

Pripovršinsko odlaganje radioaktivnog otpada

Kranjc, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:977271>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geografski odsjek

Marko Kranjc

Pripovršinsko odlaganje radioaktivnog otpada

Prvostupnički rad

Mentor: izv. prof. dr. sc. Nenad Buzjak

Ocjena: _____

Potpis: _____

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geografski odsjek

Prvostupnički rad

Pripovršinsko odlaganje radioaktivnog otpada

Marko Kranjc

Izvadak: Komercijalnom upotrebom nuklearnih elektrana u proizvodnji električne energije u javnosti je podignuto pitanje odlaganja proizvedenog radioaktivnog otpada. Pripovršinsko se odlaganje trenutno smatra najsigurnijom i najisplativijom metodom odlaganja niskoradioaktivnog otpada. U ovome je radu iznesena analiza inženjerske izvedbe pripovršinskih odlagališta kao funkcija uspostavljanja njihove sigurnosti, razmatrani su potencijalni radiološki i neradiološki utjecaji pripovršinskih odlagališta na ekosustave i čovjeka te je prikazana upotreba geografskih informacijskih sustava kao geografskog pristupa rješavanju problema lokacije pripovršinskog odlagališta radioaktivnog otpada.

22 stranice, 7 grafičkih priloga, 3 tablice, 29 bibliografskih referenci; izvornik na hrvatskom jeziku

Ključne riječi: Pripovršinsko odlaganje, radioaktivni otpad, okoliš, nuklearna energija

Voditelj: izv. prof. dr. sc. Nenad Buzjak

Tema prihvaćena: 10. 1. 2019.

Datum obrane: 6. 9. 2019.

Rad je pohranjen u Središnjoj geografskoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geography

Undergraduate Thesis

Near surface radioactive waste disposal

Marko Kranjc

Abstract: The commercial use of nuclear power plants in the production of electricity has raised the issue of the disposal of produced radioactive waste in the public. The near surface disposal is currently considered to be the safest and the most cost-efficient method of the disposal of low-level waste. This paper analyzes the engineering execution of near-surface disposal sites as a function of establishing their safety, considers the potential radiological and non-radiological impacts of near-surface disposal sites on ecosystems and humans, and presents the use of geographic information systems as a geographic approach to addressing the problems of siting near surface radioactive waste disposal sites.

21 pages, 7 figures, 3 tables, 29 references; original in Croatian

Keywords: Near surface disposal, radioactive waste, environment, nuclear energy

Supervisor: Nenad Buzjak, PhD, Associate Professor

Undergraduate Thesis title accepted: 10/01/2019

Undergraduate Thesis defense: 06/09/2019

Thesis deposited in Central Geographic Library, Faculty of Science, University of Zagreb, Marulićev trg 19, Zagreb, Croatia

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Radioaktivni otpad	1
3. Metode i tehnologija pripovršinskog odlaganja	3
4. Postizanje sigurnosti pripovršinskog odlagališta	5
5. Opasnosti i prijetnje pripovršinskog odlaganja	8
5.1. Utjecaj pripovršinskog odlaganja radioaktivnog otpada na ekosustave.....	8
5.2. Utjecaj pripovršinskog odlaganja radioaktivnog otpada na čovjeka.....	12
6. Odabir lokacije pripovršinskog odlagališta.....	12
7. Zaključak.....	16
8. Literatura	Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.
9. Izvori	21

1. Uvod

Porast svjetskog stanovništva i značajni tehnološki napredak ljudske civilizacije rezultirao je rastom potrebe za električnom energijom. Od 1945. godine glavni fokus u znanstvenim istraživanjima nuklearne fisije bio je u tehnološkoj evoluciji pouzdanih nuklearnih elektrana (*Outline History of Nuclear Energy*, 2019). Nakon što su fisijski reaktori u procesu proizvodnje električne energije prešli u komercijalnu upotrebu javlja se potreba za sigurnim i odgovornim zbrinjavanjem radioaktivnog otpada nastalog nuklearnim ciklusom. Dugogodišnja praksa odlaganja radioaktivnog otpada urodila je međunarodnim dogovorima i sporazumima gdje se kao jedna od metoda odlaganja radioaktivnog otpada ističe pripovršinsko odlaganje (*Odlaganje NSRAO-a*, n.d.). Pripovršinsko odlaganje odnosi se na smještaj čvrstog radioaktivnog otpada koji sadrži pretežito radionuklide kratkog vremena poluraspada u odlagalište smješteno na ili u blizini zemljine površine (*Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste*, 2014). Geoekološke se posljedice nepravilnog odlaganja radioaktivnog otpada na maloj dubini ispod površine mogu vidjeti na površini u obliku promjena u okolišu te ljudskoj aktivnosti. Geografska analiza tih promjena može uvelike doprinijeti u procesu odabira lokacije odlagališta, usavršavanju metoda i tehnologije odlaganja, saniranju postojećeg zagađenja te u sprečavanju buduće kontaminacije. U ovome će radu kroz analizu znanstvene i stručne literature te publikacije međunarodnih organizacija za nuklearnu energiju biti analizirane karakteristike, mogućnosti i opasnosti pripovršinskog odlaganja radioaktivnog otpada, geografski parametri u odabiru lokacije odlagališta te će u konačnici biti izneseno kritičko vrednovanje metode te prijedlozi za budući razvoj.

2. Radioaktivni otpad

Radioaktivni otpad obuhvaća bilo koji materijal koji je sam po sebi radioaktivan ili koji je bio kontaminiran radioaktivnošću, te kao takav ne nastaje isključivo nuklearnim ciklusom u nuklearnim elektranama već nastaje i u manjoj mjeri iz radioaktivnih materijala koji se koriste u medicinskoj tehnologiji, znanstvenim istraživanjima, eksploataciji minerala, poljoprivredi i industriji (*Radioactive Waste Management*, 2018). Međunarodna Agencija za Atomsku Energiju klasificira radioaktivni otpad u šest klasa s obzirom na razinu radioaktivnosti: izuzeti radioaktivni otpad (IRAO), vrlo kratkoživi radioaktivni otpad

(VKRAO), vrlo niskoradioaktivni otpad (VNRAO), niskoradioaktivni otpad (NRAO), srednjeradioaktivni otpad (SRAO) te visokoradioaktivni otpad (VRAO) (Veinović, 2016). Kategorija niskoradioaktivni otpad pokriva širok raspon otpada, uključujući radionuklide kraćeg vremena poluraspada više koncentracije radioaktivnosti te radionuklide dugog vremena poluraspada manje koncentracije radioaktivnosti. Nadalje, radioaktivnost niskoradioaktivnog otpada raspona je od razine tek iznad pozadinskog zračenja prisutnog u prirodi do visoke razine radioaktivnosti (*Low-Level Waste*, 2017). Niskoradioaktivni otpad prikladan je za odlaganje u pripovršinska postrojenja na period od nekoliko stotina godina, te obuhvaća otpad vrlo niske razine radioaktivnosti te otpada razine radioaktivnosti za čije skladištenje je potrebna snažna izolacija (*Classification of Radioactive Waste*, 2009). Prema tome, u ovom će radu u evaluaciji metode pripovršinskog odlaganja biti razmatran isključivo niskoradioaktivni otpad kojeg je zbog svojih karakteristika moguće odložiti u pripovršinska odlagališta.

Visokoradioaktivni otpad uglavnom predstavlja iskorišteno nuklearno gorivo dok niskoradioaktivni otpad obuhvaća predmete poput alata i dijelova strojeva koji su bili izloženi radioaktivnosti (*Nuclear Waste*, n.d.). Najviše proizvedenog radioaktivnog otpada (90%) u svijetu spada u kategoriju niskoradioaktivnog otpada (Sl. 1.)



Slika 1. Volumni udjeli kategorija radioaktivnog otpada

Izvor: *Klasifikacija radioaktivnog otpada*, n.d.

Oko 15% niskoradioaktivnog otpada nije odloženo (Tablica 1.) već je skladišteno na mjestu njegove proizvodnje te se njegovo odlaganje očekuje. Pripovršinska odlagališta zbog toga imaju veliki značaj u ukupnom globalnom sustavu odlagališta otpada, te će usavršavanje tehnologije pripovršinskog odlaganja i razmatranje njegovih prostornih posljedica morati usmjeravati njegov budući razvoj. Nadalje, Conca i dr. (2008) navode kako je nuklearnim otpadom, suprotno popularnom mišljenju, lako rukovati budući da ga je toliko malo te je radijaciju lako mjeriti.

Tablica 1. Procijenjeni inventar nuklearnog otpada u svijetu 2018. godine

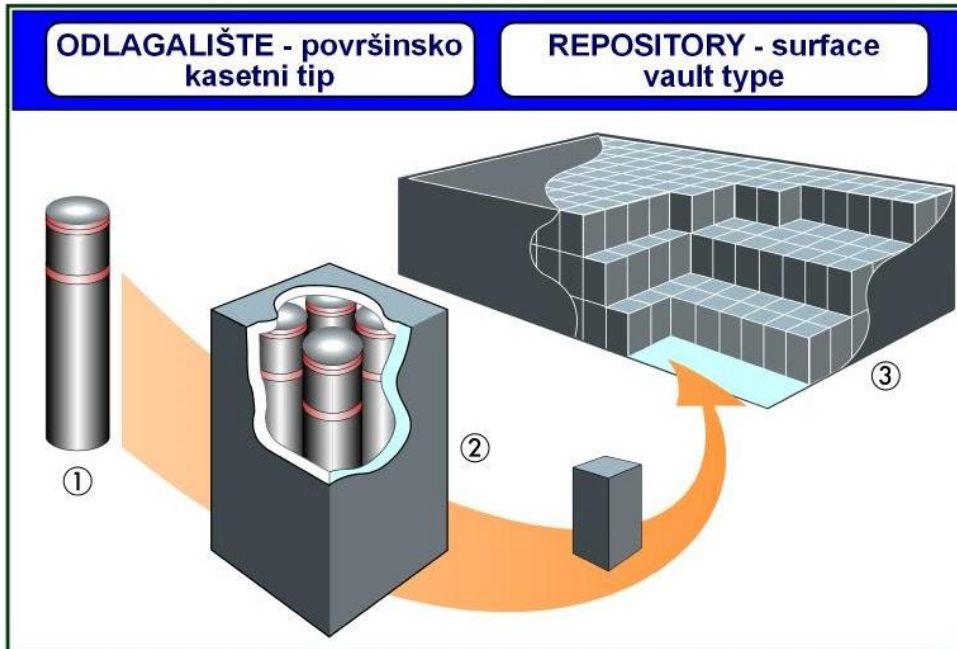
Kategorija otpada	Skladišteni radioaktivni otpad (m ³)	Odloženi radioaktivni otpad (m ³)	Udio odloženog radioaktivnog otpada (%)
Vrlo niskoradioaktivni	2356000	7906000	77
Niskoradioaktivni	3479000	20451000	85
Srednjeradioaktivni	460000	107000	19
Visokoradioaktivni	22000	0	0

Izvor: *Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management*, 2018

3. Metode i tehnologija pripovršinskog odlaganja

Odlaganje radioaktivnog otpada konačni je stadij u procesu gospodarenja radioaktivnim otpadom. Sav radioaktivni otpad prije odlaganja prolazi proces obrade kako bi se umanjio štetni utjecaj radijacije za vrijeme i nakon skladištenja. Dugoročni problem koji se javlja prilikom pripovršinskog odlaganja radioaktivnog otpada je osiguravanje stabilnosti kako bi se onemogućila kontaminacija biosfere radionuklidima. Osnovni principi za osiguravanje stabilnosti su imobilizacija radionuklida korištenjem smola i betona, pravilna tehnološka izvedba bačvi i ostalih posuda te odgovarajući tip geološke formacije u koji se smješta odlagalište (*Odlaganje NSRAO-a*, n.d.). Dubina na kojoj se otpad odlaže te vrsta odlagališta u koje se odlaže će ovisiti o nekoliko čimbenika uključujući karakteristike otpada te lokalne uvjete u okolišu (*Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste*, 2014). Skrzeczkowska i dr. (2012) navode kako se osiguravanju potrebne razine izolacije i zatvaranja pridodaje velika važnost, te se izolacija postiže prirodnim geološkim barijerama u koje se otpad odlaže koje zatim mogu, ali i ne moraju, zahtijevati dodatna pojačanja inženjerskim barijerama. Najjednostavnije površinsko odlagalište predstavlja plitki rov sa odgovarajućom

izolacijom na dnu u koji se otpad polaže i prekriva šljunkom, pijeskom i glinom (*Odlaganje NSRAO-a*, n.d.), dok se u drugoj varijanti pripovršinskog odlagališta (kasetni tip odlagališta) otpad stavlja u betonske spremnike (Sl. 2) i polaže u zidane betonske građevine ukopane ispod površine (Sl. 3).



Slika 2. Polaganje radioaktivnog otpada u betonske spremnike
Izvor: *Odlaganje NSRAO-a*, n.d.

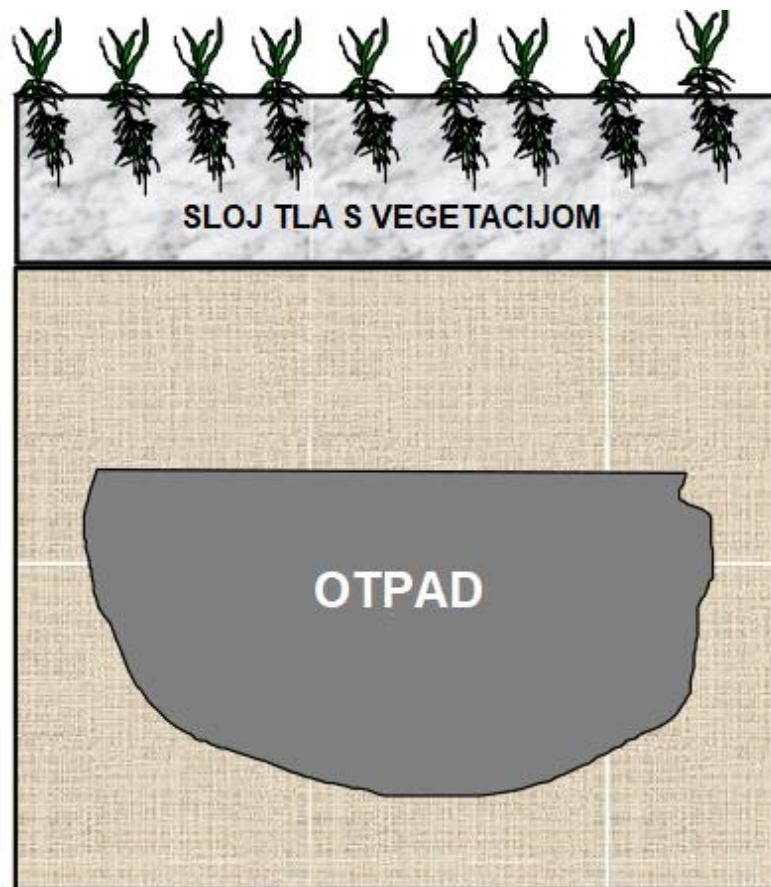


Slika 3. Polaganje betonskih spremnika ispod površine
Izvor: *Odlaganje NSRAO-a*, n.d.

4. Postizanje sigurnosti pripovršinskog odlagališta

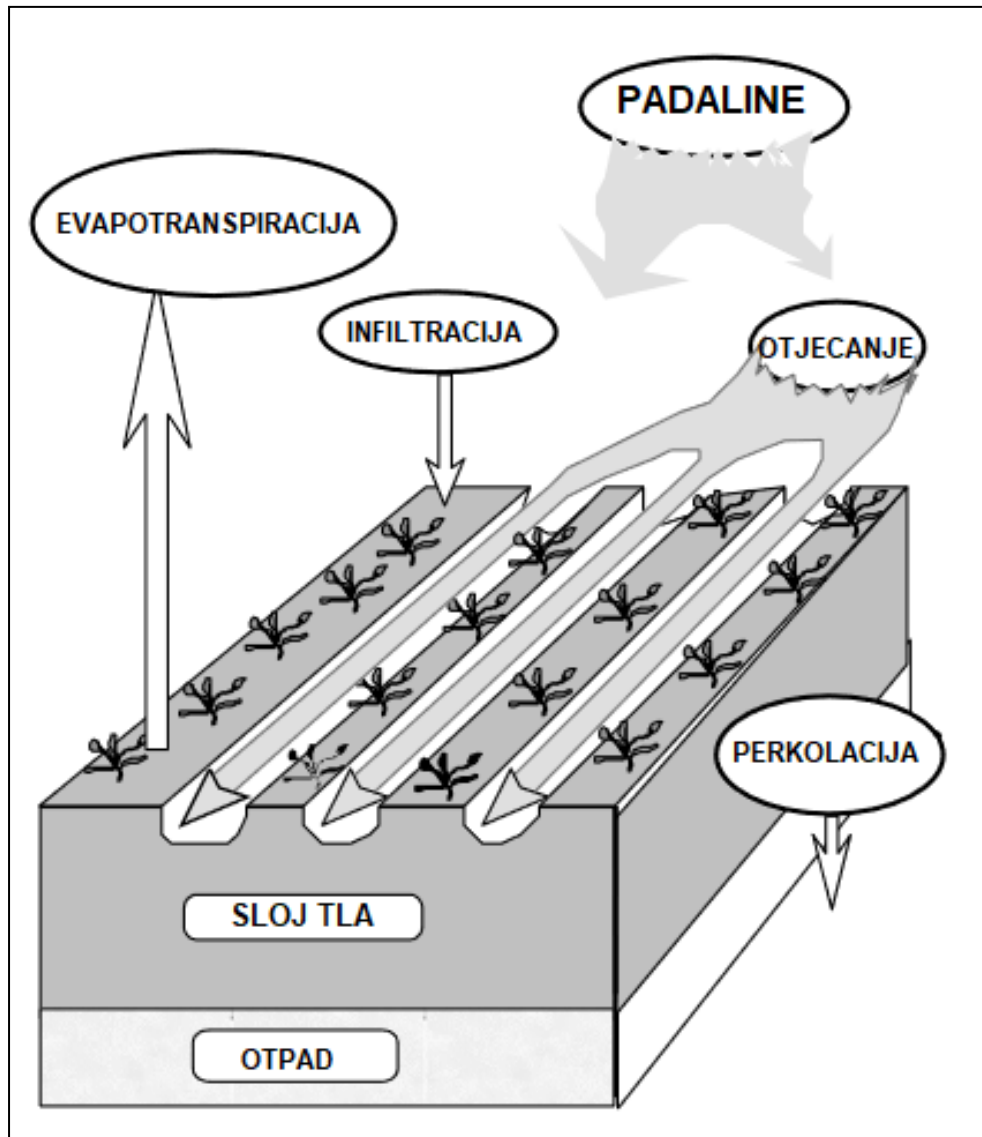
Pripovršinsko odlagalište može sadržavati nekoliko inženjerskih komponenti koje ga osiguravaju poput sloja niske propusnosti na površini koji djeluje kao čep, drenažnog sustava koji odvodi površinsku i podzemnu vodu dalje od odlagališta te markera na površini koji budućim generacijama ukazuju na prisutnost zatvorenog odlagališta. Najčešća komponenta je izolacijski čep na površini dizajniran da smanji infiltraciju površinskih tvari, biološku intruziju te utjecaj erozije odlagališta na površini (*Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste*, 2001).

Jedan od koncepata površinskog čepa je sloj vegetacije koji štiti površinski sloj tla od erozije te smanjuje vlažnost tla transpiracijom biljaka (Sl. 4.). U vlažnim okolišima se evapotranspiracijom može ukloniti i do 80% vode infiltrirane u površinski sloj tla, te je ova metoda vrlo jeftina i učinkovita u zaštiti odlagališta (*Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste*, 2001).



Slika 4. Sloj vegetacije nad pripovršinskim odlagalištem
Izvor: *Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste*, 2001

Nadalje, jedna od metoda upravljanja vodom u blizini pripovršinskog odlagališta je metoda barijera za kontrolu infiltracije u kojoj se dizajniranim drenažnim kanalima pojačava otjecanje i time kontrolira infiltracija i perkolacija vode do radioaktivnog otpada (sl. 5).



Slika 5. Barijere za kontrolu infiltracije

Izvor: *Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste, 2001*

Potreba za kontrolom infiltracije vode proizlazi iz činjenice da uklanjanje vode iz tla vegetacijom ima gornju granicu, te se u prostorima gdje godišnja količina padalina prelazi gornju granicu evapotranspiracije vjerojatnost prodiranja vode do radioaktivnog otpada povećava (*Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste, 2001*). Podzemna voda koja uspije prodrijeti do spremnika radioaktivnog

otpada može biti ispumpana na površinu te u postrojenje za filtraciju otpadne vode dizajnirano za pročišćavanje i obradu iscjetka iz nasipa pripovršinskog odlagališta (*Environmental impact statement*, 2017). Pripovršinska odlagališta u vlažnijim područjima mogu zahtijevati složenije metode zaštite za jednaku količinu dugoročne izolacije otpada od biosfere, te će u pravilu imati više inženjerskih značajki (*Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste*, 2001). Navedene su metode samo neke od metoda kojima se nastoji usporiti ili spriječiti negativno djelovanje površinskih procesa na strukturu odlagališta te izoliranjem otpada od vanjskog utjecaja postići sigurnost pripovršinskog odlagališta. S druge strane, neki spremnici otpada trajati će kraće nego što je sam otpad opasan, stoga radioaktivni otpad mora biti odlagan na način da je ponovna kontejnerizacija i kontinuirana izolacija otpada od okoliša moguća (D'Arrigo, 2009).

Iako niskoradioaktivni otpad odložen u pripovršinska odlagališta ima kratko vrijeme poluraspada, zbog svoje radioaktivnosti predstavlja ekološki hazard nekoliko desetaka godina (*Radioactive Waste – Myths and Realities*, 2017). Prema tome, takva odlagališta zahtijevaju kontinuiranu kontrolu i djelomični nadzor nekoliko desetaka godina. U nekim se državama zbog dobivanja javne podrške odlaganju javila opcija dugoročnog skladištenja radioaktivnog otpada čime se nastoji odužiti odluka o konačnom odlaganju (Won Han i dr., 1997). Kod skladištenja radioaktivnog otpada na duži period neizbježno dolazi do strukturne degradacije paketa otpada i njihovog sadržaja zbog čega dugoročno skladištenje bez odlaganja nije prikladna metoda gospodarenja radioaktivnim otpadom na duže vrijeme (*The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability*, 2003). Za razliku od visokoradioaktivnog otpada dužeg vremena poluraspada, otpad odložen u pripovršinska odlagališta prestaje biti opasan nakon kraćeg vremena te se smanjuje vremenski okvir unutar kojeg može doći do promjena u strukturi prirodnih i umjetnih barijera odlagališta te radioaktivne kontaminacije. Dugoročno gledano, radiološki utjecaj odlaganja rezultira kroz prirodni proces degradacije odlagališta ili kroz posljedice ljudske destabilizacije odlagališta (Nys, 2006). Prema tome, kako bi se osigurala dugoročna sigurnost pripovršinskih odlagališta tehnička izvedba inženjerskih barijera odlagališta mora biti na visokoj razini kako bi se umanjila mogućnost interakcije radionuklida sa okolišem prilikom degradacije odlagališta te kako bi se umanjila mogućnost utjecaja ljudske aktivnosti na površini na odlagalište. Sigurnost pripovršinskog odlagališta u najvećoj mjeri leži na kvaliteti odabrane lokacije te u sposobnosti dizajna odlagališta u sadržavanju i izoliranju otpada (*Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste*, 2014).

5. Opasnosti i prijetnje pripovršinskog odlaganja

Od početka rada komercijalnih nuklearnih elektrana i dobivanja uvida u prirodu radioaktivnog otpada generiranog nuklearnim ciklusom u javnosti se izražava zabrinutost o nuklearnoj industriji, posebice vezana uz sigurnost odlaganja radioaktivnog otpada. Budući da je odgovorno gospodarenje radioaktivnim otpadom jedan od strateških ciljeva država proizvođača radioaktivnog otpada informirani stav javnosti važan je kako bi društvo osjećalo sigurnost nakon odlaganja radioaktivnog otpada. Česta podignuta pitanja vezana uz odlaganje radioaktivnog otpada uključuju pitanja dugoročne sigurnosti, pitanja rizika i nesreća te pitanja troškova i isplativosti (*Radioactive Waste – Myths and Realities*, 2017). Nadalje, naponi u zaštiti čovjeka od radijacije doveli su do značajnih pomaka u radioekologiji te u fokusu na antropocentrične probleme poput kontaminacije hrane transferom radionuklida kroz hranidbene lance, no proširenje interesa radioekologije na ekosustave i sve životne oblike koji ih nastanjuju zahtijeva tranziciju na ekocentrični pristup (Bréchnac i dr., 2003).

5.1. Utjecaj pripovršinskog odlaganja radioaktivnog otpada na ekosustave

Koncept sigurnog i odgovornog gospodarenja radioaktivnim otpadom usmjeren je na smanjenje mogućnosti ostavljanja nepoželjnih posljedica u prostoru. U svim fazama gospodarenja radioaktivnim otpadom zaštita čovjeka i okoliša je prioritet, a radioaktivnim materijalima treba rukovati na način da je mogućnost postojanja nedozvoljenih koncentracija radionuklida u biosferi isključena (*Waste disposal for nuclear power plants*, 2012). Nadalje, Conca i dr. (2008) zaključuju kako svako nuklearno postrojenje mora vršiti opsežno nadgledanje zdravlja ljudi i okoliša, odnosno javnosti i radnika u nuklearnim postrojenjima te aerosola, vode i tla.

Negativni utjecaji pripovršinskog odlagališta na okoliš ne moraju biti isključivo radiološke prirode, već mogu proizaći iz aktivnosti vezanih uz izgradnju odlagališta. Za vrijeme životnog ciklusa pripovršinskog odlagališta mogu se očekivati kratkoročne i dugoročne posljedice, no najveći ukupni utjecaji događaju se u fazama izgradnje, odlaganja i zatvaranja radioaktivnog otpada u odlagališta (*Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste*, 2002). Potencijalne štetne utjecaje pripovršinskog odlagališta na okoliš koji nisu radiološke prirode moguće je sanirati mjerama

osmišljenima za ublažavanje negativnih posljedica i planiranjem za buduće neočekivane slučajeve (Tablica 2.).

Tablica 2. Primjeri potencijalnih utjecaja pripovršinskog odlagališta i sanacijskih mjera

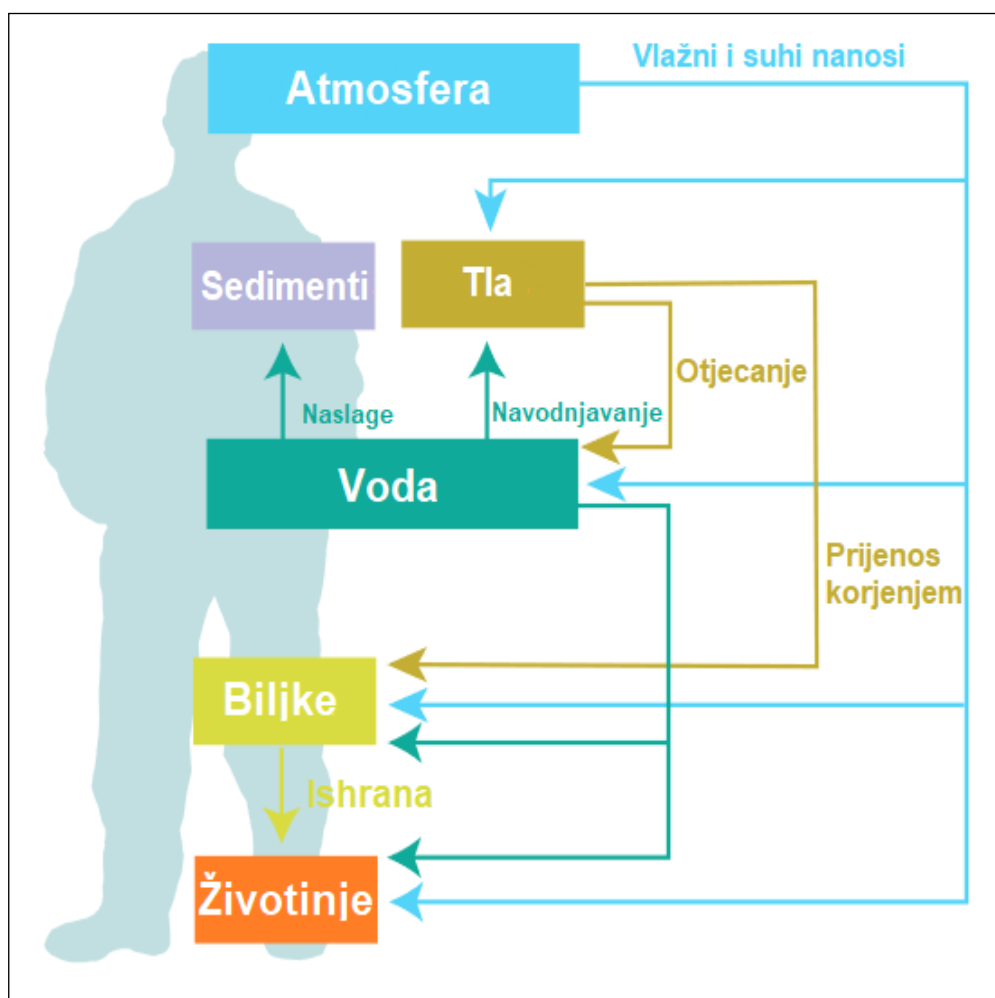
Faktor utjecaja	Potencijalni utjecaj	Potencijalna mjera
Resursi tla	Poremećaji tla kroz iskopavanje	Kontrola erozije i sadnja vegetacije
Resursi podzemnih voda	Smanjenje raspoloživosti vode u obližnjim bunarima	Dobivanje vode iz dubljih izvora ili izvora izvan šireg područja odlagališta
Resursi površinskih voda	Povećanje otjecanja vode u drenažni sustav za vrijeme oluja	Provođenje mjera zaštite od poplave
Biotički resursi	Uklanjanje vegetacije	Kompenzacija projektima za obnovu vegetacije
Vizualni utjecaj	Odlagalište vidljivo lokalnom stanovništvu	Sadnja drveća za prikrivanje pogleda
Ekološki osjetljiva područja	Šteta rijetkim ili ugroženim vrstama	Izrada i provedba plana zaštite ili stvaranje novih staništa

Izvor: *Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste, 2002*

Navedeni se utjecaji u prostoru manifestiraju kroz uklanjanje izvornih značajki prostora, s njim povezanih krajolika te u njima prisutnih ekosustava. Dio tih utjecaja povezan je s poremećajem terena namijenjenog za lociranje pripovršinskog odlagališta prilikom njegove izgradnje. Budući da nisu radiološke prirode, ti se nepoželjni utjecaji mogu jednostavnije sanirati nakon zatvaranja odlagališta na način da se pokušaju vratiti izvorni izgled krajobraza, estetske vrijednosti prostora i značajke ekosustava.

Potencijalni negativni učinci pripovršinskih odlagališta na ekosustave mogu biti rezultat pogrešaka u dizajnu i inženjerskoj izvedbi odlagališta kojima se omogućava radioaktivna kontaminacija. Nesreće i kvarovi mogu se dogoditi u svim fazama djelovanja pripovršinskog odlagališta u obliku događaja pokrenutih iznutra poput kvara opreme ili u

obliku događaja pokrenutih izvana poput prirodnih opasnosti (*Environmental impact statement*, 2017). Također, normalna evolucija pripovršinskog odlagališta rezultirati će neizbježnim otpuštanjem radionuklida u biosferu (Zeevaert i dr., 1997). Prema tome, gotovo je nemoguće izbjeći djelomičnu radioaktivnu kontaminaciju ekosustava u blizini odlagališta. Iako se niskoradioaktivni otpad odložen u pripovršinska odlagališta smatra manje opasnim, duga izloženost radionuklidima može imati nepoželjne posljedice na ekosustave. Sve komponente ekosustava čine međusobno povezani sustavu u kojem je moguća migracija radionuklida i kemotoksičnih elemenata od abiotičkih komponenti poput tla i vode do biotičkih komponenti poput biljnih i životinjskih zajednica u ekosustavu (sl. 6.)



Slika 6. Kruženje radionuklida okolišem
Izvor: *Radioecology*, 2001.

U slučaju radioaktivne kontaminacije biosfere ionizirajuća radijacija iz otpada može utjecati na stanice živih bića i pritom oštetiti njihov genetski materijal, no u malim dozama

ionizirajuća radijacija ne uzrokuje trenutne zdravstvene učinke već doprinosi ukupnom riziku razvitka raka i drugih bolesti u izloženim organizmima (*Radiation Health Effects*, n.d.). Kako bi procijenili razinu radioaktivne kontaminacije okoliša nužno je eksperimentalno istraživati migraciju i koncentraciju radionuklida u podzemnim vodama, tlu i vegetaciji (Konstantinova i dr., 2007). Voda je medij kojim se radionuklidi mogu brzo širiti kroz ekosustav. Primjerice, u studiji slučaja procjene sigurnosti pripovršinskog odlagališta u Belgiji navodi se kako su u slučaju kontaminacije podzemne vode koncentracije kemotoksičnih elemenata između 100 i 1000 metara nizvodno od odlagališta ispod standarda pitkosti za većinu elemenata (*Management of low and intermediate level radioactive wastes with regard to their chemical toxicity*, 2002) što može predstavljati radiološki rizik za veći broj ekosustava kroz koje prodiere kontaminirana podzemna voda. Nadalje, Kautsky i dr. (2016) u modeliranju širenja ionizirajuće radijacije navode kako slatkovodni ekosustavi primaju najveće doze svih varijanti radionuklida. Potencijalni učinci na biološku raznolikost vodenih ekosustava u blizini pripovršinskog odlagališta primarno su vezani uz promjene u podzemnoj vodi, površinskoj vodi i kvaliteti zraka, no pripovršinsko odlagalište u kanadskom okrugu Renfrew primjer je kako karakteristikama dizajna odlagališta ti negativni učinci mogu biti svedeni na zanemarivu razinu (*Environmental impact statement*, 2017).

U kopnenim ekosustavima, tlo predstavlja medij koji prima najviše emitiranih radionuklida, a problemi vezani uz degradaciju tla radioaktivnom kontaminacijom smatraju se izuzetnom vrstom kemijske kontaminacije (Smičiklas i dr., 2016). Tlo u ekosustavima predstavlja sponu između abiotičkih i biotičkih čimbenika te se kontaminacija tla radionuklidima i kemotoksičnim elementima iz pripovršinskog odlagališta može negativno odraziti na njegovu plodnost. Učinci na bioraznolikost kopnenih ekosustava također su vezani uz krčenje zemljišta i s njim povezani gubitak ili promjene u postojećoj vegetaciji i topografskim značajkama prostora (*Environmental impact statement*, 2017). U ekološki osjetljivim područjima te se promjene odražavaju na promjene u staništima te remećenje uzoraka hranjenja i migracija vrsta (*Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste*, 2002). Linsley (1989) zaključuje kako u modernim pripovršinskim odlagalištima koje sadrže inkapsulirani otpad učinci na biljke i životinje mogu biti vrlo lokalizirani u prostoru, te kako su procijenjene doze iz očekivanog oslobađanja radionuklida u okoliš ispod razine na kojoj bi bile očekivane štetne posljedice na biljke i životinje. Ipak, nekontrolirana ispuštanja radionuklida u okoliš mogu ostaviti ozbiljne posljedice na zdravlje jedinki ili cijelih populacija što se u konačnici može odraziti na stabilnost ekosustava.

5.2. Utjecaj pripovršinskog odlaganja radioaktivnog otpada na čovjeka

Utjecaj pripovršinskog odlaganja na čovjeka također može biti u obliku radiološkog utjecaja na ljudsko zdravlje ili u obliku utjecaja na socio-ekonomske uvjete u prostoru u blizini lokacije odlagališta. Socio-ekonomski utjecaji rezultat su promjena u prostoru za vrijeme izgradnje odlagališta. Socijalni utjecaji mogu biti demogeografski, kao rezultat privremenog useljavanja radnika za vrijeme izgradnje i odlaganja, utjecaji na zajednicu u obliku kolektivne tjeskobe i straha zbog blizine pripovršinskog odlagališta, te buka, povećani promet motornih vozila i povećana aktivnost u lokalnom načinu života (*Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste*, 2002). Socijalni utjecaji kao što je utjecaj na demografsku strukturu i povećanje aktivnosti kratkoročni su te traju za vrijeme izgradnje i odlaganja, dok je stvaranje kolektivne tjeskobe i straha dugoročan utjecaj koji može biti ublažen informiranjem javnosti o sigurnosti pripovršinskog odlaganja. Ekonomski utjecaj rezultat je promjena u lokalnom tržištu rada budući da izgradnja odlagališta otvara nova radna mjesta za lokalno stanovništvo, privremenih promjena u lokalnoj ekonomskoj aktivnosti kroz direktnu kupovinu materijala, opreme, vozila i goriva u lokalnim trgovinama, te promjena u upotrebi zemljišta, budući da razvoj odlagališta može privremeno ili trajno onemogućiti poljoprivredno iskorištavanje okolnog zemljišta (*Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste*, 2002). Radiološki utjecaj na čovjeka, osim u slučajevima iznimne radiološke kontaminacije može biti sveden na zanemarivu razinu. Prilikom odabira lokacije pripovršinskog odlagališta kao pogodna područja nastoje se isključiti područja u neposrednoj blizini ljudske aktivnosti, odnosno trajnih ljudskih naselja. Kautsky i dr. (2016) navode kako je u slučaju radioaktivne kontaminacije unos hrane glavni put izloženosti za ljude, te da je unos radionuklida u ljudski organizam funkcija prostora kontaminacije, proizvodnog kapaciteta zemljišta, sustava kultivacije, ljudske potrebe za energijom i veličine izložene grupe.

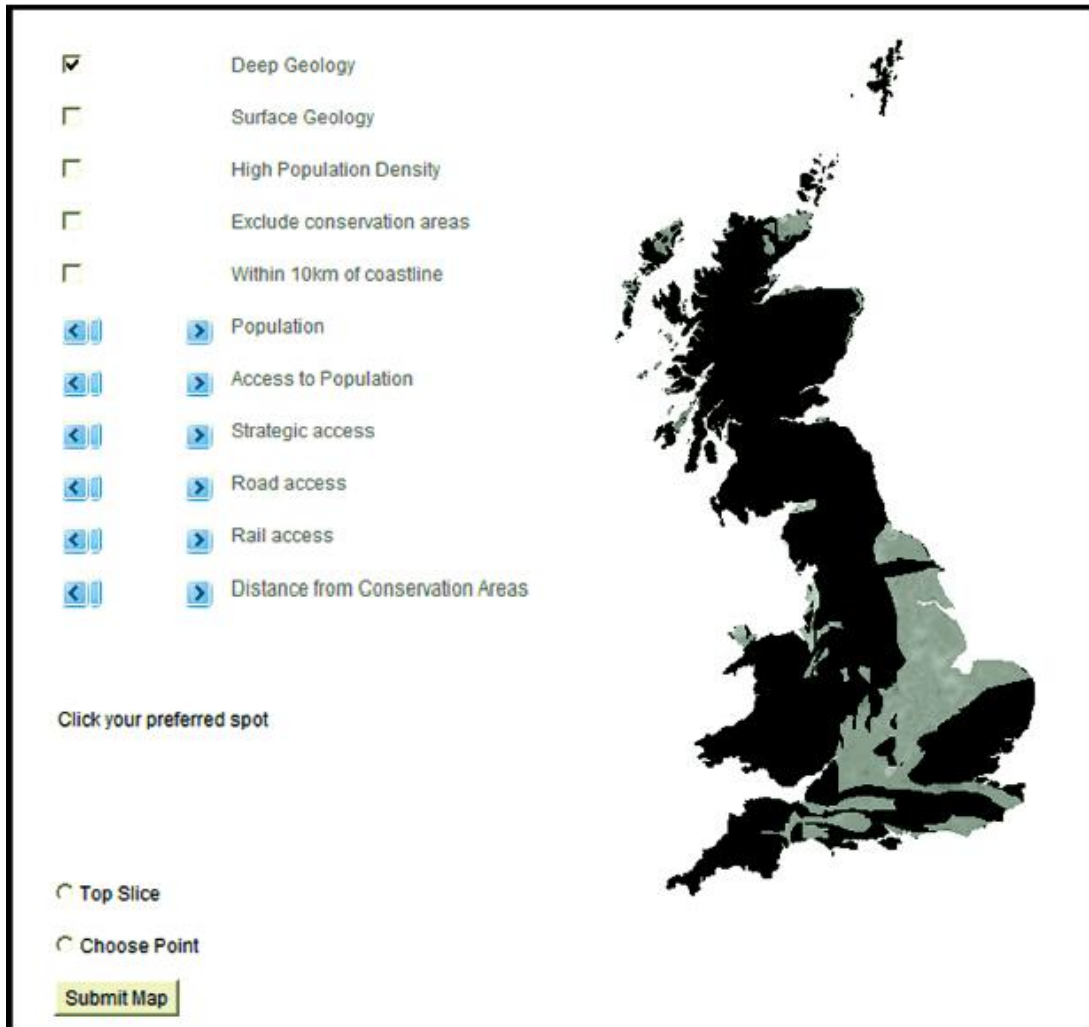
6. Odabir lokacije pripovršinskog odlagališta

Odabir je lokacije pripovršinskog odlagališta jedan od najvažnijih koraka u sigurnom i odgovornom gospodarenju radioaktivnim otpadom. Budući da proces odabira lokacije odlagališta zahtjeva kompleksne prostorne analize taj je proces inherentno geografski te zahtjeva geografski pristup. Kod odabira lokacije pripovršinskog odlagališta važno je utvrditi

kriterije i parametre koje prirodno-geografski i društveno-geografski uvjeti prostora moraju zadovoljiti kako bi se postigla odgovarajuća razina izolacije otpada od prirodnog okoliša na površini. Razalim i dr. (2010) navode kako je dobra međunarodna praksa napraviti ispitivanje lokacije za potencijalno odlagalište prije nego što se poduzmu daljnji koraci kako bi se osiguralo da izgrađeno odlagalište nije ugroženo zbog geoloških, hidroloških ili ljudski izazvanih događaja te okolišnih faktora. Prilikom odabira lokacije budućeg odlagališta najvažniji parametar je prikladna geološka formacija, a uvriježene metode odabira lokacije su analiza višekriterijskog odlučivanja (engl. MCDA), geografski informacijski sustav (GIS) i kombinirana GIS-MCDA metoda (Perković i dr., 2012). Nadalje, prilikom odabira lokacije pripovršinskog odlagališta faktori koji moraju biti uzeti u obzir uključuju prirodne hazarde koji reflektiraju geološke uvjete poput seizmike i tektonike te hazarde poput klime i hidroloških značajki prostora koji utječu na uvjete na površini u obliku poplava, ruta otjecanja podzemne vode i sl. (Skrzeczowska i dr. 2012).

Kao primjer uspješnog korištenja GIS-MCDM metodologije u odabiru lokacije odlagališta radioaktivnog otpada Perković i dr. (2012) navode primjer iz Velike Britanije gdje se kao ulazni podaci za izradu karata prikladnih lokacija koriste dva skupa tematskih geoprostornih slojeva: slojevi ograničenja i slojevi vrednovanja kriterija. Slojevi ograničenja ulazni su podaci za višekriterijsko odlučivanje kojima se ograničava geografsko područje i broj potencijalnih lokacija odlagališta, a ti slojevi uključuju stabilne geološke formacije na velikoj dubini, glinovite naslage na površini, zaštićena područja, obalni pojas (manje od 10 km) i područja s velikom gustoćom naseljenosti (Perković i dr., 2012). Ograničavanjem geografskog područja koje se smatra pogodnim nastoje se izdvojiti lokacije u kojima prirodno-geografski uvjeti omogućuju izgradnju odlagališta. U slučaju pripovršinskog odlagališta, u kojem je interakcija s uvjetima na površini više moguća, važno je utvrditi područja sa slabo propusnim te nepropusnim naslagama na površini poput koje omogućuju površinsko otjecanje vode te smanjuju odnosno onemogućavaju infiltraciju površinske vode do spremnika otpada. Također je važno utvrditi prostor udaljen od zaštićenih područja u blizini kojih zakonska i propisna ograničenja ne dozvoljavaju izgradnju odlagališta, prostor udaljen od obale kako bi se spriječila potencijalna migracija radionuklida u more te područja s vrlo malom gustoćom naseljenosti kako bi ljudska aktivnost na površini u blizini odlagališta bila ograničena. Nadalje, pored 5 parametara ograničenja u prostornu analizu ulazi 6 GIS slojeva kriterija: gustoća naseljenosti na području $2 \times 2 \text{ km}^2$, broj ljudi koji živi unutar polumjera 25km od potencijalne lokacije, prometne veze od nuklearne elektrane do odlagališta, cestovna povezanost sa svim postojećim putovima u okolici, željeznička

povezanost s okolnim prugama i udaljenost od zaštićenih područja (Perković i dr., 2012). Prema tome, ukupno je 11 parametara koji ulaze u izradu karte pogodnih područja za izgradnju odlagališta (Sl. 7).



Slika 7. Izrada karte područja pogodnih za lociranje odlagališta
Izvor: Perković i dr., 2012

Budući da je uobičajeno gustoću naseljenosti izraziti na površini 1 km^2 , nije jasno zbog čega se u navedenoj GIS analizi koristi sloj kriterija gustoće naseljenosti na 4 km^2 . Ukoliko je moguće s obzirom na dostupnost i preciznost podataka u GIS analizama lokacije odlagališta radioaktivnog otpada mora biti korištena najveća moguća prostorna rezolucija ulaznih podataka kako bi se postigla veća razina jasnoće i preciznosti izlaznih podataka analize. Korištenjem podataka o gustoći naseljenosti na prostoru 1 km^2 prostor prikladan za lokaciju pripovršinskog odlagališta biti će preciznije određen s obzirom na taj kriterij te će analiza biti usporediva s drugima.

Navedeni su parametri samo neki od kriterija koji mogu biti uzeti u evaluaciji prostora u svrhu izgradnje pripovršinskog odlagališta, a ti kriteriji nisu univerzalni već ovise o autoru i razmatranom prostoru analize. Također, metode analize ulaznih podataka, vrijednosti varijabli parametara te artikulacija parametara mogu se razlikovati u analizama. Primjerice, Razalim i dr. (2010) navode kako je u prostornoj analizi pripovršinskog odlagališta radioaktivnog otpada u malezijskoj saveznoj državi Pahang korišteno 10 parametara kojima je ovisno o prikladnosti za odlagalište radioaktivnog otpada dodijeljena vrijednost između 1 (najmanje prikladno) i 10 (najviše prikladno). Parametri te analize, kao i krajnji razredi visoke i niske težinske vrijednosti, odnosno najprikladnije i najmanje prikladne karakteristike prostora prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Parametri i krajnje težinske vrijednosti prostorne analize odlagališta u Pahangu

Faktori	Parametri	Visoka težinska vrijednosti (10)	Niska težinska vrijednosti (1)
Socio-ekonomski	Upotreba zemljišta	Očišćeno zemljište	Plantaža čaja
Geološki i hidrološki	Geološki Gustoća lienamenta Hidrogeološki	granit, metasediment < 1000 m/km ² < 5 m ³ /h	morski pijesak >2000 m/km ² >20 m ³ /h
Površinski procesi	Padaline Tlo Visina Geomorfološki	<1000 mm godišnje glina 50 – 300 m.n.v. izolirano brdo	>3000 mm godišnje pijesak <50 m.n.v. naplavna ravnic
Stabilnost terena	Nagib padine Potencijal odrona	15° – 26° <40% vjerojatnost	35° >90% vjerojatnost

Izvor: Razalim i dr., 2010

Na primjeru odabranih prostornih parametara za odlagalište u Pahangu vidljivo je kako prostor najpogodniji za lociranje pripovršinskog odlagališta karakterizira stabilna geološka podloga bez ljudske aktivnosti na površini, relativno mala godišnja količina padalina, glinovito tlo koje omogućuje površinsko otjecanje padalina i smanjuje infiltraciju vode te nadmorska visina na kojoj ne postoji opasnost od poplava. Primjeri iz Velike Britanije i Malezije pokazuju kako ipak postoje značajne sličnosti u odabiru kriterija za prostornu analizu lokacije odlagališta, te kako se u oba primjera kao prostori najpogodniji za izgradnju

pri površinskog odlagališta smatraju prostori u kojima je međusobni utjecaj vode i spremnika radioaktivnog otpada sveden na minimalnu razinu. Također, oba primjera pokazuju kako su prostori najpogodniji za izgradnju pri površinskog odlagališta oni u kojima ne postoji rizik od poremećaja odlagališta u obliku odrona, poplava, geoloških poremećaja, erozije te ljudske destabilizacije odlagališta. Nadalje, u oba se primjera prostori u blizini ljudske aktivnosti, odnosno naselja te poljoprivrednih područja smatraju nepogodnim za lokaciju pri površinskog odlagališta.

7. Zaključak

Pri površinsko se odlaganje smatra najprikladnijom metodom za odlaganje vrlo niskoradioaktivnog i niskoradioaktivnog otpada koji predstavljaju većinu proizvedenog radioaktivnog otpada u svijetu. Duga prisutnost pri površinskog odlaganja u praksama gospodarenja radioaktivnim otpadom svih država proizvođača dovela je do značajnih pomaka u tehnologiji i kvaliteti inženjerske izvedbe odlagališta. Kombinacijom prirodnih barijera poput slojeva šljunka, pijeska te gline i umjetnih inženjerskih barijera moguće je na jednostavan i jeftin način odložiti velike količine radioaktivnog otpada uz osiguravanje zadovoljavajuće razine sigurnosti i stabilnosti pri površinskog odlagališta. Poseban se naglasak u izgradnji pri površinskog odlagališta stavlja na kontrolu površinskih procesa poput erozije i otjecanja vode kako bi se usporio prirodni proces degradacije odlagališta.

Budući da je pri površinsko odlagalište vezano uz procese na površini može se očekivati niz kratkoročnih i dugoročnih posljedica vidljivih u prostoru u svim operativnim fazama odlagališta. Zbog toga napor u razvijanju pri površinskih odlagališta moraju biti usmjereni na prevenciju potencijalnih nepoželjnih posljedica u prostoru te na sanaciju već izazvanih posljedica. Posebno je važno spriječiti nekontroliranu radioaktivnu kontaminaciju okoliša koja bi mogla uzrokovati niz nepopravljivih posljedica u biosferi u obliku povećanja učestalosti bolesti u jedinkama, poremećaja u hranidbenim lancima te poremećaja u obrascima migracija. Nadalje, posebni napor također moraju biti usmjereni na osiguranje sigurnosti društva i ljudskog zdravlja, no pristup u zaštiti od nepoželjnih posljedica ne smije biti isključivo antropocentričan. Napreci i otkrića u radioekologiji važni su u razumijevanju migracije radionuklida i kemotoksičnih elemenata kroz ekosustave te mogu u velikoj mjeri doprinijeti napretku sigurnosti pri površinskog odlaganja radioaktivnog otpada. U javnosti je u određenoj mjeri prisutan strah od odlaganja radioaktivnog otpada, no negativni osjećaji u vezi odlagališta radioaktivnog otpada mogu biti ublaženi edukacijom i informiranjem javnosti o

radioaktivnom otpadu, metodama odlaganja, inženjerskoj izvedbi odlagališta te o njihovoj sigurnosti ali i o potencijalnim nepoželjnim posljedicama.

Veliku važnost u sigurnom pripovršinskom odlaganju radioaktivnog otpada ima odabir lokacije odlagališta, gdje veliku ulogu ima geografski pristup te upotreba geografskih informacijskih sustava (GIS). GIS omogućuje slojevitu analizu prostornih podataka kojom se može ograničiti prostor koji je po svojim fizičko-geografskim i socio-ekonomskim uvjetima u prostoru prikladan za lociranje pripovršinskog odlagališta.

Energija dobivena iz nuklearnih izvora predstavlja ozbiljnu alternativu energiji iz fosilnih goriva, posebice zbog toga što nuklearna goriva, za razliku od fosilnih goriva, emitiraju izrazito male količine polutanata u atmosferu. S druge strane, nuklearna goriva na proizvođačima energije ostavljaju odgovornost zbrinjavanja opasnog radioaktivnog otpada proizvedenog nuklearnim ciklusom. Ukoliko znanstveni i tehnološki napredak čovječanstva omogući potpuno sigurno i isplativo dugoročno zbrinjavanje radioaktivnog otpada, usmjeravanje na nuklearnu energiju kao prijelaz na potpuno obnovljive izvore energije predstavlja iznimnu priliku za održivi razvoj ljudske civilizacije. U konačnici, Won Han i dr. (1997) navode slijedeće: „Odlaganje niskoradioaktivnog i srednjeradioaktivnog otpada temeljeno je dokazanim i dobro demonstriranim tehnologijama. Ako su odlagališta pravilno locirana, sagrađena i upravljana – i sadržaj radionuklida u otpadu je kontroliran i ograničen – sigurnost može biti zadovoljavajuće osigurana na dugi vremenski period.“.

8. Literatura

Bréchnac, F., Polikarpov, G., Oughton, D. H., Hunter, G., Alexakhin, R., Zhu, Y. G., Hilton, J., Strand, P., 2003: Protection of the environment in the 21st century: radiation protection of the biosphere including humankind, *Ethics in Science and Environmental Politics* 2002, 40-42.

Classification of Radioactive Waste, International Atomic Energy Agency, 2009, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1419_web.pdf (16.7.2019.)

Conca, J., Sage, S., Wright, J., 2008: Nuclear energy and waste disposal in the age of fuel recycling, *The New Mexico Journal of Science* 45, 13-21.

D'Arrigo, D., 2009: "low-level" radioactive waste is not low risk, *NIRS Factsheet* April 1, 2009.

Environmental Impact Statement, Canadian Nuclear Laboratories, 2017, <https://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents/p80122/118412E.pdf> (8.8.2019.)

Kautsky, U., Saetre, P., Berglund, S., Jaeschke, B., Nordén, S., Brandefelt, J., Keesmann, S., Näslund, J. O., Andersson, E., 2016: The impact of low and intermediate-level radioactive waste on humans and the environment over the next one hundred thousand years, *Journal of Environmental Radioactivity* 151, 395-403.

Konstantinova, M., Gudelis, A., Butkus, D., 2007: On leakage from the near-surface radioactive waste storage facility, *GlobalNEST International Journal* 9 (1), 63-70.

Linsley, G., 1989: Protection of natural ecosystems: Impact of radiation from waste disposal practices, *IAEA Bulletin* 31 (4), 28-31.

Low-Level Waste, United States Nuclear Regulatory Commission, 2017, <https://www.nrc.gov/waste/low-level-waste.html> (3.8.2019.)

Management of low and intermediate level radioactive wastes with regard to their chemical toxicity, International Atomic Energy Agency, 2002, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1325_web.pdf (5.8.2019.)

Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, International Atomic Energy Agency, 2014, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1637_web.pdf (17.7.2019)

Nuclear waste, Nuclear Energy Institute, n.d., <https://www.nei.org/fundamentals/nuclear-waste> (19.7.2019.)

Nys, V., 2006: Demonstrating the safety of near surface disposal facilities, u: International conference on the safety of radioactive waste disposal; Tokyo, International Atomic Energy Agency, 263-269.

Odlaganje NSRAO-a, Radioaktivni Otpad, n.d., <https://radioaktivniotpad.org/odlaganje-nsrao-a/> (25.6.2019.)

Outline History of Nuclear Energy, World Nuclear Association, 2019, <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx> (25.6.2019.)

Perković, D., Perković, A., Avdić, A., 2012: Otvoreni sustav potpore prostornom odlučivanju na primjeru odabira lokacije odlagališta radioaktivnog otpada, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* 24, 95-100.

Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste, International Atomic Energy Agency, 2001., https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1260_prn.pdf (29.7.2019.)

Radiation Health Effects, United States Environmental Protection Agency, n.d., <https://www.epa.gov/radiation/radiation-health-effects> (9.8.2019.)

Radioactive Waste Management, World Nuclear Association, 2018., <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx> (16.7.2019.)

Radioactive Waste – Myths and Realities, World Nuclear Association, 2017, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-wastes-myths-and-realities.aspx> (29.7.2019.)

Razalim, F. A. A., Surip, N., Hasnulhadi, A., Harun, N., Malek, N. N. A., Musa, R. C., 2010: Geographical information system (GIS) suitability analysis of radioactive waste repository site in Pahang, Malaysia, *Seminar R&D Nuclear Malaysia 2010*.

Skrzeczowska, M., Pietrzykowski, P., 2012: Razmatranje brtvenih svojstava tla u svrhu lociranja novog pripovršinskog odlagališta radioaktivnog otpada u Poljskoj kroz prizmu dugotrajne sigurnosti, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* 24, 101-104.

Smičiklas, I., Šljivić-Ivanović, M., 2016: Radioactive Contamination of the Soil: Assessments of Pollutants Mobility with Implication to Remediation Strategies, u: *Soil Contamination - Current Consequences and Further Solutions* (eds. Larramendy, M. i dr.), IntechOpen, 253-276.

Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste, International Atomic Energy Agency, 2002, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1308_web.pdf (7.8.2019.)

The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability, International Atomic Energy Agency, 2003, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/LTS-RW_web.pdf (29.7.2019.)

Veinović, Ž., 2016: Zbrinjavanje radioaktivnog otpada – svjetska praksa i hrvatski izazovi, *Zaštita okoliša, Kem. Ind.* 65 (7-8), 420-423.

Zeeavert, T., Govaerts, P., Baekelandt, L., Minon, J. P., 1997: Radiological protection factors in site selection of near surface repositories, u: *Planning and operation of low level waste disposal facilities*, International Atomic Energy Agency, 177-186.

Waste disposal for nuclear power plants, VGB PowerTech, 2012, https://www.vgb.org/vgbmultimedia/VGB_Brosch_Entsorgung_web_ENGL_-p-6422.pdf (2.8.2019.)

Won Han, K., Heinonen, J., Bonne, A., 1997: Radioactive waste disposal: Global experience and challenges, *IAEA Bulletin* 39 (1), 33-41.

9. Izvori

Klasifikacija Radioaktivnog otpada, Radioaktivni otpad, n.d., <http://radioaktivniotpad.org/klasifikacija-radioaktivnog-otpada/> (28.7.2019.)

Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, International Atomic Energy Agency, 2018, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf (17.7.2019.)

Odlaganje NSRAO-a, Radioaktivni Otpad, n.d., <https://radioaktivniotpad.org/odlaganje-nsrao-a/> (25.6.2019.)

Odlaganje NSRAO-a, Radioaktivni Otpad, n.d., <https://radioaktivniotpad.org/odlaganje-nsrao-a/> (25.6.2019.)

Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste, International Atomic Energy Agency, 2001., https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1260_prn.pdf (29.7.2019.)

Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste, International Atomic Energy Agency, 2001., https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1260_prn.pdf (29.7.2019.)

Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste, International Atomic Energy Agency, 2002, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1308_web.pdf (7.8.2019.)

Radioecology, Institut de protection et de sûreté nucléaire, 2001, https://www.irs.fr/EN/publications/thematic/Documents/booklet_radioecology.pdf (6.8.2019.)

Perković, D., Perković, A., Avdić, A., 2012: Otvoreni sustav potpore prostornom odlučivanju na primjeru odabira lokacije odlagališta radioaktivnog otpada, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* 24, 95-100.

Razalim, F. A. A., Surip, N., Hasnulhadi, A., Harun, N., Malek, N. N. A., Musa, R. C., 2010: Geographical information system (GIS) suitability analysis of radioactive waste repository site in Pahang, Malaysia, *Seminar R&D Nuclear Malaysia 2010*.