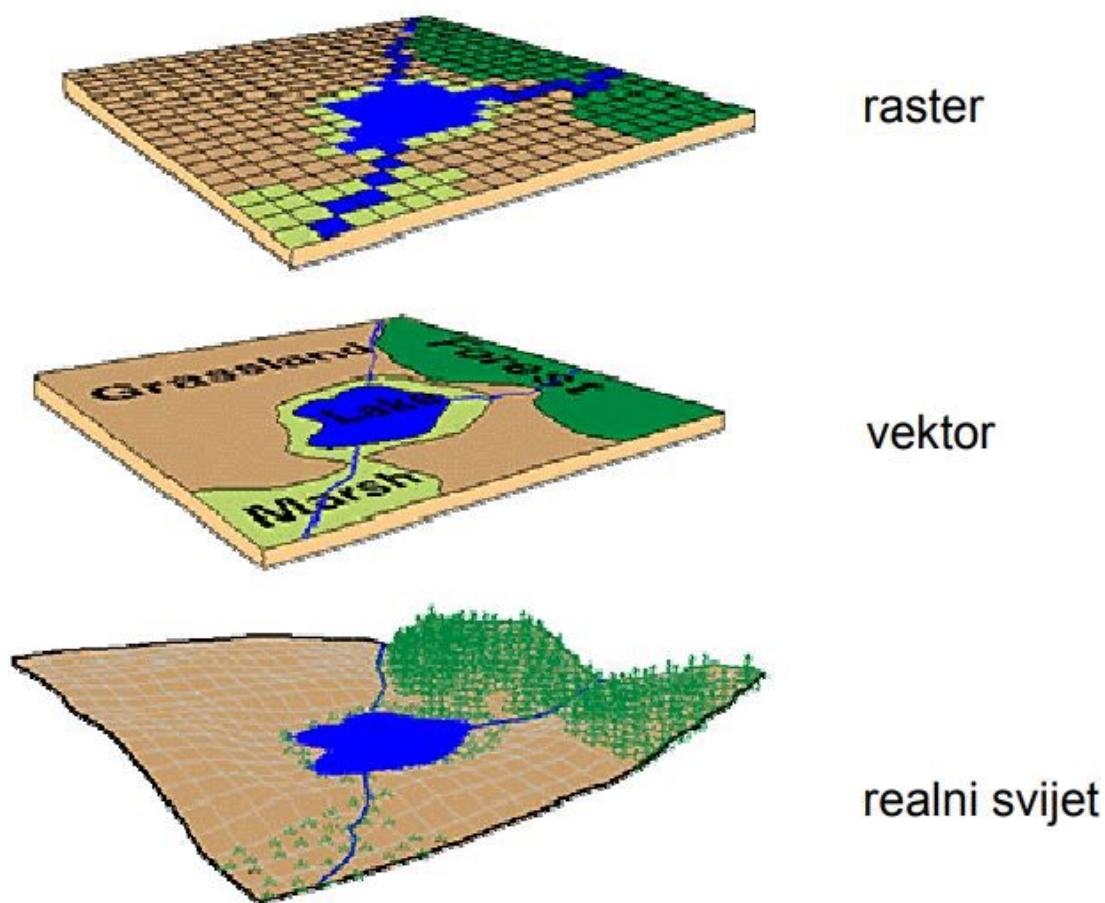
GIS tehnologijom se povezuju dobivene informacije s geografskim položajem koji obuhvaća litosferu, hidrosferu, biosferu i atmosferu. Predmete promatranja možemo podijeliti na prirodne (vodotoci, jezera, obale mora, površine prekrivene vegetacijom, itd.) i umjetne (naselja, željezničke i cestovne trase, razne vodove poput kanalizacije ili vodovoda i sl.) (Perković, 2018). Organizacija i prikazivanje tih podataka u tematskim slojevima krajnjem korisniku daju odličan uvid u određenu lokaciju, omogućavajući da korisnici izvršavaju operacije na svim slojevima u cilju dobivanja novog, mješovitog sloja za daljnju analizu.

GIS informacije o stvarnome svijetu vidimo kao skup informacija povezanih geografijom. Većina prikupljenih podataka je povezana s nekom lokacijom u svijetu, tj. prostornim koordinatama. Skupovi informacija mogu doći u raznim oblicima poput prostornih podataka (vezani s nekom lokaciji na Zemlji, npr. geografska dužina i širina) koje spremamo u obliku vektora ili rastera te neprostornih atributa (opisni podatci, tj. dodatne informacije o pojedinoj prostornoj karakteristici, npr. temperatura, površina, naziv) i topoloških odrednica (odnos objekata prema okolini) (Perković, 2018). Postoje dva osnovna tipa geoprostornih podataka, kojima prikazujemo stvarni svijet (Slika 5-1):

1. Vektorski podatci - predstavljeni točkama, crtama i poligonima;
2. Rasterski podatci – predstavljeni matricom piksela



dok je relevantni opisni podatak najčešće pohranjen u atributnoj tablici vektorskog zapisa, bez obzira bio to *shapefile* (najčešći GIS format – standard za sve softvere) ili *geodatabase*



Slika 5-1 Prikaz rasterskih i vektorskih podataka u GIS-u (Perković, 2018)

GIS omogućava brzo i efikasno rješavanje problema prostorne analize upravo zbog mogućnosti sjedinjenja prostornih i atributnih podataka koja se mogu grupirati i smjestiti na tu istu kartu, koja će biti kombinacija svih vrsta podataka, kombinacija prostorne informacije (dimenzije) i numeričkih (neprostornih) podataka (Perković, 2018). Njihovom kombinacijom se dobiva prostorni, tj. georeferencirani podatak. Georeferencirani podatci se mogu analizirati radi određivanja:

- (a) svojstva lokacije ili odnosa s obzirom na ostale podatke
- (b) postojanja nekih svojstava na određenom području
- (c) učestalosti ili gustoće obilježja u određenom prostoru
- (d) onoga što se nalazi unutar ili pokraj nekog područja interesa

- (e) mapiranja promjena određenog prostora u nekom vremensko razdoblju (i na koji način)

GIS podatci se mogu analizirati koristeći GIS alate i vizualizirati u vidu karata. Ono što GIS tehnologiju razlikuje od klasične kartografije je mogućnost pohrane većeg broja podataka, mogućnosti prostorne analize i prikazivanja analiza i informacija prilagođenih korisniku (Grgurić, 2019).

U cilju što točnije analize i odluke o lokaciji odlaganja visokoradioaktivnog otpada, pomoću GIS-a se mogu dobiti točni i precizni podatci o pogodnom području upravo zbog mogućnosti spajanja različitih parametara, dostupnih podataka i traženih kriterija (Perković i dr., 2012). Koristeći spoj GIS-a i multikriterijske analize odlučivanja (engl. *Multi Criteria Decision Analysis*, MCDA), tim različitim parametrima se dodjeljuju težinski kriteriji. MCDA se koristi za logičko ocjenjivanje i usporedbu različitih kriterija za odabir najbolje moguće odluke, što je posebno bitno kada postoji velik broj sudionika različitih interesa i različitih krajnjih ciljeva. Primjerice, pomoću GIS-a se mogu brzo locirati područja odlaganja radioaktivnog otpada, a pomoću metode MCDA se te lokacije mogu rangirati i pridodati im se težinske vrijednosti kako bi dobili što kvalitetnija potencijalna područja. MCDA se može koristiti u svim područjima za promatranje problema gdje se mogu javiti višestruka pogodna rješenja (Malczewski, 2015).

Koristeći spoj GIS-a i MCDA mogu se transformirati i oblikovati podatci s obzirom na težinske kriterije radi rješavanja prostornih problema. Koraci GIS-MCDA postupka koji se rade u svrhu što boljeg razumijevanja problema i dobivanja što točnijeg rezultata:

1. Definiranje problema ili cilja, sveobuhvatnim razumijevanjem problema;
2. Određivanje kriterija i ograničenja korištenjem stručnog mišljenja i informacija iz različitih izvora, pretraživanjem dostupne literature, analizom povijesnih podataka i uključivanjem stručnjaka iz različitih područja;
3. Transformiranje vrijednosti na relativnu ljestvicu što omogućuje usporedbu različitih kriterija i rangira procjene i mišljenja stručnjaka smislenim konstruktivnim brojevima;
4. Procjenjivanje težine svih kriterija u odnosu na njihov međusoban odnos i na konačni cilj;
5. Kombinacija, sinteza i skup svih geoprostornih slojeva i kriterija;
6. Analiza i potvrda rezultata.

Prikupljanjem i unošenjem atributa, postojeći podatci mogu biti u već digitaliziranom (vektorskom ili rasterskom) obliku, što uvelike olakšava daljnju obradu, ili mogu biti podatci koji ipak zahtijevaju predobradu za daljnje korištenje.

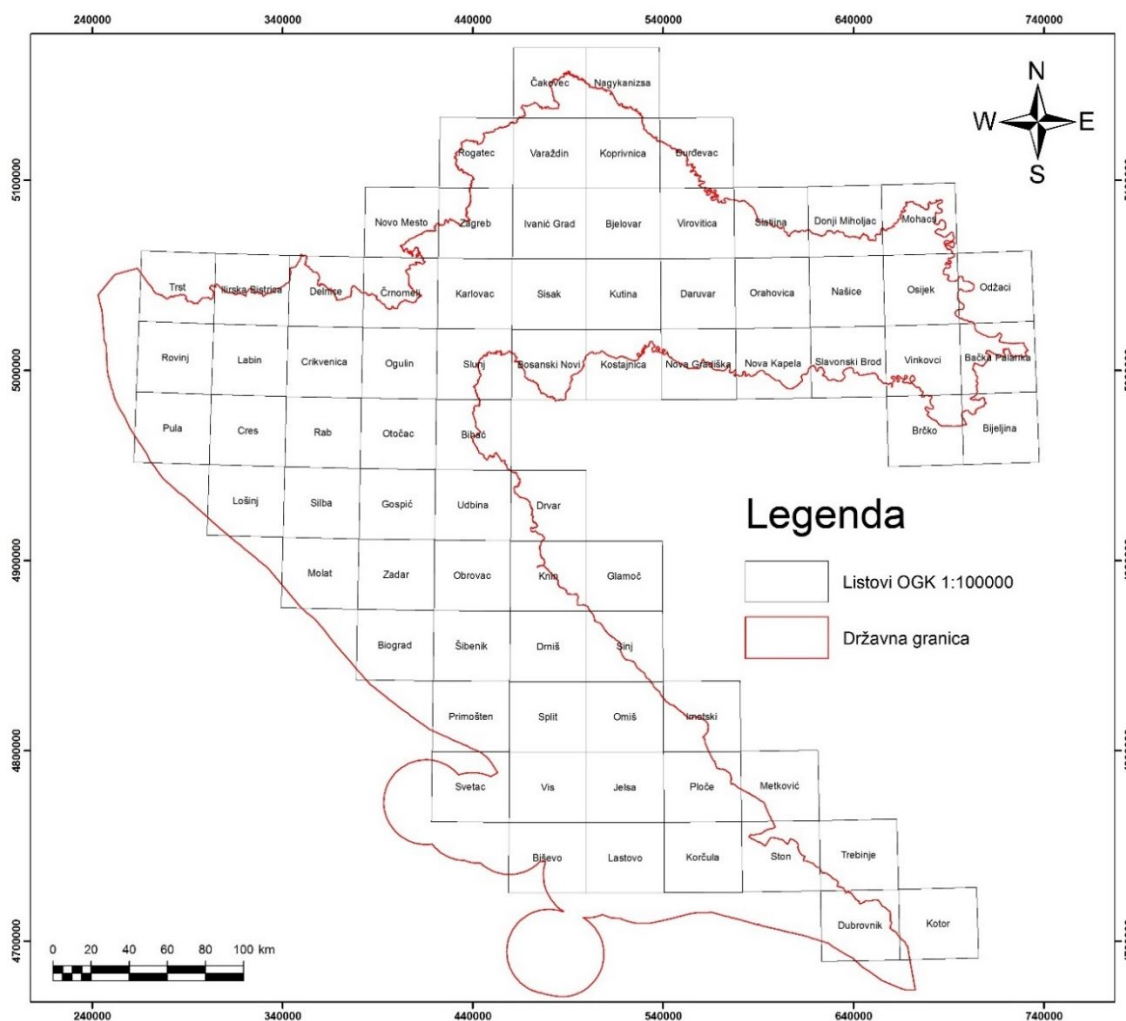
Kako bi se uspješno procesuirale informacije o prostoru, za potrebe GIS-a se vrši prikupljanje podataka na temelju čega se obavlja modeliranje, analiziranje i prikazivanje podataka. Razvoj GIS-a se može podijeliti u četiri faze:

1. Ulaz podataka u GIS (prikupljanje podataka)
2. Tematsko modeliranje (preklapanje GIS slojeva)
3. Prostorne operacije (prostorna analiza)
4. Prikazivanje (vizualizacija) (Perković, 2018)

## **5.1 Ulaz podataka u GIS**

Potrebni podatci su dobiveni iz postojeće mreže karata, tumača za pojedinu kartu te državnih granica. Također je korištena karta predneogenske podloge s distribucijom dubina na području Panonske Hrvatske, preuzeta iz Cvetković i dr. (2019) i karta nalazišta dijabira na području Jadranskog mora, preuzeta iz Saftić i dr. (2019).

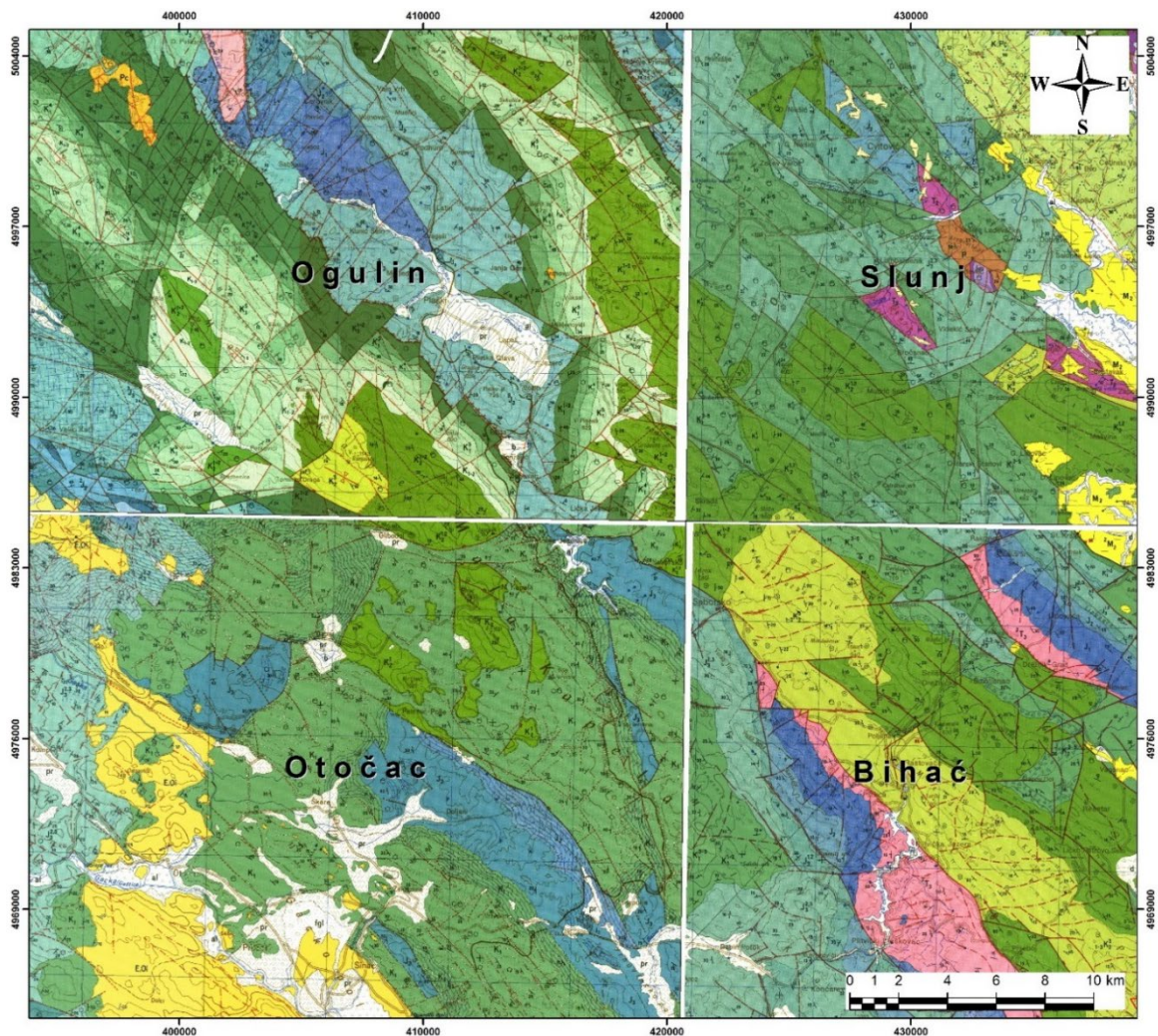
Postojeća osnovna geološka karta u mjerilu 1:100 000 (skraćeno O GK100) prikazuje RH podijeljenu na 75 listova (Slika 5-2). Jedan list O GK100 u prosjeku pokriva područje od 1450 km<sup>2</sup>, a čitav, neizrezan list sadrži tumač znakova kartiranih jedinica i standardnih oznaka, geološki stup te jedan do dva, iznimno tri geološka profila.



Slika 5-2 Osnovna geološka karta RH

S obzirom da se OGK100 radila tada najmodernijom tehnologijom, koja danas nažalost nije dovoljno precizna, mjerilo 1: 100 000 je presitno za rješavanje složenijih problema u gospodarstvu te postoji velika potreba za njenom digitalizacijom. Također, prilikom unosa točnog geografskog položaja se primjećuje kako postoje određene praznine između susjednih karata s obzirom da su se karte radile od 1962. do 1989. godine (Halamić, 2013) npr. listova Ogulin (izrađenog 1981. godine), Slunj (izrađenog 1979. godine), Otočac (izrađenog 1974. godine) i Bihać (izrađenog 1976. godine) (Slika 5-3).





Slika 5-3 Primjer postojećih bijelih rubova između listova Ogulin, Slunj, Otočac i Bihać  
(prema Velić i dr., 1981; Korolija i dr., 1979; Velić i dr., 1974; Polšak i dr., 1976)

U novije vrijeme je postalo uvriježeno da se neki listovi (čitavi neizrezani) na mreži karata dobivaju u PDF obliku te ih je za potrebe mozaičnog spajanja potrebno pretvoriti u TIF ili JPG format jer se GIS softver ne može uvući PDF format.

## 5.2 Obrada ulaznih podataka

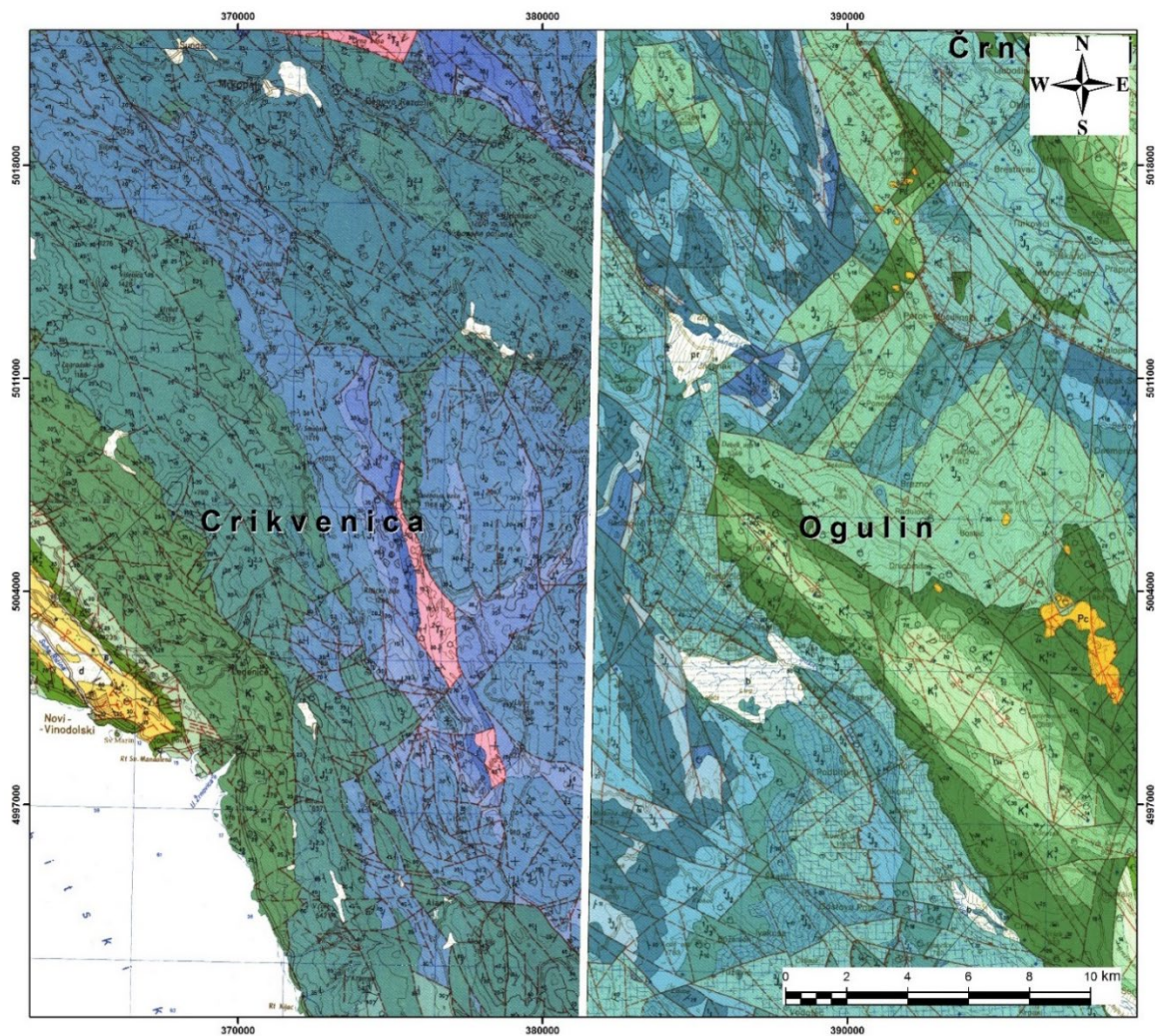
Pri izradi ovog rada korišten je *ArcGIS 10.1 for Desktop* modul *ArcMAP*. Pri radu u *ArcMap 10.1* GIS softveru, potrebno je ispuniti nekoliko uvjeta:

1. odabir koordinatnog sustava – u ovom slučaju službeni HTRS96 (Hrvatski Terestrički Referentni Sustav za epohu 1995.55)
2. rezolucija – 300 DPI (broj točaka po inču)

3. broj boja – 256 (8-bit), zbog mogućnosti spajanja listova, ukoliko karta ne sadrži 256 boja potrebno je ručno smanjiti broj boja, što će kasnije biti i prikazano
4. format datoteke – TIFF (Tagged Image File Format), zbog mogućnosti spremanja georeferenciranih informacija u raster formatu

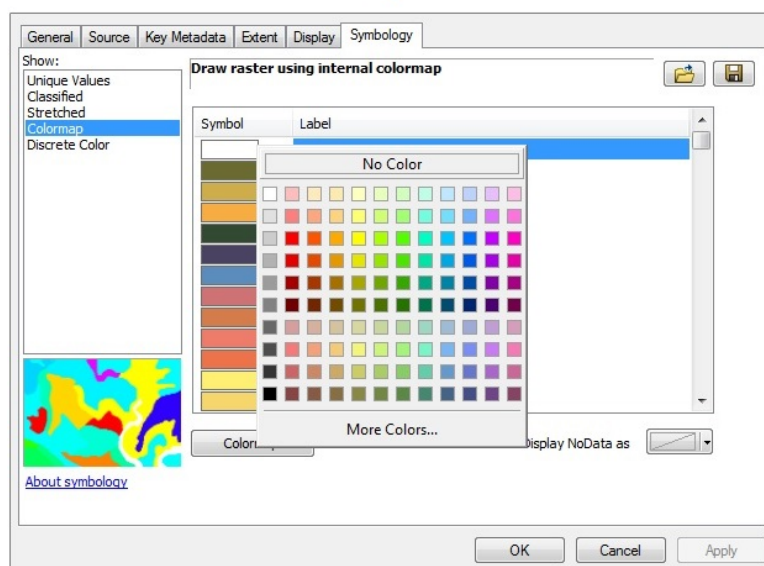
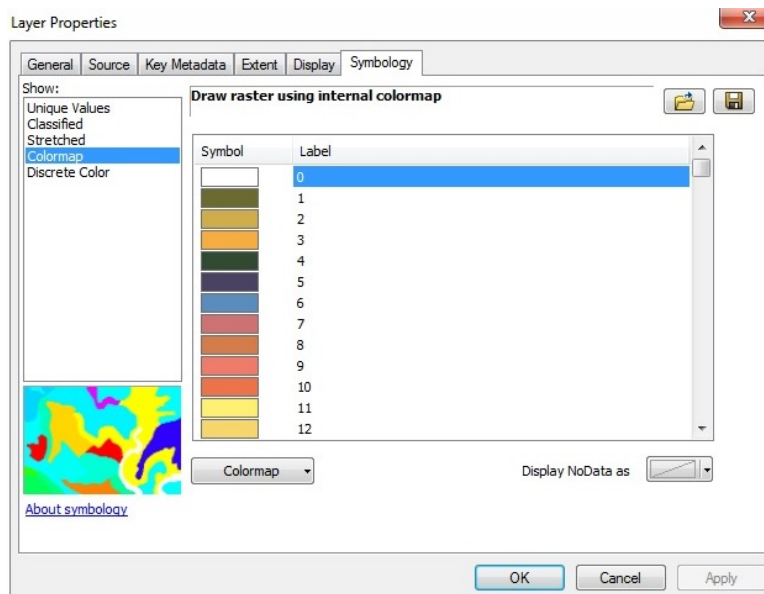
Prvi korak pri kreiranju novog dokumenta je postavljanje koordinatnog sustava. U RH, od 2010. godine je na snazi HTRS96/TM, terestrički koordinatni sustav, što će nam dati podlogu za smještaj određene lokacije na Zemlji. Zatim, postojeća mreža karata se mora prilagoditi na način da se ručno prikriju svi bijeli rubovi s karte i učini ih se prozirnima (Slika 5-4).





Slika 5-4 Primjer bijelih praznina na listovima Crikvenica i Ogulin (prema Šušnjar i dr., 1970; Velić i dr., 1981)

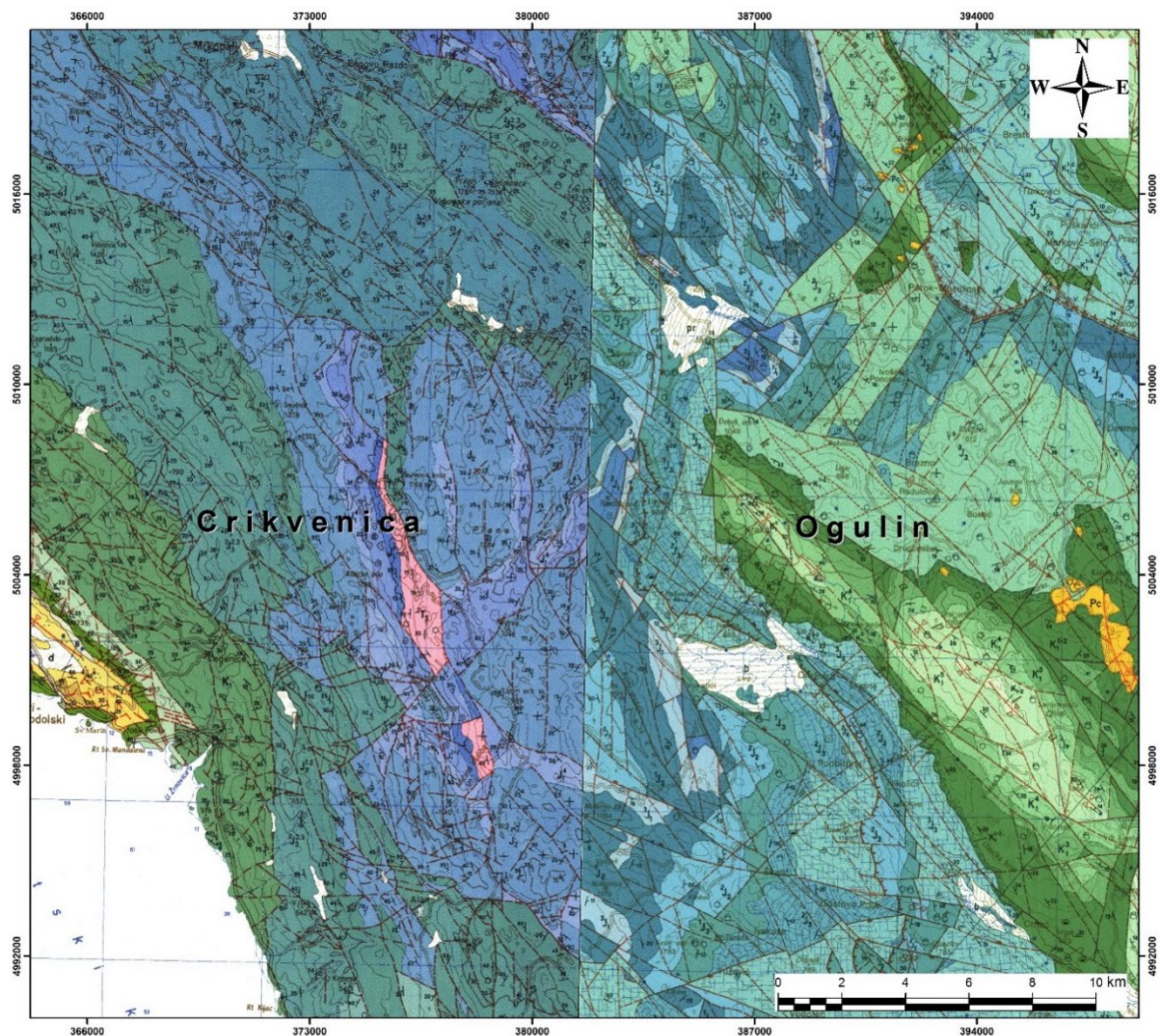
Za uklanjanje bijelih praznina između dva susjedna lista, na primjeru OGK listova Crikvenica (izrađenog 1970. godine) i OGK Ogulin (izrađenog 1981. godine), pod opcijom *Layer Properties* na karti Crikvenice, odabirom opcije *Symbology* se mogu vidjeti sve boje koje se pojavljuju na karti. Sadrži sveukupno 256 boja, a njenim pregledom se vidi kako je rub karte označen bijelom bojom, a sami elementi karte se sastoje od različitih nijansi plave, zelene, žute i ružičaste. Bijela boja kojom je taj nepoželjan rub označen se nalazi na poziciji 0 (Slika 5-5).



Slika 5-5 Pozicija neželjene boje unutar *Layer Properties* izbornika

Mijenjanjem te bijele boje u *No Color* opciju, uklanjaju se elementi bijele boje s karte i dolazi do smanjena razmaka između dva susjedna lista. Ponavljanjem postupka i na susjednom listu Ogulin, a kasnije i na cijelom području RH dobiva se minimalan razmak između dva susjedna lista što uvelike olakšava daljnju obradu i omogućava veću točnost i preciznost (Slika 5-6).





Slika 5-6 Rezultat uklanjanja bijelih rubova na primjeru listova Crikvenica i Ogulin (prema Šušnjar i dr., 1970; Velić i dr., 1981)

Neki dijelove karte se moraju potpuno prilagoditi *ArcMap*-u jer se oni ne nalaze u formatu koji program podržava, npr. listovi Koprivnica (Šimunić i dr., 2013) i Mohač (Pikija i dr., 2015), koji se nalaze u PDF obliku, imaju nepoželjan bijeli rub i broj boja se mora smanjiti na 256. To se može riješiti korištenjem besplatnog softvera *Photo Filtre*. Učitavanjem lista u *Photo Filtre* i odabirom opcije *Polygon* izrezuje se bijeli rub i pripadajuće stratigrafske oznake koju su trenutno nepotrebne. Broj boja se smanjuje na 256 koristeći naredbu *Image > Mode > Indexed color* nakon čega se izabere opcija *256 colors*. Time su stvoreni preduvjeti za uklanjanje ruba karte u *ArcMap*-u. Novonastali dokument se može spremiti u TIFF formatu i kao takav se može koristiti u *ArcMap*-u. Listovi Koprivnica i Mohač se sada nalaze u dobrom formatu, kao i predneogenska podloga koju će se kasnije koristiti, no nemaju zadan koordinatni sustav i mora ih se smjestiti u prostor, tj. mora ih se georeferencirati. Samo

georeferenciranje označava postavljanje tako dobivene karte u prostor, što se može napraviti na dva različita načina:

- (a) unosom koordinata očitanih sa slike
- (b) metodom *Raster over Vector*

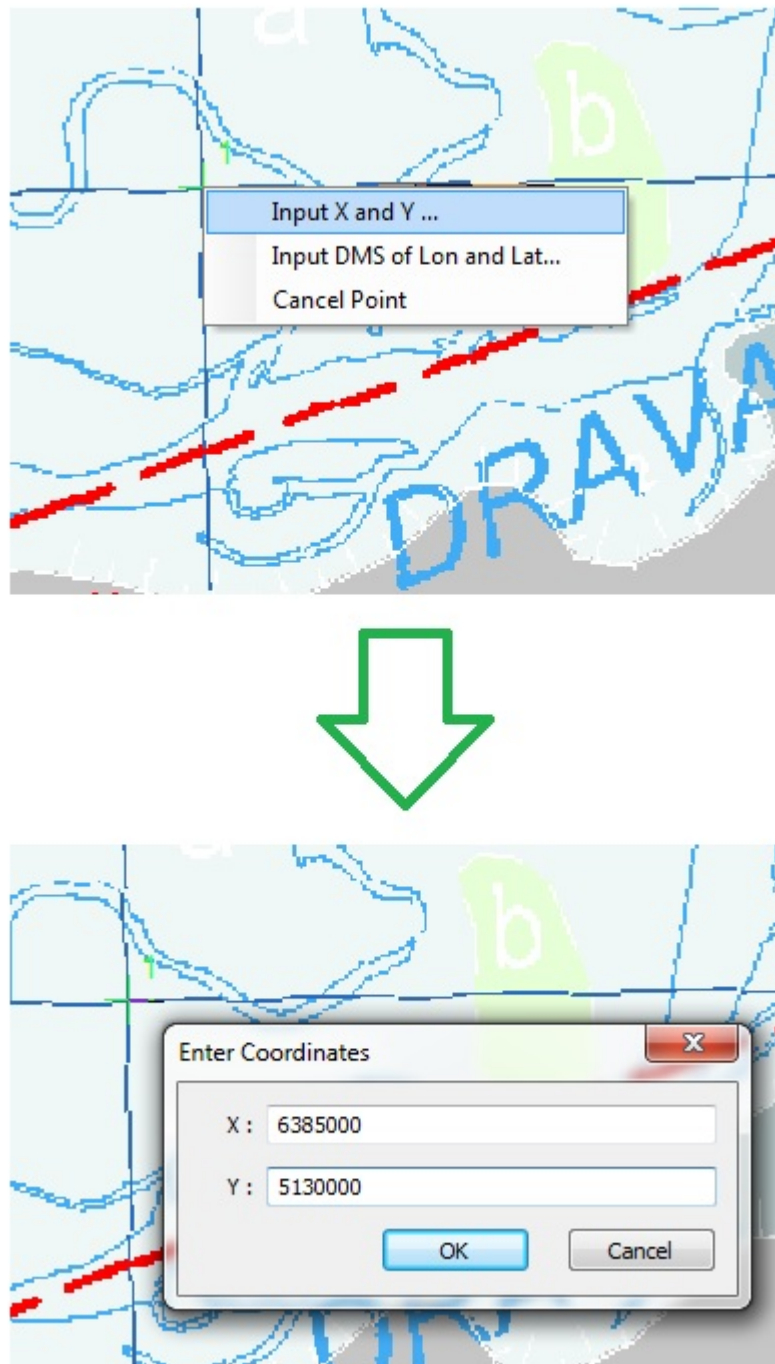
Za prethodno spomenute listove Koprivnica i Mohač, koristi se metoda unosa koordinata koje su očitane s karte. Za prikaz ove metode korišten je list Koprivnica.

Izdvajaju se x i y vrijednosti koordinata koje se nalaze u četiri poznata sjecišta na karti, u gornjem lijevom (GL), gornjem desnom (GD), donjem lijevom (DL) i donjem desnom (DD) kutu (Tablica 5-1) jer će se one kasnije unositi u sam GIS softver.

Tablica 5-1 Opis: x i y vrijednosti koordinata lista Koprivnica

| GL |           | GD |           |
|----|-----------|----|-----------|
| x  | 63 85 000 | x  | 64 20 000 |
| y  | 51 30 000 | y  | 51 30 000 |
| DL |           | DD |           |
| x  | 63 85 000 | x  | 64 20 000 |
| y  | 51 00 000 | y  | 51 00 000 |

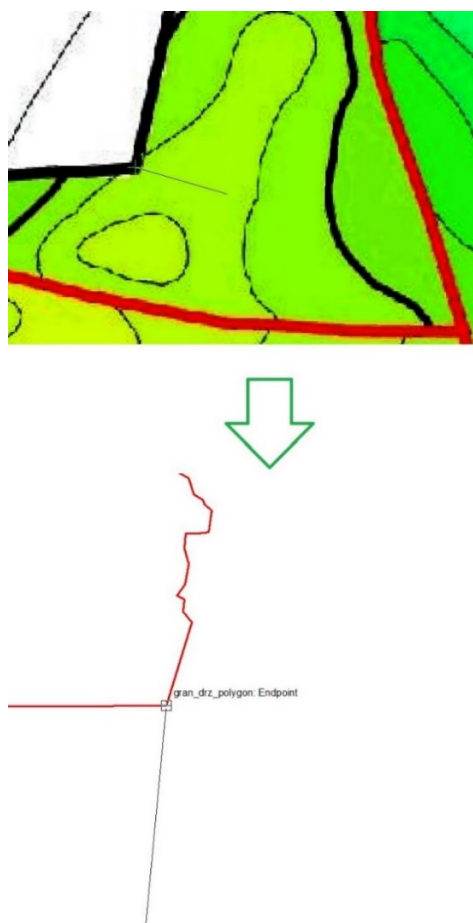
Unutar *Georeferencing* toolbara se klikom na *Layer* odabere rasterski sloj koji se želi georeferencirati, u ovom slučaju, riječ je o listu Koprivnica.tiff. Uvećavanjem prikaza određenog križića s karte (radi dobivanja što točnijeg konačnog rezultata) i odabirom opcije *Add Control Points* , označi se traženo sjecište i pod opcijom *Input X and Y* se ručno unesu koordinate (Slika 5-7)



Slika 5-7 Unošenje koordinata otprije očitanih s karte

Ponavljanjem postupka na sva četiri sjecišta dobiva se potpuno georeferencirani list. Isti postupak se koristi i za list Mohač. Ukoliko postoji greška, ona se može očitati u *Total RMS Error* unutar *View Link Table* opcije. Koristeći naredbu *Rectify*, list će se spremi u novi TIFF format kao transformirani georeferencirani raster s koordinatama koje su mu ručno unesene u prošlom koraku.

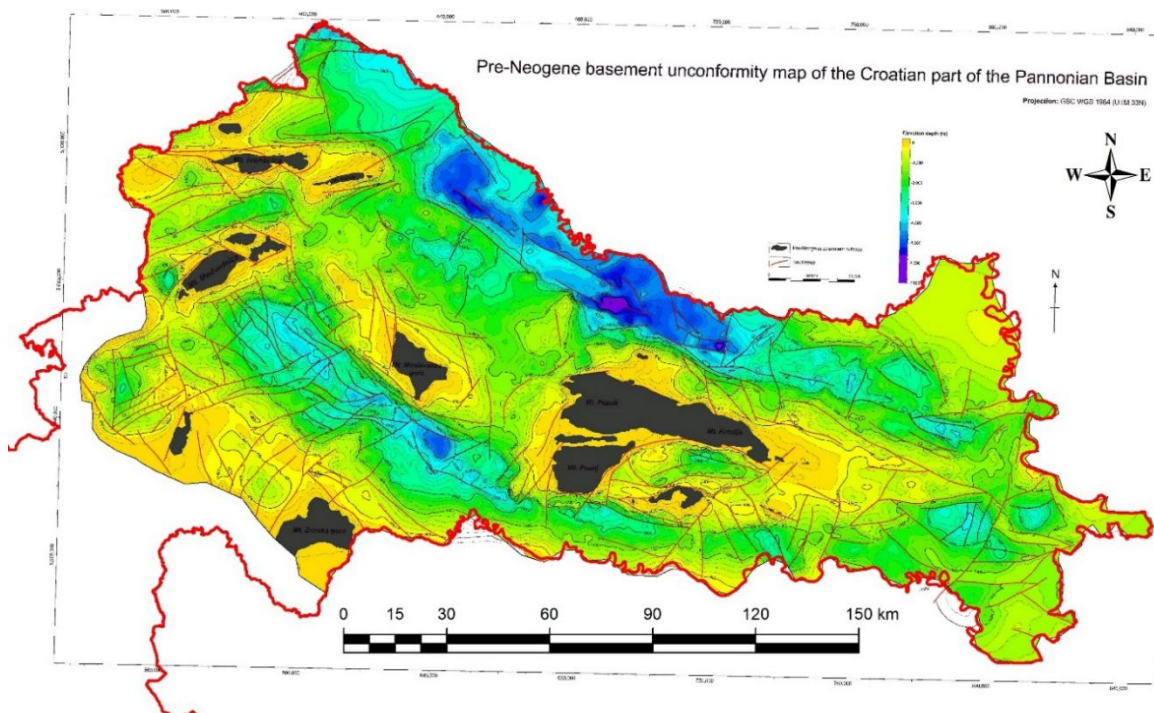
Drugi način georeferenciranja je metoda *Raster over Vector*, kojim se unosi vektorski sloj i na njega se ručno namješta rasterska podloga pomoću poznatih istovjetnih točaka na vektoru. To je slučaj kada na karti ne postoje koordinate te se mora oslanjati na kartu čija geolokacija postoji u nekom vektorskom GIS sloju (Perković, 2018), kao što je slučaj s kartom predneogenske podloge i kartom dijapira. Bitno je naći dovoljno prepoznatljive točke na obje karte u svrhu dobivanja što preciznijeg i točnijeg rezultata. Učitavanjem rasterske predneogenske podloge se uzimaju poznate, specifične točke koje se pridružuju tim istim specifičnim točkama na vektorskoj karti, u ovom slučaju riječ je o vektorskom sloju granica RH. Koristeći *Georeferencing* opciju, odabirom *Add Control Points*  označavaju se karakteristične točke na rasterskoj karti i spajaju se s tom istom karakterističnom točkom na vektorskoj karti (Slika 5-8)



Slika 5-8 Razvlačenje rasterske slike preko vektora na primjeru karte predneogenske podloge



Konačan rezultat je georeferencirana karta predneogenske podloge (Slika 5-9).



Slika 5-9 Georeferencirana karta predneogenske podloge (Cvetković i dr., 2019)

### 5.3 Tematsko modeliranje

Nakon pripreme svih ulaznih podataka, može se početi s obradom svih karata. Početni korak u izboru lokacije odlaganja visokoradioaktivnog otpada je odlučivanje potencijalno pogodnih područja s obzirom na geološku građu. Izdvojene su magmatske i metamorfne stijene koje se nalaze na području Republike Hrvatske:

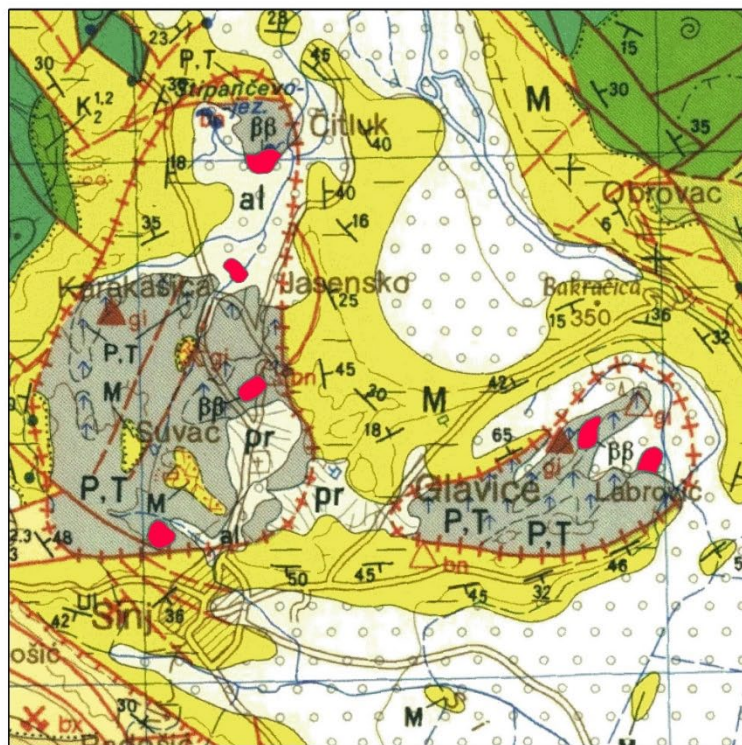
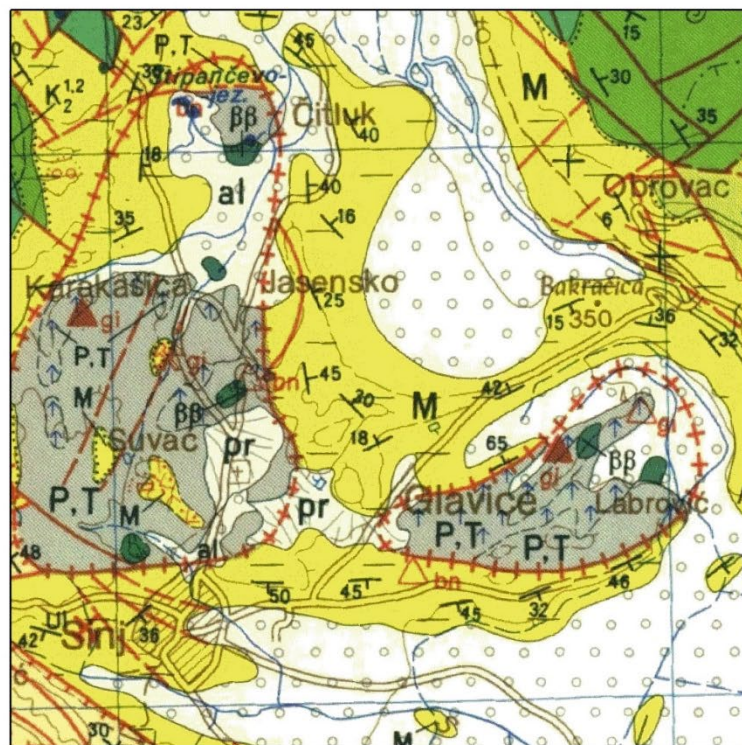
1. Albitski rioliti i andeziti
2. Amfiboliti i amfibolski škriljavci
3. Bazalti
4. Dijabazi i spiliti
5. Gabro
6. Graniti i gnajsovi
7. Keratofiri
8. Dijapiri

Prvi korak je pregled svih karata osnovne geološke karte u cilju izdvajanja pojava pogodnih stijena. U tumaču za kartu OGK100 se traže gore spomenute stijene na svakom od 75 listova.

Ukoliko se tražene stijene pojavljuju na nekom području/listu, ta lokacija se traži i na karti. Kada je približna lokacija pronađena, potreban je *Zoom In* na taj list unutar OGK100 u GIS-u sve do pronađenih tipova površinskih stijena. Postupak vektorizacije tražene stijene se pokreće pomoću *Editor Toolbar*-a odabirom opcije *Start Editing*. Unutar *Create Features* prozora pod *Construction Tools* odabirom opcije *Polygon*, pažljivim prelaskom preko odabranog tipa stijena se on označava, a mora se paziti da se uključi samo željeni tip stijena. Na primjeru Sinja, jedan od pogodnih tipova stijene su i spilitizirani dijabazi značeni na OGK100 kao:



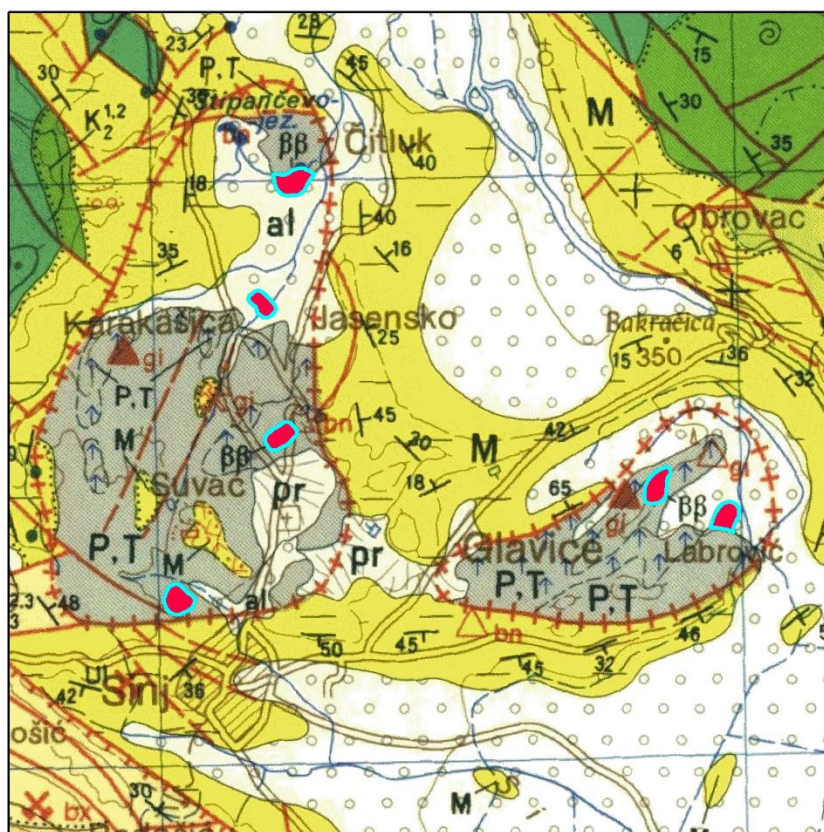
Isertavanjem pojavljivanja tog tipa stijene dobivaju se sva pojavljivanja tog tipa stijene na karti (Slika 5-10).



Slika 5-10 Crvenim poligonima označeni spilitizirani dijabazi označeni na OGK100 s  $\beta\beta$  na primjeru lista Sinja (Papeš i dr., 1982)



Otvaranjem atributne tablice, tim novostvorenim poligonima se pridodaju sljedeće opisne značajke (atributi, polja u atributnoj tablici): oznaka OGK lista na kojem se poligon nalazi, oznaka opisa stijene, a pomoću opcije *Calculate Geometry* se računa njihova površina izražena u km<sup>2</sup>. Svakom tipu stijene je pridodan jedan kôd kojim se grupiraju svi slični tipovi stijena koje su izdvojeni, npr. kôdom 4 su označena svaka pojavljivanja dijabaza i spilita (Slika 5-11).



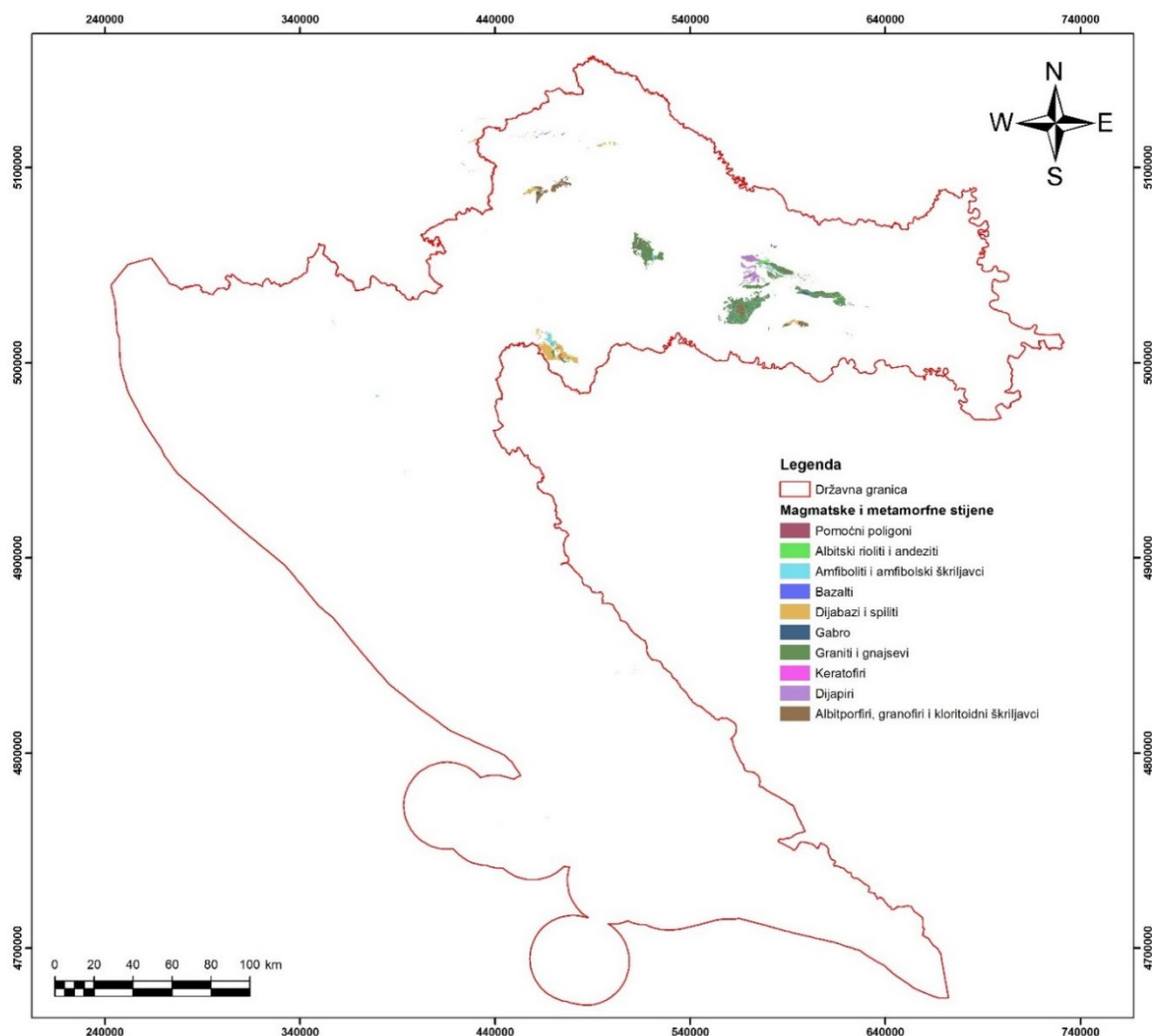
| FID | Shape * | Id | OGK_list | Naslage                | Area     | Kod |
|-----|---------|----|----------|------------------------|----------|-----|
| 948 | Polygon | 0  | Sinj     | Spilitizirani dijabazi | 0,049185 | 4   |
| 949 | Polygon | 0  | Sinj     | Spilitizirani dijabazi | 0,042751 | 4   |
| 950 | Polygon | 0  | Sinj     | Spilitizirani dijabazi | 0,033339 | 4   |
| 951 | Polygon | 0  | Sinj     | Spilitizirani dijabazi | 0,055569 | 4   |
| 952 | Polygon | 0  | Sinj     | Spilitizirani dijabazi | 0,04754  | 4   |
| 953 | Polygon | 0  | Sinj     | Spilitizirani dijabazi | 0,042283 | 4   |

Slika 5-11 Atributne informacije pomoću kojih pobliže definiramo vrstu i područje pojavljivanja na primjeru Sinja (Papeš i dr., 1982)

Na taj način, pregledom svih OGK100 listova, označavaju se sva područja na kojima se pojavljuju magmatske i metamorfne stijene pogodne za odlaganje radioaktivnog otpada. U pojedinim područjima se neke od pogodnih stijena nalaze označene zajedno sa stijenama koje nisu pogodne, npr. pojavljivanje i označavanje spilita zajedno s prioklastima i

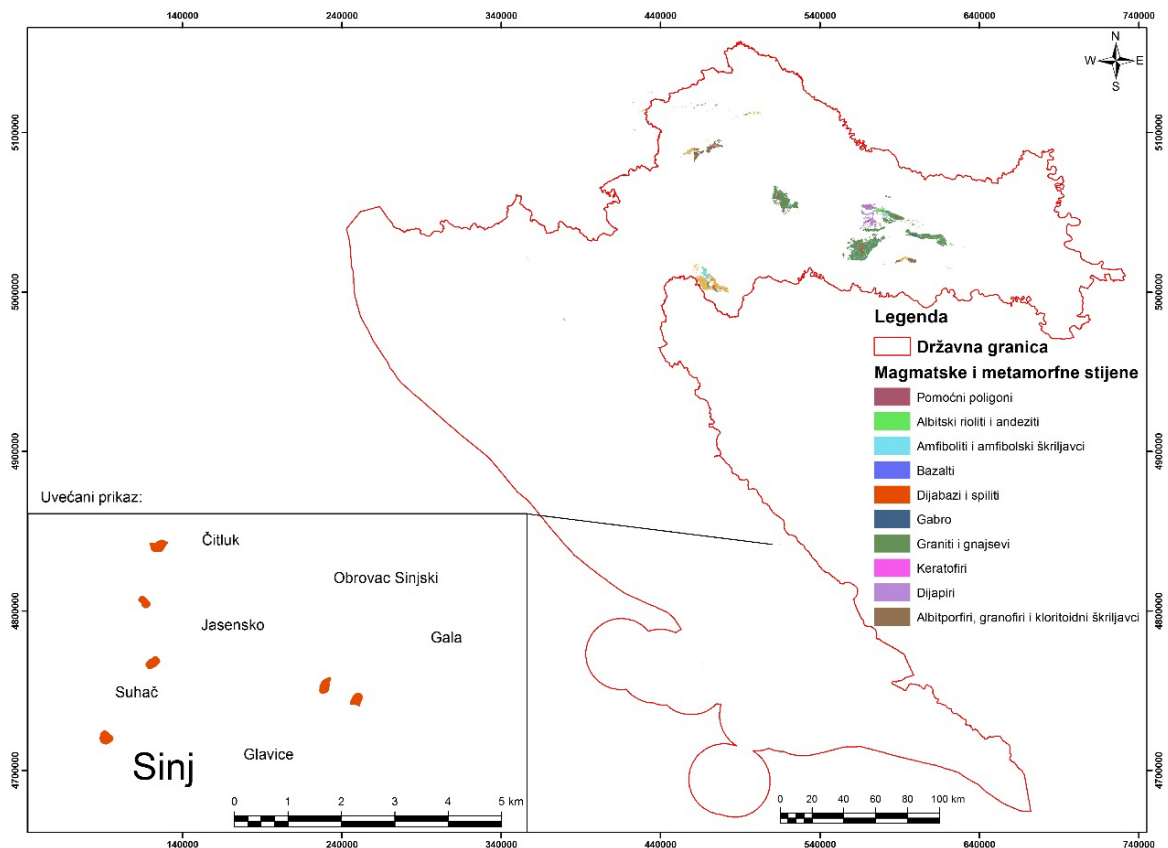


vulkanskim brečama na području OGK lista Bosanski Novi. Također, neka područja su označena s dvije različite povoljne stijene, npr. tinjčevi škriljci i gnajsovi, podređeno kvarciti, kvarcni i tinjčasto–kvarcni škriljci, također na području Bosanski Novi. Podijeljeni su s obzirom na prevladavajuće stijene u devet kategorija (Prilog 7). Tom podjelom se dobiva karta pogodnih stijena za odlaganje radioaktivnog otpada koja uključuje sve povoljne vrste magmatskih i metamorfnih stijena koje se nalaze na području RH (Slika 5-12).



Slika 5-12 Prikaz pogodnih magmatskih i metamorfnih stijena prema osnovnim geološkim kartama (OGK) u mjerilu 1:100 000 područja RH

Dio stijena u Dalmaciji, u području Sinja i Drniša, zbog svoje veličine nije vidljiv na karti cijele Hrvatske, no mogu se vidjeti na uvećanom prikazu na Slici 5-13.



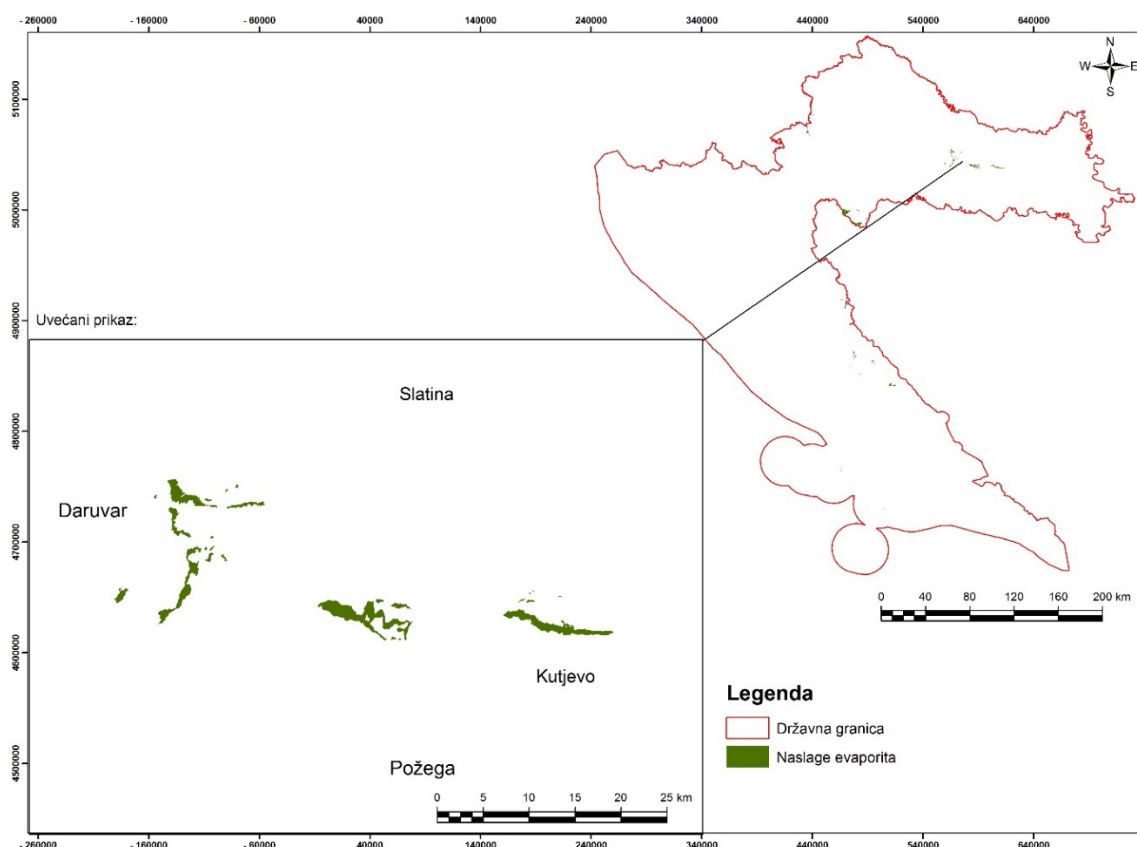
Slika 5-13 Prikaz pogodnih magmatskih i metamorfnih stijena prema osnovnim geološkim kartama (OGK) u mjerilu 1:100 000 područja RH s povećanim prikazom područja Sinja

Na nekim listovima na OGK100 se pojavljuju pogodne stijene, no ne nalaze se na površini, već samo na geološkom profilu. S obzirom na izgradnju dubokog geološkog odlagališta na dubini od minimalno 300m, to također predstavlja potencijalnu pogodnu lokaciju. Riječ je o sljedećim lokacijama i pripadajućim stijenama:

- List OGK100 Čakovec - metamorfiti podloge (u stupu i profilu) – gnajsovi, amfiboliti, filiti
- List OGK100 Đurđevac - škriljci (u stupu i profilu)
- List OGK100 Ivanić Grad - gnajsovi i graniti (samo u profilu)
- List OGK100 Donji Miholjac - gnajs i škriljci (u stupu i profilu)
- List OGK100 Kutina - gornja kreda: breče, vapnenci, pješčenjaci, i dijabazi (samo u profilu)
- List OGK100 Našice - gnajsovi metamorfnog kompleksa Motajice (samo na profilu) (senon)
- List OGK100 Osijek - granit-gnajs – na dubini, nema na karti

- List OGK100 Odžaci - dijabazi – samo na dubini; spiliti – samo na dubini

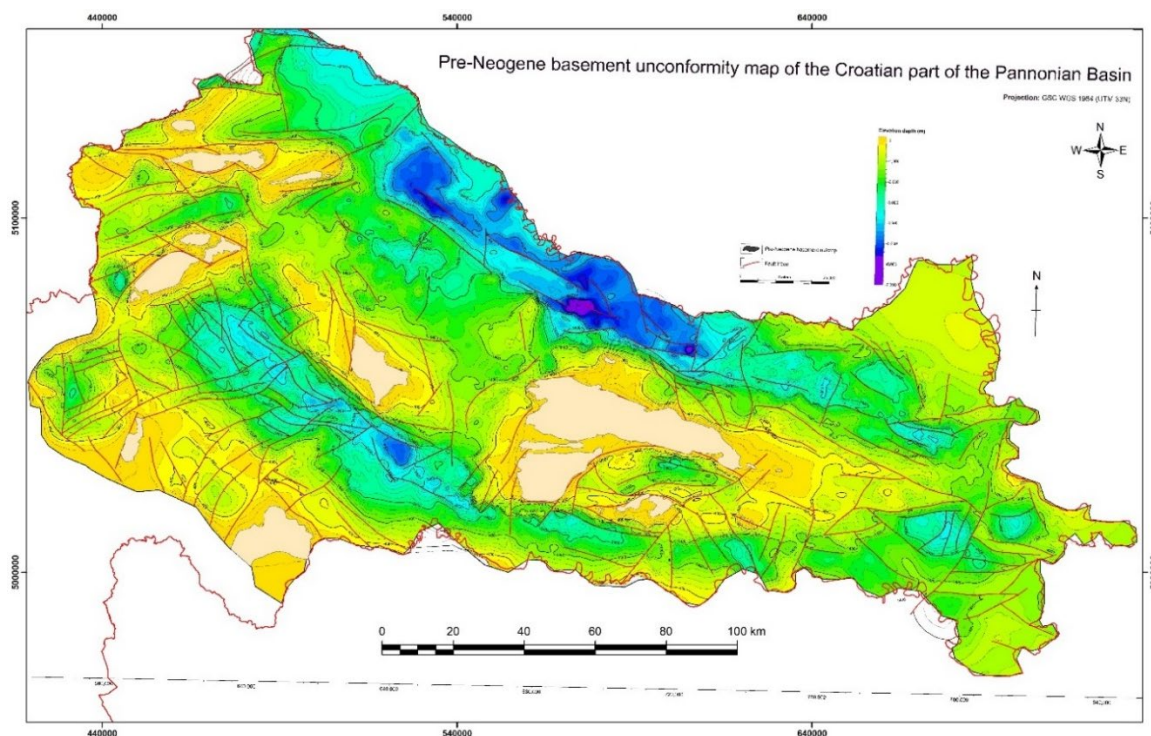
Pored magmatskih i metamorfnih stijena izdvojenih s OGK100, mogu se izdvojiti i pogodni evaporiti. Pojave i ležišta evaporita se nalaze u obliku naslaga anhidrita i gipsa, dolomita i vapnenaca, udruženih s klastitima i magmatitima, a nalaze se u Sinjskomu polju, Vrličkomu polju, Petrovu polju (Drniš), Kosovu polju (Knin), gornjem toku rijeke Zrmanje, sjeverno od Knina, te u dolini Srebrenice i Une u širem području Brotnje i Suvaje, Ličkoj Kaldri i dolini Butišnice (Gabrić i dr., 2020). Način izdvajanja naslaga evaporita je jednak prethodno opisanom načinu izdvajanja magmatskih i metamorfnih stijena, a krajnji rezultat je prikazan na Slici 5-14.



Slika 5-14 Pojavljivanje evaporita prema osnovnim geološkim kartama (OGK) u mjerilu 1:100 000 na području RH

Potencijalno pogodne lokacije s obzirom na geološku građu mogu se smatrati i lokacije u predneogenskoj podlozi panonskog dijela Hrvatske jer povrh predneogenske podloge najčešće slijedi klastičan slijed neogenskih i kvartarnih naslaga koje predstavljaju dobre

izolatorske stijene (Cvetković i dr., 2019). S georeferencirane karte predneogenske podloge područja Panonske Hrvatske izdvojena su označena područja temeljnog gorja i krovinskog mezozojskog kompleksa (Slika 5-15).

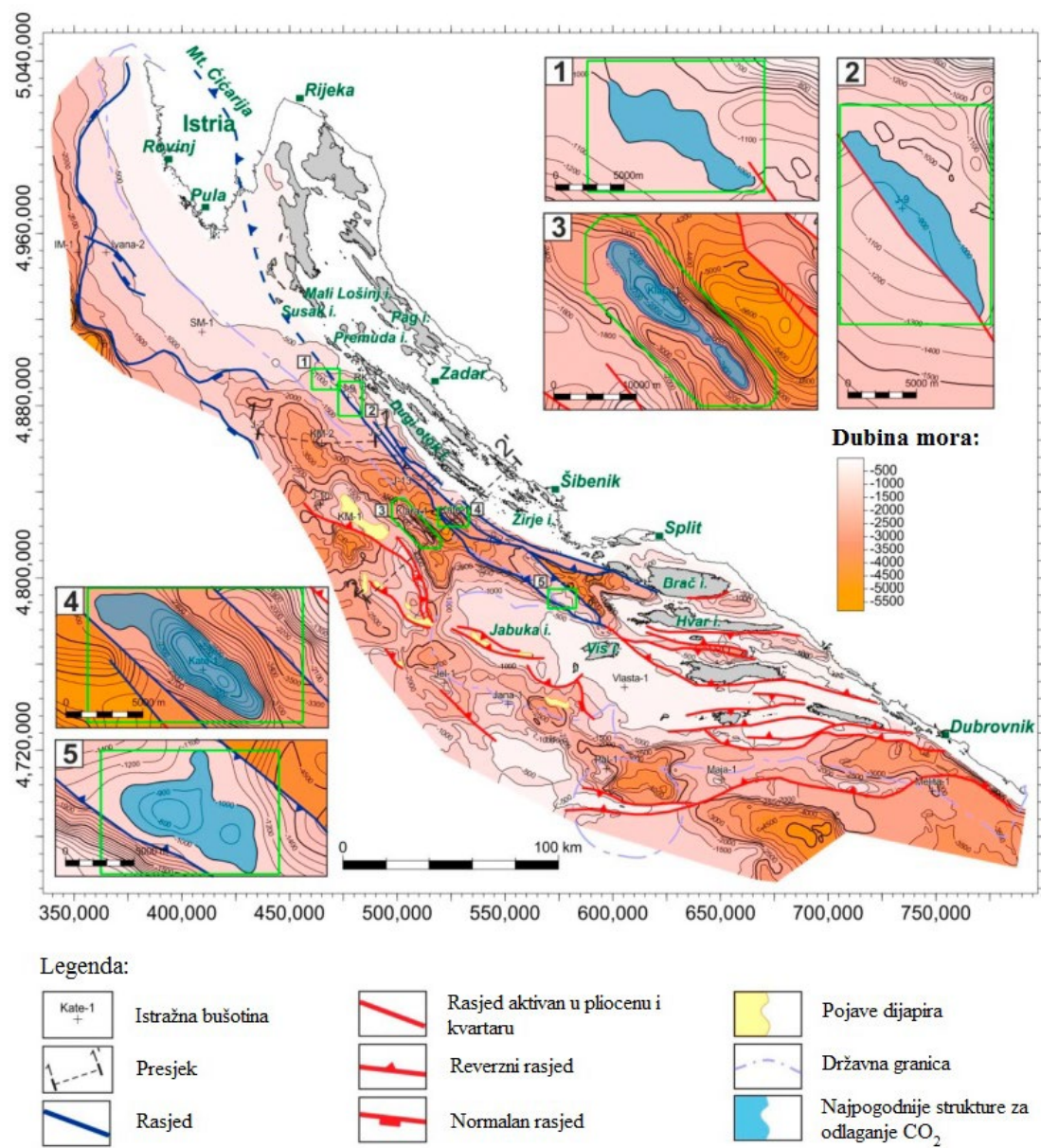


Slika 5-15 Karta predneogenske podloge s označenim temeljnim gorjem i krovinskim mezozojskim kompleksima pogodnih za odlaganje VRAO i/ili ING (prema Cvetković i dr., 2019)

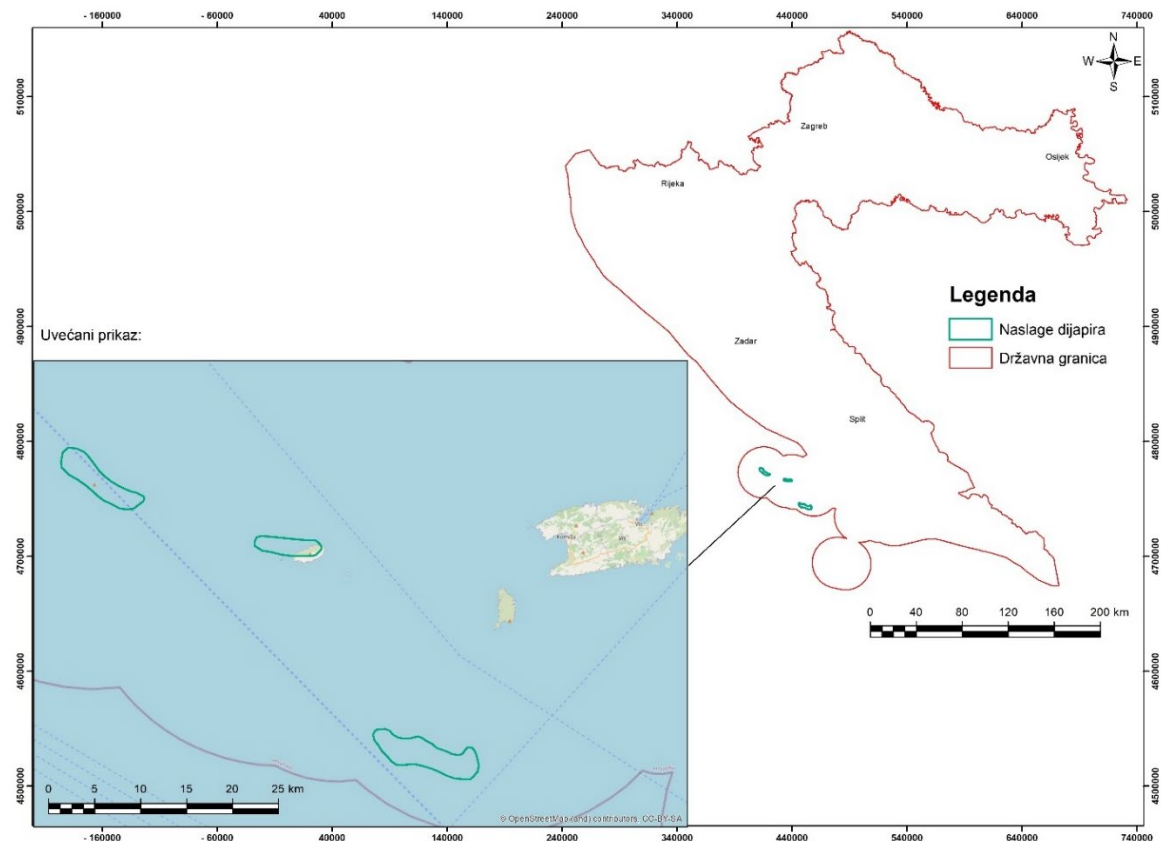
Stijene pogodne za odlaganje radioaktivnog otpada su i dijapiri<sup>17</sup>. Koristeći kartu s pojavama dijapira u RH (Slika 5-16), preuzetu iz Saftić i dr. (2019), koja je izrađena u svrhu istraživanja najpogodnijih geoloških struktura za odlaganje CO<sub>2</sub> u hrvatskom dijelu Jadranskog mora, mogu se izdvojiti pojave dijapira i vektorizirati ih u novi GIS sloj. Nalaze se na tri lokacije, sve tri smještene u Viškom arhipelagu (Slika 5-16).

<sup>17</sup> Dijapir - stijenski prodor koji, nakon proboja iz nižih razina, kupolasto zakrivljuje pokrovne naslage. Dijapiri unutar sedimenata, obično u jezgri, sadrže solne naslage ili glinene škriljevce (Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020d)





Slika 5-16 Strukturna karta gornjeg karbonatnog kompleksa (preuzeta iz Saftić i dr., 2019 i prilagođena na hrvatski jezik)



Slika 5-17 Karta pojavljivanja dijapira na području RH prema Saftić i dr. (2019)

Skup svih potencijalnih lokacija za odlaganje VRAO i ING na području Republike Hrvatske se dobije preklapanjem svih pogodnih područja, tj. svih slojeva koje uključuju magmatske i metamorfne stijene, naslage evaporita i dijapira te povoljnih stijena dobivenih iz predneogenske podloge, radi dobivanja mješovitog, zajedničkog sloja. Radi boljeg i jasnijeg prikaza, boje su promijenjene u odnosu na one korištene u pokaznim primjerima (Prilog 8).

## 6. ZAKLJUČAK

Problematika odlaganja radioaktivnog otpada, posebice visokoradioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva se javlja u svim državama koje koriste radioaktivne izvore. Neke države su napravile istraživanja pogodnih stijena, poput Njemačke i Finske koje imaju najrazrađenije programe, sve u skladu s općenitim smjernicama izdanih od strane Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA). Uspješno su spojene karte prijašnjih istraživanja, korištenjem napredne GIS tehnologije. GIS tehnologija omogućava spajanje, tj. povezivanje rasterskih slika s onim vektorskim, dajući im lokaciju na zemljinoj površini, ujedno naglašavajući važnost atributnih podataka pridodanih određenoj lokaciji, poput općine u kojoj se nalaze ili površine koju zauzimaju. Važnost GIS-a leži u činjenici da uspješno spaja velike količine podataka koje su bitne za rješavanje kompliciranih problema, poput izbora najpogodnije stijene, koji se temelji na težinskim kriterijima koji uključuju izbor najpogodnije geološke sredine (geološki kriterij), sigurnosnim i okolišnim zahtjevima potrebnim za izgradnju dubokog geološkog odlagališta, kriterij transporta i zaštite okoliša. Korištenjem GIS tehnologije, ulazni podatci (OGK100, tumač za OGK100, karta predneogenske podloge i karta pojavljivanja dijapira) su obrađeni, a korištenjem programa *ArcMap 10.1* su izdvojena geografska područja s pogodnom vrstom stijena za odlaganje radioaktivnog otpada na području Republike Hrvatske. Iz dobivenih podataka je vidljivo da se većina pogodnih stijena (stijena koje su površinom dovoljne veličine za prihvrat dubokog geološkog odlagališta) nalazi na području kontinentalne Hrvatske, na četiri lokacije: na području Zrinske i Moslavačke gore, Medvednice te na području Papuka, Psunja i Dilja. Zbog zaštićenosti nekih lokaliteta, kao i zbog blizine granice sa susjednom Bosnom i Hercegovinom, daljnja analiza bi se trebala temeljiti na multikriterijskoj analizi težinskih faktora svake pojedine lokacije.

## 7. LITERATURA

- BENAC, Č., 2016. Rječnik pojmova u općoj i primijenjenog geologiji. Rijeka: Građevinski fakultet u Rijeci.
- BESEDNIK, M., 2018. Nastanak i zbrinjavanje radioaktivnog otpada. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu.
- CVETKOVIĆ, M., MATOŠ, B., RUKAVINA, D. & KOLENKOVIĆ, I., 2019. Geoenergy potential of the Croatian part of Pannonian Basin: insights from the reconstruction of the pre-Neogene basement unconformity. *Journal of Maps*, 15/2, str. 651-661.
- ČERŠKOV KLIKA, M., 1998. Odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada; zračenje i javnost. Zagreb: Agencija za posebni otpad.
- FLORINSKY, I. V., 2016. Lineaments and Faults. Puščino, Rusija: The Keldysh Institute of Applied Mathematics.
- GRGURIĆ, D., 2019. Mapiranje eksploatacijskih polja mineralnih sirovina u hrvatskoj u GIS tehnologiji. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- HALAMIĆ, J., 2013. Geološke karte: jučer, danas, sutra. Zagreb: Hrvatski geološki institut.
- IAEA, 1994. *Siting of Geological Disposal Facilities*. Beč, Austrija: IAEA Safety Guides.
- IAEA, 2009. *Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability*. Beč, Austrija: IAEA Safety Standards.
- IAEA, 2013. *Characterization of Swelling Clays as Components of the Engineered Barrier System for Geological Repositories*. Beč, Austrija: IAEA Safety Standards.
- IAEA, 2014. *International Safeguards in the Design of Nuclear Reactors*. Beč, Austrija: IAEA Safety Standards.
- IAEA, 2018. *Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management*. Beč, Austrija: IAEA Safety Standards.
- KOROLIJA, B., ŽIVALJEVIĆ, T., ŠIMUNIĆ, A., 1979. Osnovna geološka karta 1:100.000 list Slunj L33-104. Zagreb: Geološki zavod Zagreb.
- KOSKINEN, K., 2014. *Effects of Cementitious Leachates on the EBS*. Eurajoki, Finska: Posiva Oy.
- LEOPOLD, R., 2015. Odabir lokacije odlagališta radioaktivnog otpada. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- MALCZEWSKI, J. & RINNER, C., 2015. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Ontario, Kanada: Springer.



- MARTINEZ, S., ALAR, V., BLAGUS BARTOLEC, G., NAHOD, B., REICHENBACH, D., SERDAR, M., 2015. Hrvatsko nazivlje korozije i zaštite materijala. Zagreb: Institut za hrvatski jezik i jezikoslovlje.
- MCEWEN, T., MATTILA, J., KÄPYAHO, A., ARO, S., KOSUNEN, P., PERE, T. & HELLÄ, P., 2012. Rock Suitability Classification - RSC 2012. Eurajoki, Finska: Posiva Oy.
- MISKIEWICZ, A., OLSZEWSKA, W., ZAKRZEWSKA-KOŁTUNIEWICZ, G., LANKOF, L. & PAJAK, L., 2015. Multibarrier system preventing migration of radionuclides from radioactive waste repository. Nukleonika.
- PAPEŠ, J., MARINKOVIĆ, R., RAIĆ, V., 1982. Osnovna geološka karta 1:100.000 list Sinj K33-10. Sarajevo: Institut za geologiju Sarajevo.
- PERIĆ, M., 2007. Englesko-hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina. Zagreb: INA industrija nafte d.d..
- PERKOVIĆ, D., 2018. Geoinformatika: interna skripta. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- PERKOVIĆ, D., PERKOVIĆ, A. & AVDIĆ, A., 2012. Otvoreni sustav potpore prostornom odlučivanju na primjeru odabira lokacije odlagališta radioaktivnog otpada. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, vol. 24, str. 95-100.
- PIKIJA, M., ŠIKIĆ, K., TRIFUNOVIĆ, S., 2015. Osnovna geološka karta 1:100.000 list Mohač L34-74. Zagreb: Hrvatski geološki institut.
- POLŠAK, A., JURIŠA, M., ŠPARICA, M., ŠIMUNIĆ, A. (1976). Osnovna geološka karta 1:100.000 list Bihać L33-116. Zagreb: Institut za geološka istraživanja Zagreb.
- POSIVA OY, 2012. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis. Eurajoki, Finska: Posiva Oy.
- SAFTIĆ, B., KOLENKOVIĆ MOČILAC, I., CVETKOVIĆ, M., VULIN, D., VELIĆ, J., TOMLJENOVIĆ, B., 2019. Potential for the Geological Storage of CO<sub>2</sub> in the Croatian Part of the Adriatic Offshore. Minerals. 9/577.
- SLUNJSKI, L., 2018. Metodologija uzorkovanja površinskih i podzemnih voda. Varaždin: Geotehnički fakultet.
- SOBOTA, I., 2016. Zaštita okoliša u rudarstvu: interna skripta. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- ŠIMUNIĆ, A., HEĆIMOVIĆ, I., AVANIĆ, R., 2013. Osnovna geološka karta 1:100.000 list Koprivnica L33-70. Zagreb: Hrvatski geološki institut.

- ŠUŠNJAR, M., BUKOVAC, J., NIKLER, L., CRNOLATEC, I., MILAN, A., ŠIKIĆ, D., GRIMANI, I., VULIĆ, Ž., BLAŠKOVIĆ, I., 1970. Osnovna geološka karta 1:100.000 list Crikvenica L33-102. Zagreb: Institut za geološka istraživanja Zagreb.
- THOMSEN, L. M., BAARTMAN, J. E. M., BARNEVELD, R. J., STARKLOFF, T. & STOLT, J., 2015. Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion. SOIL, 1/2015, str. 399-410.
- UROIĆ, G., 2019. Termičko-hidro-mehanički efekti na odlagalištu istrošenog nuklearnog goriva. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- VEINOVIĆ, Ž., 2018. Gospodarenje otpadom: interna skripta. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- VEINOVIĆ, Ž., KOVAČEVIĆ ZELIĆ, B. & DMITROVIĆ, D., 2015. Deep geological disposal of spent nuclear fuel and high-level waste : Current state and future challenges. IGI Global, 1/2015, str. 367-399.
- VELIĆ, I., BAHUN, S., SOKAČ, B., GALOVIĆ, I., 1974. Osnovna geološka karta 1:100.000 list Otočac L33-115. Zagreb: Institut za geološka istraživanja Zagreb.
- VELIĆ, I., SOKAČ, B., 1981. Osnovna geološka karta 1:100.000 list Ogulin L33-103. Zagreb: Geološki zavod Zagreb.

## INTERNET IZVORI

BRITISH GLASS, 2019. Nuclear sludge turned into glass by Glass Technology Services. URL:

<https://www.britglass.org.uk/news-comment/nuclear-sludge-turned-glass-glass-technology-services>. (1.9.2020.)

DRŽAVNI ZAVOD ZA RADIOLOŠKU I NUKLEARNU SIGURNOST, 2018. Pravilnik o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora NN 12/18. URL:

[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018\\_02\\_12\\_271.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_02_12_271.html). (21.8.2020.)

FORO NUCLEAR, 2020. Nuclear Fuel Support Material. URL:

<https://www.foronuclear.org/en/press-room/support-material/nuclear-fuel>

IEA, 2020. Global Energy Review 2020. URL:

<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/nuclear>. (1.9.2020.)

<sup>a</sup>LEKSIKOGRAFSKI ZAVOD MIROSLAV KRLEŽA, 2020. Hrvatska enciklopedija.

URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51474> (14.8.2020.)

<sup>b</sup>LEKSIKOGRAFSKI ZAVOD MIROSLAV KRLEŽA, 2020. Hrvatska enciklopedija.

URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=44387> (14.8.2020.)

<sup>c</sup>LEKSIKOGRAFSKI ZAVOD MIROSLAV KRLEŽA, 2020. Hrvatska enciklopedija.

URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51471> (14.8.2020.)

<sup>d</sup>LEKSIKOGRAFSKI ZAVOD MIROSLAV KRLEŽA, 2020. Hrvatska enciklopedija.

URL: <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=15111> (14.8.2020.)

NWMO, 2015. Multiple-Barrier System. URL:

<https://www.nwmo.ca/en/A-Safe-Approach/Facilities/Deep-Geological-Repository/Multiple-Barrier-System>. (1.9.2020.)

SABOR RH, 1998. Zakon o odgovornosti za nuklearnu štetu NN143/98. URL:

[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/1998\\_10\\_143\\_1760.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/1998_10_143_1760.html) (21.8.2020.)

SABOR RH, 2014. Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva NN 125/2014. URL:

[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014\\_10\\_125\\_2382.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_10_125_2382.html) (29.8.2020.)

VLADA RH, 1992. Zaključak o utvrđivanju kriterija za izbor lokacija za termoelektrane i nuklearne objekte NN 78/92. URL:

[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/1992\\_11\\_78\\_2042.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/1992_11_78_2042.html) (29.8.2020.)

## **PRILOZI**

Prilog 1 Ocjena prijenosa radioaktivnih tvari kretanje podzemne vode u IPP-u

| Kriterijsko svojstvo         | Kriterijski pokazatelj                                                                                      | Vrijednosne grupe |                         |                  |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------|------------------|
|                              |                                                                                                             | Povoljno          | Uvjetno povoljno        | Nepovoljno       |
| Protok podzemne vode         | Udaljenost i brzina podzemne vode [mm/a]                                                                    | < 0.1             | 0.1 – 1                 | > 1              |
| Opskrba podzemnom vodom      | Karakteristična propusnost stijena [m/s]                                                                    | < $10^{-12}$      | $10^{-12}$ – $10^{-10}$ | > $10^{-10}$ *   |
| Brzina difuzije              | Karakteristični koeficijent efektivne difuzije stijene za tritiranu vodu (HTO) pri 25°C [m <sup>2</sup> /s] | < $10^{-11}$      | $10^{-11}$ – $10^{-10}$ | > $10^{-10}$     |
| Brzina difuzije kroz glinjak | Apsolutna poroznost                                                                                         | < 20 %            | 20% – 40%               | > 40%            |
|                              | Stupanj konsolidacije                                                                                       | Glinjak           | Čvrsta glina            | Polučvrsta glina |

\*Za sustave skladišta koji se temelje na geološkim barijerama, mjesta s permeabilnosti većom od  $10^{-10}$  m/s moraju biti isključena iz postupka kao neprikladna.

Prilog 2 Ocjena konfiguracije tijela stijene

| Kriterijsko svojstvo                      | Kriterijski pokazatelj                                                      | Vrijednosne grupe                       |                                                                |                                               |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                           |                                                                             | Povoljno                                | Uvjetno povoljno                                               | Nepovoljno                                    |
| Djelotvornost barijere                    | Debljina barijere [m]                                                       | > 150                                   | 100 – 150                                                      | 50 – 100                                      |
|                                           | Stupanj zatvorenosti skladišnog prostora IPP-om                             | Potpuno                                 | Nepotpun, postojanje manjih nedostataka u nekritičnom položaju | Nepotpun; veći nedostaci u kritičnom položaju |
| Otpornost i sigurnosne rezerve            | Dubina gornje granice IPP-a [m ispod površine terena]                       | > 500                                   | 300 – 500                                                      | –                                             |
| Volumen koji IPP zauzima                  | Proširivanje prostora (višestruko veće od minimalnog zahtjeva za prostorom) | >> 2 puta                               | oko 2 puta                                                     | << 2 puta                                     |
| Spajanje vodovodnih slojeva u neposrednoj | Prisutnost slojeva stijena s hidrauličkim svojstvima i                      | Ne postoje vodonosnici kao potencijalni | –                                                              | Vodonosni sloj u blizini IPP-a                |

|                                                                       |                                                                                                    |                                               |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--|--|
| blizini IPP-a na području koje uzrokuje visoki hidraulički potencijal | hidrauličkim potencijalom, koje omogućavaju propusnost ili jačanje kretanja podzemnih voda u IPP-u | izvori pitke vode u neposrednoj blizini IPP-a |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--|--|

### Prilog 3 Ocjena procjene prostorne karakterizacije

| Kriterijsko svojstvo                                                                                              | Kriterijski pokazatelj                                                  | Vrijednosne grupe                                                                         |                                                                                                              |                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                   |                                                                         | Povoljno                                                                                  | Uvjetno povoljno                                                                                             | Nepovoljno                                                  |
| Određivanje vrsta stijena i njihovih karakteristična svojstva u predviđenom području, posebno u predloženom IPP-u | Raspon odstupanja svojstva stijena u predviđenom području               | Nizak                                                                                     | Jasan, poznat ili pouzdano utvrđen                                                                           | Značajan i/ili ga nije moguće pouzdano utvrditi             |
|                                                                                                                   | Prostorna rasprostranjenost stijena i njihovih svojstva                 | Jednolika                                                                                 | Neprekidna, poznata prostorna promjena                                                                       | Diskontinuirane, nedovoljno predvidljive prostorne promjene |
|                                                                                                                   | Opseg tektonske disturbancije <sup>18</sup> izolirane geološke jedinice | Uglavnom neporemećeni (poremećaji na udaljenosti > 3km od ruba IPP-a), ravno skladištenje | Malo uznemireni (veći poremećaji na udaljenosti od 100m do 3km od ruba IPP-a), efekti fleksure <sup>19</sup> | Poremećen (usko uslojen, udaljenost < 100 m), izboran       |
| Prenosivost svojstva u                                                                                            | Facijes <sup>20</sup>                                                   | Regionalno ujednačeni facijesi                                                            | Facijesi se izmjenjuju prema                                                                                 | Facijesi se izmjenjuju prema                                |

<sup>18</sup> Tektonska disturbancija – potpuni ili djelomični poremećaj nekog izoliranog radioaktivnog sustava tektonskim aktivnostima, čija je posljedica gubitak (smanjenje sadržaja) ili dobitak (povećanje sadržaja) radioaktivnih ili radiogenih izotopa i promjena vrijednosti radiometrijske (radiološke) starosti izmjerene po tom poremećenom sustavu (Perić, 2007).

<sup>19</sup> Fleksura – asimetrična ili koljениčasta bora (Benac, 2016)

<sup>20</sup> Facijes – izgled, vanjšina i karakteristike litografske jedinice koji obično odražavaju uvjete njena postanka, osobito diferencijaciju jedinice od susjednih ili povezanih jedinica (Perić, 2007)

|                      |  |  |                     |                       |
|----------------------|--|--|---------------------|-----------------------|
| predviđenom<br>IPP-u |  |  | poznatom<br>obrascu | nepoznatom<br>obrascu |
|----------------------|--|--|---------------------|-----------------------|

Prilog 4 Ocjena tendencije stvaranja puteva fluidima

| Kriterijsko<br>svojstvo                                     | Kriterijski pokazatelj                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Vrijednosne grupe                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Povoljno                                                                                                                                                                                                            | Uvjetno<br>povoljno                                                                                                                                   | Nepovoljno                                                                                                                      |
| Promjenjivost<br>postojeće<br>propusnosti<br>stijenske mase | Omjer reprezentativne<br>propusnosti<br>planine/stijena                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | < 10                                                                                                                                                                                                                | 10 – 100                                                                                                                                              | > 100                                                                                                                           |
|                                                             | Iskustvo učinkovitosti<br>stijenskih formacija u<br>sljedećim slučajevima:<br>– nedavno je<br>postojala stijena<br>topiva u vodi<br>– postojanje<br>vodotopivih stijena<br>u podlozi<br>– inkluzije fosilnih<br>tekućina<br>– postojanje ležišta<br>tekućih ili<br>plinovitih<br>ugljikovodika<br>– korištenje<br>hidrogeološkog<br>zaštitnog sloja u<br>hodnicima za<br>oporabu<br>– održavanje funkcije<br>brtvljenja čak i pod<br>dinamičkim<br>opterećenjem<br>– korištenje šupljina<br>za skladištenje<br>plinovitih i tekućih<br>medija | vrsta stijena<br>identificirana<br>je izravno ili<br>neizravno iz<br>jednog ili više<br>područja<br>iskustva kao<br>blago<br>propusna do<br>nepropusna,<br>čak i pod<br>geogenim ili<br>tehnološkim<br>opterećenjem | Zbog<br>nedostatka<br>iskustva, vrsta<br>stijene se ne<br>može izravno<br>ili neizravno<br>okarakterizirati<br>kao blago<br>propusna do<br>nepropusna | Vrsta stijene<br>je<br>identificiran<br>a izravno ili<br>neizravno,<br>na temelju<br>iskustva,<br>kao<br>nedovoljno<br>propusna |
|                                                             | Duktilnost stijene<br>(budući da nema<br>definiranih ograničenja<br>deformacije stijene u<br>pogledu njene<br>duktilnosti ili krtosti,<br>ovaj se kriterij koristi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Duktilna/plas<br>tično-<br>viskozna                                                                                                                                                                                 | Slabo izražena<br>krto-duktilnost<br>do<br>elastovisokopl<br>astičnost                                                                                | Krto,<br>linearno-<br>elastično                                                                                                 |

|                                                                                                 |                                                          |                                                                                                                        |                                                                                                                         |                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                 | samo pri uspoređivanju lokacija)                         |                                                                                                                        |                                                                                                                         |                                                                                                                                                                         |
| Zacjeljivanje pukotina                                                                          | Smanjenje sekundarne propusnosti zacjeljivanjem pukotina | Pukotina se potpuno zatvara zbog ponašanja duktilnog materijala, pri čemu nadoknađuje hrapavost površine <sup>21</sup> | Pukotina se zacjeljuje mehaničkim smanjenjem širine pukotina zbog sekundarnog mehanizma, na primjer deformacijom izvora | Pukotina je zatvorena samo u ograničenoj mjeri (na primjer u slučaju krto g ponašanja materijala, hrapavosti površine)                                                  |
|                                                                                                 | Smanjenje mehaničkih svojstava zacjeljivanjem pukotina   | Zacjeljivanje pukotina geokemijskim procesom vezivanja na površini pukotine                                            | –                                                                                                                       | Zacjeljivanje pukotina samo zahvaljujući geogenoj opskrbi i kristalizacijom sekundarnih minerala (mineralizirana voda u porama i pukotinama, sekundarna mineralizacija) |
| Sažetak procjene tendencije stvaranja puteva fluidima na temelju procjene pojedinih pokazatelja |                                                          | Ocjena je uglavnom "povoljna": nema sklonosti stvaranju fluidnih puteva                                                | Procjena pretežno "uvjetno povoljna": mala tendencija stvaranja trajne pokretljivosti puteva fluida                     | Procjena pretežno "manje povoljna": treba očekivati stvaranje trajnih puteva sekundarne fluidnosti                                                                      |

## Prilog 5 Ocjena zadržavanja retencije u IPP-u

<sup>21</sup> Hrapavost površine tla - topografska nepravilnost površine tla, uzrokovana čimbenicima poput teksture tla, veličine agregata ili fragmenata stijena, vegetacije i upotrebe zemljine površine. Hrapavost tla utječe na površinsko skladištenje, infiltraciju fluida u podzemlje, nadzemni tok i eroziju tla (Thomsen i dr., 2015)



| Kriterijsko svojstvo                | Kriterijski pokazatelj                                                                            | Vrijednosne grupe                                                                             |                                                       |            |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------|
|                                     |                                                                                                   | Povoljno                                                                                      | Uvjetno povoljno                                      | Nepovoljno |
| Sorpcijski kapacitet stijena IPP-aa | K <sub>d</sub> vrijednost za dugoročno relevantne radionuklide $\geq 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$ | Uranij, protaktinij, torij, plutonij, neptunij, cirkonij, tehnecij, paladij, jod, cezij, klor | Uranij, plutonij, neptunij, cirkonij, tehnecij, cezij | -          |

Prilog 6 Ocjena zaštite IPP-a od prekomjernog opterećenja krovinom

| Kriterijsko svojstvo                                                                          | Kriterijski pokazatelj                                                                                                                                  | Vrijednosne grupe                                                                           |                                                                                                                             |                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                               |                                                                                                                                                         | Povoljno                                                                                    | Uvjetno povoljno                                                                                                            | Nepovoljno                                                                           |
| Zaštita IPP-a od erozije, sufozije <sup>22</sup> i njihovih posljedica (posebno dekompakcije) | Osiguravanje IPP-a stijenama koje produljuju vrijeme prodiranja ili potpuno zaustavljaju prodor podzemne vode povoljnom raspodjelom i debljinom stijena | Potpuna pokrivenost, raspodjela stijena koje inhibiraju podzemnu vodu u otkrivci            | Opsežna, ali nepotpuna pokrivenost ili opsežna, ali nepotpuna distribucija stijena koje inhibiraju podzemnu vodu u otkrivci | Nedostatak pokrivenosti, nedostatak stijena koje inhibiraju podzemne vode u otkrivci |
|                                                                                               | Rasprostranjeno st i debljina sloja stijena koje sprečavaju eroziju u otkrivci IPP-a                                                                    | Potpuna pokrivenost, široka zatvorena raspodjela stijena koje inhibiraju eroziju u otkrivci | Opsežna, ali nepotpuna pokrivenost ili opsežna, ali nepotpuna distribucija stijena otpornih na eroziju u otkrivci           | Nedostatak pokrivenosti, nedostatak stijena koje inhibiraju eroziju u otkrivci       |
|                                                                                               | Strukturne komplikacije (poremećaji, postojanje krijeste grebena <sup>23</sup> , krških struktura) u otkrivci, koje bi mogle rezultirati                | Krovina neporemećene strukture                                                              | Postojanje strukturalnih komplikacija, ali bez vidljivog hidrauličkog utjecaja (npr. zacjeljivanje pukotina)                | Strukturne komplikacije s potencijalnim hidrauličkim utjecajem                       |

<sup>22</sup> Sufozija – proces podzemne erozije sitnozrnastih sedimenata, oblik filtracijskog razaranja tla pri kojem se odnose sitne čestice iz tla pod utjecajem toka podzemne vode (Benac, 2016)

<sup>23</sup> Krijesta grebena – najviša točka ili linija od koje se padine spuštaju u suprotnim smjerovima, najviša točka brijega ili planine ili najviša linija ili najviši hrbat brežuljka ili planinskog lanca (Perić, 2007)

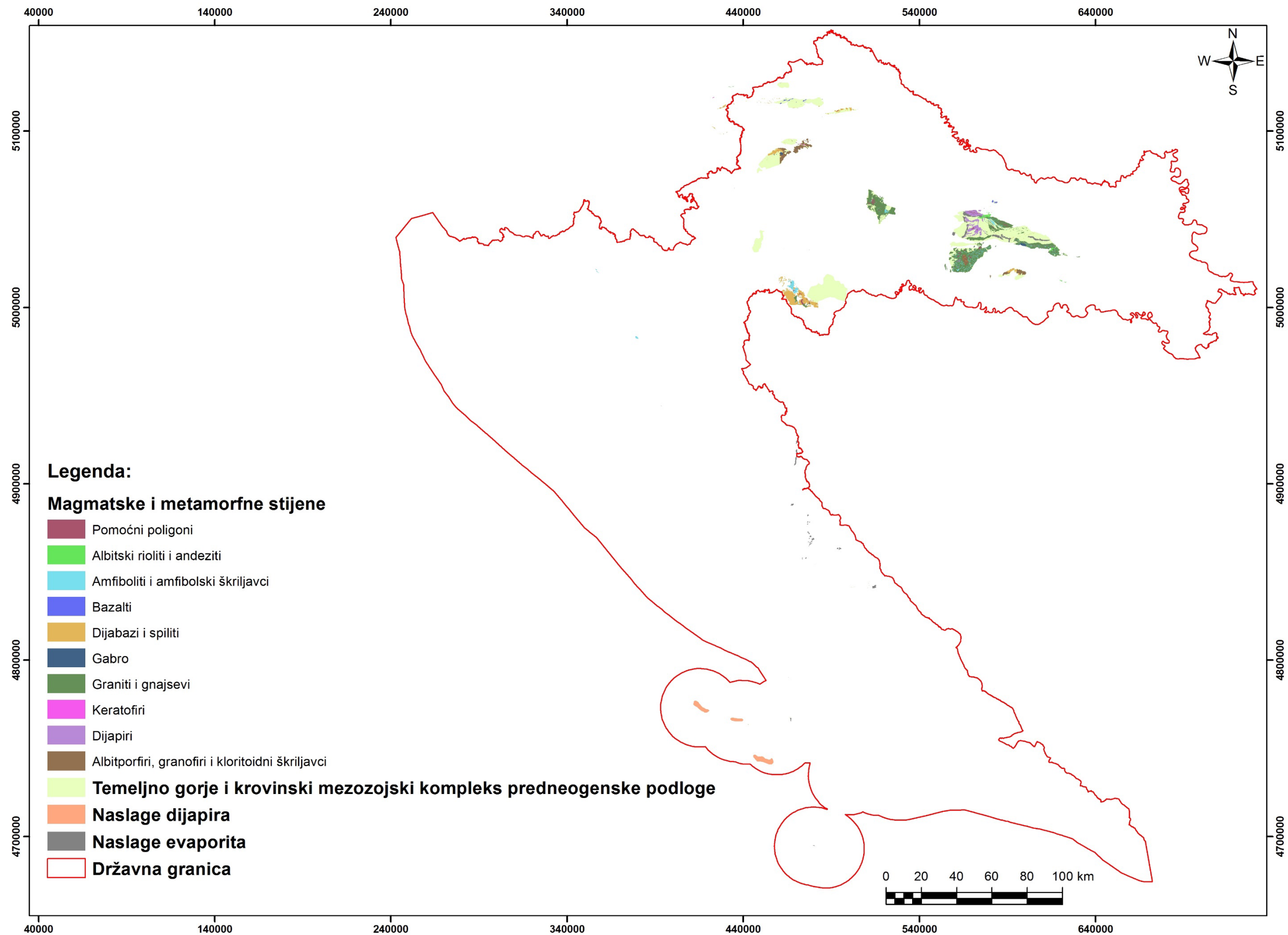
|  |                                                                                        |  |  |  |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
|  | subrozivnim <sup>24</sup> ,<br>hidrauličkim ili<br>mehaničkim<br>oštećenjima IPP-<br>a |  |  |  |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|

Prilog 7 Kategorije magmatskih i metamorfnih stijena na području RH

| Kod | Naziv kategorije                                 | Stijene koje pripadaju toj kategoriji                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0   | Pomoćni poligoni                                 | Poligoni koji nisu dio traženih tipova stijena, ali su izrađeni radi lakšeg snalaženja i iscrtavanja                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 1   | Albitski rioliti i andeziti                      | Andezit; dacito-andezit; albitski rioliti; porfirni albitni riolit i metaandezit                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 2   | Amfiboliti i amfibolski škriljavci               | Amfiboliti i amfibolitski/amfibolni škriljavci; amfibolitske stijene; diopsid-amfibolitski škriljavci; amfibolski porfirit; masivni i škriljavi, amfibolski škriljavci (pretežno ortoamfiboliti)                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 3   | Bazalti                                          | Bazalti i andezit bazalti                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 4   | Dijabazi i spiliti                               | Spilitizirani dijabaz i spilitizirani dijabazni tuf; bazični eruptivi (dijabazi, spilitizirani dijabazi, spiliti); dijabazi; spiliti, spilit bazalt i tuf; spiliti, prioklasti, vulkanske breče; pješčenjaci, šejlovi, rožnjaci, sitnozrnati vapnenci, silificirani sedimenti, spiliti, dijabazi, rijetko keratofiri (prevladavaju sedimenti); kvarcdijabazi; ortometamorfiti: zeleni škriljci, metamorfozirani gabri, dijabazi i doleriti                      |
| 5   | Gabro                                            | Gabri; amfibolitski gabro; metamorfizirani dijabazi i gabri; metagabri                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 6   | Graniti i gnajsovi                               | Moslavački graniti i grandioriti; leukokratni žilni graniti; gnajsovi s kordieritom; granat-staurolitski gnajsovi (staurolit-granatski gnajsovi); graniti Omanovca; biotit-muskovitski gnajsovi; granitoidi; tinjčevi škriljci i gnajsovi, podređeno kvarciti, kvarcni i tinjčasto - kvarcni škriljci (srednji stupanj metamorfizma); granat-staurolitski gnajsovi/gnajsovi, kvarc-klorit-albitski škriljavci; ortognajsovi; paragnajsovi, muskovit – biotitski |
| 7   | Keratofiri                                       | Kvarcdioriti, dioriti, kvarckeratofiri; keratofiri, spiliti – keratofiri                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 8   | Dijapiri                                         | Dijapiri                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 9   | Albitporfiri, granofiri i kloritoidni škriljavci | Albitporfiri; mramorni i kalcit-kvarc-sericit-kloritski škriljavci, filiti, šejlovi, slejtovi i siliti; albit-kvarc-klorit-sericit-kalcitni škriljavci, kvarciti, mramori i dr; tinjčevi škriljci i gnajsovi, podređeno kvarciti, kvarcni i tinjčasto - kvarcni                                                                                                                                                                                                 |

<sup>24</sup> Subrozija – otapanje slojeva soli ili gipsa u podzemnim vodama

|  |  |                                                                                                                                                                                                            |
|--|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | škriljci (srednji stupanj metamorfizma); mramori, mramorni škriljci, kvarc-sericitski i kvarc-kloritski škriljci/mramorni i kalcit-kvarc-sericit-kloritski škriljavci, filiti, šejlovi, slejtovi i siltiti |
|--|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



Prilog 8 Skup svih pogodnih područja za odlaganje VRAO i ING na području RH