

Vrednotenje ozemlja Slovenije za odlaganje radioaktivnih odpadkov z vidika geologije

Geological evaluation of the Slovenian territory for radioactive waste disposal

Janko URBANC¹, Jasna ŠINIGOJ¹ & Peter TOMŠE²

¹ Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1001 Ljubljana

² Agencija za radioaktivne odpadke, Parmova 53, 1000 Ljubljana

Ključne besede: radioaktivni odpadki, odlaganje, vrednotenje prostora, večparametrška analiza, GIS, Slovenija

Key words: radioactive waste, disposal, area survey, multicriterial analysis, GIS, Slovenia

Kratka vsebina

Karta naravnih danosti za odlaganje NSRAO je rezultat vrednotenja prostora z vidika geologije v okviru postopka izbora lokacije za odlagališče nizko in srednje radioaktivnih odpadkov (NSRAO) v Sloveniji. Karta predstavlja eno izmed izhodišč za nadaljevanje postopka izbora lokacije. Prikazuje del vrednotenja prostora, ki se nanaša na naravne lastnosti prostora z vidika primernosti za izgradnjo odlagališča NSRAO. Pri izdelavi karte so bili upoštevana priporočila glede prostornine geološke pregrade, enostavnosti geološke zgradbe, vrste kamnine, geokemičnih lastnosti geološke pregrade, podzemne vode, seizmične aktivnosti, tektonskih značilnosti, stabilnosti kamnin, poplav in erozije ter morfologija terena. Karta je bila izdelana v GIS okolju z uporabo večparametrskih odločitvenih metod. Na osnovi rezultatov pregleda prostora je bila izdelana ocena, da je v Sloveniji skoraj 10.000 km² površine ozemlja perspektivno za iskanje lokacij za odlaganje NSRAO.

Abstract

Due to the growing need for a final disposal of low and intermediate level (LILW) radioactive waste, the final solution for the short-lived LILW is one of the key issue of radioactive waste management in Slovenia at the moment. In the Area Survey Stage of the site selection process for the final disposal the suitability of the Slovenian territory for a surface or underground repository of LILW is examined by cabinet investigations in order to locate geologically suitable formations. The assessment of natural conditions of the system was based on consideration of the main geological, hydro-geological and seismotectonic conditions. It was performed with ARC/INFO technology. The results are compiled in a map, showing potential areas for underground and surface disposal of LILW in Slovenia. It has been established that there is a potential suitability for both surface and underground disposal on about 10,000 km² of the Slovenian territory, which represents almost half of the entire Slovenian territory.

Uvod

Za izvedljivost postopka izbora lokacije za odlagališče nizko in srednje radioaktivnih odpadkov (NSRAO) je ključna družbena

sprejemljivost. Pred pričetkom vključevanja javnosti v postopek izbora lokacij je nujno zagotoviti ustrezne strokovne podlage izdelane na osnovi ekspertnega vrednotenja prostora. Podlaga za takšno vrednotenje so

strokovno pripravljene smernice, izdelane na osnovi mednarodnih priporočil ter z upoštevanjem lokalnih specifičnosti. Najpomembnejša tehnična priporočila oziroma smernice se nanašajo na zagotavljanje dolgoročne varnosti odlagališča. Postopek analize in vrednotenja prostora glede na primernost za odlaganje NSRAO torej ustreza predvsem tehnološkim in prostorsko funkcionalnim merilom oziroma tehničnim vidikom lokacije za odlagališče NSRAO.

V začetni stopnji stopnji lokacij odlagališča izvedemo kabinetni pregled ozemlja na osnovi obstoječih podatkov. V ta namen je potrebno pridobiti ustrezne prostorske podatke, jih primerno obdelati, zagotoviti njihovo kakovost in medsebojno združljivost ter nato po posameznih parametrih izbora ovrednotiti prostor. Tu gre predvsem za računalniško podprte zbirke prostorskih podatkov, pri samem vrednotenju prostora pa si pomagamo z večparametrskimi odločitvenimi metodami. Agencija ARAO je leta 1999 začela zbirati in obdelovati vse potrebne digitalizirane prostorske podatke. Ko so bili ti obdelani do take mere, da je bila zagotovljena njihova usklajenost in združljivost, se je pričelo z vrednotenjem slovenskega ozemlja, katerega cilj je bil prikaz potencialno primernih območij za odlaganje NSRAO v Sloveniji. Znotraj teh bi nato v sodelovanju z lokalnimi skupnostmi in podrobnejšimi raziskavami izbranih območij prišli do končne lokacije za odlagališče NSRAO.

Vloga geologije v postopku vrednotenja prostora za odlagališče NSRAO

Osnovni princip odlaganja radioaktivnih odpadkov (RAO) je poiskati stabilna in slabo prepustna geološka okolja, kjer naravni procesi, ki lahko vplivajo na radioaktivne odpadke, potekajo čim bolj upočasnjeno. Koncept odlaganja RAO temelji na vzpostavitvi več zaporednih pregrad, ki upočasni ali onemogočajo migracijo radionuklidov v okolju, kjer so odpadki odloženi. Geološko okolje, v katerem je zgrajeno odlagališče, predstavlja zadnjo pregrado tega koncepta, saj omogoča dolgoročno izolacijo odpadkov od biosfere oziroma od ljudi in okolja. Geološki dejavniki, ki karakterizirajo neko lokacijo odlagališča, so torej v neposredni zvezi z dolgoročno varnostjo odlagališča saj:

- zagotavljajo fizično zaščito odlagališča pred naravnimi (npr. erozija, tektonika) in antropogenimi vplivi,
- omejujejo prehod radioaktivnih izotopov iz odlagališča in njegove bližnje okolice,
- zadržujejo radionuklide v geološkem okolju v širši okolici odlagališča (kamnini, ki ga obdaja).

Vsako načrtovanje odlagališča radioaktivnih odpadkov mora zato vsebovati obsežne geološke raziskave za zagotovitev zadostnega razumevanja lastnosti geološkega okolja, primerne za odlaganje RAO. Skladno z mednarodnimi priporočili (IAEA, 1994) obstaja konsenz o vlogi in pomenu posameznih geoloških dejavnikov pri zagotavljanju dolgoročne varnosti odlagališča RAO. V splošnem lahko kot zelo pomemben dejavnik navedemo stopnjo kompleksnosti geološkega okolja. Relativno preprosto in predvidljivo geološko okolje je želeni pogoj za izvedbo varnostne ocene odlagališča, prav tako je takšno lokacijo lažje karakterizirati. Vsak geološki dejavnik, za katerega lahko smatramo, da povečuje kompleksnost geološkega okolja načeloma zmanjšuje oceno primernosti posamezne lokacije (Savage, 1995). Pri določitvi vloge in načina upoštevanja posameznih geoloških dejavnikov je pomembno, da jim ne pripišemo prevelike vloge glede na vrsto odpadkov, katerih odložitev načrtujemo.

V začetnih fazah postopka izbora lokacij mora biti pozornost osredotočena na geološka okolja, ki po pričakovanjih nudijo večji potencial za odlaganje NSRAO. Šele v kasnejših stopnjah je cilj izbrati lokacijo, ki bo skupaj svojimi značilnostmi, primerno zasnovano odlagališča in inženirskimi pregradami izpolnjevala s strani upravnega organa postavljene zahteve glede varstva pred sevanji. Na osnovi izkušenj (Petkovšek et al., 1996) se je pokazalo, da je pomembno, da v začetnih stopnjah ne uporabljamo nikakršnih izključitvenih kriterijev. Važno je zasnovati postopek, ki ostaja fleksibilen in temelji na smernicah in priporočilih, ki niso preskriptivne narave. V primerjavi z neuspešnim postopkom izbora lokacije v letih 1990 – 93, ne iščemo več »geološko najboljše« lokacije, ampak geološka okolja, ki so za odlaganje bolj primerna. Odločitev o morebitni izključitvi nekega območja ali lokacije lahko temelji samo na neposrednem ali po-

srednem dokazu neprimernosti, pridobljenem med izvršenimi terenskimi raziskavami v naslednjih načrtovanih stopnjah postopka. Ne uporabljamo torej strogih izločitvenih kvalitativnih kriterijev, ampak opisna priporočila, ki dajejo postopku nujno fleksibilnost. Rezultati so eno izmed izhodišč za postopek izbora lokacije za odlagališče NSRAO, ki naj bi se zaključil s potrditvijo lokacije. Kljub temu, da je za dokončno ovrednotenje prostora potrebno obravnavati še številne druge prostorske sestavine ter dodatne vidike (ranljivost), pa gre v tej fazi vendarle za ključni del vrednotenja (Urbanistični inštitut, 2000) in sicer iz več razlogov:

- Obravnavan je tisti del (naravne danosti – geologija, vode, seizmika) prostora, ki je pri izboru lokacije ključen za zagotavljanje funkcionalnosti in varnosti odlagališča in ga tako obravnavajo tudi mednarodne smernice za izbor lokacij odlagališč RAO
- Gre za merila, ki imajo vlogo v več vidikih vrednotenja: po eni strani so ključna za opredelitev privlačnosti za investicijo – kolikor ugodnejše so naravne razmere, toliko enostavnejša in cenejša je izgradnja odlagališča. Ta merila so v primeru odlagališča

NSRAO povezana z izolacijskimi lastnostmi geološke pregrade in so torej tudi v neposredni povezavi z varnostjo odlagališča.

Za ovrednotenje primernosti prostora z vidika geologije za odlaganje NSRAO so bila upoštevana priporočila navedena v Tabeli 1 (Petkovšek et al., 1995, Veselič, 1995, Urbanc et al., 1998).

Metoda vrednotenja in način izdelave karte

Prostor celotne Slovenije je bil obdelan v GIS okolju z uporabo večparametrsk metode utežene vsote (Nijkamp et al., 1990). Metoda ima dve izraziti prednosti zaradi katerih smo se odločili, da jo uporabimo:

- je enostavna, kar je ugodno za razumevanje postopka izbora, saj bodo vanj vključene različne skupine ljudi z različno stopnjo znanja, in
- omogoča dober pregled vpliva posameznega parametra na končni rezultat. Pri mnogih tovrstnih metodah zaradi bolj kompliciranega postopka namreč ni mogoče videti, na kakšen način se bo vrednost določenega parametra odražala v končni oceni korist-

Tabela 1: Upoštevana priporočila pri vrednotenju prostora za odlaganje NSRAO z vidika geologije

Parameter / Priporočilo	Osnova za upoštevanje	Način upoštevanja
Prostornina geološke pregrade	Večja prostornina / večja učinkovitost	Posredno – oddaljenost od najbližje geološke meje geološke pregrade
Enostavnost geološke zgradbe	Sorazmerno preprosta in predvidljiva	Gostota strukturnih elementov / km ²
Vrsta kamnine	Litološke značilnosti, ki preprečujejo migracijo radionuklidov	Določitev primernosti za odlaganje vsem litološkim členom litostratigrafske karte
Geokemične značilnosti geološke pregrade	Stabilnost geokemične pregrade / minimiziranje reakcij z odpadki	Posredno iz litološke karte – primernost glinastih in kristalinskih kamnin
Podzemna voda	Ugodne hidravlične značilnosti / majhna izdatnost podzemne vode	Geološke strukture z manjšo prepustnostjo, izdatnostjo
Seizmična aktivnost	Izven območij pričakovane večje seizmične aktivnosti.	Projektni pospešek tal za povratno dobo 475 let.
Tektonske značilnosti	Izven območij pričakovane večje tektonske aktivnosti.	Linije glavnih regionalnih prelomov.
Stabilnost terena	Izven nestabilnih območij (površinsko odlaganje)	Trdnost kamnin (podzemno odlaganje) Območja plazjenja, nagib pobočij (površinsko odlaganje)
Poplave in erozija	Izven območij erozije, poplav	Vodotoki, poplavna območja, stopnja erozije.
Morfologija	Primernejši teren za izgradnjo	Digitalni model reliefa odlagališča (površinsko odlaganje)

nosti posamezne variante, kar poveča možnost napačne presoje posameznih parametrov v odločitvenem postopku.

Pri uporabi metode utežene vsote moramo vsakemu parametru določiti najprej stopnjo primernosti (koristnosti), poleg tega pa moramo določiti tudi relativni pomen določenega parametra glede na ostale parametre, ki nastopajo v procesu izbora. Odločili smo se, da poleg številčnih ocen uporabimo tudi opisno lestvico ocen primernosti posameznega parametra, saj so opisne ocene v načelu primernejše za ocenjevanje (Rajkovič, 1987). Uporabili smo sledečo lestvico ocen primernosti:

5 – zelo primerno, 4 – primerno, 3 – srednje primerno, 2 – manj primerno, 1 – zelo nizka stopnja primernosti, 0 – izjemoma primerno

V tabeli 2 je prikazan način ocenjevanja primernosti za parameter seizmična aktivnost.

Oceno primernosti posamezne točke določimo na osnovi vsote uteženih ocen primernosti posameznih parametrov:

$$O_{sk} = \sum O_{pr} \cdot O_{po}$$

O_{sk} skupna ocena primernosti lokacije
 O_{pr} ocena primernosti parametra
 O_{po} ocena pomena parametra

Nekateri parametri so tako pomembni, da v veliki meri pogojujejo primernost posameznega območja. Ker je bil naš namen obdelava prostora brez vnaprejšnjega izločanja posameznih območij (brez uporabe izločilnih kriterijev), je potrebno zelo velik pomen takšnih parametrov v postopek izbora vgraditi na drugačen način. Tudi če temeljnim parametrom pripišemo visoke ocene pomena, po naših izkušnjah slaba območja v povprečju dobijo še vedno previsoko število točk. Območja ocenjujemo namreč na osnovi več parametrov, tako da ena izrazito slaba ocena v primerjavi z ostalimi ocenami ne pomeni

Tabela 2: Določitev primernosti območja za odlaganje NSRAO glede na seizmično aktivnost

Ocena primernosti	Vrednost	Pomen
5	projektni pospešek tal je do 0,150 g	4* / 3 **
4	projektni pospešek tal je nad 0,150 do 0,175 g	
3	projektni pospešek tal je nad 0,175 do 0,200 g	
2	projektni pospešek tal je nad 0,200 do 0,225 g	
1	projektni pospešek tal je nad 0,225 g	

* za površinsko odlaganje NSRAO, ** za podzemno odlaganje NSRAO

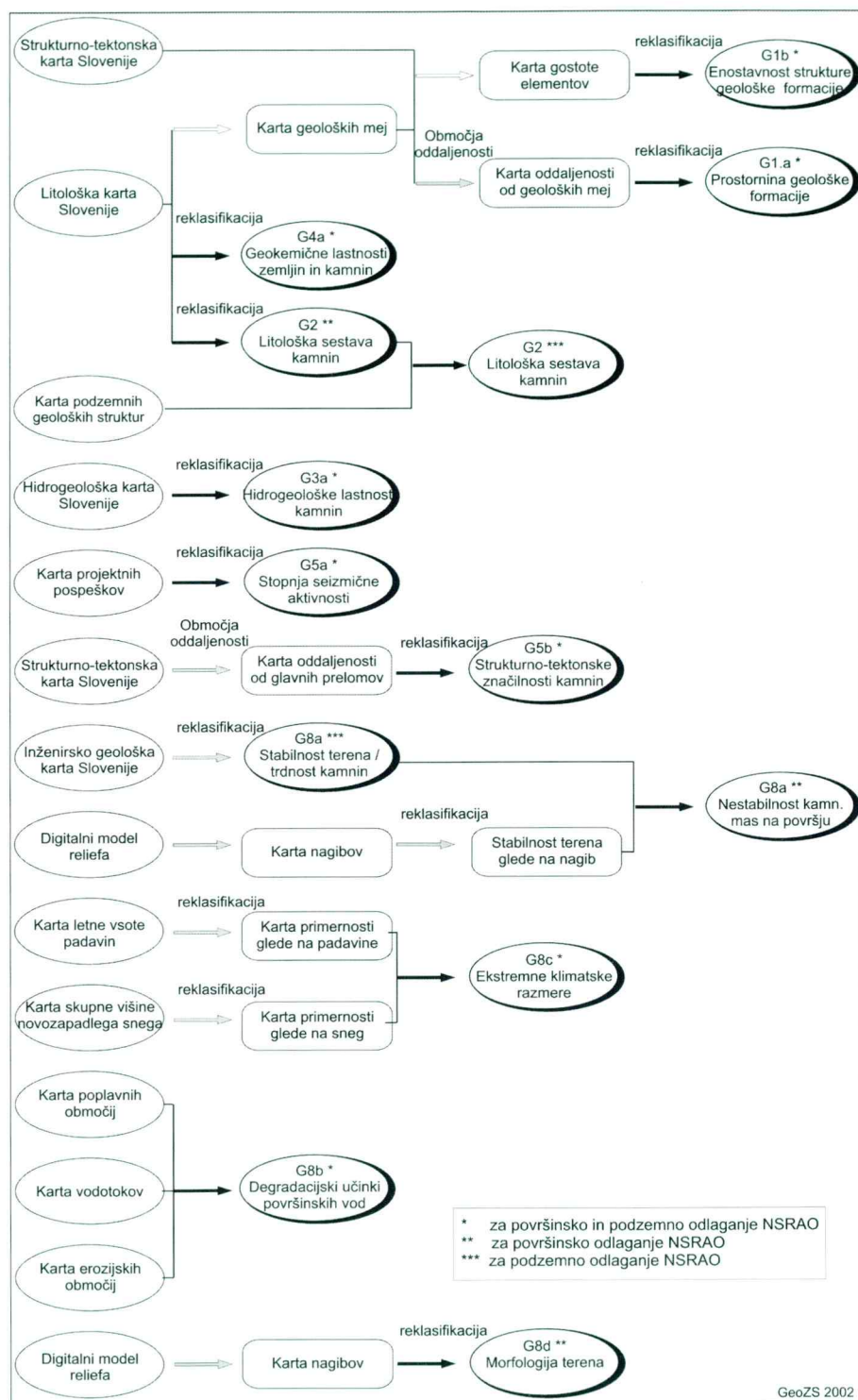
Vsi parametri seveda nimajo enakega pomena za oceno možnosti izvedbe odlagališča. Če bi privzeli enako težo vseh parametrov, bi se zares pomembni parametri nekako izgubili v povprečju, tako da bi lahko izrazite prednosti posameznih območij v glavnih parametrih izničile z slabšimi ocenami manj pomembnih parametrov. S ponderiranjem ocen pomena parametrov lahko dosežemo bolj realen prispevek pomena posameznega parametra h končni oceni lokacije (Carver, 1991). Uporabljali smo sledečo lestvico ocenjevanja pomena parametrov:

5 – zelo pomemben, 4 – pomemben, 3 – srednje pomemben, 2 – manj pomemben, 1 – praktično zanemarljiv.

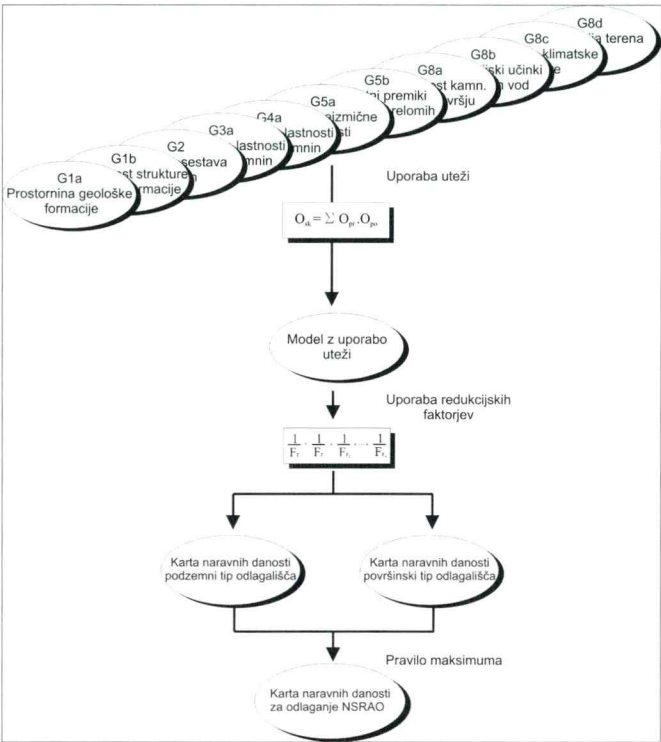
prav veliko. Zaradi tega smo v postopku obdelave prostora uvedli poseben faktor, s katerim smo zmanjšali končno oceno tistih lokacij, ki so glede enega ali večih temeljnih parametrov izrazito slabo ocenjene. Ta faktor smo imenovali redukcijski faktor (F_r), njegove vrednosti so v razponu od 0 do 1. Redukcijski faktorji so bili določeni na osnovi ekspertnega ocenjevanja v fazi kalibracije modela primernosti. Z redukcijskim faktorjem pomnožimo skupno število točk, ki jih je dosegla določena lokacija.

$$O_{sk} = F_r \cdot \sum O_{pr} \cdot O_{po}$$

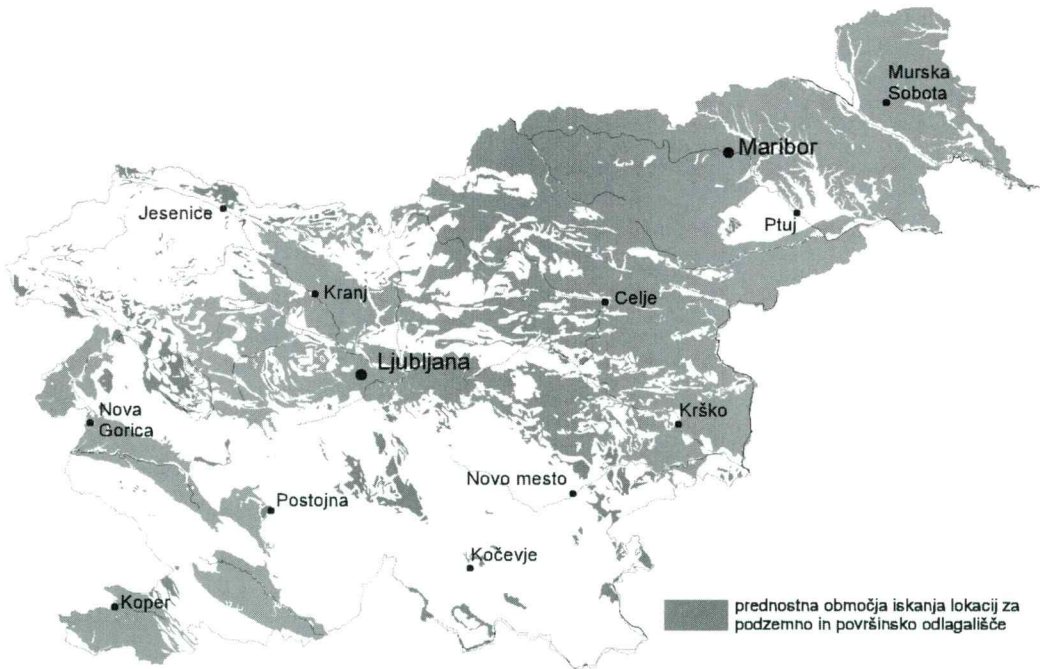
F_r redukcijski faktor
 O_{sk} skupna ocena primernosti lokacije



Slika 1: Postopek izdelave kart primernosti za odlaganje NSRAO po posameznih parametrih



Slika 2: Postopek izdelave karte naravnih danosti.



Slika 3: Karta naravnih danosti za odlaganje NSRAO.

O_{pr} ocena primernosti parametra

O_{po} ocena pomena parametra

Če ima lokacija več redukcijskih faktorjev, njihov skupni učinek seštejemo po formuli:

$$\frac{1}{F_r} = \frac{1}{F_{r_1}} = \frac{1}{F_{r_2}} + \dots + \frac{1}{F_{r_n}}$$

Končno ustreznost posamezne celice smo izrazili v odstotkih glede na največje možno število točk, ki ga lahko dobi posamezna celica. Za grafično prikazovanje smo ocene posameznih območij razdelili v dva razreda. Analize smo izvajali v Arc/Info okolju (GRID modul), uporabili pa smo digitalne baze prostorskih podatkov, ki prekrivajo celotno Slovenijo. Za velikost celice smo določili 100 x 100 m.

Za vsak parameter smo izdelali karto, ki prikazuje oceno primernosti za odlaganje NSRAO glede na izbrani parameter (slika 1). Karte primernosti za odlaganje NSRAO za posamezne parametre smo utežili, jih sešteli, nato pa uporabili še redukcijske faktorje (slika 2). Izdelali smo dve karti naravnih danosti prostora za odlaganje NSRAO, in sicer za površinski in podzemni tip odlagališča. Končna karta naravnih danosti prostora predstavlja združitev obeh kart (slika 3). Karti smo združili po pravilu maksimuma, saj bo na končni, primerni lokaciji le en tip odlagališča, bodisi površinski ali podzemni (Urbanc et al., 2001).

Rezultati vrednotenja

Karta naravnih danosti za odlaganje NSRAO predstavlja izhodiščna potencialna območja iskanja lokacij za odlagališče NSRAO. Območja iskanja lokacij so tista območja, na katerih obstaja določena verjetnost, da bo z naknadnimi terenskimi raziskavami mogoče najti primerno lokacijo za odlaganje radioaktivnih odpadkov. Gre torej za potencialno primerna območja, katerih primernost bo treba še potrditi z nadaljnjimi raziskavami. Karta je nastala s kabinetnim pregledom ozemlja celotne Slovenije. Na osnovi opravljenih analiz ocenjujemo, da skoraj na polovici skupne površine ozemlja Slovenije razpolagamo z območji, perspektiv-

nimi za iskanje lokacij za odlaganje NSRAO.

Pri delu je bila velika pozornost dana mehanizmom pridobivanja zaupanja v izdelano kartografsko gradivo. Izdelan je bil sistem preverjanja karte s kontrolnimi točkami, na osnovi katerih je bilo izvršeno preverjanje posameznih modelov. Prav tako je bila izvršena analiza občutljivosti modela na spreminjanje uteži ter pomena uporabljenih parametrov.

Kombiniran postopek izbora lokacije (ARAO, 1997; Mele in Železnik, 1998), ki vključuje tehnični del postopka in vključevanje javnosti, zahteva pred začetkom komunikacije z javnostmi ustrezno pripravljene strokovne podlage. Karta naravnih danosti predstavlja eno temeljnih osnov za nadaljevanje postopka izbora lokacij. Rezultate lahko smatramo do neke mere za dokončne, saj se stanje v naravi v času izbora lokacije ne bo bistveno spremenilo (lahko pridobimo edino boljše vhodne podatke). Prav tako je malo verjetno, da bi se bistveno spremenila izhodišča za vrednotenje, ki niso odvisna od interesne skupine oziroma vrednostnega sistema posameznega ocenjevalca, ampak gre za opredeljena strokovna vrednostna izhodišča. Seveda v naslednjih korakih dobljeni rezultati zahtevajo nadaljnje vrednotenje in učinkovito usklajevanje interesov.

Literatura

ARAO, 1997: Priprava postopka za izbor lokacije za odlagališče NSRAO – Zaključki delavnice, ARAO, Ljubljana.

Carver, S.J. 1991: Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. International Journal of Geographical Information Systems 5.

IAEA, 1994: Siting of Geological Disposal Facilities, Safety Series No. 111-G-4.1, IAEA, Vienna.

Kvamme K., Oštir-Sedej K., Stančič S. & Šumrada R. 1997: Geografski informacijski sistemi, Znanstvenoraziskovalni center SAZU. Ljubljana.

Mele I., Železnik N. 1998: "A new approach to the LILW repository site selection", Proc. Int. Conf. Nuclear energy in central Europe '98, Terme Čatež, Slovenia, September 7-10, Nuclear Society of Slovenia.

Petkovšek, B., Urbanc, J., Uhan, J. & Kočevár, M. 1995: Geološke smernice za izbor lokacije podzemnega odlagališča NSRAO. Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, arh.št. J-II-30d/b14-23/1-v, Ljubljana.

Petkovšek, B. et al., 1996: "Geological aspects of site selection for LILW radwaste repository in Slovenia", In: P.A. Witherspoon, (Ed.) Geologi-

cal problems in the radwaste isolation – Second world-wide review, Lawrence Berkeley Institute, Berkeley, pp.197-204

Rajkovič, V., 1987: Večparametrski odločitveni postopek, ki temelji na metodah kibernetike in umetne inteligence. Disertacija, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana.

Savage D. 1995: The scientific and regulatory basis for the geological disposal of Radioactive waste, J.Wiley and Sons, West Sussex, p.202-233.

Urbanc, J., Šinigoj, J. & Duhovnik, B. 1998: Izbor lokacije za odlagališče NSRAO – Določitev načina uporabe kriterijev in rangiranje področij po primernosti za lokacijo odlagališča NSRAO 1. in 2. del. Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, Ljubljana.

Urbanc, J., Šinigoj, J., Komac M., Kumlj, Š., Duhovnik, B., Marušič, I. & Golobič, M. 2001: Izbor lokacije za odlagališče NSRAO – Vrednotenje prostora po posameznih parametrih in prikaz potencialno primernih območij po posameznih parametrih.

Urbanistični inštitut RS, 2000: Strokovne podlage za prostorski plan RS za področje radioaktivnih odpadkov, 2. faza. Urbanistični inštitut Republike Slovenije. Ljubljana.

Veselič, M. 1995: Geološke smernice za izbor lokacije odlagališča NSRAO, Rev. 1. Poročilo Inštitut za rudarstvo, geologijo in okolje IRGO, 35 str., Ljubljana.

www.gov.si/arao/model/g_index.htm