Odabir lokacije odlagališta radioaktivnog otpada

Leopold, Roman

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:169:415773

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

ODABIR LOKACIJE ODLAGALIŠTA RADIOAKTIVNOG OTPADA

Diplomski rad

Roman Leopold

R 74

Zagreb, 2015.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

ODABIR LOKACIJE ODLAGALIŠTA RADIOAKTIVNOG OTPADA

ROMAN LEOPOLD

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

Sažetak

U diplomskom radu opisane su vrste radioaktivnog otpada i načini njegovog odlaganja. Navedene su vrste i količine radioaktivnog otpada u Hrvatskoj te dva predložena koncepta odlaganja za nisko i srednje radioaktivni otpad. Prikazan je proces odabira lokacije, s naglaskom na kriterijima za odabir lokacije za nisko i srednje radioaktivni otpad. Objašnjena je općenita primjena GIS-a pri odabiru lokacije kao i konkretan primjer korištenja GIS tehnologije pri odabiru lokacije u Hrvatskoj.

Ključne riječi: radioaktivni otpad, izbor lokacije, GIS, potencijalno područje

Diplomski rad sadrži: 58 stranica, 40 slika i 30 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Doc. Dr. sc. Želimir Veinović
Pomoć pri izradi: Doc. Dr. sc. Dario Perković

Ocjenjivači: Doc. Dr. sc. Želimir Veinović
Doc. Dr. sc. Dario Perković
Doc. Dr. sc. Uroš Barudžija

Datum obrane: 24. rujan 2015.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

SITE SELECTION FOR RADIOACTIVE WASTE

ROMAN LEOPOLD

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

Summary

The master's thesis describes the types of radioactive waste and the means of it's disposal. The types and quantities of radioactive waste in Croatia are declared and the two concepts of disposal of low and intermediate radioactive waste are proposed. The process of site selection, with a focus for criteria for selecting sites for low and intermediate radioactive waste is shown. The general application of GIS concerning the site selection is explained, as well as a concrete example of GIS application for site selection in Croatia.

Keywords: radioactive waste, site selection, GIS, potential area

Thesis contains: 58 pages, 40 figures and 30 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor
Technical support and assistance: PhD Dario Perković, Assistant Professor

Reviewers: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor
PhD Dario Perković, Assistant Professor
PhD Uroš Barudžija, Assistant Professor

Date of defense: September, 24. 2015

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. RADIOAKTIVNI OTPAD 2

2.1. Klasifikacija radioaktivnog otpada 3

2.2. Izvori radioaktivnog otpada 5

3. GOSPODARENJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM U HRVATSKOJ 7

4. TEHNOLOGIJA ZBRINJAVANJA RADIOAKTIVNOG OTPADA 9

4.1. Tipovi odlagališta radioaktivnog otpada 11

4.2. Odlaganje NSRAO 12

4.2.1. Idejno rješenje odlagališta NSRAO u Hrvatskoj – površinsko odlagalište 13

4.2.2. Idejno rješenje odlagališta NSRAO u Hrvatskoj – tunelski tip 15

4.3. Odlaganje VRAO i ING 17

4.3.1. Duboko geološko odlagalište Onkalo 18

4.3.2. Odlaganje u duboke buštotine 20

5. IZBOR LOKACIJE ODLAGALIŠTA 21

5.1. Način odabira lokacije odlagališta 21

5.2. Kriteriji za izbor lokacije odlagališta 22

6. PRIMJENA GIS TEHNOLOGIJE 26

6.1. Primjena GIS-a u zbrinjavanju radioaktivnog otpada 26

6.1.1. Primjena GIS-a pri vrednovanju lokacije odlagališta 27

6.1.2. Primjena GIS-a pri uključivanju javnosti u donošenju odluka 28

6.2. Prikaz sučelja i primjene GIS-a 29

6.3. Izlučno vrednovanje teritorija Republike Hrvatske 32

6.4. Potencijalna područja sa geološkim podlogama 39

6.5. Potencijalna lokacija - Trgovska gora 50

7. ZAKLJUČAK 54
8. LITERATURA 55

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Konceptualni prikaz sheme klasifikacije otpada 4

Slika 4-1 Koncept površinskog odlaganja nisko radioaktivnog otpada 13

Slika 4-2 Predviđeni koncept površinskog tipa odlagališta NSRAO 14

Slika 4-3 Površinski tip odlagališta 15

Slika 4-4 Skica odlagališta tunelskog tipa. 16

Slika 4-5 Skladištenje RAO kod tunelskog tipa odlagališta 17

Slika 4-6 Odlaganje VRAO i ING 18

Slika 4-7 Vrste posuda za konačno odlaganje 19

Slika 4-8 Podzemno odlagalište Onkalo 19

Slika 5-1 Faze odabira lokacije 21

Slika 6-1 Prikaz 34 potencijalne lokacije u 7 potencijalnih područja 27

Slika 6-2 Izrada karte pogodnih područja na temelju slojeva ograničenja i slojeva vrednovanja kriterija 29

Slika 6-3 DOF i TK25 karte u ArcMap-u 30

Slika 6-4 Postupak georeferenciranja karata 30

Slika 6-5 Crtanje poligona 31

Slika 6-6 Potencijalna područja i njihove površine 31

Slika 6-7 Pregled potencijalnog područja 32

Slika 6-8 Kriterij litoloških i geomorfoloških osobina 33

Slika 6-9 Kriterij udaljenost od aktivnih rasjeda 34

Slika 6-10 Kriterij ugroženosti od potresa 35

Slika 6-11 Kriterij ugroženosti od plavljenja 35

Slika 6-12 Kriterij hidrogeologije 36

Slika 6-13 Kriterij gustoća naseljenosti 37

Slika 6-14 kriterij zaštićenih prirodnih i kulturnih baština 38

Slika 6-15 Potencijalna područja 38
Slika 6-16 Potencijalno područje 1 39
Slika 6-17 Potencijalno područje 2 40
Slika 6-18 Potencijalno područje 3 41
Slika 6-19 Potencijalno područje 4 i 5 43
Slika 6-20 Potencijalno područje 6 44
Slika 6-21 Potencijalno područje 7 45
Slika 6-22 Potencijalno područje 8 46
Slika 6-23 Potencijalno područje 9 47
Slika 6-24 Potencijalno područje 10 48
Slika 6-25 Potencijalno područje 11 49
Slika 6-26 Lokacija Trgovske gore 50
Slika 6-27 TK i DOF 3 mikro lokacije 51
Slika 6-28 Naselja i mreža lokalnih i državnih cesti u blizini potencijalnih lokacija 52
Slika 6-29 Vodotoci u blizini potencijalnih lokacija 52
Slika 6-30 Geološka karta potencijalnog područja 53

POPIS KRATICA

APO	Agencija za opasni otpad
DOF	digitalna ortofo karta
GIS	geografski informacijski sustav
IAEA	International Atomic Energy Agency
ING	istrošeno nuklearno gorivo
IRAO	izuzeti radioaktivni otpad
JPEG	Joint Photographic Experts Group
MCDA	Multi Criteria Decision Analysis
MCS	Mercalli-Cancani-Siebergova ljestvica
NEK	Nuklearna elektrana Krško
NECSA	Nuclear Energy Corporation of South Africa
NN	Narodne novine
NORM	Naturally Occurring Radioactive Material
NRAO	nisko radioaktivni otpad
NSRAO	nisko i srednje radioaktivni otpad
OSDM	Open Spatial Decision Making
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations
RAO	radioaktivni otpad
RH	Republika Hrvatska
SAD	Sjedinjene Američke Države
SRAO	srednje radioaktivni otpad
TIF	Tagged Image Format File
TK	topografska karta
TENORM	Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

VKRAO	vrlo kratkoživući radioaktivni otpad
VNRAO	vrlo nisko radioaktivni otpad
VRAO	visoko radioaktivni otpad

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

Simbol	**Značenje**	**Jedinica**
Gy	grej	J/kg
k	koeficijent propusnosti	km/s
P	površina	km^2
Sv	sievert	J/kg

1. UVOD

Radioaktivni otpad (RAO) nastaje upotrebom radioaktivnog materijala u medicini, industriji, istraživanju, poljoprivredi ali ponajviše u proizvodnji nuklearne energije. Obzirom na svojstva, neke vrste radioaktivnog otpada mogu ostati radioaktivne i do nekoliko tisuća godina. Zbog toga je izbor lokacije odlagališta jedan od najbitnijih i najsloženijih postupaka pri odlaganju RAO.

U Republici Hrvatskoj postoje male količine otpada potekle iz medicinskih, industrijskih te znanstveno-istraživačkih izvora, no obzirom da je RH suvlasnik Nuklearne elektrane Krško te je dužna zbrinuti svoj dio otpada, javlja se i potreba za izgradnjom odlagališta. Godine 1988. započeo je projekt odabira lokacije u Hrvatskoj, a 1997. godine odabrane su četiri preferentne lokacije. Do danas, Trgovska gora ostala je kao jedina preferentna lokacija za zbrinjavanje RAO.

Cilj ovog diplomskog rada je prikazati mogućnost upotrebe geografskog informacijskog sustava (GIS) pri odabiru lokacije. S obzirom da odabir lokacije uključuje mnoge čimbenike, kao što su zaštita okoliša i geologija te hidrogeološke, inženjerskogeološke i socijalno-ekonomske značajke, GIS nudi ekonomičan i praktičan način prikazivanja takvih podataka u prostoru. Osim toga, GIS nudi i mogućnost sudjelovanja javnosti u važnim procesima donošenja odluka pri odabiru lokacije.

2. RADIOAKTIVNI OTPAD

Radioaktivnost je spontani proces u kojem jezgre nestabilnih atoma gube energiju emitiranjem α i β čestica te γ zraka pri čemu se mijenjaju svojstva tvari. Alfa-raspad promjena je atomske jezgre pri kojoj jezgra emitira alfa česticu (jezgru helija) pri čemu se smanjuje maseni broj. Kod beta-raspada mijenja se atomski broj emisijom ili apsorpcijom elektrona ili pozitrona i antineutrina ili neutrina. Gama-radioaktivnost prijelaz je između stanja više pobuđenosti atomske jezgre u stanje niže pobuđenosti ili u osnovno stanje, a elektromagnetsko zračenje visoke frekvencije koje se pritom emitira naziva se gama-zračenje. Materijal koji spontano emitira takve čestice smatra se radioaktivnim (http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=51474).

U SI sustavu, radioaktivnost se mjeri u bekerelima (Bq), gdje 1 Bq odgovara jednom raspadu atomske jezgre u sekundi. Mjerna jedinica grej (Gy) označava apsorbiranu dozu ionizirajućeg zračenja a definirana je omjerom energije i mase tijela (Gy=J/Kg). Ekvivalentna doza apsorbirane doze izražava se u sievertima (Sv). Dobiva se množenjem apsorbirane doze (izražene u Gy) i faktora kvalitete Q (utjecaj određene vrste zračenja) (http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=51474).

Radioaktivni proizvodi ili otpad su radioaktivni materijali koji su nastali u procesu proizvodnje ili korištenjem nuklearnog goriva ili drugi materijali koji su postali radioaktivni zbog toga što su bili izloženi zračenju emitiranom tijekom navedenog procesa, isključujući radioizotope koji su nastali u završnoj fazi proizvodnje i koji se mogu koristiti u znanstvene, medicinske, poljoprivredne, trgovačke ili industrijske svrhe (Zakon o odgovornosti za nuklearnu štetu, 1998).

Radioaktivnost takvog materijala s vremenom se smanjuje, te može postati neznatnom nakon nekoliko dana ili mjeseci ali može ostati i opasno radioaktivno i do tisuću godina. Međunarodna agencija za atomsku energiju (International Atomic Energy Agency, IAEA), u ranijim klasifikacijama, radioaktivni otpad dijeli u dvije grupe. Prvu grupu čini visokoaktivni otpad (VRAO) koji znatno povišenu radioaktivnost mogu zadržati i do nekoliko tisuća godina. VRAO čini mali postotak ukupnog radioaktivnog otpada te se on odlaže u duboka geološka odlagališta. Drugu grupu čine nisko i srednje aktivni otpad (NSRAO). NSRAO čine većinu ukupne količine radioaktivnog otpada te njegova radioaktivnost neće ostati značajno povišena duže od nekoliko stoljeća. Takav otpad se odlaže u površinskim ili pripovršinskim odlagalištima (Levanat, 2000).

2.1. Klasifikacija radioaktivnog otpada

Klasifikacija radioaktivnog otpada osnovni je alat za razvoj nacionalne strategije upravljanja radioaktivnim otpadom, kao i za planiranje i projektiranje tehnologija i odlagališta. Prema IAEA, idealna klasifikacija radioaktivnog otpada mora biti:

- korisna u svim koracima upravljanjem radioaktivnim otpadom;
- povezati klase radioaktivnog otpada s pripadajućim potencijalnim opasnostima za sadašnje i buduće generacije;
- dovoljno fleksibilna da služi specifičnim situacijama;
- jednostavna i lako razumljiva;
- prihvaćena kao zajednički temelj za karakterizaciju otpada od svih stranaka, uključujući regulatora, operatera i ostale zainteresirane stranke;
- široko primjenjiva

IAEA vodič (2009b) predlaže novu klasifikaciju, te razlikuje šest klasa radioaktivnog otpada koje su osnova za klasifikacijsku shemu.

Izuzeti otpad (IRAO): Materijali koji su izuzeti od obveze regulatornog nadzora za potrebe zaštite od zračenja. Sadrže radioaktivne izotope specifičnih aktivnosti koje su jednake ili niže od propisanih graničnih vrijednosti. Međutim, nakon što je izuzeti otpad izuzet iz regulatornog nadzora, ne smatra se više radioaktivnim otpadom (Veinović et al., 2014).

Vrlo kratkoživući otpad (VKRAO): Sadrži radionuklide vrlo kratkog vremena poluraspada a korišten je u istraživanju i u medicinske svrhe. Odlaže se na određeno vrijeme (do nekoliko godina) kada se izdvaja iz regulatornog nadzora te odlaže, koristi ili ispušta bez nadzora.

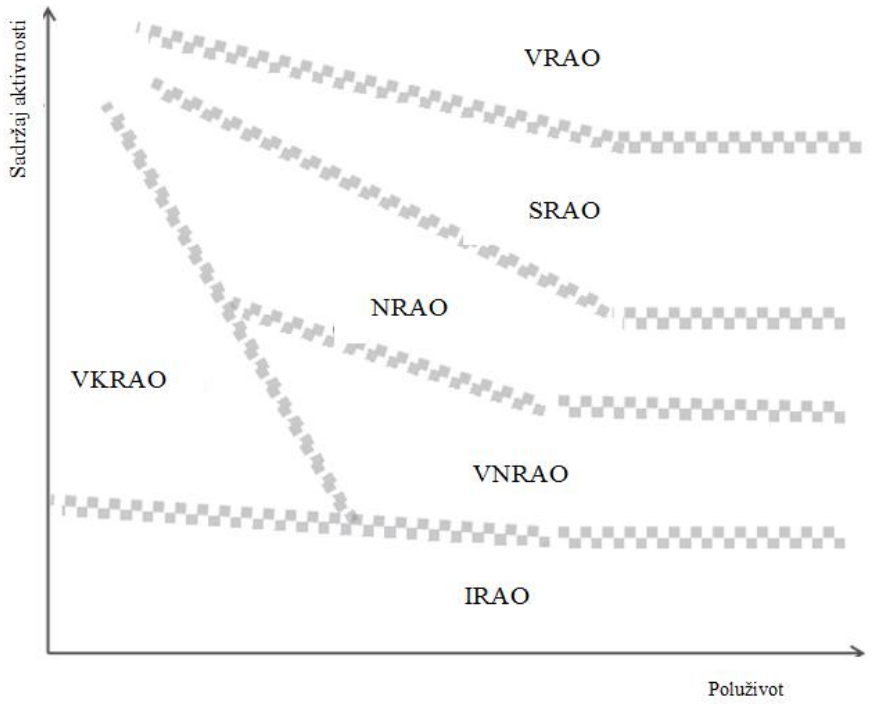
Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO): Nije potrebno zbrinjavati u odlagalištima s višestrukim barijerama, te je zbog svoje niske razine radioaktivnosti pogodan za zbrinjavanje u površinska i pripovršinska odlagališta s ograničenim regulatornim nadzorom (Veinović et al., 2014).

Nisko radioaktivni otpad (NRAO): Zahtjeva veću razinu izolacije u razdoblju od nekoliko stotina godina, te je pogodan za odlaganje u projektiranim pripovršinskim objektima. Može sadržavati kratkoživuće radionuklide s višim razinama aktiviteta, te dugoživuće radionuklide ali samo s razmjerno niskim aktivitetom (IAEA, 2009b).

Srednje radioaktivni otpad (SRAO): Zahtjeva veći stupanj izolacije od pripovršinskog odlagališta jer sadrži dugoživuće radionuklide. Ipak, ne zahtijeva, ili zahtjeva u vrlo maloj količini, nadzor zbog ispuštanja topline tijekom skladištenja i odlaganja. Može sadržavati dugoživuće radionuklide, osobito alfa emitere, koji neće radioaktivnim raspadom sniziti svoj aktivitet na razine prihvatljive za pripovršinsko odlaganje u vremenu u kojem se nad njime može provoditi institucionalni nadzor. Otpad ove klase odlaže se na dubinama od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara (IAEA, 2009b).

Visoko radioaktivni otpad (VRAO): Otpad visokog aktiviteta koji generira značajne količine topline radioaktivnim raspadom. Također sadrži visoku koncentraciju dugoživućih radionuklida koju treba uzeti u obzir prilikom projektiranja odlagališta. VRAO se odlaže u geološko stabilnim formacijama na dubinama od nekoliko stotina metara.

Na slici 2-1 je konceptualni prikaz sheme klasifikacije otpada. Okomita os predstavlja sadržaj aktivnosti otpada, a vodoravna poluraspad radionuklida u otpadu.



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

2.2. Izvori radioaktivnog otpada

Izvori radioaktivnog otpada mogu biti: NORM (Naturally Occurring Radioactive Material), TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material), otpad iz ciklusa goriva u nuklearnim elektranama, institucionalni i vojni otpad (Veinović et al., 2014).

NORM je pojam koji obuhvaća radioaktivne materijale koji se mogu naći u prirodi. Izvori NORM-a mogu se podijeliti u dvije skupine: zemljini izvori i kozmički izvori. Zemljini izvori čine većinu NORM-a, to su minerali koji sadrže uran, torij, cirkon i rijetke zemlje. Kozmički izvori u načelu ne daju radioaktivni materijal nego samo radioaktivno zračenje, jer je njihov izvor pozadinsko zračenje iz svemira. Većina radioaktivnih čestica reflektira se od Zemljinog magnetskog polja i samo vrlo mali dio dospije do površine Zemlje (Žlimen, 2014).

TENORM je „tehnološki poboljšani" NORM. Pod pojmom TENORM-a obuhvaćeni su svi radioaktivni materijali čija je radioaktivnost povećana (koncentrirana) industrijskim i tehnološkim procesima, kao npr. jalovina nastala pri eksploataciji i obogaćivanju urana, proizvodnji nafte i plina, mineralnih gnojiva i slično (Žlimen, 2014).

Ciklus goriva u nuklearnim elektranama proizvodi više vrsta radioaktivnog otpada uključujući istrošeno nuklearno gorivo (ako je ono proglašeno otpadom), visoko radioaktivni otpad koji je nastao kemijskom preradom iskorištenog goriva te vrlo nisko radioaktivni, nisko radioaktivni i srednje radioaktivni otpad koji je nastao radom reaktora, preradom, dekontaminacijom, dekomisijom i drugim aktivnostima u gorivnom ciklusu (IAEA, 2009b).

Iskorišteno nuklearno gorivo (ING) sadrži veliku količinu fisijskih materijala. Nakon vađenja iz reaktora, iskorišteno gorivo visoko je radioaktivno te ispušta veliku količinu topline. Zbog toga se odlaže u bazene koji se nalaze unutar postrojenja s reaktorom na najmanje pet mjeseci. Bazeni su ispunjeni sa bornom vodom koja štiti od radioaktivnog zračenja i djeluje kao rashladno sredstvo za odvođenje topline. Preradom iskorištenog goriva nastaju čvrste, tekuće i plinovite radioaktivne tvari. Visoko radioaktivne tvari se vitrificiraju te odlažu u duboka geološka odlagališta.

Najveće količine otpada čini vrlo nisko radioaktivni i nisko radioaktivni otpad nastao razgradnjom nuklearnih elektrana (Veinović et al., 2014).

Institucionalni radioaktivni otpad obuhvaća otpad nastao na područjima istraživanjem, industrije i medicine. Najveće količine otpada nastaju na području istraživanja tj. tijekom rada u istraživačkim reaktorima, drugim nuklearnim istraživačkim postrojenjima i proizvodnji radioaktivnih izotopa (Veinović et al., 2014).

Vojni otpad odnosi se na radioaktivni otpad nastao proizvodnjom nuklearnog oružja, njegova razgradnja i testiranje.

3. GOSPODARENJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM U HRVATSKOJ

Radioaktivni otpad u Republici Hrvatskoj je, prema Uredbi o uvjetima te načinu zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih zatvorenih radioaktivnih izvora i izvora ionizirajućeg zračenja (NN 44/08), klasificiran je u sljedeće kategorije:

- izuzeti i otpušteni radioaktivni otpad (RAO);
- nisko radioaktivni otpad (NRAO);
- nisko i srednje radioaktivni otpad (NSRAO);
- visoko radioaktivni otpad (VRAO).

U nadležnosti Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost je uspostava i održavanje sustava zbrinjavanja RAO nastalog obavljanjem djelatnosti s radioaktivnim izvorima zračenja i pronalaženje i zbrinjavanje izvora bez posjednika. U Republici Hrvatskoj je postavljeno oko 60.000 ionizirajućih javljača dima te oko 500 radioaktivnih gromobrana na više od 1.500 zgrada i drugih objekata (Kučar-Dragičević et al., 1996).

Radioaktivni otpad nastao na području Republike Hrvatske godišnje je veličine manje od jednog m^3 i potječe iz područja djelatnosti medicine (83%), industrije (15%) i znanstveno-istraživačkih instituta (2%) (Strategija, 2009).

Niski i srednji radioaktivni otpad te iskorišteni izvori zračenja skladište se u Institutu „Ruđer Bošković“ i u Institutu za medicinska istraživanja u Zagrebu. Tamo je do danas uskladišteno približno 7,5 m^3 radioaktivnog otpada.

Industrijski otpad (TENORM) vrlo niske specifične radioaktivnosti (VNRAO) potječe u velikoj mjeri s tri lokacije: termoelektrana Plomin, tvornica mineralnih gnojiva u Kutini i termoelektrana u Kaštelanskom zaljevu. Sanacija navedenih odlagališta je u tijeku.

Republika Hrvatska je suvlasnik nuklearne elektrane Krško (NEK) te je pritom nužna izgradnja odlagališta za RAO nastao tijekom rada i nakon dekomisije NEK. RH mora preuzeti NSRAO nastao radom i razgradnjom iz NEK količine oko 5.000 m^3 i to do 2020. godine, a istrošeno gorivo do 2023. (Žlimen, 2014). Prema programu PROMETHEE iz 1997. godine izabrane su četiri potencijalne lokacije za izgradnju odlagališta: Trgovačka gora, Moslavačka gora. Papuk i Psunj. Moslavačka gora je prema Uredbi o proglašenju regionalnog parka Moslavačka gora (NN 68/11) od lipnja 2011. proglašena regionalnim parkom. Papuk i Psunj su uklonjeni iz daljnjeg procesa odlučivanja bez jasnog

obrazloženja. Zbog navedenih događaja, Trgovačka gora je ostala kao jedina najizglednija lokacija iako možda ne i najprikladnija.

4. TEHNOLOGIJA ZBRINJAVANJA RADIOAKTIVNOG OTPADA

Cilj zbrinjavanja radioaktivnog otpada je odlaganje otpada kojim bi se onemogućio kontakt radioaktivnih izotopa s biosferom i podzemnim vodama. Odlaganje radioaktivnog otpada završna je faza gospodarenja otpadom, a toj fazi prethode predobrada, obrada i kondicioniranje.

Predobrada je početni korak koji se sastoji od sakupljanja i razvrstavanja otpada, te dekontaminacije i manjeg kemijskog prilagođavanja, a može uključivati i vrijeme privremenog skladištenja (Levanat, 1997). Skladištenje podrazumijeva privremeno čuvanje radioaktivnog otpada pri čemu se radioaktivnost s vremenom smanjuje, pa je transport i rukovanje lakše i sigurnije. Dva su načina privremenog skladištenja visoko radioaktivnog otpada:

- **Mokro skladištenje** je držanje iskorištenih elemenata u bazenu s vodom u krugu nuklearne elektrane. Bazeni su sastavni dio tehnološkog sustava te se mogu nalaziti unutar ili izvan zgrade za rukovanje gorivom. Dubine bazena su uglavnom 12 do 15 metara a napunjeni su bornom vodom koja štiti od intenzivnog zračenja, djeluje kao sredstvo za hlađenje te kao medij za apsorpciju neutrona iz zaostale fisije. Zidovi i dno bazena obloženi su nehrđajućim čelikom zbog sprečavanja od korozije. Istrošeno nuklearno gorivo u bazenu se drži najmanje pet godina nakon čega mogu biti podvrgnuti drugim postupcima kao suho skladištenje, prerada ili trajno odlaganje (Šabović et al., 2011).
- **Suho skladištenje** služi za držanje gorivih elemenata koji su proveli najmanje 5 godina u bazenima za hlađenje. Iskorišteno gorivo nalazi se u plinovitom stanju. Odlaganje je moguće u masivnim kontejnerima, tzv. nezavisnim skladištima ili u bunkerima (podzemne ili nadzemne armirano betonske zgrade) (Šabović et al., 2011).

Obradom radioaktivnog otpada cilj je povećati sigurnost ili ekonomičnost pohranjivanja otpada promjenom njegovih svojstava. Temeljni koncepti obrade su smanjivanje obujma otpada, uklanjanje radionuklida i promjena sastava otpada. Operacije kojima se to postiže su: spaljivanje gorivog otpada ili prešanje suhog otpada; isparavanje ili propuštanje tekućeg otpada kroz filtere i ionske izmjenjivače; te izdvajanje kemijskih

sastojaka precipitacijom ili flokulacijom. Dekontaminacijom tekućeg otpada može nastati sekundarni otpad kao mulj, filteri i ostalo (Levanat, 1997).

Kondicioniranje radioaktivnog otpada postiže se imobiliziranjem i pakiranjem da bi otpad bio prikladniji za rukovanje, prijevoz, skladištenje i odlaganje. Manje radioaktivni tekući otpad imobilizira se zalijevanjem u bitumensku ili betonsku matricu (solidifikacija), a visoko aktivni otpad u staklenu matricu (vitrifikacija ili ostakljivanje). Otpad se pakira u dvjestolitarske čelične bačve ili posebno konstruirane posude s debelim stjenkama uz eventualno zapunjivanje materijalima odgovarajućih svojstava (Levanat, 1997).

Temeljno načelo **odlaganja** RAO je njegova izolacija od okoliša, tj. onemogućavanje prodora radionuklida u biosferu. Odlaganja se planiraju na rok od nekoliko stotina do 10.000 godina, ovisno o trajnosti barijera te vremenu poluraspada radioaktivnog materijala. Da bi se osiguralo što manje ispuštanje radionuklida, pomno se odabire način pakiranja i oblik otpada, vrste inženjerskih barijera kojima se otpad izolira u odlagalištu te vrsta stijene u kojima se otpad odlaže. Odlagališta moraju biti smještena i osmišljena kako bi osigurala izolaciju radioaktivnog otpada i od ljudi i od biosfere. Za kratkoživući otpad potrebna je izolacija do nekoliko stotina godina a za srednje i visoko radioaktivni otpad i do nekoliko tisuća godina. Zbog toga, odlagališta dijelimo na površinska i pripovršinska odlagališta (za nisko i srednje radioaktivni otpad) te na duboka podzemna odlagališta (za VRAO).

Tipovi tla koji su pogodni za odlaganje su granitne stijene, glinene i slane naslage te škriljavci. Slojevi koji su u kontaktu s odlagalištem moraju biti gotovo nepropusni, tj. imati koeficijent propusnosti $k<1 \times 10^{-9}$ cm/s. Okolne stijene ne smiju sadržavati agresivne elemente koji bi mogli pospješiti ili izazvati koroziju metalnih dijelova koji se nalaze u odlagalištu (Živković i Kovačević Zelić, 2002). Dubina i dimenzije matične stijene moraju biti dovoljne za izgradnju odlagališta a udaljenost od diskontinuiteta mora biti dovoljna da bi se spriječio prodor radionuklida kroz pukotine. Termičke i termomehaničke osobine stijene moraju se razmatrati za otpad koji generira toplinu. Ako postoji mogućnost pojave plinova u odlagalištu, razmatra se sposobnost transporta plinova kroz geološke barijere (IAEA, 1994).

Na matičnu stijenu ne smiju utjecati buduće geomehaničke pojave (klimatske promjene, neotektonika, seizmika, vulkani) do te mjere da naruše izolacijske sposobnosti cjelokupnog sustava. Buduće klimatske promjene, kao interglacijalni i glacijalni ciklusi,

mogu utjecati na Zemljinu hidrosferu, tj. na razinu mora, erozijske i sedimentacijske procese, glacijalne i periglacijalne procese te na različite površinske i podzemne hidrološke ravnoteže. Potresi, slijeganje i uzdizanje tla, te vulkani također mogu utjecati na uvjete i procese u Zemljinoj kori (IAEA, 1994).

Osim lokalnih stijena, izolaciju osiguravaju i višestruke inženjerske barijere. Barijere se sastoje od metalne posude, armiranobetonske ili čelične posude za trajno odlaganje te bentonitne ispune. Metalne posude i posude za trajno odlaganje osiguravaju izolaciju radionuklida kod NSRAO do nekoliko stotina godina, kada radioaktivnost cijelog objekta toliko opada da ne predstavlja opasnost za okoliš (Peša, 2013). Bentonitna ispuna ima funkciju brtvljenja kako bi ograničila vodene putve oko spremnika koji sadrže radioaktivni otpad. Bentonit ima sposobnost bubrenja, samozacjeljivanja, visoku razinu plastičnosti te omogućuje hidrauličku vodljivost (Žlimen, 2014).

Korištenjem višestrukih sigurnosnih barijera osigurava se veća sigurnost odlagališta. Ukoliko jedna barijera ne obavi u potpunosti svoju funkciju, ostale barijere osiguravaju sigurnost cijelog sustava. Na sigurnosnu funkciju utječu fizičke i kemijske karakteristike barijera. Fizičke karakteristike (oblik otpada, način pakiranja i vrsta stijene) osiguravaju i ograničavaju migraciju radionuklida, dok kemijske karakteristike utječu na procese topljenja, korozije i brzinu ispiranja (IAEA, 2011).

4.1. Tipovi odlagališta radioaktivnog otpada

Idealno, sav radioaktivni otpad bi se trebao odložiti duboko ispod površine, u stijeni s povoljnim geološkim karakteristikama, na lokaciji udaljenoj od urbanih sredina sa suhom klimom uz korištenje višestrukih barijera (inženjerskih i prirodnih). U praksi postoje mnogo primjera odlagališta radioaktivnog otpada koja se razlikuju obzirom na vrstu radioaktivnog otpada koji se odlaže, te o regulatornim zahtjevima u pojedinim državama. Prema Međunarodnoj agenciji za atomsku energiju (IAEA) odlagališta dijelimo na:

1. Površinska odlagališta (*''near surface disposal''*)
    a. Površinsko odlaganje bez inženjerskih struktura
    b. Površinsko odlaganje s inženjerskim strukturama
2. Pripovršinska odlagališta (*''subsurface disposal''*)
3. Odlaganje u dubokim geološkim formacijama (*''geological disposal''*)

Temelj ovih klasifikacija je vrsta radioaktivnog otpada koji se odlaže te njegova potreba za duljom ili kraćom izolacijom od okoliša.

4.2. Odlaganje NSRAO

NSRAO se odlaže u površinska i pripovršinska odlagališta na period od 250 do 300 godina. Prema Schalleru (1997) se u tom periodu djelovanje odlagališta dijeli na nekoliko etapa:

1) razdoblje punjenja odlagališta otpadom (40-50 godina);

2) razdoblje zatvaranja odlagališta uz stalni institucijski nadzor i mjerenja ekološki bitnih pokazatelja (5-10 godina);

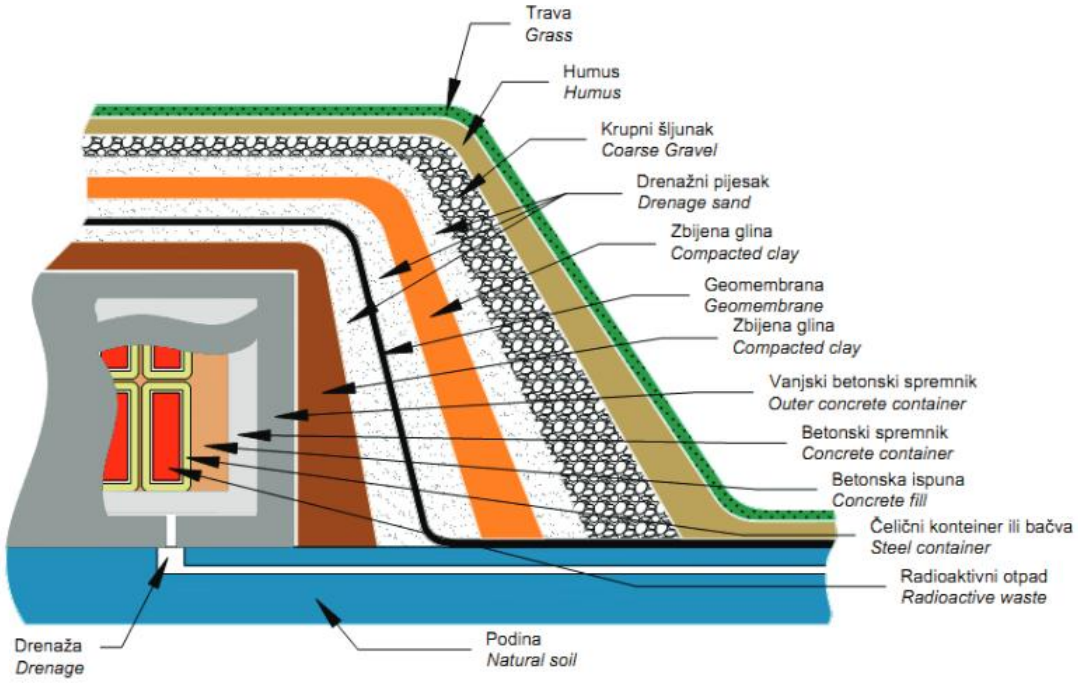
3) razdoblje aktivnog institucijskog nadzora, odnosno, "monitoringa" odlagališta i okolice (do 100 godina nakon zatvaranja odlagališta), pri čemu je predviđena stalna prisutnost osoblja na lokaciji odlagališta uz kontrolirani pristup tom području te stalno praćenje ekološki važnih pokazatelja;

4) razdoblje pasivnog institucijskog nadzora (tijekom daljnjih 150 godina), tijekom kojega je ograničeno korištenje lokacije odlagališta za druge namjene.

U **površinska odlagališta** odlaže se nisko i srednje radioaktivni otpad s dugoživućim radionuklidima. Tu pripadaju i velike količine materijala nastale dekomisijom nuklearnih elektrana, koje se odlažu na površinskim odlagalištima s ograničenim inženjerskim barijerama, najčešće u blizini mjesta gdje je i nastao otpad. Površinska odlagališta bez inženjerskih barijera i bez ispuna koriste se za VKRAO i VNRAO, a za više radioaktivni otpad koristi se odlaganje u bunkere koji se zatvaraju vodootpornim materijalom, nad kojim je potreban monitoring za vrijeme institucionalnog nadzora. U novije vrijeme koriste se potpuno zatvorena površinska odlagališta kojima je cilj smanjiti mogućnost kontakta vode s otpadom. U takva odlagališta odlaže se kratkoživući otpad s visokim razinama aktiviteta.

Površinska odlagališta s inženjerskim strukturama (slika 4-1) izgrađena su od armiranobetonskih barijera s donje, gornje i bočne strane. Odlagalište se zatrpava šljunkom, pijeskom i glinom, a prostor između paketa se zapunjava šljunkom ili betonom.

Drenažni sustav ugrađuje se u i oko odlagališta za odvođenje padalinskih voda te kontrolu onečišćenja



Slika 4-1 Koncept površinskog odlaganja nisko radioaktivnog otpada (modificirano iz Levant, 1997)

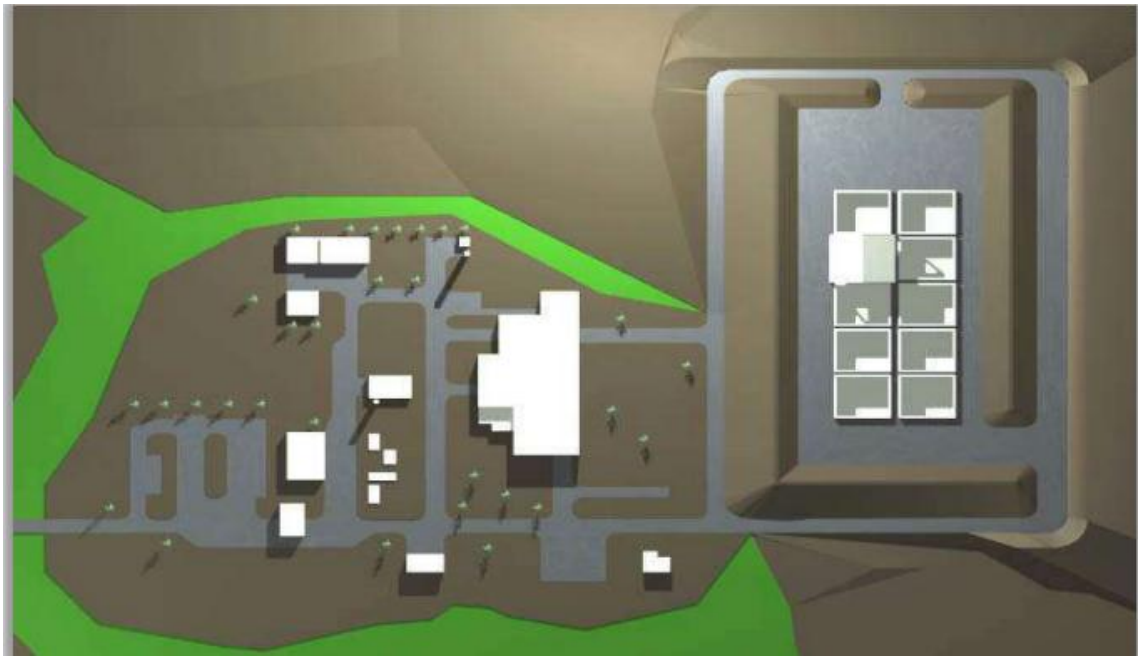
Zajedničko svim površinskim odlagalištima je aktivno institucionalno praćenje odlagališta nakon zatvaranja zbog mogućih upada ljudi i životinja te zbog moguće pojave erozije. Monitoring bi trebao trajati dok radioaktivnost otpada ne opadne na razinu kada više nije opasna za okoliš (IAEA, 2009c).

U **pripovršinska odlagališta** odlaže se kratkoživući, ali i dugoživući NSRAO. U tu svrhu koriste se postojeći rudnici ili namjenski iskopane prostorije dubina do par stotina metara. Uz lokalne stijene, izolaciju čine beton i izolacijski materijali koji se ugrađuju u odlagalište. Zbog dubina na kojima se izgrađuju, pripovršinska odlagališta sigurna su od mogućih upada ljudi i životinja.

4.2.1. Idejno rješenje odlagališta NSRAO u Hrvatskoj – površinsko odlagalište

Prema idejnom rješenju preuzetog iz *Programa razgradnje NEK i odlaganja NSRAO i ING*, u Hrvatskoj su predložena dva koncepta odlaganja NSRAO. Površinsko odlagalište s prirodnim i inženjerskim barijerama, te tunelski tip odlagališta.

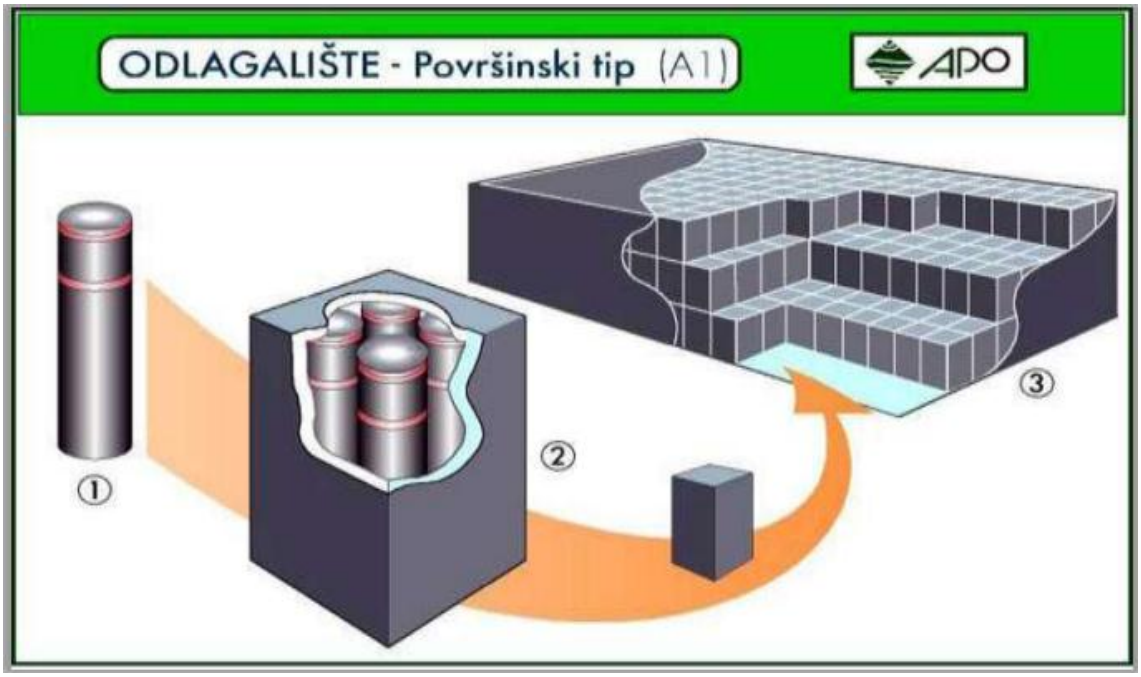
Površinsko odlagalište može se podijeliti na tri područja: sigurnosno nenadzirano područje na kojemu su smješteni informacijski centar i odlagalište iskopane zemlje, sigurnosno nadzirano područje koje obuhvaća ulazni sigurnosno-nadzorni objekt, administrativnu zgradu, zgradu tehničke potpore, servisne radionice s pripadajućim skladištima, zgradu za pripremu vode, meteorološki stup i dio glavnog tehnološkog objekta, te sigurnosno nadzirano područje koje obuhvaća područje glavnog tehnološkog objekta za neposredno zbrinjavanje NSRAO, prostore za odlaganje s pripadajućim transportnim uređajima, objekte za prikupljanje i obradu vode na tom području i kontrolne bunare (slika 4-2) (Peša, 2013).



Slika 4-2 Predviđeni koncept površinskog tipa odlagališta NSRAO (Lokner et al., 2004)

Dovoz obrađenog NSRAO predviđa se standardnim cestovnim vozilima, koji se onda stavlja u betonske spremnike. Praznine između otpada i spremnika zapunjavaju se vezivnom masom. Spremnici se zatim odlažu u armirano betonske jedinice za odlaganje, dimenzija 20 x 20 x 10 m, djelomično zakopane u teren. Broj jedinica ovisi o potrebnom volumenu za odlaganje. Prazni prostor u jedinicama zapunjava se mješavinom niskopropusne zemljane i bentonitne gline. Nakon zapunjavanja, jedinice za odlaganje zalijevaju se betonom a zatim i višeslojnim pokrovom koji smanjuje mogućnost prodiranja površinskih voda u odlagalište i omogućava njezino odvođenje. Ispod i oko odlagališa,

izgrađeni su drenažni sustavi i bunari za nadziranje stanja u odlagalištu. Na slici 4-3 prikazan je način odlaganja u površinski tip odlagališta (Peša, 2013).



Slika 4-3 Površinski tip odlagališta: 1) čelična bačva, 2) Kontejner, 3) Složeni kontejneri u odlagalištu (Levanat i Lokner, 2000).

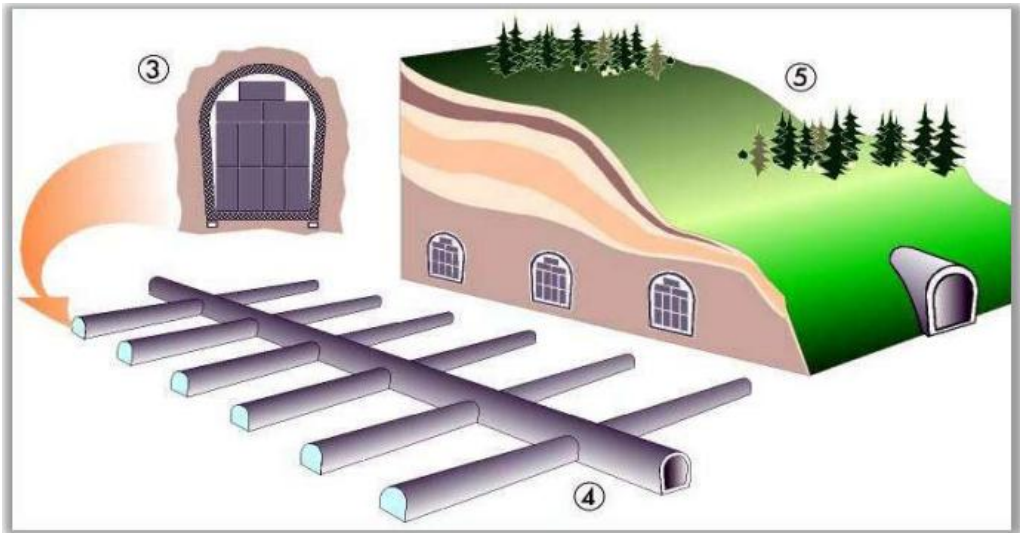
4.2.2. Idejno rješenje odlagališta NSRAO u Hrvatskoj – tunelski tip

Drugi predloženi koncept je odlaganje NSRAO u tunelski tip odlagališta. Dubina odlagališta ovisi o stabilnosti geoloških formacija u matičnoj stijeni, a najmanja dubina na kojima bi se izvodila je 50 m. Pasivna kontrola za ovakav tip odlagališta predviđa se u razdoblju od 100 godina. Odlagalište se dijeli na podzemne dijelove i površinske prateće objekte (Peša, 2013).

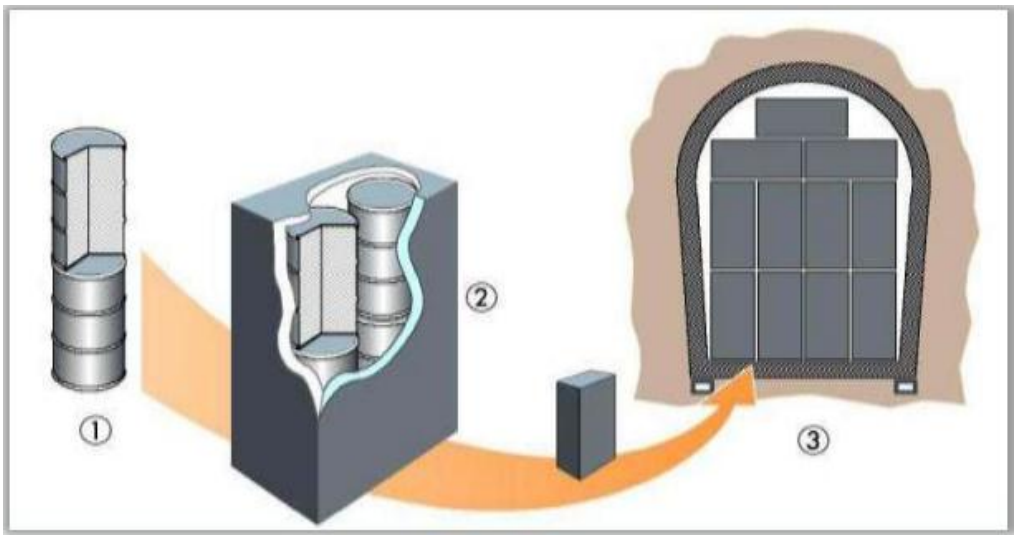
Prateći objekti na površini obuhvaćaju: ulazno sigurnosno-nadzorni objekt, administrativnu zgradu, zgradu tehničke potpore, servisne radionice s pripadajućim skladištima, zgradu za pripremu vode, meteorološki stup te prostore glavnog tehnološkog objekta za neposredno upravljanje NSRAO (objekti i uređaji za prihvat i evidentiranje otpada, popravak uništene ambalaže, među-skladištenje, pripremu za ulaganje u rovove za odlaganje te za preradu i pripremu NSRAO koji dospijeva na odlagalište u obliku neprimjerenom za odlaganje). Područje odlagališta koje nije zaštićeno je informacijski centar te deponija iskopane zemlje (Peša, 2013).

Ovisno o geomehaničkim svojstvima, u odlagalište je moguće ući vodoravno (tunelski tip) ili ulaznom rampom (pristup pod određenim nagibom). Transport do odlagališta predviđen je cestovnim transportnim vozilima, a odlaganje u rovove, mostovnim dizalom (Peša, 2013).

Podzemni dio odlagališta (slika 4-4) čine pristupni rovovi i rovovi za odlaganje. Veličina tih objekata i njihov raspored ovisi o količini i obliku otpada, predviđenoj tehnologiji odlaganja i značaju lokacije. Punjenje rovova, trajno pakiranim otpadom, započinje u najudaljenijem rovu. U rov za odlaganje postavljaju se pregradne stijene koje čine prostorije dimenzija 7,6 x 6,4 x 5,7 m (slika 4-5). Međuprostor se zalijeva rijetkim betonom, a rov se zatvara armirano betonskim poklopcem. Rovovi su raspoređeni na minimalnoj međusobnoj udaljenosti od 35 m. Po preliminarnim izračunima za sav otpad (oko 18.000 m^3) potrebno je izgraditi osam rovova za odlaganje, duljine 160 m. Drenažni sustav nalazi se na oblogu pristupnih rovova i rovova za odlaganje, te odvodi brdsku vodu na površinu u bazen za prikupljanje. Voda koja se skuplja u rovu za odlaganje i pristupnom rovu, odvodi se na površinu u posebne bazene. U slučaju pristupa odlagalištu rampom, voda se prikuplja na najnižoj točki odlagališta te se zatim crpkama diže na površinu. Nakon razdoblja punjenja odlagališta, slijedi zatvaranje odlagališta betonom koji popunjava rovove za odlaganje i dijelove pristupnih rovova. Drenažni sustavi ostaju nepopunjeni do isteka aktivnog nadzora odlagališta (Peša, 2013).



Slika 4-4 Skica odlagališta tunelskog tipa: 3) Slaganje kontejnera u hodnike za odlaganje; 4) Raspored hodnika za odlaganje i pristupnog hodnika; 5) Shematski prikaz presjeka odlagališta tunelskog tipa (Levanat i Lokner, 2000).



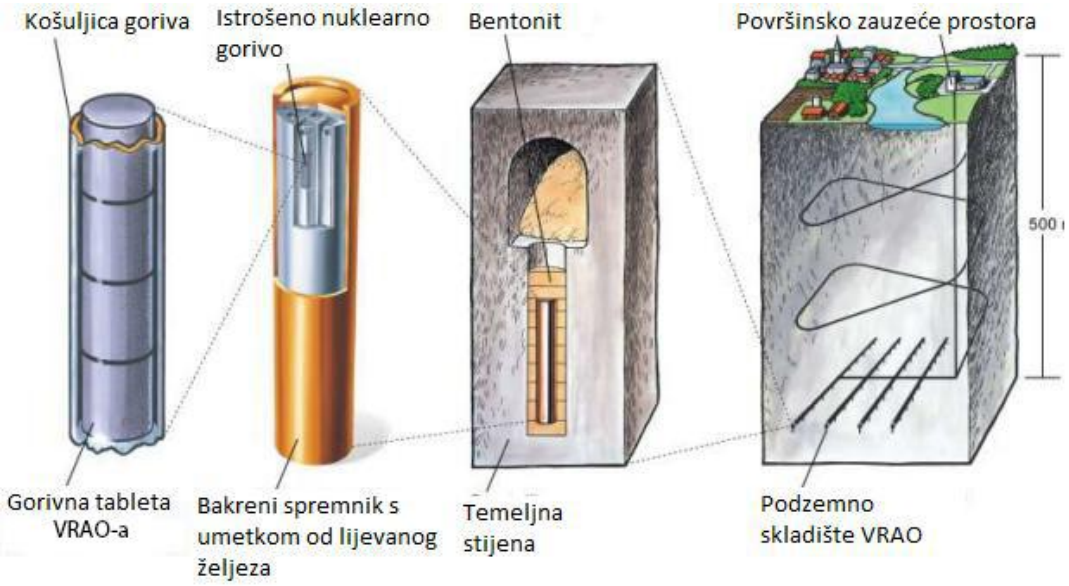
Slika 4-5 Skladištenje RAO kod tunelskog tipa odlagališta.
1) Slaganje spremnika s NSRAO; 2) Zatvaranje spremnika u betonske kontejnere;
3) Slaganje kontejnera u hodnike za odlaganje (Levanat i Lokner, 2000).

4.3. Odlaganje VRAO i ING

Za odlaganje istrošenog goriva iz nuklearne elektrane, vitrificiranog VRAO, dugoživućeg SRAO (nastao tijekom rada NE, iz reprocesiranja iskorištenog goriva, te tijekom dekomisije), osiromašenog urana te otpada nastalog dekomisijom nuklearnog oružja (pluton i obogaćeni uran) koriste se **duboka geološka odlagališta**. Cilj odlaganja ovakvog otpada trajno je odlaganje duboko ispod površine, na dubinama od 300 do preko 1000 metara, bez oslanjanja na dugoročni nadzor. Sigurnost cijelog sustava temelji se na sustavu višestrukih barijera koje čine: stabilan oblik otpada, dugovječna ambalaža u kojoj je otpad pohranjen, te trajnost ostalih izgrađenih inženjerskih struktura ili prirodnih prepreka (Lokner, 1997).

Zbog vremenskog razdoblja na koje se odlagalište konstruira (10 000 godina), pretpostavlja se degradacija inženjerskih barijera. Zbog toga je bitan izbor lokacije, tj. izbor matične stijene u kojoj će odlagalište biti izgrađeno. Geološke strukture kao što su granit, bazalt, tuf i solne formacije pogodne su za odlaganje istrošenog nuklearnog goriva i vitrificirani VRAO (Žlimen, 2014). Osim vrste stijene, lokacija mora imati povoljna i ostala geološka svojstva kao što su: mehanički stabilne formacije, geokemiju podzemnih voda koja ne ugrožava stabilnost paketa s otpadom i oko njih izgrađenih prepreka, vrlo mali protok podzemnih voda i vrlo dugo vrijeme prijenosa podzemnih voda iz dubina na

kojima je otpad odložen prema površini (Lokner, 1997). Na slici 4-6 prikazan je način odlaganja VRAO i ING.



Slika 4-6 Odlaganje VRAO i ING (Izvor: http://radioaktivniotpad.org/zbrinjavanje-vrao-a/)

U budućnosti, duboka geološka odlagališta neće biti ograničena samo na odlaganje VRAO, već će se u njih odlagati i dugoživući NSRAO. Cijena proširenja postojećih dubokih odlagališta, da prihvate i ostale tipove dugoživućeg otpada bit će vrlo mala.

Danas u svijetu ne postoji odlagalište VRAO. Tek su Finska i SAD donijele odluke o lokaciji budućeg odlagališta VRAO.

4.3.1. Duboko geološko odlagalište Onkalo

Onkalo je konačno odlagalište visokoradioaktivnog otpada u Finskoj. Odlagalište se nalazi na zapadnoj obali Finske na dubini od 455 m u granitnim stijenama. Izgradnja je počela 2004. godine, a u njega se odlaže otpad iz nuklearnih elektrana Olkiluoto i Loviisa. Odlagalište se sastoji od dva dijela: nadzemnog dijela i podzemnog odlagališta.

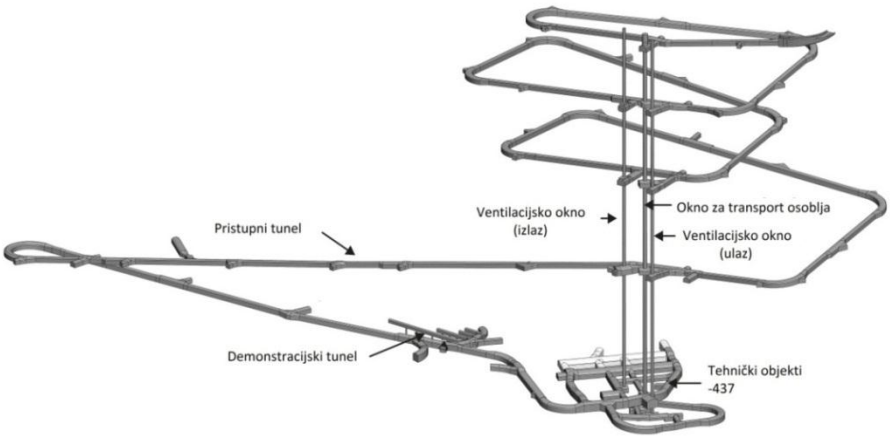
U nadzemnom dijelu odlagališta, ING se isporučuje u transportnim posudama. Tamo se ono vadi, suši i pakira u posude za konačno odlaganje (slika 4-7). Posuda za konačno odlaganje sastoji su od vanjske i unutarnje stijenke. Vanjska stijenka napravljena je od bakra, debljine 5 mm, koja štiti unutrašnjost od korozivnog djelovanja podzemnih voda. U nepovoljnim uvjetima, bakar može sačuvati nepropusnost od nekoliko stotina pa i do tisuću godina. Unutrašnjost posude izgrađena je od lijevanog željeza koji posudi daje

čvrstoću. Nakon punjenja, posude se ispunjavaju plinom argonom, zatvaraju čeličnim poklopcem i elektrolučno vare. Konačno, posude se odlažu u odlagalište, a prostor oko posude se zapunjava bentonitom.



Slika 4-7 Vrste posuda za konačno odlaganje (Izvor: http://www.posiva.fi/en/final_disposal/basics_of_the_final_disposal/the_final_disposal_canister#.VdRi1Pntmko)

Podzemno odlagalište (slika 4-8) sastoji se od jednog pristupnog tunela (nagiba 1:10, širine 5,5 m i visine 6,3 m) te tri okna: dva okna za ventilaciju i jedno za transport osoblja. Na dubini od 420 m nalazi se podzemni istraživački laboratorij. U njemu se provode geološka, geofizička i hidrogeološka istraživanja, te hidrogeokemijsko uzorkovanje i mjerenje.



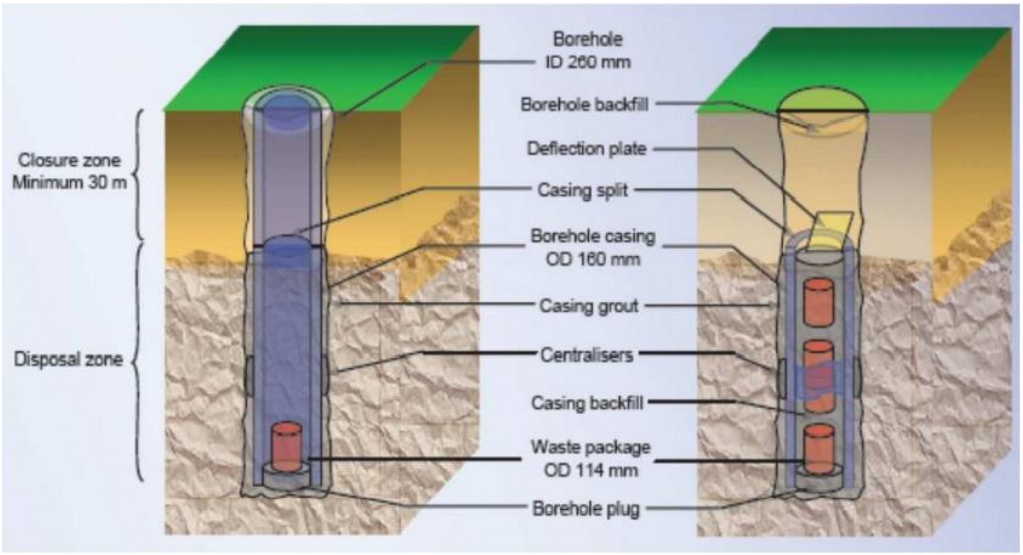
Slika 4-8 Podzemno odlagalište Onkalo

(Izvor: http://www.posiva.fi/en/final_disposal/onkalo#.VUth95NS21l)

4.3.2. Odlaganje u duboke buštotine

Odlaganje u duboke bušotine ekonomski je isplativ način odlaganja za male količine radioaktivnog otpada. Bušenje vrlo dubokih bušotina (preko 10 km) jedna je od potencijalnih metoda za odlaganje VRAO-a. Osim za VRAO, bušotine su pogodne i za odlaganje NSRAO. Takve bušotine su duboke od nekoliko metara do nekoliko stotina metara a promjera od nekoliko desetaka centimetara do preko jednog metra. Stijene pogodne za ovakav način odlaganja su ležišta soli, karbonati, škriljci i granitne stijene. Ležišta kamene soli imaju prednost pred drugim geološkim formacijama iz više razloga: naslage soli odgovaraju stabilnim područjima bez naglih tektonskih pomaka, imaju visoku toplinsku vodljivost što omogućuje jednoliko odvođenje topline (hlađenje), te omogućavaju jednostavno bušenje i kopanje tunela. (http://radioaktivniotpad.org/zbrinjavanje-visoko-radioaktivnog-otpada/).

Otpad se odlaže u inženjerski projektiranim paketima zbog nemogućnosti da se osiguraju odgovarajući sigurnosni uvjeti u bušotini. Na slici 4-9 prikazan je način odlaganja u bušotine predložen od strane IAEA i Necsa (Nuclear Energy Corporation of South Africa) za iskorištene zatvorene radioaktivne izvore.



Slika 4-9 Odlaganje u bušotine (IAEA, 2009a)

5. IZBOR LOKACIJE ODLAGALIŠTA

5.1. Način odabira lokacije odlagališta

Ustrojstvo odabira lokacije (slika 5-1) dijeli se na dvije faze. Prva faza odnosi se na globalno vrednovanje državnog teritorija a druga na usporedbeno vrednovanje potencijalnog područja. Ovaj diplomski rad većinom će biti orijentiran na prvu fazu, gdje će se uz pomoć GIS računalnog programa odbaciti sva šira područja koja ne zadovoljavaju zahtjevima barem jednog izlučnog kriterija. U drugoj se fazi izdvojena potencijalna područja vrednuju usporedbenim kriterijima pri čemu se dobivaju potencijalne lokacije. Daljnjim, detaljnijim vrednovanjem potencijalnih lokacija dolazi se do preferentnih lokacija na kojima se mogu vršiti terenska istraživanja (Schaller, 1997).



Slika 5-1 Faze odabira lokacije

Potencijalna područja zahtijevaju površinu između 100 i 600 km^2 dok potencijalne lokacije između 2 i 20 km^2. Za preferentne lokacije potrebno je između 2 i 10 km^2 dok konačna lokacija mora imati oko 20 hektara površine za smještaj odlagališta i pratećih objekata (Schaller, 1997).

5.2. Kriteriji za izbor lokacije odlagališta

Prema Zaključku o utvrđivanju kriterija za izbor lokacija za termoelektrane i nuklearne objekte (NN 78/92) definiraju se dvije vrste kriterija kod odabira lokacija za odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada: eliminacijski i usporedbeni.

Eliminacijski kriteriji eliminiraju:

- *svi prirodni poplavni prostori bez obzira da li su zaštićeni ili ne;*
- *sva područja s maksimalnim mogućim intenzitetom potresa IX i višeg stupnja MCS ljestvice;*
- *prostori u zoni nominalnih aktivnih rasjeda;*
- *područja s pojačanom erozijom prouzrokovanom litološkim sastavom ili dinamičnim reljefom;*
- *područja izgrađena od stijena nestabilnih u prirodnim uvjetima i prigodom građevinske aktivnosti;*
- *područja s klizištima i tereni skloni odronjavanju, ako ugrožavaju vanjske objekte odlagališta*
- *područja zaštite izvorišta pitke vode prema Pravilniku o zaštitnim mjerama i uvjetima za određivanje zona sanitarne zaštite izvorišta vode za piće (u cilju zaštite voda lokacija odlagališta ne smije biti u području sa značajnijim vodonosnicima bilo kojeg tipa);*
- *područja kod kojih je kumulativna gustoća naseljenosti u radijusu od 20 km veća od 80 stanovnika po km^2;*
- *prostori posebne namjene i njihove zaštitne zone*
- *područja u zoni sadašnje ili buduće eksploatacije ruda, minerala, plina, nafte, ugljena i sl.;*
- *prostori nacionalnih parkova, nominalnih parkova prirode, i ostalih značajnih rezervata prirode;*
- *prostori kulturnih dobara upisanih u Listu svjetske kulturne baštine i prirodne baštine, prostori kulturnih dobara koja su po ukupnosti svojih vrijednosti od izuzetnog i velikog značaja za društvenu zajednicu.*

Usporedbeni kriteriji za odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada podijeljeni su u 4 skupine prema prevladavajućim karakteristikama:

1) *Tehničko-tehnološki aspekti*

- *Seizmotektonika i seizmika - povoljnije su lokacije u predjelima manjeg maksimalno očekivanog intenziteta potresa.*
- *Inženjerska geologija - što su nepovoljniji prirodni uvjeti na lokaciji (veći nagib terena, površinski sloj tla lošijih geomehaničkih karakteristika s manjim dozvoljenim opterećenjem), lokacija je lošija.*

2) *Sigurnost objekta*
   - *Hidrološki aspekti - povoljnije su lokacije izvan dosega gorskih tekućica, te u područjima s odsutnošću, odnosno slabijim razvojem ili rizikom erozijskih procesa.*
   - *Meteorološki aspekti - povoljnije su lokacije s manjim intenzitetom i količinom padalina.*
   - *Seizmotektonika i seizmika - povoljnije su lokacije u neotektonski manje aktivnim zonama.*
   - *Litologlija 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, gnajsevi).*
   - *Stanje tla - povoljnije su lokacije u područjima gdje prevladavaju tla niske kemijske agresivnosti.*

3) *Sigurnost i prihvatljivost uže lokacije*
   - *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.*
   - *Hidrološki aspekti - povoljnije su lokacije udaljenije od stalnih i povremenih površinskih tokova ili akumulacija.*
   - *Meteorološki aspekti - povoljnije su lokacije za koje je pretpostavljena disperzija prizemnog sloja atmosfere veća.*
   - *Hidrogeologija - povoljnije su lokacije s manjim zalihama podzemne vode, a uvjeti infiltracije i podzemnog tečenja takvi da smanjuju mogućnost transporta radionuklida.*

- *Demografski aspekti - povoljnije su lokacije s manjom gustoćom naseljenosti i lošijim demografskim prilikama u naseljima u radijusu 5 km od lokacije.*
- *Povoljnije su lokacije u čijem je polumjer od 5 km manji broj naselja i manji broj naselja s izraženijim središnjim i radnim funkcijama.*
- *Povoljnije su lokacije u čijem je radijusu 5 km manji broj turističkih središta te manji broj postojećih i planiranih turističkih smještajnih kapaciteta.*
- *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.*
- *Povoljnije su lokacije u čijem je radijusu od 5 km manje sporednih šumskih proizvoda: jestivih gljiva i ljekovitog bilja.*
- *Povoljnije su lokacije u čijem je radijusu do 5 km manji broj industrijskih središta manje osjetljive industrije.*
- *Povoljnije su lokacije gdje je priključak na infrastrukturne instalacije (vodovod, elektro-energetska mreža) bolji.*
- *Povoljnije su lokacije koje, s aspekta obrane, nemaju ograničenja ni posebnih zahtjeva.*
- *Povoljnije su lokacije gdje je u radijusu 5 km manji broj zaštićenih i evidentiranih lokaliteta i koji su manjeg značenja.*
- *Povoljnije su lokacije gdje je u radijusu 5 km manji broj zaštićenih i evidentiranih lokaliteta i objekata i manjeg su značaja.*
- *Povoljnije su lokacije gdje je u radijusu 5 km manji udio visokopogodnih tala za biljnu proizvodnju.*
- *Povoljnije su lokacije koje su biološki manje vrijedne ili manje osjetljive.*
- *Povoljnije su lokacije gdje je u radijusu od 5 km manja migracija podzemnih voda u tlima i bioakumulacija radionuklida u organizmima.*

4) *Prihvatljivost šire lokacije*

- *Povoljnije su lokacije gdje je u radijusu 5- 20 km manji broj naselja s izraženijim središnjim i radnim funkcijama i manji broj većih naselja.*
- *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.

- *Povoljnije su lokacije gdje je u radijusu do 20 km manji broj vrijednih zaštićenih i evidentiranih objekata prirodne baštine.*
- *Povoljnije su lokacije s manjom zastupljenošću posebno vrijednih zaštićenih i evidentiranih cjelina i objekata kulturne baštine.*

6. PRIMJENA GIS TEHNOLOGIJE

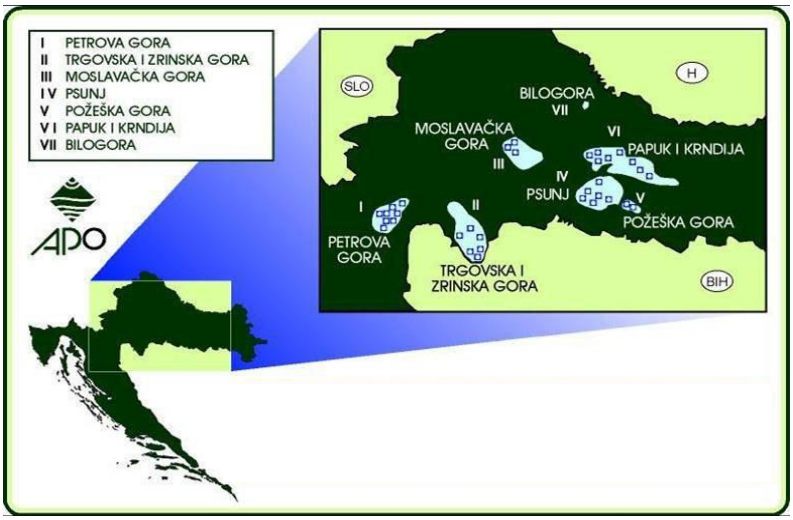
Prema najčešće citiranoj definiciji, GIS je „sustav za prikupljanje, spremanje, provjeru, integraciju, upravljanje, analiziranje i prikaz podataka koji su prostorno povezani sa Zemljom. U taj sustav obično je uključena baza prostornih podataka i odgovarajući programi“.

GIS je jedna od najatraktivnijih informatičkih disciplina današnjice, a definirana je i opisana kao sustav o cjelokupnom zemljinom prostoru s ciljem uspješnijeg gospodarenja (Perković, 1998).

6.1. Primjena GIS-a u zbrinjavanju radioaktivnog otpada

Prilikom donošenja odluke o lokaciji budućeg odlagališta, GIS odnosno geografski informacijski sustav mogao bi imati višestruku uporabu. Mogao bi biti korišten kao WebGIS servis prilikom uključivanja javnosti u sudjelovanje u odabiru lokacija budućeg odlagališta ili od strane struke prilikom vrednovanja lokacije (Peša, 2013). Općenito, analiza donošenja odluke o pogodnom području za posebnu namjenu uključuje usvajanje parametara i kriterija iz svih dostupnih (službenih i javnih) dokumenata, te njihovo povezivanje s ažurnim geoprostornim podacima i pripadajućim opisnim podacima.

Uvriježene metode koje se koriste pri odabiru prihvatljivih područja su analiza višekriterijskog odlučivanja (*engl. MCDA – Multi Criteria Decision Analysis*) te geografski informacijski sustav (GIS). Ove dvije metode se vrlo često kombiniraju, pa se radi o trećoj GIS - MCDA integriranoj metodi (Perković et al., 2012). Izbor lokacije odlagališta složen je proces koji uključuje mnogo bitnih čimbenika, kao što su zaštita okoliša, geologija te hidrogeološke, inženjerskogeološke i socijalno-ekonomske značajke. Uporaba GIS-a za lociranje odlagališta otpada je ekonomičan i praktičan način za odabir lokacije u kratkom vremenskom periodu, dok MCDA predstavlja koristan alat kod odabira lokacije na način da se rangiranjem i pridavanjem težinskih vrijednosti čimbenicima utvrđuju što kvalitetnija potencijalna područja. Ova metodologija je uspješno korištena i u Republici Hrvatskoj, a rezultirala je brojnim kartografskim prikazima (Slika 6-1) te konačno pogodnim potencijalnim područjima za odlaganje radioaktivnog otpada. Nakon definirane metodologije i kriterija pri izboru, najprije je utvrđeno 7 potencijalnih područja, a ubrzo nakon njih i 34 potencijalne lokacije.



Slika 6-1 Prikaz 34 potencijalne lokacije u 7 potencijalnih područja (Schaller, 1997)

U današnje vrijeme kada je globalno aktivna povećana briga za okoliš, potreba za sudjelovanjem javnosti u važnim procesima donošenja odluka postaje sve važnija. Upravo je nedostatak transparentnosti bio veliki nedostatak prilikom procesa odabira lokacije u Hrvatskoj, pa se može smatrati dobrim primjerom za zatvoreno prostorno odlučivanje.

6.1.1. Primjena GIS-a pri vrednovanju lokacije odlagališta

GIS se može koristiti prilikom sve tri faze odabira odlagališta radioaktivnog otpada koje je izdala IAEA:

1) PRVA FAZA podrazumijeva izlučno vrednovanje kada se u obzir uzimaju geologija, gustoća naseljenosti, dostupnost lokacije i zaštita. U ovoj fazi je za odabir odlagališta dovoljan samo GIS.
2) DRUGA FAZA odnosi se na preliminarno utvrđivanje ograničenog broja lokacija za daljnja istraživanja. U ovoj fazi GIS se koristi u svrhu pružanja osnovnih informacija o karakteristikama odlagališta pomoću geografskih čimbenika.
3) TREĆA FAZA uključuje konačnu potvrdu o prihvatljivosti lokacije odlagališta. U ovoj fazi, GIS se koristi za detaljne informacije o odlagalištu uporabom točnih proračuna te kao pomoć pri procjeni utjecaja na okoliš, pružajući ključne detalje, analizu i model predviđanja.

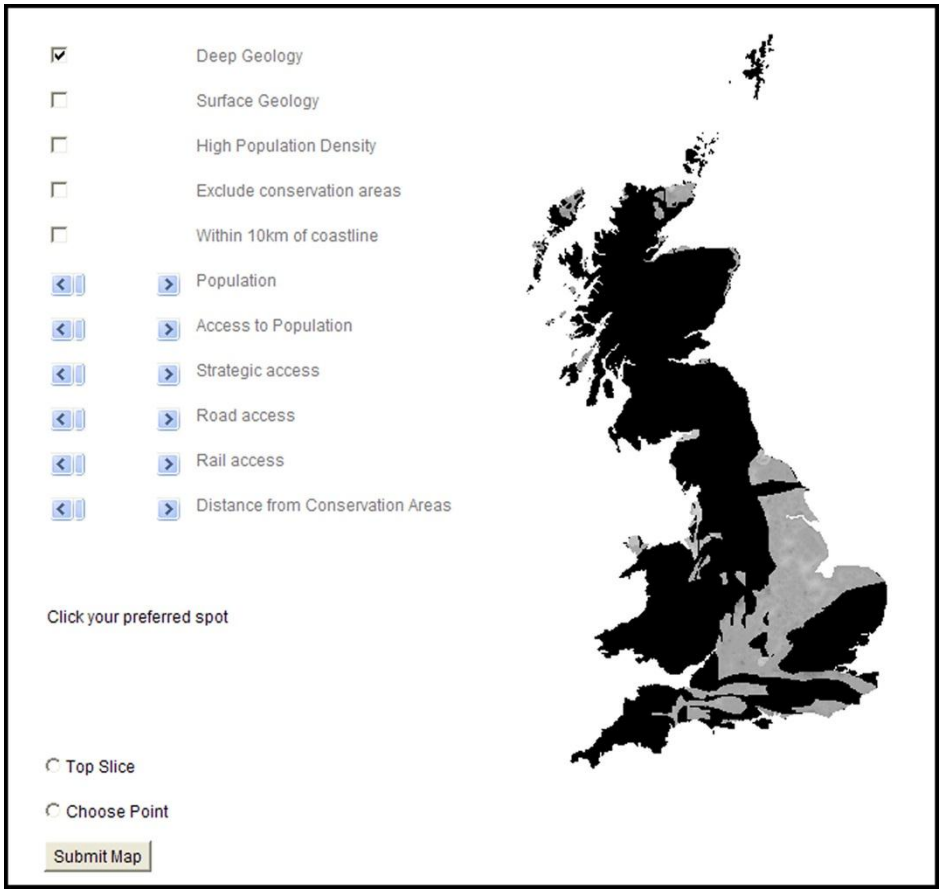
Uporaba GIS-a ima mnoge prednosti: brzina i efikasnost, mogućnost istovremenog istraživanja i pretraživanja cijele zemlje za odgovarajućim lokacijama, nepristrano tretiranje svih lokacija uporabom iste procedure, mogućnost rada s velikim brojem

informacija uključujući geološke, socijalno-ekonomske, ekološke, političke i sl., visok stupanj fleksibilnosti koji omogućuje brzo istraživanje učinaka promjene kriterija te pruža znanstveno temeljno opravdavanje smještaja potencijalne lokacije (Peša, 2013).

6.1.2. Primjena GIS-a pri uključivanju javnosti u donošenju odluka

Osim struke, brojni su primjeri uspješnog javnog korištenja GIS - MCDA metodologije pri odabiru potencijalne lokacije odlagališta radioaktivnog otpada. Najpoznatiji je upravo sustav za otvoreno prostorno donošenje odluka (*engl. OSDM – Open Spatial Decision Making*), koji je zamišljen kao sustav za pomoć pri odabiru lokacija prema zadanim kriterijima. Razvio ga je Steve Carter 1996. godine. Takav sustav donošenja odluka objedinjuje višekriterijsko odlučivanje, geografski informacijski sustav i Internet/World Wide Web tehnologiju (Perković et al., 2012).

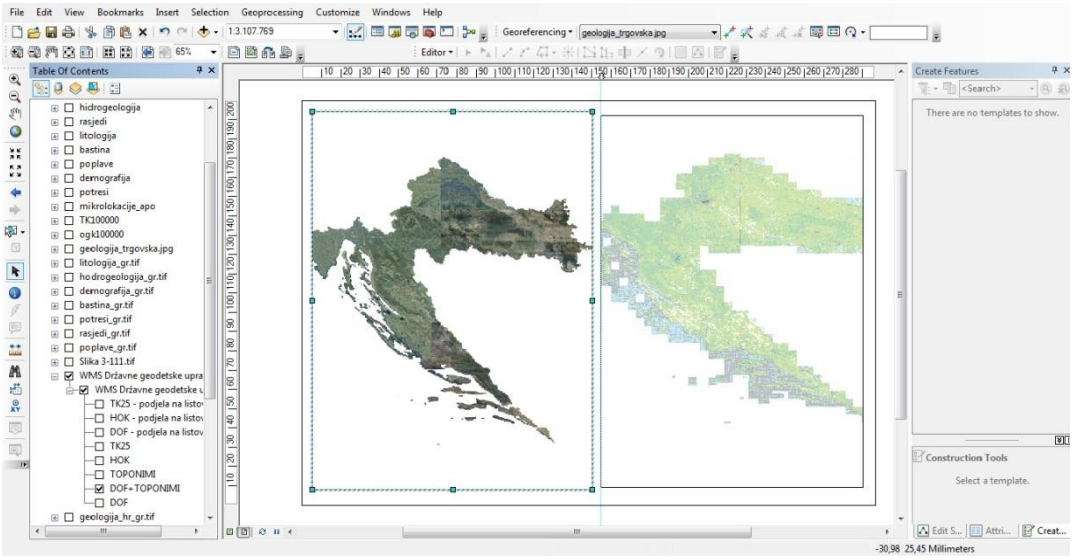
Već desetljeće u Velikoj Britaniji postoji vrlo posjećena i aktivna URL stranica čiji naslov glasi „Exploring environmental decision making using Internet GIS" (Perković et al., 2012). Ova stranica namijenjena je svima onima koji žele sudjelovati u planiranju i odlaganju državnog radioaktivnog otpada odnosno, pojedincima izvan struke koji imaju pravo sudjelovati u odabiru lokacije na način da uporabom interaktivne karte pridaju težinske udjele pojedinim kriterijima koje smatraju bitnima. Izrada karte najznačajniji je dio u čitavom sustavu. Ulazni podaci sastoje se od dva skupa tematskih geoprostornih slojeva: slojeva ograničenja i slojeva vrednovanja kriterija (Slika 6-2). Slojevi ograničenja su ulazni podaci za višekriterijsko sudjelovanje te uključuju: stabilne geološke formacije na velikoj dubini, glinovite naslage na površini, zaštićena područja, obalni pojas (manje od 10 km) te područja s velikom gustoćom naseljenosti. Prethodno navedeni slojevi služe ograničavanju geografskih područja i broja potencijalnih mjesta za razmatranje. Podaci o vrednovanju sastoje se iz šest GIS slojeva kriterija: gustoća naseljenosti na području 2x2 km^2; broj ljudi koji žive unutar polumjera 25 km od potencijalne lokacije: strateški pristup (prometna povezanost od NE do odlagališta); cestovna i željeznička povezanost te udaljenost zaštićenih područja. Konačno se sustavu šalje željena korisnička karta prema ponuđenim kriterijima. Može se poslati karta s lokacijom (jedna točka) te manjim ili većim područjem izraženim u jedinicama površine. Izradi karte prethodi i obavezno kreiranje vlastitoga profila s podacima kao što su spol, dob, trenutni status na Sveučilištu, stupanj obrazovanja te mjesto stanovanja (Perković et al., 2012).



Slika 6-2 Izrada karte pogodnih područja na temelju slojeva ograničenja i slojeva vrednovanja kriterija (Perković et al., 2012)

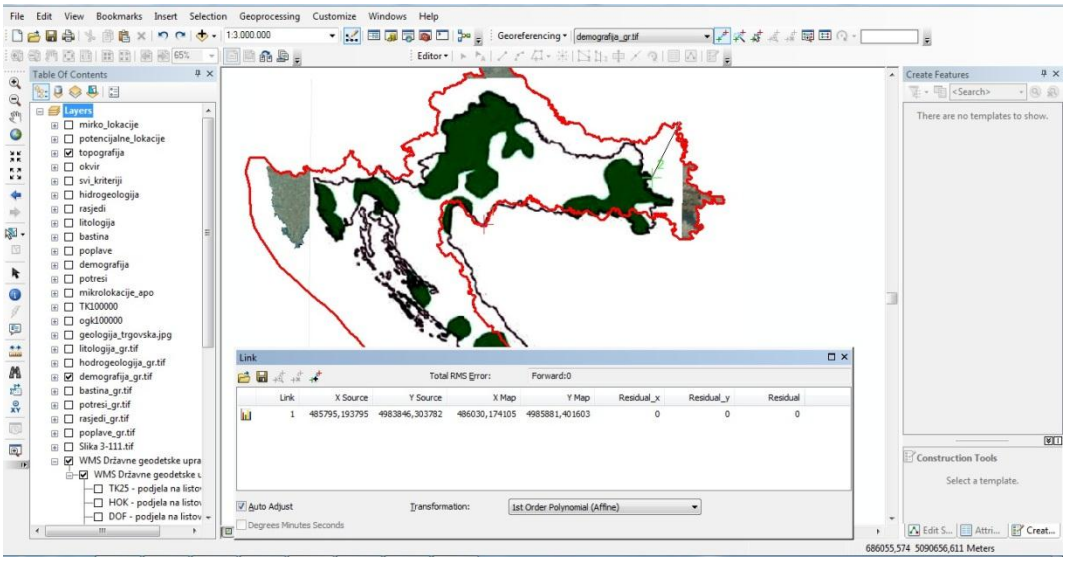
6.2. Prikaz sučelja i primjene GIS-a

Za potrebe izrade diplomskog rada korišten je ArcMap 10.1. GIS program. Kao osnovni slojevi za Republiku Hrvatsku korištene su Hrvatska osnovna karta (HOK) 1:5000, topografska karta (TK25) 1:25000 i digitalna ortofoto karta (DOF) 1:5000 koje su dostupne na Geoportalu Državne geodetske uprave. Na slici 6-3 prikazano je sučelje ArcMap programa s DOF i TK25 kartama. Osim toga korištene su i osnovne geološke karte 1:100000.



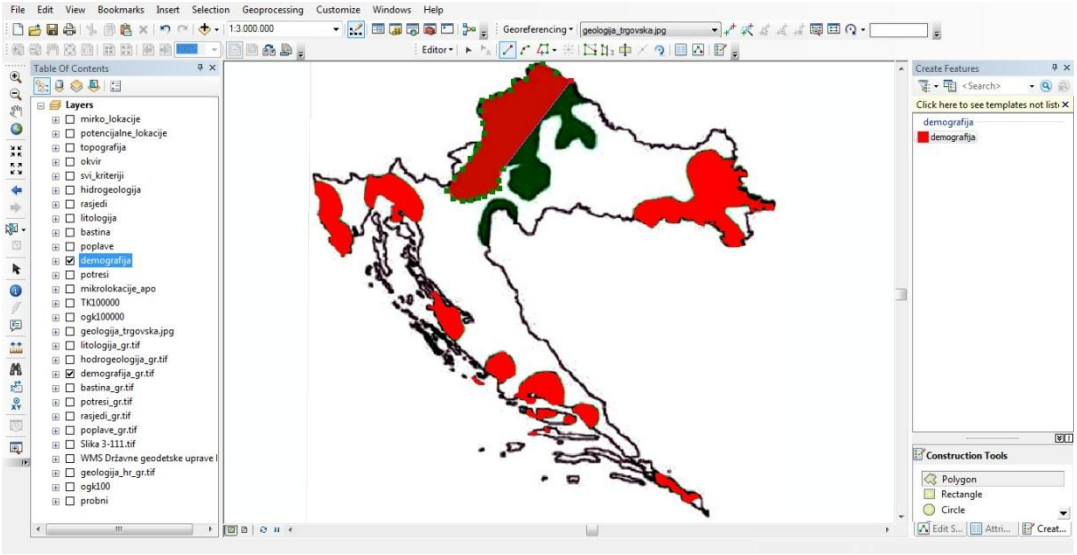
Slika 6-3 DOF i TK25 karte u ArcMap-u

Za izradu diplomskog rada koristilo se 7 postojećih karta sa odbačenim područjima nakon vrednovanja određenim kriterijem (karte preuzete iz Schaller, 1997). Nakon ubacivanja karata u GIS u JPEG formatu, iste su se postupkom georeferenciranja postavile na svoje stvarne prostorne koordinate, te su se dalje spremale i koristile u TIF formatu. Na slici 6-4 prikazan je postupak georeferenciranja karte s izlučnim vrednovanjem RH kriterijem demografije - gustoće naseljenosti.



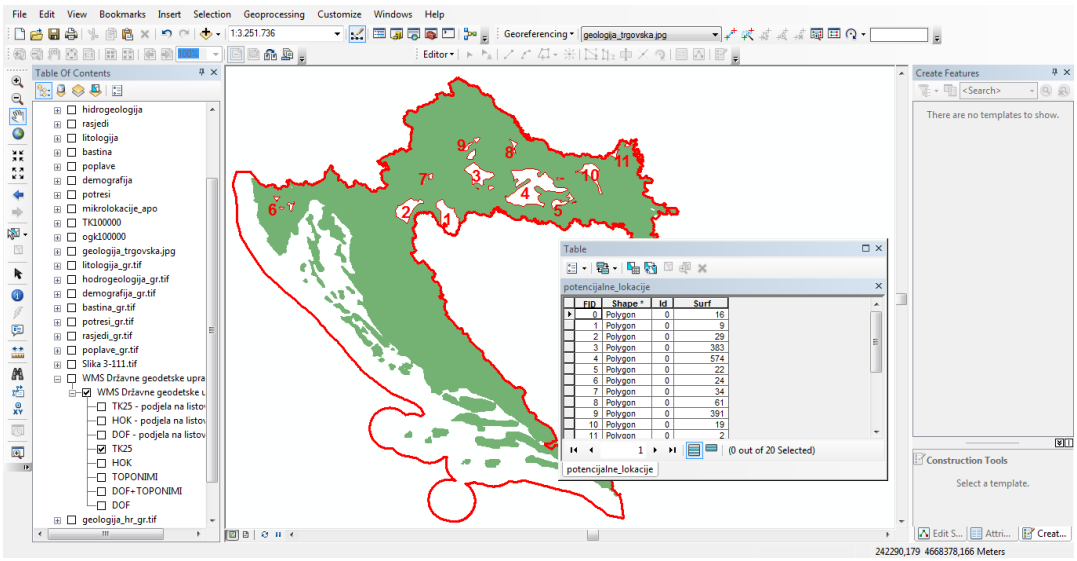
Slika 6-4 Postupak georeferenciranja karata

Nakon georeferenciranja izrađuju se vektorske teme (shapefiles), tj. poligoni, preko postojećih karata s odbačenim područjima. Na taj se način rasterske teme pretvaraju u vektorske, koje nam omogućavaju lakše upravljanje s podacima. Na slici 6-5 prikazano je crtanje poligona preko rasterskih karata s odbačenim područjima.



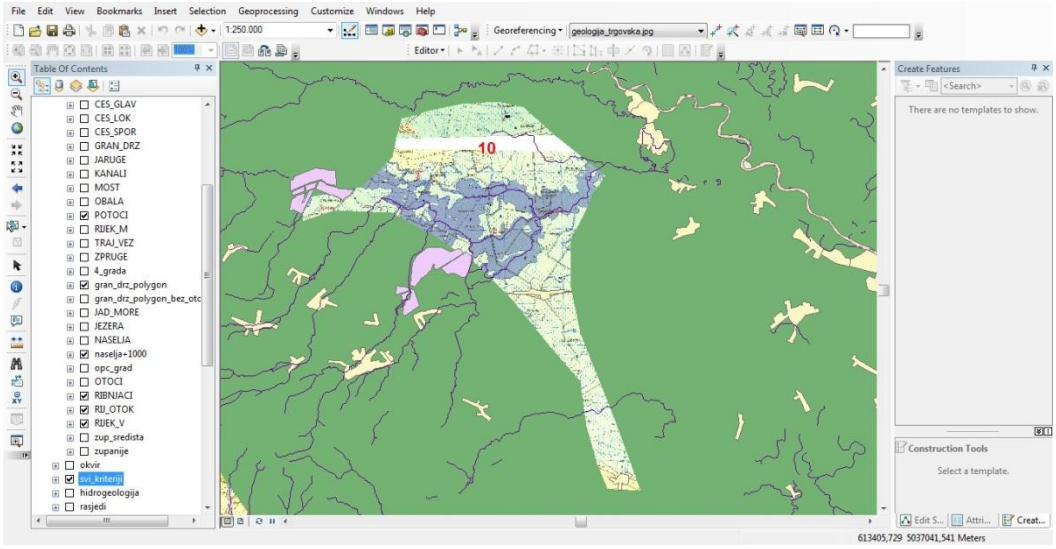
Slika 6-5 Crtanje poligona

Preklapanjem svih vektorskih karata s odbačenim područjima (slika 6-6), na karti ostaju neoznačena potencijalna područja za odlaganje radioaktivnog otpada. Također, uz pomoću programa, sada je moguće izračunati površinu svake potencijalne lokacije.



Slika 6-6 Potencijalna područja i njihove površine

Nakon izlučnog vrednovanja teritorija RH, pristupa se analizi svakog potencijalnog područja. U kombinaciji s TK25 i DOF, kao podloga korištena je i osnovna geološka karta mjerila 1:100000 te 1:200000. Vektorizirani podaci kao naselja, ceste, rijeke, potoci, jezera, korišteni su pri detaljnoj analizi svakog područja. Na slici 6-7 prikazano je potencijalno područje s geološkom podlogom te vektoriziranim slojevima naselja, cesta i potoka.



Slika 6-7 Pregled potencijalnog područja

6.3. Izlučno vrednovanje teritorija Republike Hrvatske

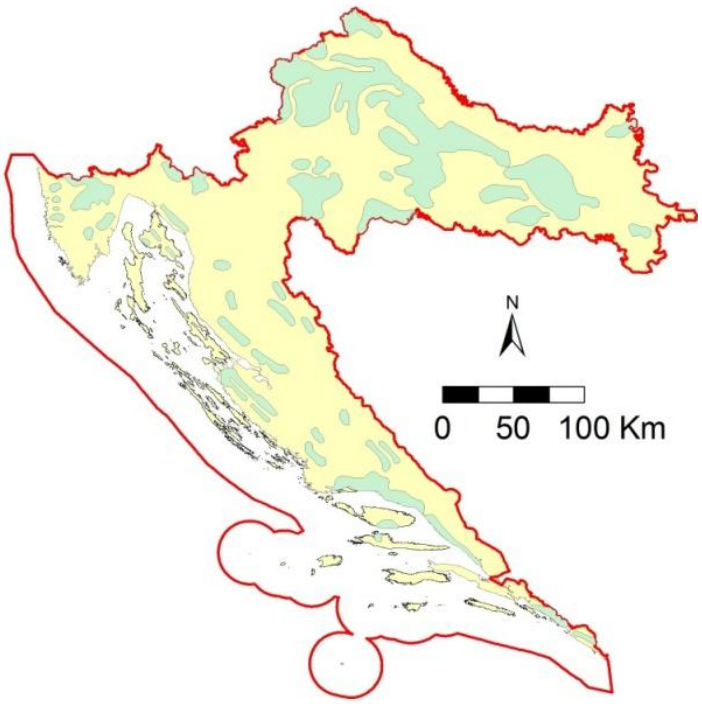
Odabirom 7 izlučnih kriterija za izbor lokacija za termoelektrane i nuklearne objekte definiranim u Narodnim novinama (NN78/92), te uz pomoć GIS programa, odbačena su sljedeća područja:

- Odbačena područja nakon vrednovanja kriterijem litoloških i geomorfoloških osobina (slika 6-8)

Litološki sastav, geotehničke i geomorfološke osobine najvažniji su kriterij pri odabiru lokacije. Ovisno o tipu odlagališta, razlikuju se i kriteriji. Za površinska odlagališta s inženjerskim strukturama odbacuju se područja s pojačanom erozijom uzrokovanom litološkim sastavom ili dinamičnim reljefom, a koja su izgrađena od stijena nestabilnih u prirodnim uvjetima ili prigodom graditeljskih djelatnosti. Najpovoljnije matične stijene za površinska odlagališta su gline gornjeg pliocena i kvartara i neogenski

lapori. Kod podzemnih odlagališta tunelskog tipa odbacuju se područja s klizištima i tereni skloni odronjavanju (Schaller, 1997).

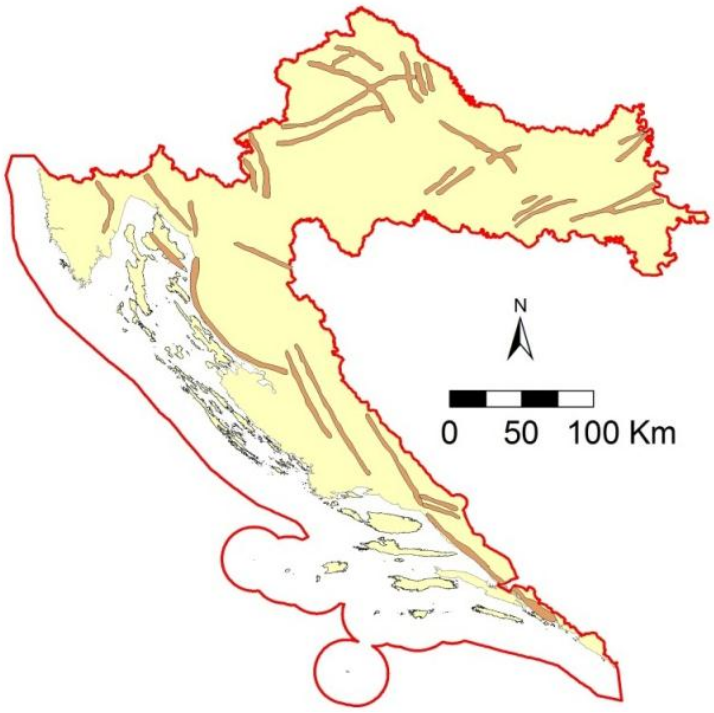
Odbačena područja: gorski masivi Medvednice, Ivanščice i Banskog brda, pobrđa unutarnje Istre, Međimurskih gorica, Dilja i većeg dijela Bilogore, sjeverna Banovina s donjim Pounjem, prigorje i podgorje Medvednice, Ivanščice, Psunja, Papuka i Krndije te prostor Unsko-koranske zaravni u kršu i podvodna područja Crne Mlake, Turopolja, Lonjskog polja i Spačve. Odbačena su područja fluvijalne sedimentacije duž riječnih tokova u unutrašnjosti (Sava, Drava, Dunav, Mura, Bednja, Breznica, Karašica, Sutla, Krapina, Kupa, Odra, Glina, Lonja, Česma, Ilova, Orljava Bosut), u Istri (Mirna, Raša) i Dalmaciji (Neretva) (Schaller, 1997).



Slika 6-8 Kriterij litoloških i geomorfoloških osobina

- Odbačena područja nakon vrednovanja kriterijem udaljenosti od aktivnih rasjeda (slika 6-9)

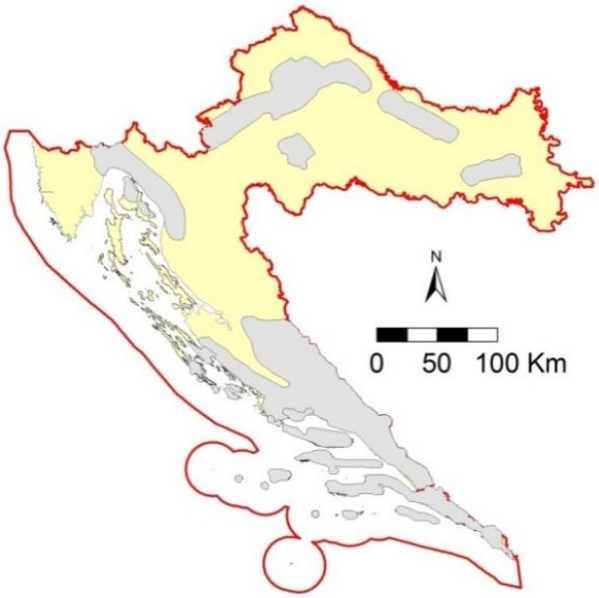
Odbačena područja: Sjeverozapadna Hrvatska, duž crte žumberačka gora-Medvednica-Kalnik, veći dio Bilogore, pobrđe Dilja, donje Pokuplje, znatan dio Kvarnera i gotovo cijela Dalmacija.



Slika 6-9 Kriterij udaljenost od aktivnih rasjeda

- Odbačena područja nakon vrednovanja kriterijem ugroženosti od potresa (slika 6-10)

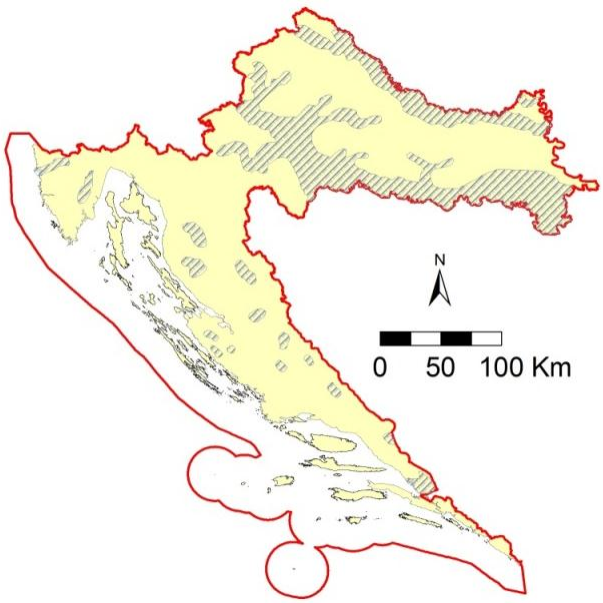
Odbačena područja: Sjeverozapadna Hrvatska duž crte žumberačka gora-Medvednica-Kalnik, veći dio Bilogore, pobrđe Dilja, dio slavonske Posavine duž crte Sl. Brod-Đakovo-Vinkovci-Županja, slavonska Podravina duž crte Čađavica-D. Miholjac, Beničanci-Valpovo-Belišće te Koška-Osijek-Dalj, Bansko brdo u Baranji, donje Pokuplje, znatan dio Kvarnera i gotovo cijela Dalmacija



Slika 6-10 Kriterij ugroženosti od potresa

- Odbačena područja nakon vrednovanja kriterijem ugroženosti od plavljenja (slika 6-11)

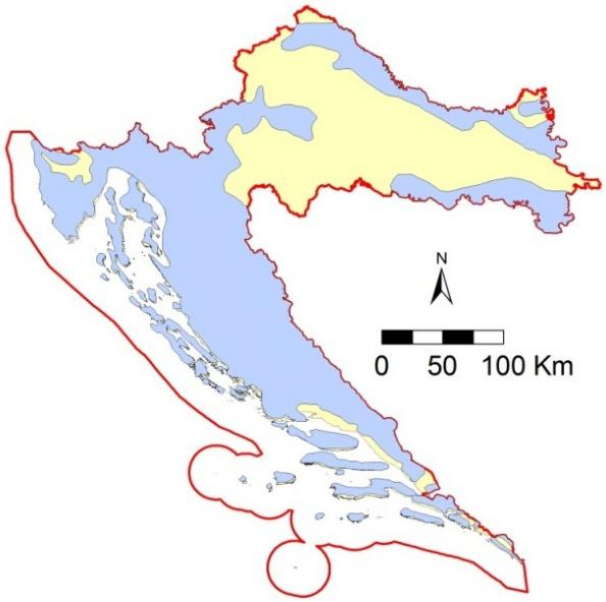
Odbačena područja: Poloji (naplavne ravni) rijeke Mure, Drave, Save i Kupe te nekih manjih rijeka u unutrašnjosti, naplavne ravni Mirne i Raše u Istri, ušće Neretve te niz polja u krškom prostoru Hrvatske.



Slika 6-11 Kriterij ugroženosti od plavljenja

- Odbačena područja nakon vrednovanja kriterijem hidrogeologije, tj zaštićenih vodonosnika (slika 6-12)

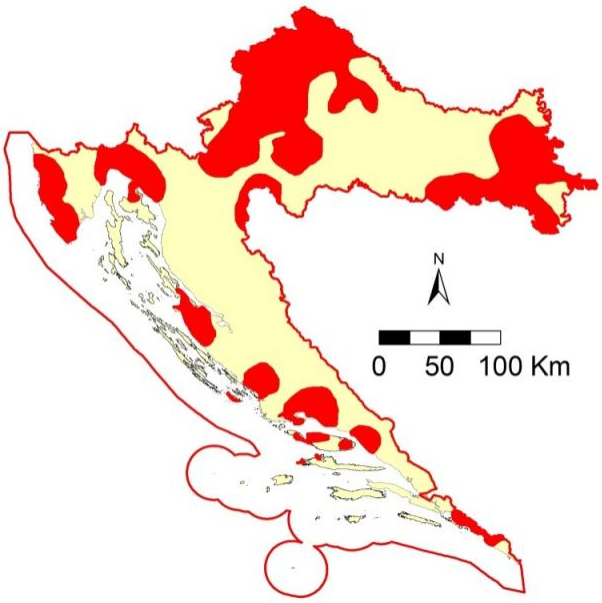
Odbačena područja: Područje krša u Hrvatskoj, tj. prostor južno od crte Samobor-Karlovac Slunj-Cetingrad. Zbog postojanja velikih vodonosnika, po istom se ovom kriteriju isključuju i područja Pomurja, Podravine te veliki dijelovi Podunavlja i Posavine.



Slika 6-12 Kriterij hidrogeologije

- Odbačena područja nakon vrednovanja kriterijem gustoće naseljenosti (slika 6-13)

Odbačena područja: Šira područja naših najvećih gradova Zagreba, Splita, Rijeke i Osijeka, kao i Pule, Zadra, Šibenika i Dubrovnika te Karlovca, Siska, Varaždina i Slavonskog Broda.

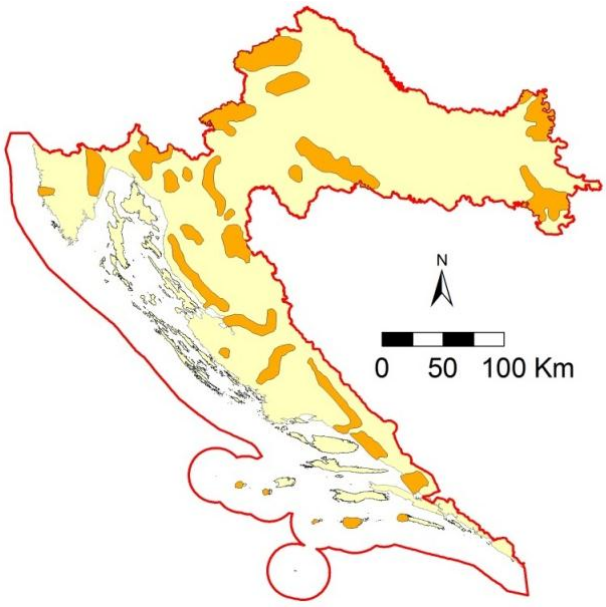


Slika 6-13 Kriterij gustoća naseljenosti

- Odbačena područja nakon vrednovanja kriterijem zaštićenih prirodnih i kulturnih baština (slika 6-14)

Odbačena područja zaštićene prirodne baštine: nacionalni parkovi Plitvička jezera (pod zaštitom UNESCO), Risnjak, Brijuni, Paklenica, slapovi Krke, Kornati i Mljet; nominirani parkovi prirode Učka, Žumberak, Bjelolasica (Bijele i Samarske stijene), Mrežnica, Hrvatsko zagorje, Medvednica, Lonjsko polje, Kopački rit, Velebit, Silba-Olib, Telašćica, donji tok Cetine, Biokovo, donja Neretva, otok Korčula, Lastovo i Elafiti; ostali važniji nominirani rezervati prirode Limska draga, Vražji prolaz-Zeleni vir, Spačva, Gacka, južni dio otoka Cresa, Silba, Vidova gora na Braču, Malostonski zaljev i dr.

Odbačena područja zaštićene kulturne baštine: Dioklecijanova palača u Splitu i stara gradska jezgra Dubrovnika (pod zaštitom UNESCO), kao i područja gradova u kojima se nalaze važni spomenici kulturne baštine. Isključena su također područja šire okolice arheološki vrijednih lokaliteta, povijesnih urbanih i ruralnih naselja te memorijalna područja. Zbog koncentracije kulturnih dobara i pejsažnih osobitosti isključena su područja Mošćenička Draga-Rijeka-Novi Vinodolski, Trogir-Split-Omiš s bližim zaleđem, Makarska rivijera s masivom Biokova, otoci Krk, Brač, zapadni dio Hvara s Paklenim otocima, Biševo, istočni dio otoka Korčule, zapadni dio Pelješca, Lastovo te Dubrovačka rivijera između Slanog i Cavtata s bližim zaleđem i Elafitskim otocima.



Slika 6-14 kriterij zaštićenih prirodnih i kulturnih baština

Nakon preklapanja svih karata s izlučnim kriterijima, neoznačeno je ostalo 11 potencijalnih područja za odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada (slika 6-15). Ukupna površina svih potencijalnih područja iznosi 3443 km^2 što je 6,089% ukupne površine Hrvatske.

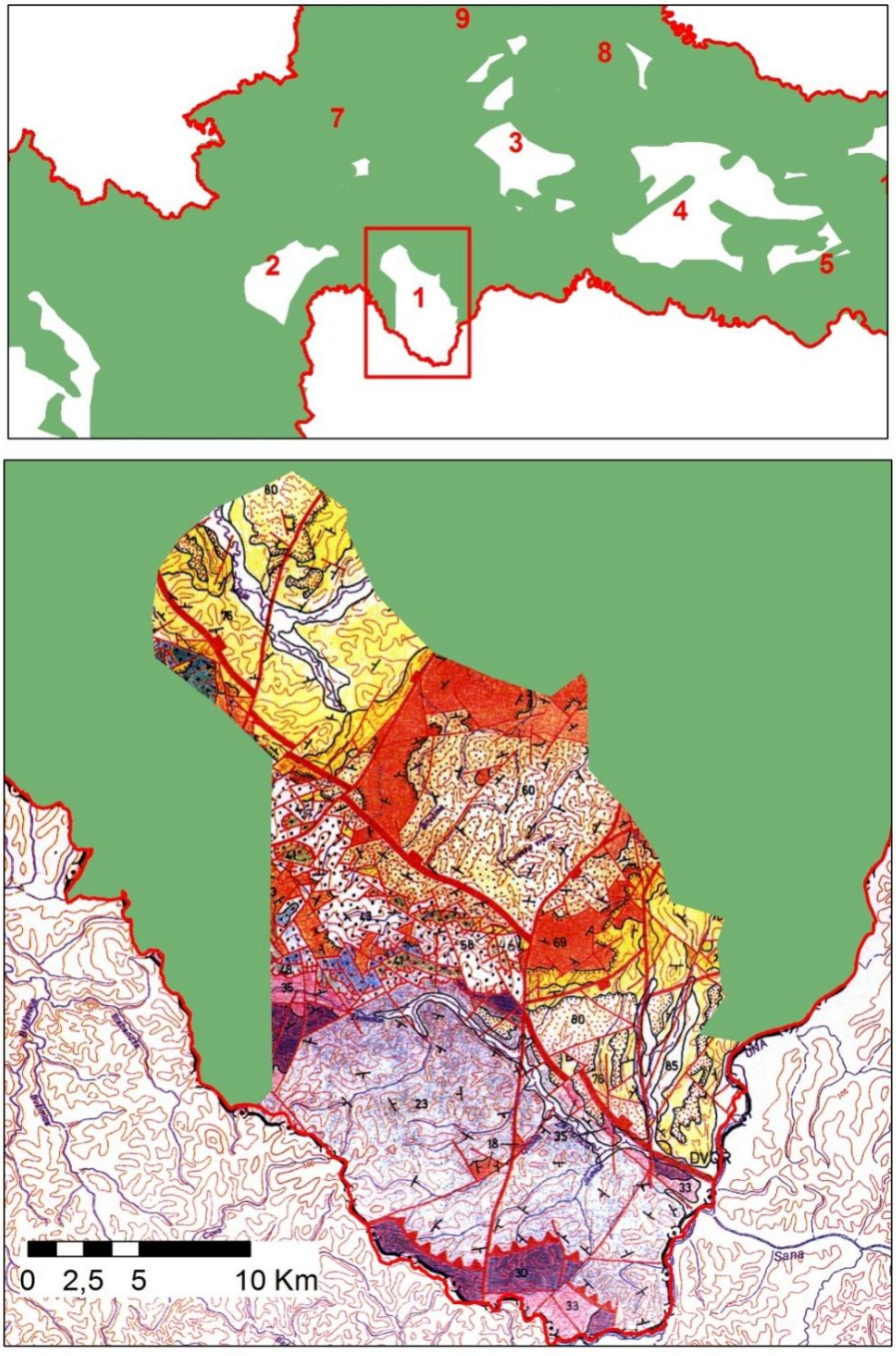


Slika 6-15 Potencijalna područja

6.4. Potencijalna područja sa geološkim podlogama

Potencijalno područje 1

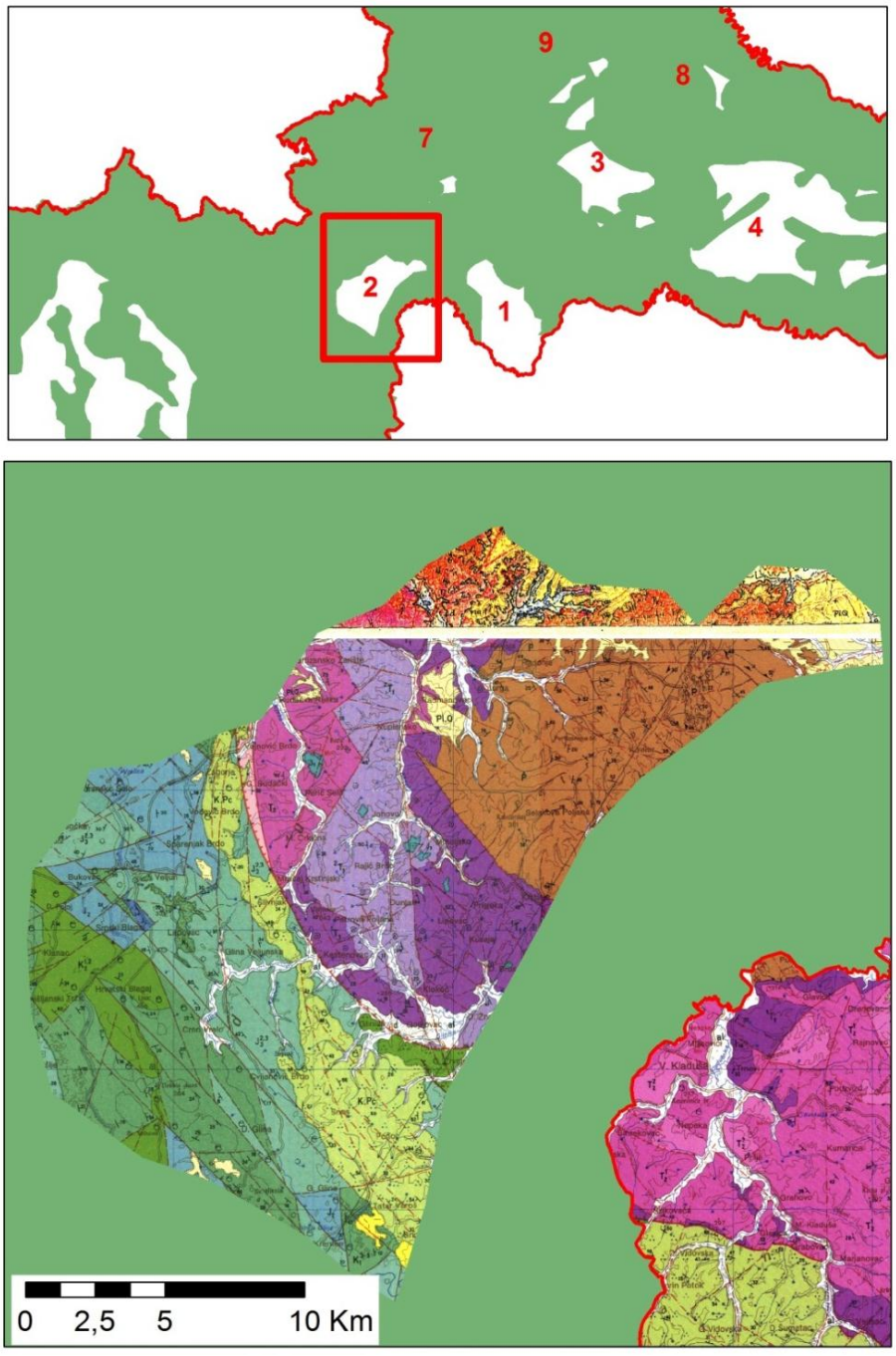
Potencijalno područje 1 (slika 6-16) nalazi se u Sisačko-moslavačkoj županiji u općini Dvor. Površina potencijalnog područja iznosi 574 km^2. Kao podloga korištena je geološka karta mjerila 1:200000.



Slika 6-16 Potencijalno područje 1

Potencijalno područje 2

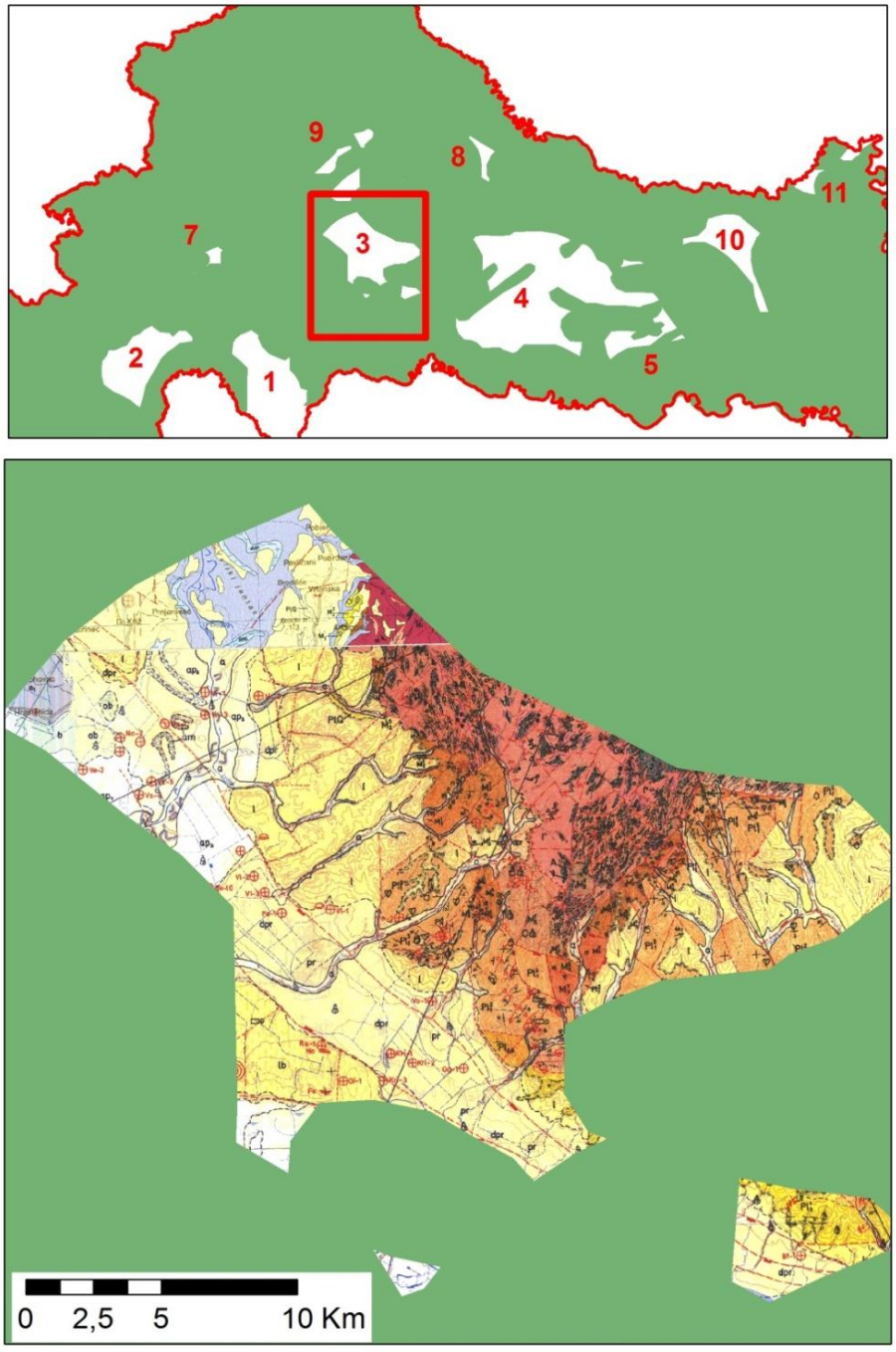
Potencijalno područje 2 (slika 6-17) prekriva 383 km^2 te se nalazi unutar Karlovačke, a dijelom i unutar Sisačko-moslavačke županije. Na ovom području nalazi se samo jedno mjesto koje ima broj stanovnika veći od 1.000 (Općina Vojnić s 4.764 stanovnika). Na sjeveru ovog područja nalazi se Petrova Gora (Petrovac, 507 m) koja je izgrađena od škriljavca, pješčenjaka i konglomerata iz doba perma. Najznačajniji površinski tok na ovom području je rijeka Korana.



Slika 6-17 Potencijalno područje 2

Potencijalno područje 3

Potencijalna područja 3 (slika 6-18) ukupno prekrivaju 412 km^2 a nalaze se unutar tri županije: Zagrebačke, Sisačko-moslavačke te Bjelovarsko-bilogorske županije. Unutar potencijalnih područja nalaze se dva naselja koja prema popisu stanovnika iz 2011. godine imaju broj stanovnika veći od 1.000: Općina Križ (6.963) i Općina Popovača (11.905). Najznačajniji površinski tok na ovom području je rijeka Česma i njezini pritoci.

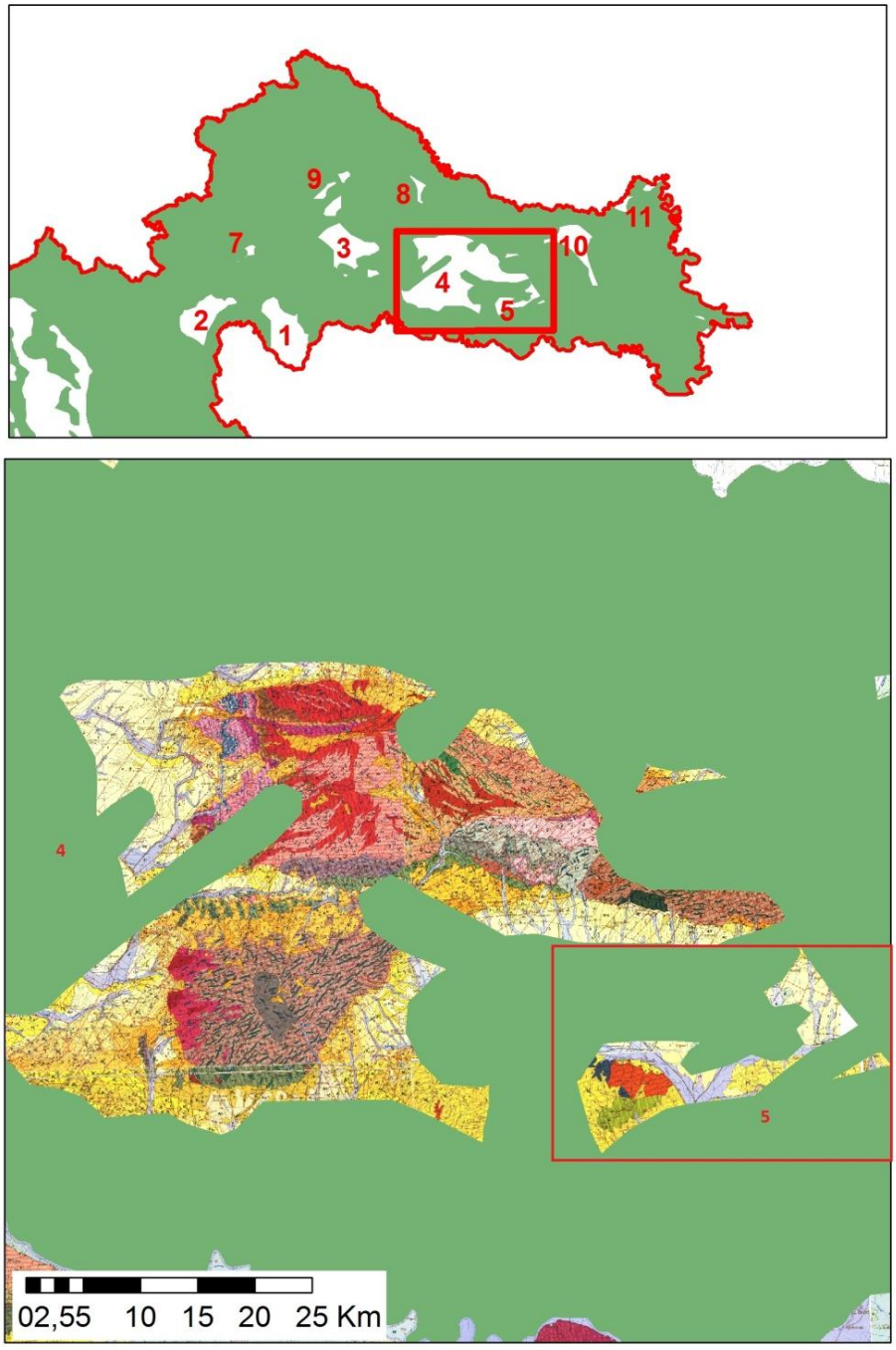


Slika 6-18 Potencijalno područje 3

Potencijalna područja 4 i 5

Potencijalno područje 4 (slika 6-19) presijeca 5 županija: Bjelovarsko-bilogorsku, Sisačko-moslavačku, Požeško-slavonsku, Brodsko-posavsku i Virovitičko-podravsku. Područje se rasprostrinje na 1.368 km^2. Ovdje se nalaze dva grada s brojem stanovnika većim od 1 000: Daruvar (11.633) i Pakrac (8.460). Na ovom području dominiraju masivi Papuk, s najvišim vrhom Papuk (953 m) i Psunj s vrhom Brezovo Polje (984 m). Psunj je uglavnom izgrađen od prekambrijskih metamorfita, gnajseva, dok je Papuk izgrađen od stijena starijeg paleozoika, migmatskih gnajseva. Mnogi potoci na ovom području pripadaju slivu Save u koju se ulijevaju preko Orljave i potoka Pakra.

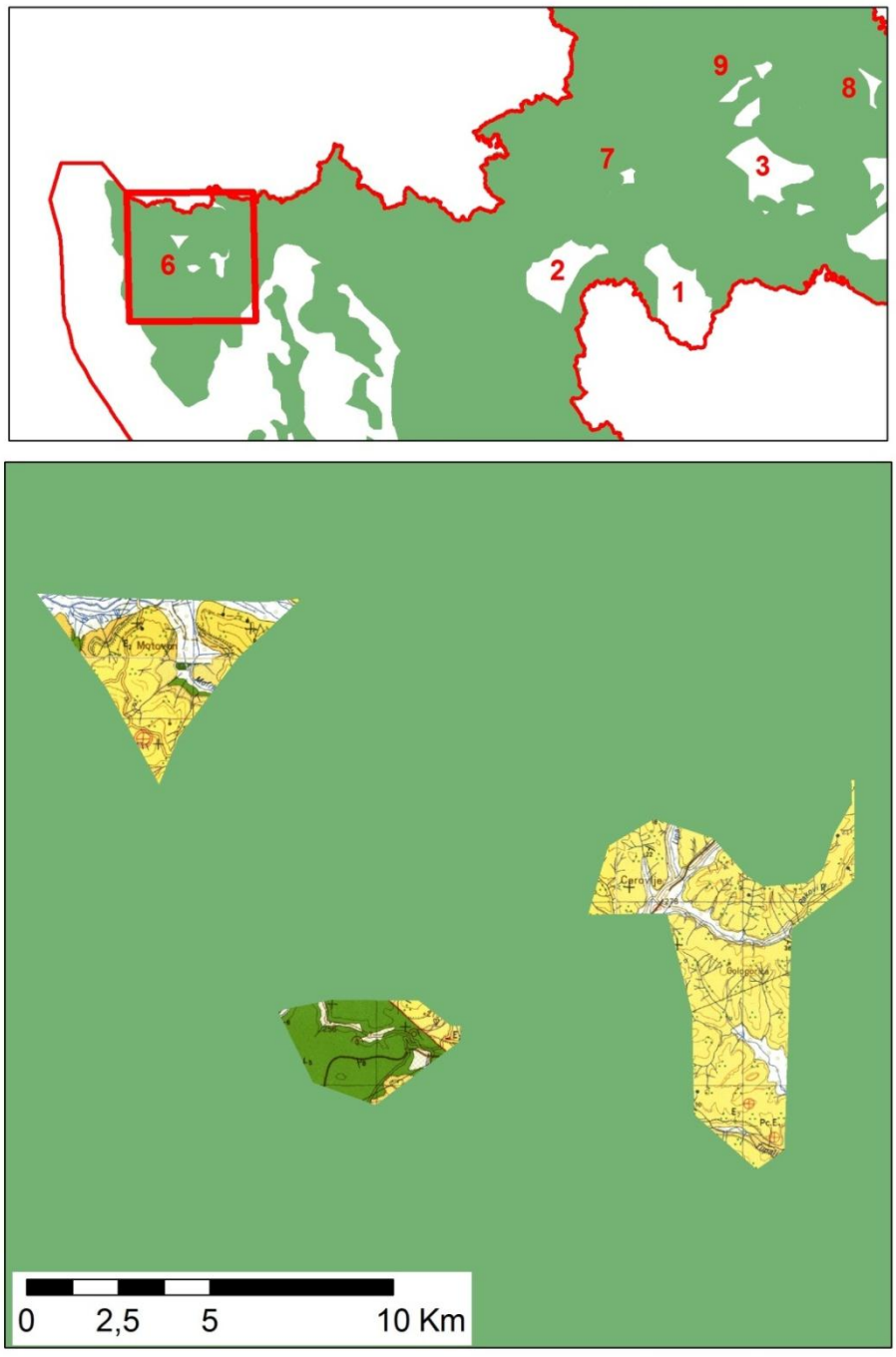
Potencijalno područje 5 nalazi se u Požeško-slavonskoj županiji i prekriva 122 km^2. Na rubu samog područja nalaze se dva veća grada: Požega s 26.248 stanovnika i Pleternica s 11.323 stanovnika.



Slika 6-19 Potencijalno područje 4 i 5

Potencijalno područja 6

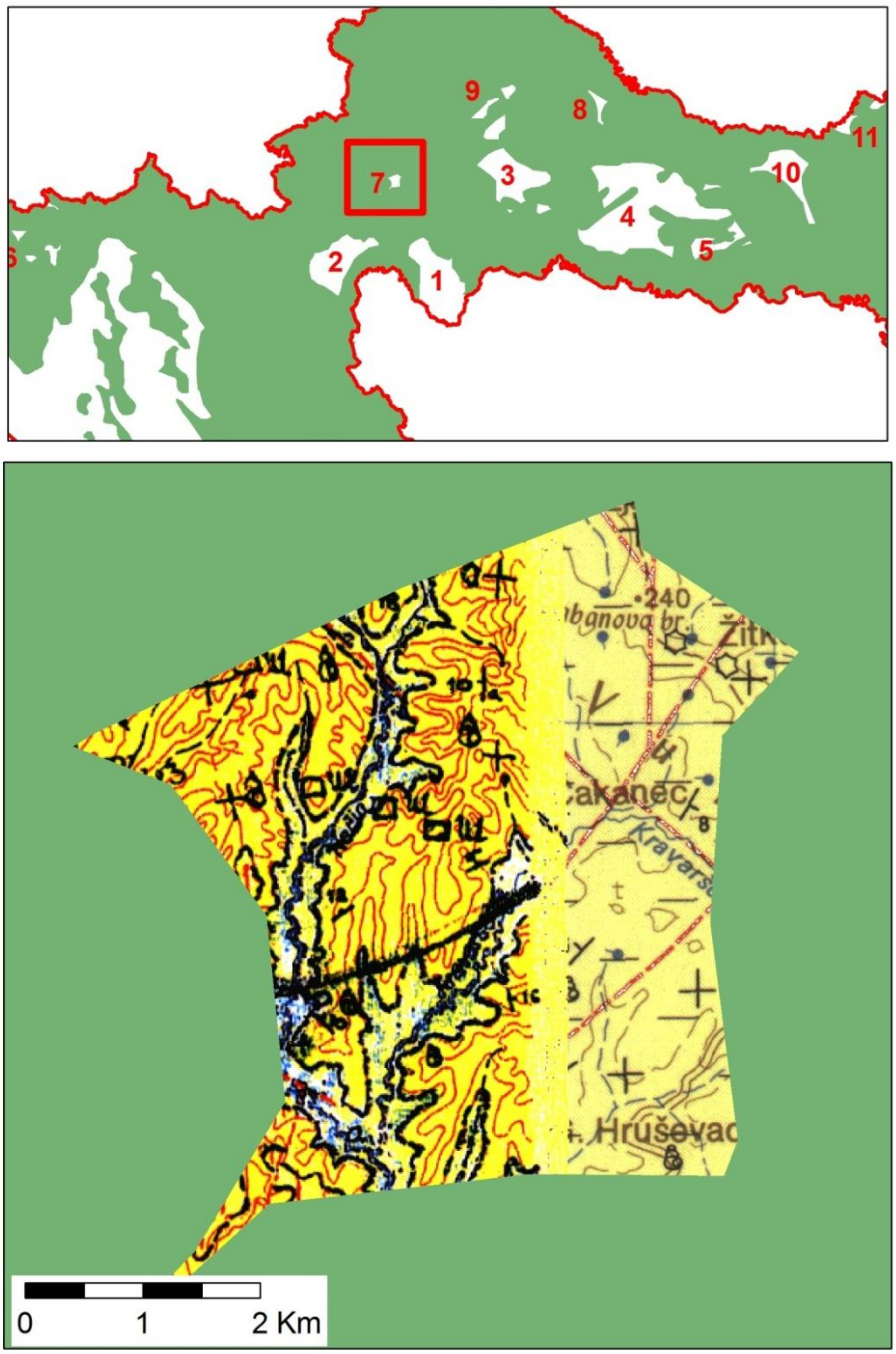
Potencijalno područje 6 (slika 6-20) nalazi se u Istarskoj županiji i prekriva područje površine 54 km^2. Jedino veće naseljeno mjesto koje se nalazi u blizini je Grad Pazin s 8.638 stanovnika. S obzirom da je površina područja manja od 100 km^2, područje se ne razmatra kao moguća potencijalna lokacija.



Slika 6-20 Potencijalno područje 6

Potencijalno područje 7

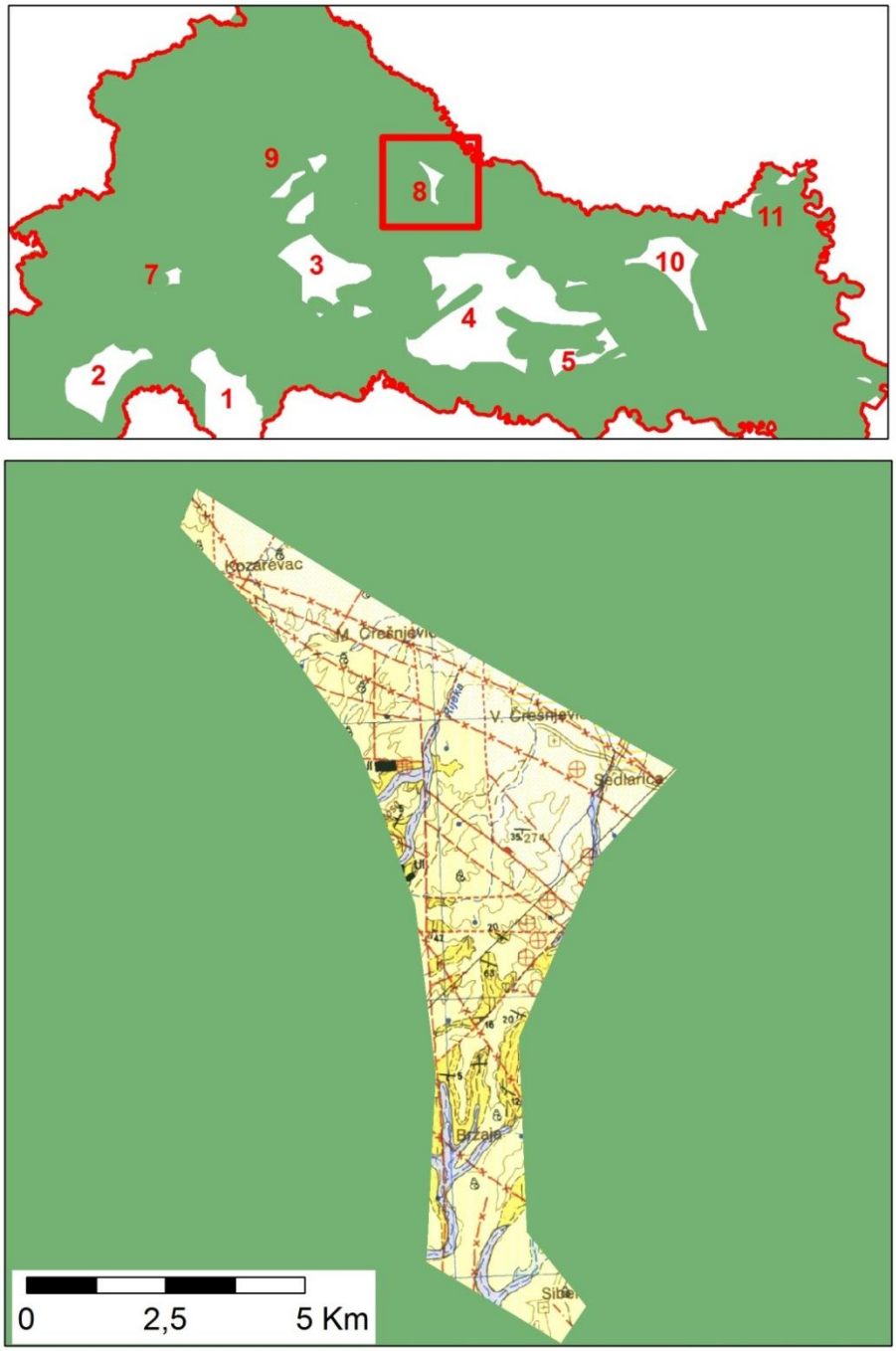
Potencijalno područje 7 (slika 6-21), površine 22 km^2, nalazi se u Zagrebačkoj županiji. U blizini područja nema naseljenog mjesta sa brojem stanovnika većim od 1.000. S obzirom da je površina područja manja od 100 km^2, područje se ne razmatra kao moguća potencijalna lokacija.



Slika 6-21 Potencijalno područje 7

Potencijalno područje 8

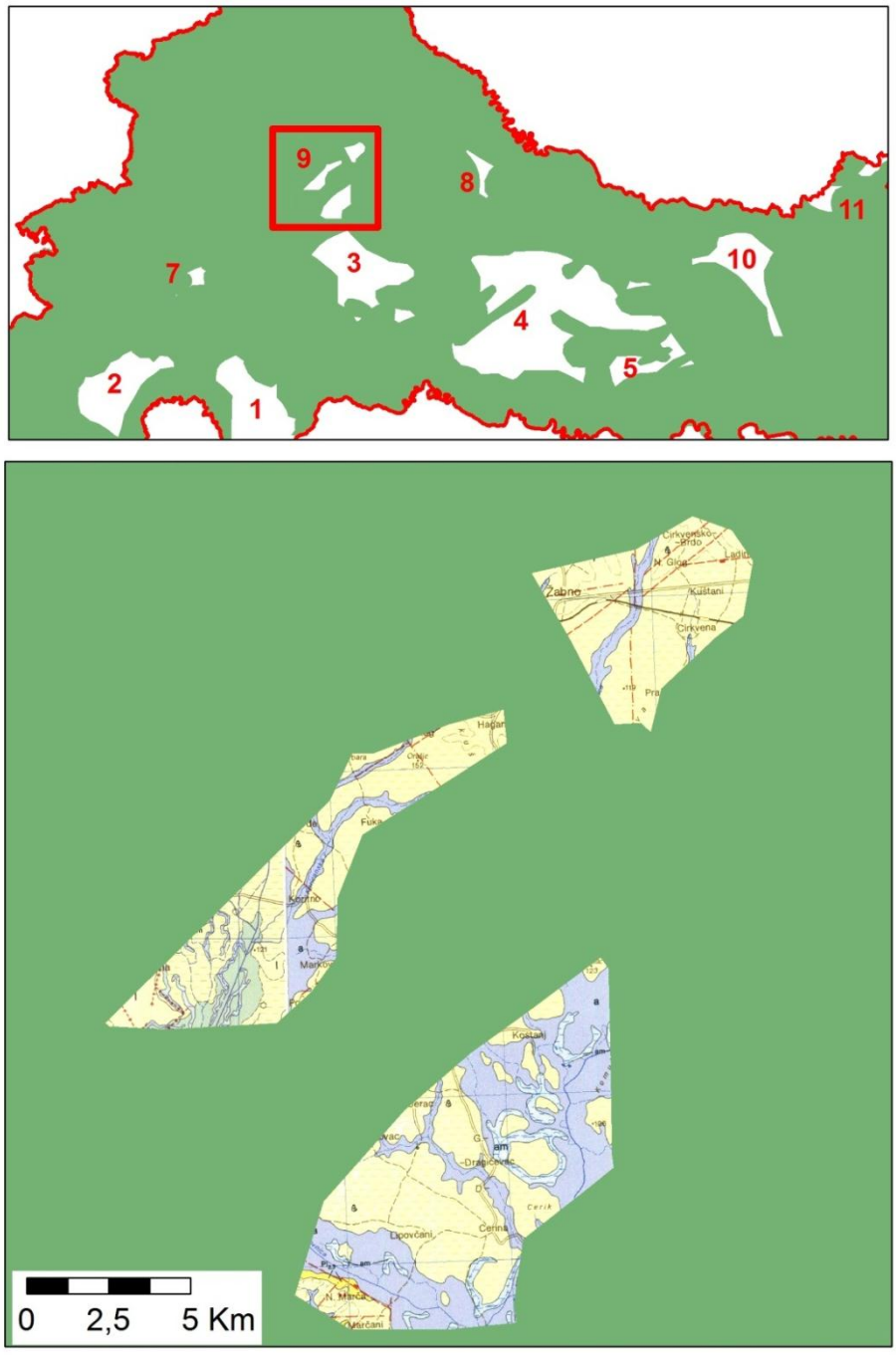
Potencijalno područje 8 (slika 6-22) prekriva površinu od 38 km^2, a presijeca 3 županije: Bjelovarsko-bilogorsku, Virovitičko-podravsku i Koprivničko-križevačku. U blizini područja nema naseljenog mjesta s brojem stanovnika većim od 1.000. S obzirom da je površina područja manja od 100 km^2, područje se ne razmatra kao moguća potencijalna lokacija.



Slika 6-22 Potencijalno područje 8

Potencijalno područje 9

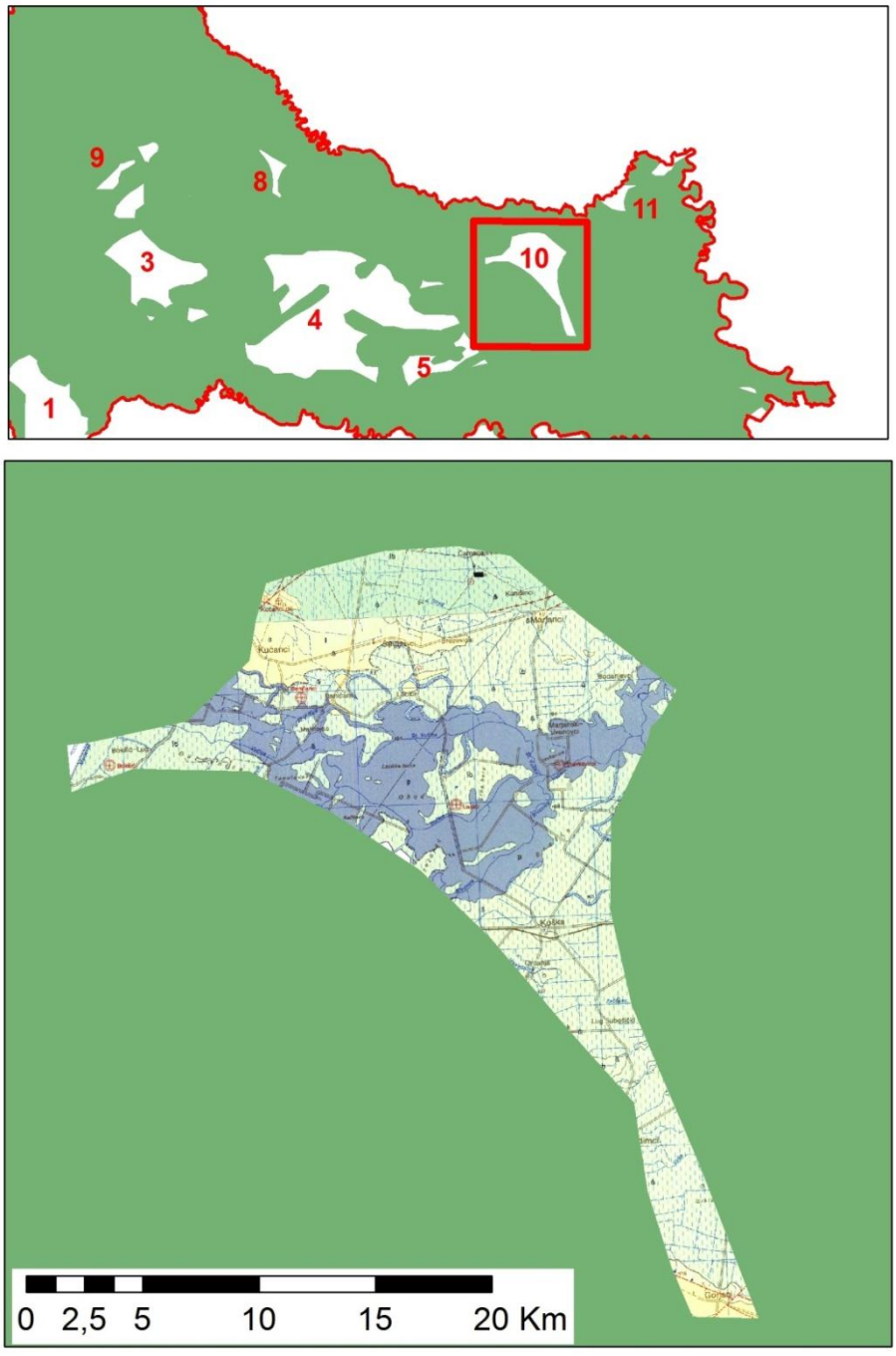
Potencijalno područje 9 (slika 6-23), ukupne površine 119 km^2, presjecaju tri županije: Zagrebačku, Bjelovarsko-bilogorsku i Koprivničko-križevačku. Na ovom području samo Općina Sveti Ivan Žabno ima broj stanovnika veći od 1.000 (5.222).



Slika 6-23 Potencijalno područje 9

Potencijalno područje 10

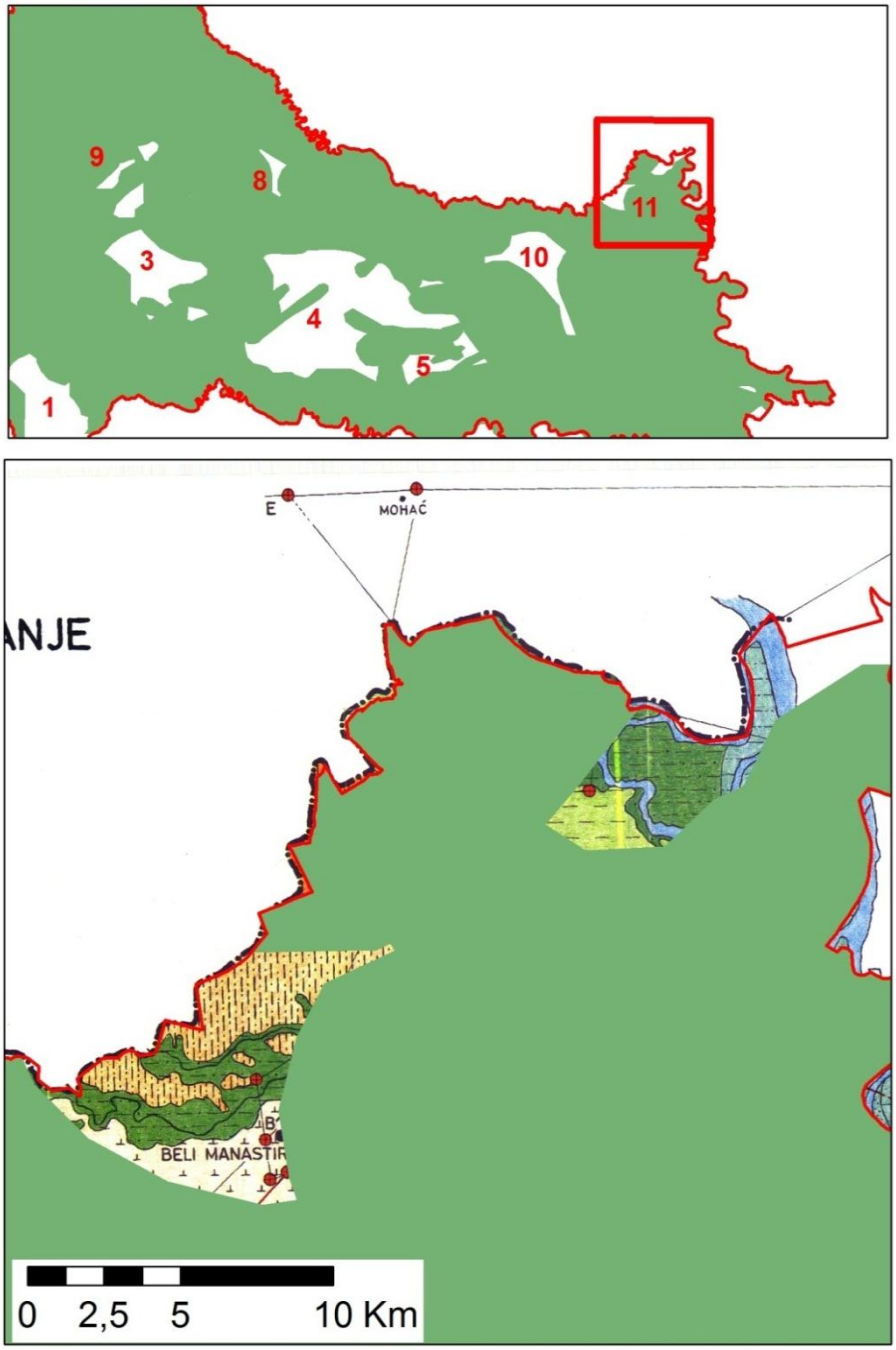
Potencijalno područje 10 (slika 6-24), površine 277 km^2, nalazi se u Osječko-baranjskoj županiji. Dvije općine imaju broj stanovnika veći od 1.000: Općina Koška sa 3.980 i Općina Gorjani sa 1.591 stanovnika.



Slika 6-24 Potencijalno područje 10

Potencijalno područje 11

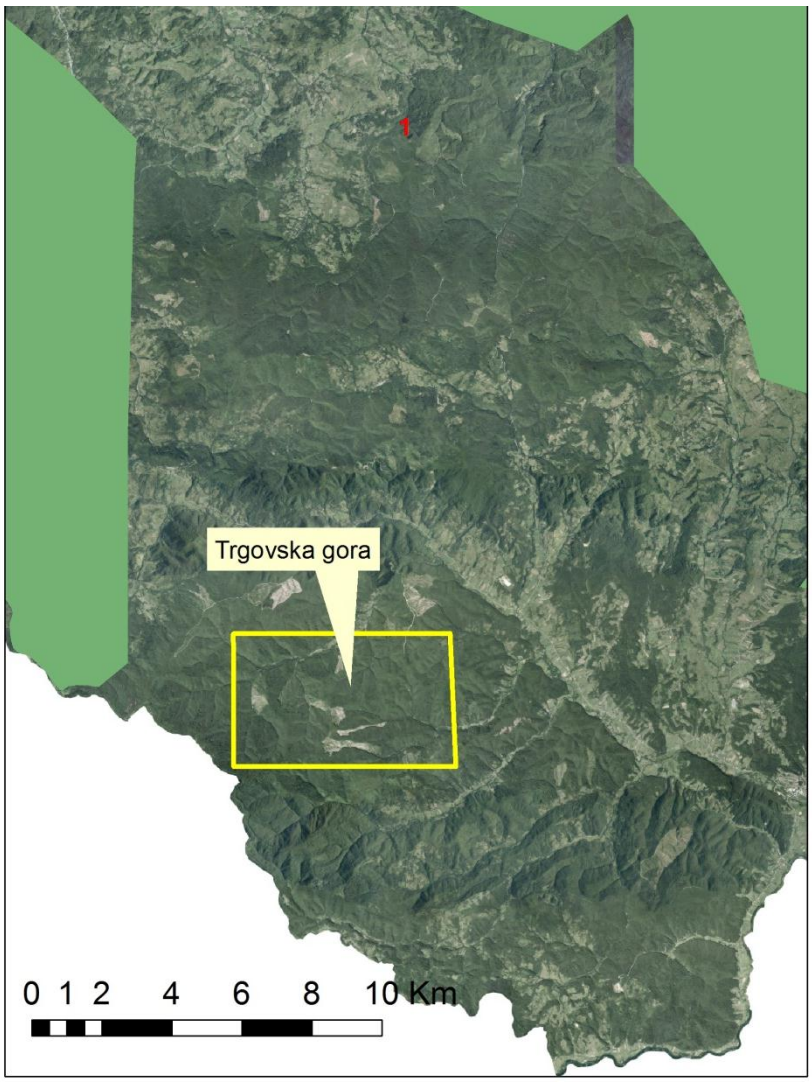
Potencijalno područje 11 (slika 6-25) nalazi se u Osječko-baranjskoj županiji te zauzima ukupnu površinu od 74 km^2. Jedino veće naseljeno mjesto koje se nalazi u blizini je Grad Beli Manastir sa 10.068 stanovnika. S obzirom da je površina područja manja od 100 km^2, područje se ne razmatra kao moguća potencijalna lokacija.



Slika 6-25 Potencijalno područje 11

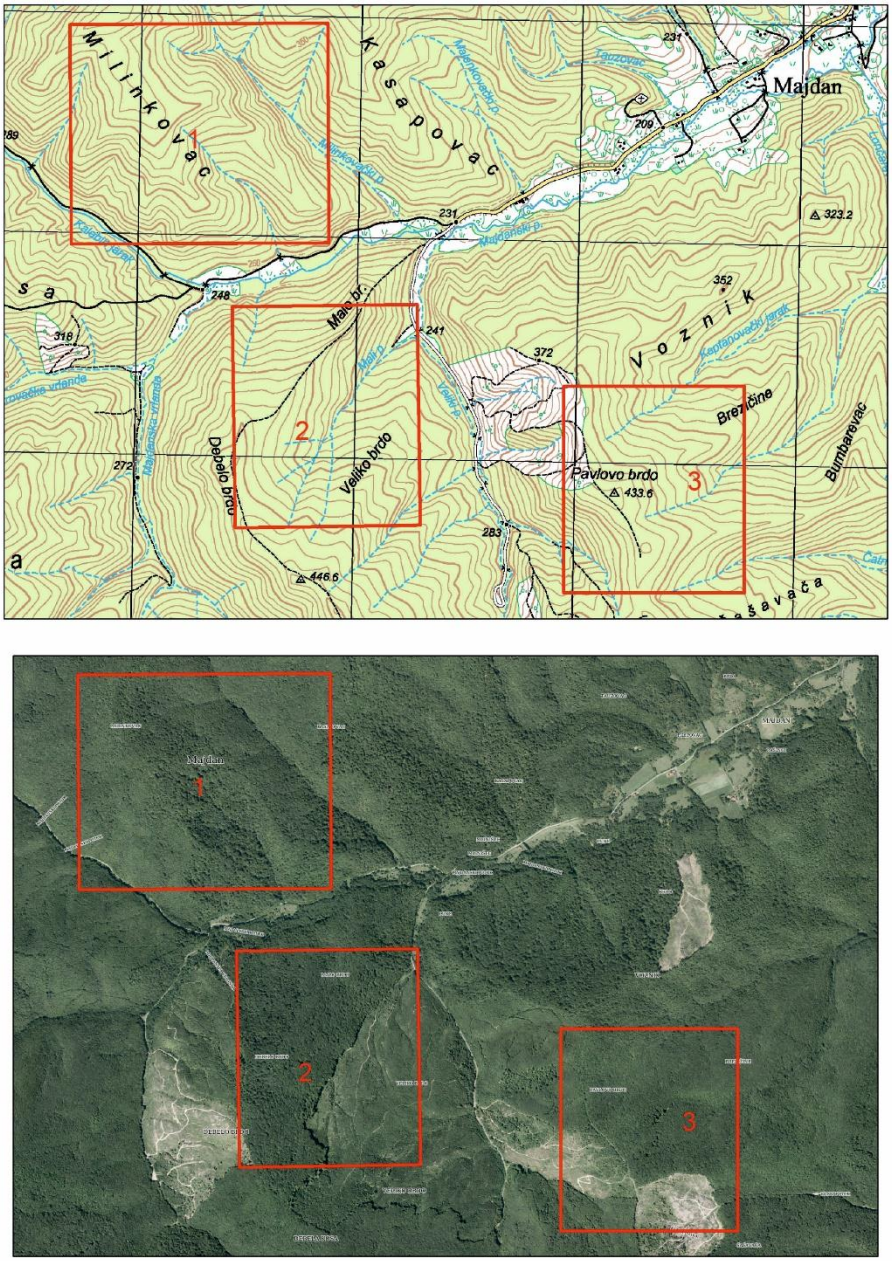
6.5. Potencijalna lokacija - Trgovska gora

Nakon što je Uredbom Vlade RH (NN 68/11) Moslavačka gora proglašena regionalnim parkom, Trgovska gora ostala je jedina preferentna lokacija za odlaganje RAO. Trgovska gora nalazi se u potencijalnom području 1 (slika 6-26), u Sisačko-moslavačkoj županiji.



Slika 6-26 Lokacija Trgovske gore

Preferentna lokacija nalazi se na središnjem dijelu Trgovske gore, te pripada području Majdanu. Lokacija zauzima površinu od oko 8 km^2. Prema Schalleru (2001) postoje tri mikrolokacije na Trgovskoj gori. Na slici 6-27 prikazana je topografska karta i digitalna ortofoto karta s označenim mikrolokacijama Milinkovac (1), Veliko brdo (2) i Pavlovo brdo (3).

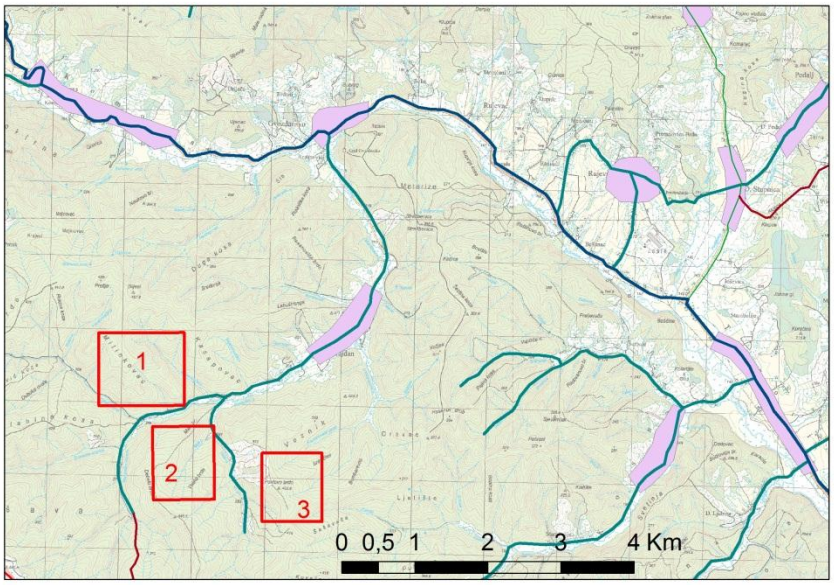


Slika 6-27 TK i DOF 3 mikro lokacije

Prema popisu stanovništva iz 2011. godine u općini Dvor živi 5.570 stanovnika, dok je gustoća naseljenosti 11 stanovnika/km^2. Najveće naselje je Dvor sa 1.406 stanovnika. Blizu samih lokacija nalazi se dva naselja: Majdan s 11, te Gornji Žirovac s 22 stanovnika.

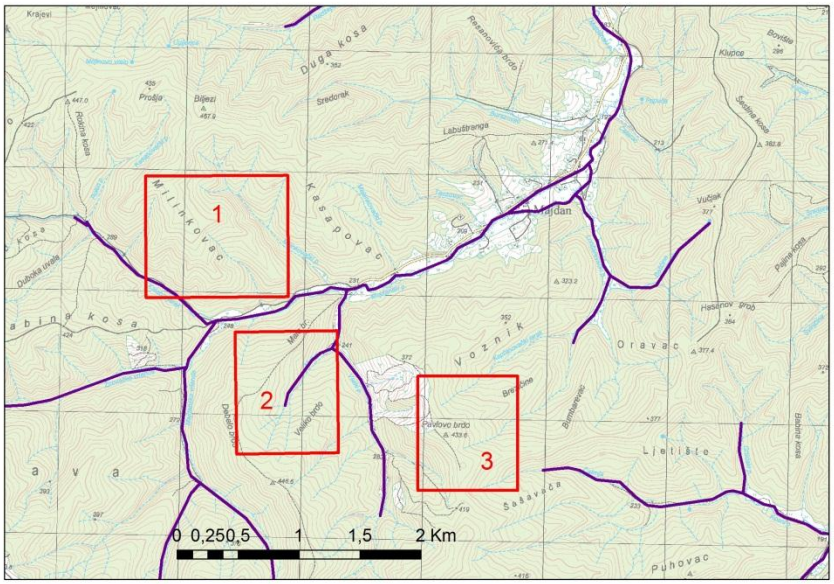
Udaljenost Trgovske gore od NE Krško, cestovnim putem, iznosi oko 170 km. Najbliža željeznica povezana s NE je pomoćna magistralna željeznička pruga Sunja–

Volinja-držana granica cestovne udaljenosti oko 25 km (Peša, 2013). Na slici 6-28 prikazana je mreža državnih i lokalnih cesta te sva naselja u blizini potencijalnih lokacija.



Slika 6-28 Naselja i mreža lokalnih i državnih cesti u blizini potencijalnih lokacija

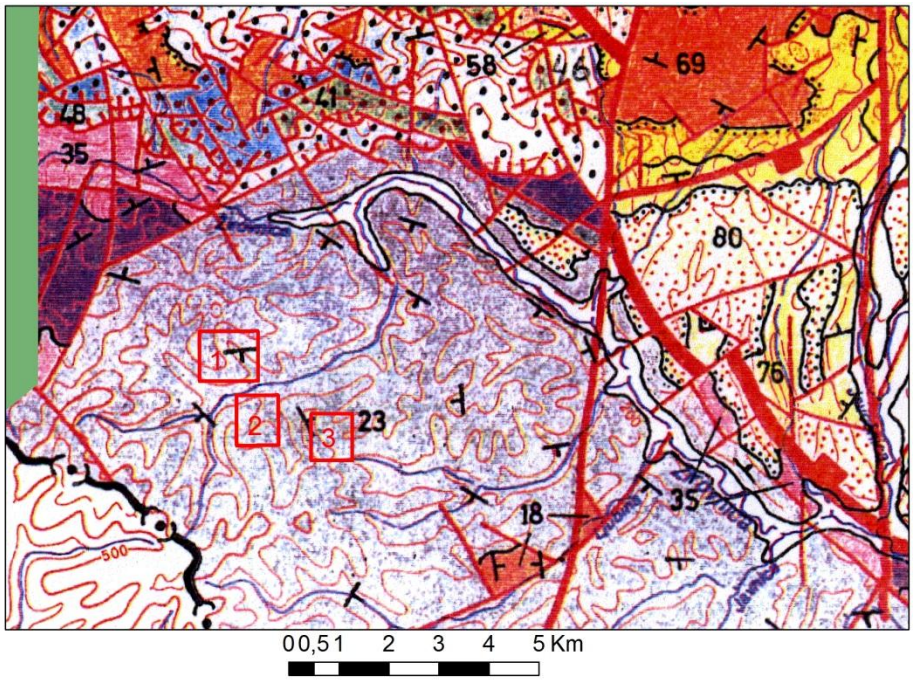
Trgovska gora pripada slivu rijeke Une. Na slici 6-29 prikazani su potoci i rijeke na potencijalnom području 1. U blizini preferentnih lokacija nalazi se Majdanski potok, koji je glavni vodotok unutar preferentne lokacije, i Veliki potok, te dva povremena potoka (Majdanska vrlanda i Kalabin jarak) (Slika 6-22) (Peša, 2013).



Slika 6-29 Vodotoci u blizini potencijalnih lokacija

Trgovska gora je po geološkoj strukturi tektonski poremećen horst. Osnovnu građu čine gornjopaleozojske naslage čije je opće pružanje SZ-JI (Slika 6-30). One se protežu od Gornjeg Žirovca prema jugoistoku do rijeke Une i zatim dalje u Bosnu u Sansko-unske paleozojske jedinice. Rasjedi izraženi uz sjeverozapadne, zapadne i sjeveroistočne rubove odvajaju paleozojski masiv od Dinarske ofiolitne zone (Peša, 2013).

Unutar paleozojskih naslaga razlikuju se dvije serije. Starija serija predstavljena je šejlovima s alteracijama siltoznih pješčenjaka, subgrauvaka i grauvaka starosti devon-karbon, dok je mlađa serija donjopermske starosti predstavljena različitim vrstama pješčenjaka sa proslojcima šejlova. Vulkanogeno-sedimentna formacija Trgovske gore nalazi se u pojasu širokom do 3 km od Stupnice na istoku, do Vratnika na zapadu. Prostor je sklon snažnoj eroziji i intenzivnom jaružanju te je relativno velika mogućnost formiranja klizišta. Dolomite i vapnence trijasa nalazimo na prostoru od Zakope do Gornjeg Žirovca. Ove stijene su vodopropusne i predstavljaju vrlo povoljne recipijente vode (Peša, 2013).



Slika 6-30 Geološka karta potencijalnog područja

7. ZAKLJUČAK

U Hrvatskoj je proveden projekt odabira lokacije za odlaganje RAO, a kao jedina potencijalna lokacija ostala je Trgovska gora. Obzirom da je Hrvatska suvlasnik Nuklearne elektrane Krško (NEK), dužna je zbrinuti pola otpada nastalog tijekom rada elektrane (NSRAO), ali i pola istrošenog nuklearnog gorivog nakon zatvaranja. Obzirom da Trgovska gora nije najprikladnija lokacija, postoji mogućnost da će se proces odabira lokacije vratiti na početak te ponovno uzeti u obzir cijela Hrvatska. Ukoliko dođe do ponovne provedbe projekta odabira lokacije, GIS će biti nezaobilazan alat zbog svoje brzine i jednostavnosti, ali i nepristranog tretiranja svih lokacija.

Cilj ovog diplomskog rada je prikazati mogućnosti i način primjene GIS-a pri odabiru lokacije. S obzirom da u Hrvatskoj nema propisanih kriterija za odlaganje VRAO, u ovom diplomskom radu prikazan je način odabira lokacije za zbrinjavanje RAO na temelju kriterija za odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada, koji su propisani Zaključkom o utvrđivanju kriterija za izbor lokacija za termoelektrane i nuklearne objekte (NN 78/92). Treba naglasiti da su pri izlučnom vrednovanju teritorija Republike Hrvatske korištene već postojeće karte s odbačenim područjima na temelju zadanih kriterija.

Ono što je nedostajalo za detaljniju provedu ovog diplomskog rada su tematske karte koje bi se primijenile pri analizi potencijalnih lokacija kao što su:

- detaljnije geološke karte,
- karta rudnih ležišta,
- demografska karta,
- karte posebnih uvjeta korištenja (zaštićena područja, kulturna dobra i nacionalne ekološke mreže),
- karte infrastrukturnih sustava (prometni sustav, energetski sustav, vodno-gospodarski sustav).

Osim pristupa svim informacijama, za provedbu projekta bitna je i uključenost javnosti. Da bi se steklo povjerenje javnosti, odabir lokacije mora biti transparentan, svima jasan i pristupačan, dok WebGIS omogućava javnosti i sudjelovanje u samom izboru lokacije.

8. LITERATURA

ANTTI I., MIA Y., TIMO Ä., 2006. Underground characterisation and research facility onkalounderground characterisation and research facility onkalo, Finska.

DOMITROVIĆ, D., VUČENOVIĆ, H., KOVAČEVIĆ ŽELIĆ, B., 2012. Ispitivanja svojstva bentonia kao inženjerske barijere u odlagalištima radioaktivnoh otpada, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 24, str 19-27.

IAEA, 1994. IAEA safety standards: Siting of Geological Disposal Facilities, Vienna.

IAEA, 2006(a). IAEA safety standards: Geological disposal of radioactive waste, Vienna.

IAEA, 2006(b). IAEA safety standards: Storage of radioactive waste, Vienna.

IAEA, 2009(a). IAEA safety standards: Borehole disposal facilities for radioactive waste, Vienna.

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

IAEA, 2009(c). IAEA safety standards: Disposal approaches for long lived low and intermediate level radioactive waste, Vienna.

IAEA, 2011. IAEA safety standards: Geological disposal facilities for radioactive waste, Vienna

KUČAR-DRAGIĆEVIĆ, S.; SCHALLER, A.; SUBAŠIĆ, D., 1996. Moguća tehnološka rješenja odlaganja nisko i srednje radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj, Zagreb, APO.

LEVANAT, I., 1997. Odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada, Zagreb, APO.

LEVANAT, I., 2000. Radioaktivni otpad, Zagreb, APO.

LEVANAT, I., LOKNER, V., 2000. Kako se procjenjuje sigurnost odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada, Zagreb, APO.

LOKNER, V., 1997. Što učiniti s radioaktivnim otpadom : mogućnosti, Zagreb, APO.

LOKNER, V., LEVANAT, I., RAPIĆ, A., ŢELEZNIK, N,. MELE, I., JENKO, T., 2004. Program razgradnje NEK i odlaganja NSRAO i ING, Zagreb.

NARODNE NOVINE, 1992. Zaključak o utvrđivanju kriterija za izbor lokacija za termoelektrane i nuklearne objekte, broj 78.

NARODNE NOVINE, 1997. Zakon o odgovornosti za nuklearnu štetu, broj 143

PERKOVIĆ, D., 1998. Hidrogeološki katastar kao dio geografskog informacijskog sustava, Magistarski rad, RGN, Sveučilište u Zagrebu.

PERKOVIĆ, D., PERKOVIĆ, A., AVDIĆ, A., 2012. Otvoreni sustav potpore prostornom odlučivanju na primjeru odabira lokacije odlagališta radioaktivnog otpada. Rudarskogeološko-naftni zbornik, 24, 95-100.

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

SCHALLER, A., 1997. Izbor mjesta odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj, Zagreb.

SCHALLER, A., 2001. Site selection and Characterization for Low and Intermediate Level Radioacitive Waste Repository in the Republic of Croatia, APO, 84-94.

STRATEGIJA ZBRINJAVANJA OTPADA I ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA REPUBLIKE HRVATSKE, 2009.

ŠABOVIĆ A., ISABEGOVIĆ J., OKIĆ A., 2011. Obrada i model konačnog zbrinjavanja radioaktivnog otpada, Rudarski institut d.d. Tuzla

VEINOVIĆ, Ž., KOVAČEVIĆ ZELIĆ, B., DOMITROVIĆ, D., 2014. Deep geological disposal of spent nuclear fuel and high level waste – Current state and future challenges, University of Zagreb, Faculty of mining, geology and petroleum engineering, Croatia.

ŽIVKOVIĆ, S.A., KOVAČEVIĆ ZELIĆ, B., 2002. Podzemno odlaganje otpada: interna skripta. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

ŽLIMEN, M., 2014. Korozija spremnika istrošenog nuklearnog goriva. Diplomski rad, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Popis internetskih izvora

DRŽAVNI ZAVOD ZA STATISTIKU, 2006. URL: http://www.dzs.hr/ (09.07.2015).

FOND ZA FINANCIRANJE RAZGRADNJE NEK, 2015. Zbrinjavanje visoko radioaktivnog otpada URL: http://radioaktivniotpad.org/zbrinjavanje-visoko-radioaktivnog-otpada/ (13.08.2015)

POSIVA, 2012. Onkalo URL: http://www.posiva.fi/en/final_disposal/onkalo#.Vcxtt_ntmkr (13.08.2015.)

MREŽNO IZDANJE HRVATSKE ENCIKLOPEDIJE, 2013.
URL: http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51474 (12.08.2015.)