arao

Ravnanje z radioaktivnimi odpadki
Radioactive Waste Management



2025

Projektna naloga

Zagotavljanje varstva pred kritičnostjo odlagališča izrabljenega goriva iz NEK

08-04-001

julij, 2025

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

Dokument:	ARAO 08-04-001	ARAO j.g.z. Litostrojska cesta 58a 1000 Ljubljana
Datum:	julij 2025	

Naslov dokumenta:

Projektna naloga

Zagotavljanje varstva pred kritičnostjo odlagališča izrabljenega goriva iz NEK

Ime in priimek	*Podpis*	*Ime in priimek*	*Podpis*
Pripravil: **Leon Kegel**	Podpisnik: LEON KEGEL, ARAO Izdajatelj: SIGEN-CA G2 (Republika Slovenija) tevilka certifikata: BB4306DE00000000572C280 Potek veljavnosti: 05/11/2029 Datum podpisa: 14.07.2025	*Pripravil:* **Alen Polovič**	Podpisnik: ALEN POLOVIČ, ARAO Izdajatelj: SIGEN-CA G2 (Republika Slovenija) Številka certifikata: 395910C200000000572B6CD1 Potek veljavnosti: 27. 03. 2029 Datum podpisa: 15.07.2025
Pregledal: **Jernej Györköš**	Podpisnik: JERNEJ GYÖRKÖŠ, ARAO, LJUBLJANA Izdajatelj: SIGEN-CA G2 (Republika Slovenija) Številka certifikata: 14BBB0CA0000000057283C24 Potek veljavnosti: 10. 01. 2027 Datum podpisa: 18.07.2025		
Pregledal QA: **mag. Bojan Hertl**	Podpisnik: BOJAN HERTL, ARAO Izdajatelj: SIGEN-CA G2 (Republika Slovenija) Številka certifikata: F4381FBA00000000572C2803 Potek veljavnosti: 5. 11. 2029 Datum podpisa: 18.07.2025	*Odobril:* **mag. Sandi Viršek, direktor**	p.p Leon Kegel Podpisnik: LEON KEGEL, ARAO Izdajatelj: SIGEN-CA G2 (Republika Slovenija) Številka certifikata: BB4306DE00000000572C2805 Potek veljavnosti: 05/11/2029 Datum podpisa: 18.07.2025

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

SLEDLJIVOST

Revizija	*Oznaka in ime dokumenta*	*Ime in priimek*	*Datum*
0	ARAO 08-04-001 *Zagotavljanje varstva pred kritičnostjo odlagališča izrabljenega goriva iz NEK*	*Pripravil:* *Leon Kegel,* *Alen Polovič*	*julij 2025*
		Pregledal: *Jernej Györköš*	
		Odobril: *Mag. Sandi Viršek,* *direktor*	

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

KRATICE

BUC – “burnup credit”;

FEP – “Features, Events and Processes”;

GE – gorivni element;

IG – izrabljeno gorivo;

IJS – Institut Jožef Stefan;

MCNP – Monte Carlo N-Particle Transport

NEK – Nuklearna elektrarna Krško;

NSRAO – nizko- in srednjeradioaktivni odpadki;

RAO – radioaktivni odpadki;

VRAO – visokoradioaktivni odpadki;

POJMI

Embalaža so izdelki, namenjeni temu, da radioaktivne odpadke ali izrabljeno gorivo obdajajo ali držijo skupaj zaradi shranjevanja ali varovanja, ravnanja z njimi, njihove dostave ali prestavitve na poti od kraja nastanka v predelavo, med skladiščenjem ali med odlaganjem. V embalažo so vloženi radioaktivni odpadki ali izrabljeno gorivo neposredno ali že predhodno embalirani**.**

Izrabljeno gorivo je jedrsko gorivo, ki je bilo obsevano v reaktorski sredici in je iz nje trajno odstranjeno.

Kritičnost je stanje snovi, ko v njej poteka stabilna jedrska verižna reakcija, ki se sama vzdržuje.

Merila sprejemljivosti za prevzem v skladiščenje ali odlaganje so kakovostno ali količinsko izražena merila v zvezi z lastnostmi radioaktivnih odpadkov ali izrabljenega goriva, ki jih morajo izpolnjevati radioaktivni odpadki ali izrabljeno gorivo zaradi varnosti njihovega skladiščenja ali odlaganja.

Odlaganje radioaktivnih odpadkov je namestitev radioaktivnih odpadkov na odlagališče ali na določeno mesto brez namena, da bi jih ponovno prevzeli.

Odlagališče je objekt, katerega osnovni namen je odlaganje radioaktivnih odpadkov.

Paket je embalaža skupaj z notranjimi pregradami ali absorpcijskim materialom, radioaktivnimi odpadki ali izrabljenim gorivom. Paket je tudi nepakiran kosovni radioaktivni odpadek ali nepakirano izrabljeno gorivo.

Varnost pred kritičnostjo je stanje, pri katerem je zagotovljeno, da ni mogoča samo vzdrževana verižna jedrska cepitev**.**

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

KAZALO

1 UVOD 7
1.1 NAMEN IN CILJI PROJEKTA 8
2 OPIS STANJA 9
2.1 IG IZ NEK 9
2.2 VARNOSTNI KRITERIJI ZA ZAGOTAVLJANJE KRITIČNOSTI 9
2.3 KONCEPT ODLAGANJA VRAO IN IG 9
2.3.1 Odlaganje v trdni kamnini 10
2.3.2 Odlaganje v sedimentnih plasteh 13
3 VSEBINA IN OBSEG PROJEKTA 14
4 KONČNI REZULTATI NALOGE 16
5 TEHNIČNE ZAHTEVE ZA ANALIZO 17
6 POGOJI IN OMEJITVE 18
7 REFERENCE 19

SLIKE:

Slika 2-1: Model vsebnika, z leve proti desni: bakrena podlaga, bakren površnik, vložek iz zlitine železa, pokrov iz jekla, pokrov iz bakra [3]. 10
Slika 2-2: Prikaz preseka odlagalnega tunela in razdalje med odloženimi vsebniki [1]. 11
Slika 2-3: Vertikalni in prečni presek odlagalne vrtine [1]. 12
Slika 2-4: Presek odlagalne vrtine po zatesnitvi s polnilnim materialom [1]. 12

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

1 UVOD

Osnovni cilj delovanja Javnega gospodarskega zavoda ARAO – Agencije za radioaktivne odpadke, Ljubljana, je zagotoviti učinkovito, varno in odgovorno ravnanje z vsemi vrstami radioaktivnih odpadkov pri nas, od njihovega nastanka, do končne odložitve.

RAO v trdni obliki se glede na stopnjo in vrsto radioaktivnosti po Pravilniku o ravnanju z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom [1], razvrščajo v kategorije prehodno radioaktivnih odpadkov, zelo nizkoradioaktivnih odpadkov, NSRAO, visokoradioaktivnih odpadkov in kategorijo radioaktivnih odpadkov z naravnimi radionuklidi.

IG slovenska zakonodaja opredeljuje kot »jedrsko gorivo, ki je bilo obsevano v reaktorski sredici in je trajno iz nje odstranjeno«. IG se lahko obravnava kot koristna snov, ki jo je mogoče predelati, ali kot radioaktivni odpadek, ki ga je treba odložiti [2].

V Sloveniji največ radioaktivnih odpadkov nastane pri proizvodnji jedrske energije, manjši del odpadkov pa nastane tudi zaradi uporabe radioaktivnih virov v medicini, industriji in pri znanstveno-raziskovalnem delu (tako imenovani institucionalni povzročitelji ali institucionalni odpadki). Ravnanje z odpadki, poleg samega odlaganja kot končne in trajne rešitve, obsega tudi različne dejavnosti in rokovanje z odpadki pred odlaganjem, kot so obdelava in priprava odpadkov za skladiščenje in/ali odlaganje, skladiščenje in prevoz. Ustanoviteljica Javnega gospodarskega zavoda ARAO – Agencije za radioaktivne odpadke, Ljubljana, je Vlada Republike Slovenije.

IG nastaja pri nas le v NEK in raziskovalnem reaktorju TRIGA Mark II. Sedanja količina IG je majhna. V primerjavi z drugimi jedrskimi državami bodo te količine izredno majhne tudi po prenehanju obratovanja obeh reaktorjev. IG ima trenutno le NEK, saj je bilo vse IG iz reaktorja TRIGA Mark II leta 1999 vrnjeno v Združene države Amerike.

Za ravnanje z IG znotraj območja jedrskega objekta v obratovanju je pristojen in odgovoren upravljavec jedrskega objekta. Tako za skladiščenje IG v NEK skrbi NEK, za skladiščenje IG iz raziskovalnega reaktorja, ki ga trenutno ni, pa IJS. ARAO bo kot izvajalec javne službe za ravnanje z RAO po koncu skladiščenja odgovoren za morebitno predelavo IG pred odlaganjem, priprave na gradnjo odlagališča, gradnjo odlagališča ter pakiranje in odlaganje IG. Po zgraditvi odlagališča bo odgovoren tudi za njegovo obratovanje, upravljanje ter po zaprtju za dolgoročni nadzor in vzdrževanje odlagališča.

2023 je ARAO naročil študijo “Costing Study for Disposal of Spent Fuel and High-level Radioactive Wastes from the Krško Nuclear Power Plant in Deep Geological Repository – Multinational Repository” [3]. V študiji so bili pregledani novi tehnični, tehnološki, zakonski in organizacijski vidiki projekta odlaganja visokoradioaktivnih odpadkov (VRAO) in izrabljenega goriva (IG). Izboljšan je bil obstoječ referenčni scenarij za geološko odlagališče v trdnih kamninah. Poleg tega je v študiji dodatno vključen in analiziran koncept odlaganja VRAO in IG v sedimentnih formacijah za generično lokacijo nekje v Republiki Sloveniji ali Republiki Hrvaški.

Popisane so bile zahteve, predlagani različni scenariji odlaganja ter pripravljene revidirane ocene stroškov odlaganja.

Geološko odlaganje IG predstavlja izziv za varnost shranjevanja jedrskega materiala, saj se varnostni izračuni kritičnosti izvajajo za časovna obdobja več sto tisoč ali celo milijon let, ki so več

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

velikostnih redov daljša kot v kateremkoli drugem segmentu jedrskega gorivnega cikla. Razumevanje dolgoročnega razvoja vsebnikov po odlaganju in modeliranje njihovega stanja v celotnem zastavljenem obdobju predstavljata izziv, ki zahteva poglobljene raziskave. V tako dolgem časovnem obdobju prihaja do različnih korozijskih in ostalih kemijskih in fizikalnih procesov, ki lahko vplivajo na materialne in dimenzijske spremembe vsebnikov in vsebovanega IG.

Pravilnik o dejavnikih sevalne in jedrske varnosti [4], v 7. členu, 4. odstavka določa, da je pri projektiranju sevalnega ali jedrskega objekta treba zagotavljati varnost pred kritičnostjo s projektnimi rešitvami. Kadar te niso na voljo, se lahko uporabijo tudi administrativni ukrepi. V primeru odlagališča je treba oceniti možen razvoj kritičnosti po zaprtju odlagališča glede na dolgoročne negotovosti. Projekt odlagališča VRAO in IG mora upoštevati morebitne spremembe oziroma motnje v odlagalnem sistemu, ki bi lahko vplivale na varnost po zaprtju. Za projektne osnove za odlagališče IG ali VRAO in projektiranje tega objekta se smiselno upoštevajo zahteve iz Pravilnika o dejavnikih sevalne in jedrske varnosti [4], priloga 4: Projektne osnove za skladišče IG ali VRAO.

V skladu z zahtevami Pravilnika o ravnanju z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom [1], v 19. členu, 5. odstavka določa, da se mora odlaganje VRAO izvajati tako, da je poleg izpolnjevanja drugih zahtev preprečena kritičnost in zagotovljeno odvajanje zaostale toplote. Poleg tega morajo merila sprejemljivosti za odlaganje radioaktivnih odpadkov vsebovati omejitve za kritičnost IG (20. člen pravilnika).

1.1 NAMEN IN CILJI PROJEKTA

Namen naloge je raziskati in optimizirati tehnične in administrativne ukrepe za zagotavljanje varstva pred kritičnostjo pri končnem odlaganju predvidenega celotnega inventarja izrabljenega goriva iz NEK.

Glavni cilji naloge so določiti metodologijo varnostnega preverjanja in postaviti tehnično utemeljitev argumentov za zagotavljanje varnosti pred kritičnostjo po zaprtju odlagališča v luči najsodobnejših znanstvenih dognanj in v skladu z regulativnimi zahtevami. Ti ključni cilji vključujejo:

- **Razumevanje dolgoročnega razvoja odlagališč**: Analiza scenarijev, ki bi lahko vodili do povečanja reaktivnosti zaradi degradacije vsebnikov ali premikov fisijskega materiala.
- **Razvoj modelov in orodij za oceno tveganj**: Razvoj, uporaba in validacija numeričnih modelov za oceno potencialnih kritičnih scenarijev po zaprtju odlagališča.
- **Postavitev ustrezne metodologije zagotavljanja varstva pred kritičnostjo na podlagi eksperimentalne verifikacije:** Preverjanje obstoječih metod, izbor ali razvoj ustrezne metodologije izračuna, ki zagotavlja, da se v dolgoročnih scenarijih odlaganja ne pojavijo pogoji za nekontrolirano verižno jedrsko reakcijo pri čemer bo opravljena optimizacija modelov in analiza zmanjšanja morebitnih preveč konservativnih ocen pri določitvah kritičnosti.
- **Določitev varnostnih omejitev:** Opredelitev mejnih vrednosti za vsebnost fisijskega materiala v odlagalnih vsebnikih ter razvoj smernic za varno zasnovo vsebnikov in odlagališča.

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

2 OPIS STANJA

2.1 IG IZ NEK

Jedrsko gorivo v NEK je v obliki tabletk uranovega dioksida v obliki sintranih tabletk, ki so zložene v gorivnih palicah iz cirkonijeve zlitine. Skupek 235 gorivnih palic je povezanih v gorivni element (GE).

V reaktorju je 121 gorivnih elementov, ki vsebujejo približno 50 ton urana. Povprečna masa urana v GE znaša nekaj manj kot 410 kg. Obogatitev se je tekom obratovanja NEK spreminjala od 2.1 % (začetna polnitev, leta 1983) do 4.95 % po letu 2007.

Gorivni element v NEK je tipičen gorivni element tlačnovodne jedrske elektrarne, ki ima 16 x 16 (256) pozicij za gorivne palice, kontrolne palice ter instrumentacijo.

Sestavlja ga snop 235 gorivnih palic, 20 vodil nevtronskih absorberjev in eno vodilo nuklearne instrumentacije. Snop je povezan z 8 distančnimi rešetkami ter zgornjo in spodnjo šobo, ki omogočata enostavno upravljanje in rokovanje z elementi. Dimenzije gorivnega elementa so približno 19.7 cm x 19.7 cm x 400 cm (širina x dolžina x višina).

2.2 VARNOSTNI KRITERIJI ZA ZAGOTAVLJANJE KRITIČNOSTI

Po poročilu SKB - Criticality effects of long-term changes in material compositions and geometry in disposal canisters [5], je osnovno merilo kritičnosti, da efektivni faktor pomnoževanja nevtronov ne sme presegati 0,95, vključno z negotovostmi, analiza jedrske varnosti pa mora vključevati upoštevanje vseh verjetnih normalnih in nenormalnih obratovalnih dogodkov. Za izpolnitev tega merila v odlagalnih vsebnikih, se upošteva izgorelost izrabljenega goriva tlačnovodnega reaktorja.

V primeru malo verjetnih dogodkov je ta omejitev postavljena na 0,98.

To merilo je vedno izpolnjeno, če je odlagalni vsebnik suh. Če se predpostavlja, da je odlagalni vsebnik napolnjen z vodo, se izkaže, da merilo kritičnosti ni izpolnjeno v kolikor je v odlagalnem vsebniku sveže izrabljeno gorivo brez gorljivega strupa.

V splošnem se upošteva, da je kritičnost goriva dosežena, če je vrednost pomnoževalnega faktorja enaka 1 (keff = 1).

2.3 KONCEPT ODLAGANJA VRAO IN IG

Za geološko odlagališče, ki se načrtuje v Sloveniji ali na Hrvaškem, sta predvidena dva koncepta [3]:

- trdna kamnina (KBS-3V, po vzoru Švedske/Finske) in
- sedimentne plasti oz. glina (OPA, na osnovi švicarske gline Opalinus).

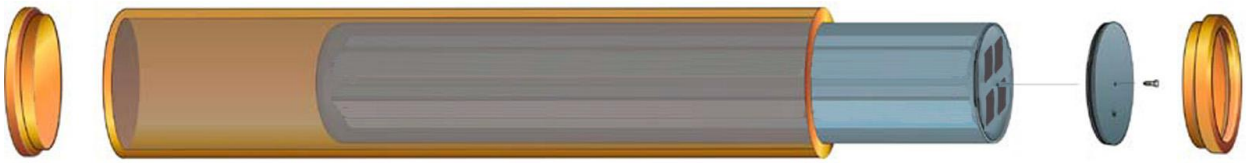
577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

Za oba koncepta je v tej fazi predvidena uporaba generičnih geoloških podatkov in referenčnih podatkov iz obeh držav. Oba koncepta predpostavljata neposredno odlaganje na globini 500 metrov in vključujeta obrat za enkapsulacijo IG, ki se nahaja skupaj z odlagališčem odpadkov, 200 km od Krškega. Odlaganje v trdni kamnini se izvaja z odlaganjem vsebnikov z bakreno oblogo v navpične vrtine, medtem ko se za odlagališče odpadkov iz gline uporablja horizontalno postavitev vsebnikov brez bakrene obloge v predore. V osnovnem scenariju, pri katerem je načrtovano obratovanje NEK do leta 2043, je predvideno odlaganje 2282 gorivnih elementov v 571 vsebnikih, pri scenariju podaljšanega obratovanja NEK do 2063 pa 3182 gorivnih elementov v 796 vsebnikih.

2.3.1 Odlaganje v trdni kamnini

Odlaganje temelji na švedsko/finskem konceptu odlaganja KBS-3V, ki obsega večpregradni sistem za izolacijo IG, VRAO in dolgoživih NSRAO. Na lokaciji odlagališča so zagotovljene vse strukture, sistemi in komponente, potrebne za delovanje odlagališča kot neodvisnega jedrskega objekta. IG je pakirano v vsebnike z bakreno oblogo, ki so odporni na korozijo, ter obdani s stisnjeno bentonitno glino za stabilizacijo in zaščito pred premiki.

Odlagalni vsebnik je sestavljen iz zunanjega dela vsebnika oziroma površnika, ki je cevaste oblike in izdelan iz bakra, ter iz notranjega dela vsebnika, ki je izdelan iz zlitine železa [3]. V železo so narejeni kanali, v katere vstavijo GE. Kanali z GE so ojačani z 10 mm debelim jeklom. Vsebnik za gorivne elemente iz tlačnovodnih reaktorjev vsebuje 4 kanale za do 4 GE.



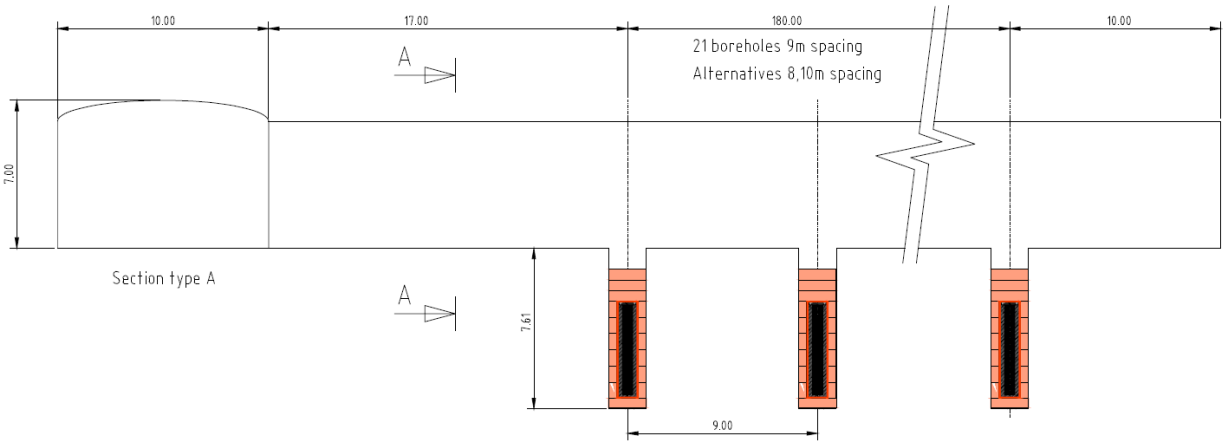
Slika 2-1: Model vsebnika, z leve proti desni: bakrena podlaga, bakren površnik, vložek iz zlitine železa, pokrov iz jekla, pokrov iz bakra [6].

Vsebnik (Slika 2-1) je sestavljen iz:

- bakrenega površnika,
- vložka iz zlitine železa s kanali za gorivo,
- jekla debeline 10 mm, ki se nahaja v kanalih,
- jeklenega pokrova,
- bakrene podlage in bakrenega pokrova.

Odlaganje se izvaja na globini 500 metrov v odlagalne tunele, izkopane z vrtanjem in miniranjem. Vsebnike z IG se odloži v navpične vrtine (globine 7,6 m, premera 1,8 m, razmika 9 m), izvrtane v tla tunela [3]. Odlagališče je sestavljeno iz nadzemnega in podzemnega dela, ki vključuje dostopno klančino (7 m x 7 m), servisni jašek (premera 5 m), prezračevalni jašek (premera 3 m), servisni prostor in odlagalne tunele. Za osnovni scenarij odlagališča je načrtovanih 28 odlagalnih tunelov, kjer je mogoče odložiti 571 vsebnikov (27 tunelov dolžine 207 m z 21 vrtinami, en tunel dolžine 54 m s 4 vrtinami). Za scenarij podaljšanega obratovanja NEK do 2063, je v odlagališču predvidenih 38 tunelov za odlaganje 796 vsebnikov (37 tunelov dolžine 207 m z 21 vrtinami, eden dolžine 189 m z 19 vrtinami).

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab



Slika 2-2: Prikaz preseka odlagalnega tunela in razdalje med odloženimi vsebniki [3].

Razmik med odlagalnimi tuneli in razmik med odlagalnimi vrtinami je določen s potrebo po vzdrževanju temperature na površini vsebnika pod 90 °C. Temperature višje od 90 °C v bližini vsebnika z IG, bi lahko imele dva negativna vpliva na dolgoročno delovanje večpregradnega sistema zadrževanja. Prvič, lahko povečajo stopnjo korozije bakrenih vsebnikov in s tem zmanjšajo njegovo vzdržljivost. Drugič, visoke temperature lahko povzročijo mikro razpoke v bentonitnih plasteh, kar lahko vpliva na njihovo vodotesnost in zadrževalne lastnosti. Zaradi teh toplotnih omejitev je razmik med odlagalnimi vrtinami 9 m, med odlagalnimi tuneli pa 40 m.

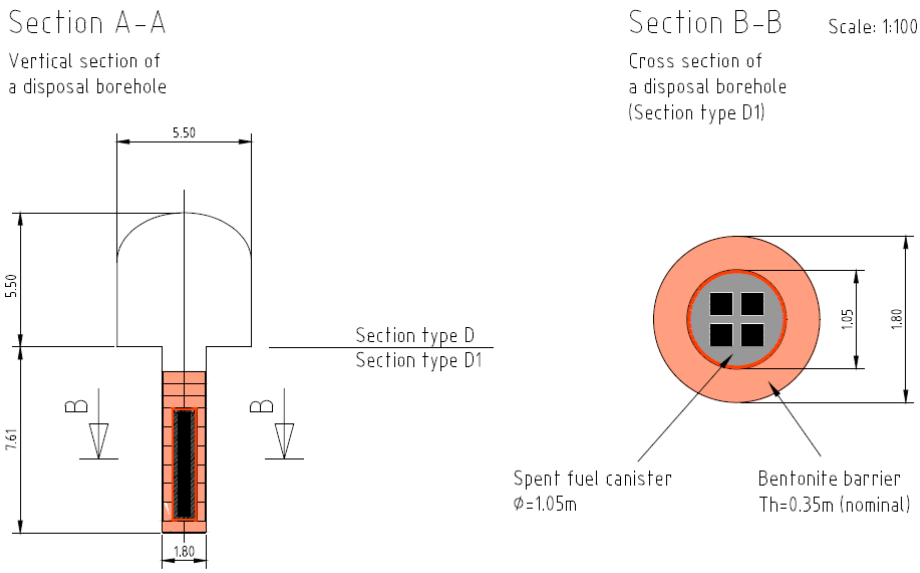
Površinski del odlagališča je razdeljen na ne ograjeno, industrijsko, tehnološko nadzemno in podzemno območje, vključno z objektom za enkapsulacijo (zmogljivost 60 vsebnikov/leto) za pripravo in pakiranje IG v odlagalne vsebnike.

Obratovanje odlagališča obsega površinske dejavnosti, zlasti prevoz in sprejem vsebnikov, ter podzemne dejavnosti, kot je ravnanje z vsebniki in njihovo namestitev/odložitev na točno določene pozicije v vrtinah.

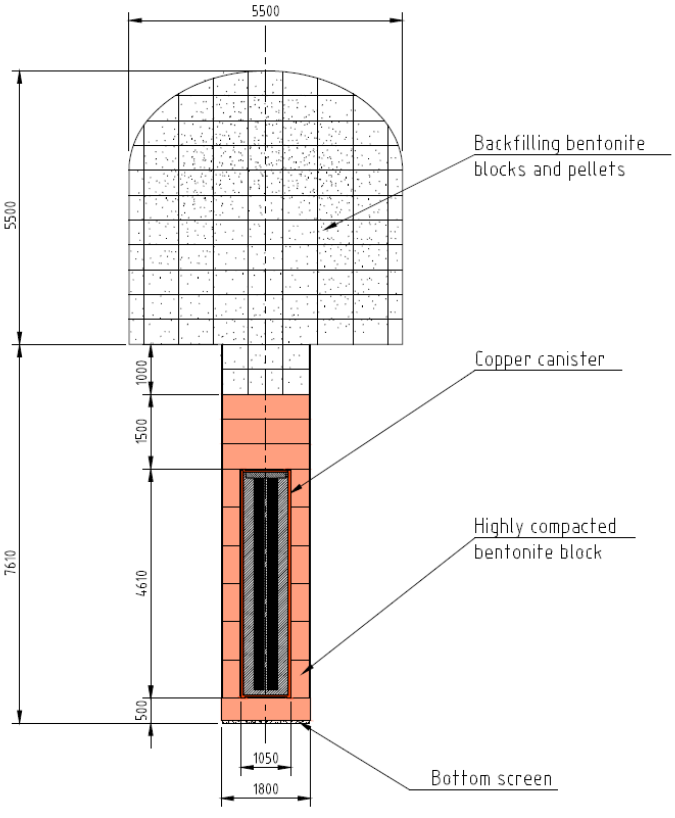
Obratovalne dejavnosti se začnejo leta 2093 takoj po pridobitvi obratovalnega dovoljenja za odlagališče in zagonu vseh sistemov. Predvideva se, da bo delovanje odlagališča trajalo 10 let, (2093–2103 za osnovni scenarij) ali 15 let (2108–2123) za scenarij podaljšanega obratovanja NEK.

Po odložitvi vseh vsebnikov z IG bodo odstranjena betonska tla, prezračevalni sistem, električna napeljava ter cevi za vodo in stisnjen zrak.

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab



Slika 2-3: Vertikalni in prečni presek odlagalne vrtine [3].



Slika 2-4: Presek odlagalne vrtine po zatesnitvi s polnilnim materialom [3].

Razgradnja objektov odlagališča se lahko začne šele, ko bo odloženo vso IG. Zaprtje geološkega odlagališča se začne z zasipanjem podzemnih rovov in odlagališč. Podzemni deli odlagališča, odlagalni tuneli, jaški, klančine in rampa se zasipajo in zatesnijo. Praznine med odlagalnimi

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

vsebniki in steno vrtin bodo zapolnjene s stisnjenim bentonitom, med bloki in stenami odlagalnih tunelov odlagališča pa bodo zapolnjene z glinenimi oz. bentonitnimi peleti (Slika 2-4).

Predvideva se, da bo ne glede na scenarij, faza razgradnje trajala 4 leta, faza zaprtja pa 3 leta. Predvideva se, da bo v obeh glavnih scenarijih aktivni institucionalni nadzor po zaprtju odlagališča trajal 50 let, ko bo odlagališče pripravljeno na pasivni dolgoročni nadzor.

2.3.2 Odlaganje v sedimentnih plasteh

Koncept odlaganja temelji na konceptu podjetja Nagra, ki je bil prvotno razvit za globoko geološko odlagališče v Švici. Vloga za splošno dovoljenje za švicarsko globoko geološko odlagališče je bila vložena leta 2024.

V osnovi koncept vključuje odlaganje ustrezno pakiranega IG v globokem geološkem odlagališču z uporabo večpregradnega sistema. Poleg pregradne funkcije, ki jo zagotavlja matična kamnina, se uporabljajo tudi inženirske pregrade, ki jih sestavljajo odlagalni vsebnik, bentonitno polnilo, ki obdaja vsebnike in tesnilni čep na vhodu v odlagalni del podzemnega dela odlagališča. Obravnavani koncept v sedimentnih plasteh je zelo podoben švedskemu konceptu KBS-3V v trdni kamnini, ki je podrobneje predstavljen v poglavju 2.3.1.

Postopek pakiranja IG je prilagojen tako, da omogoča vstavljanje GE v jeklene odlagalne vsebnike brez bakrene obloge ali prevleke.

Predvidena je enaka globina odlaganje kot pri konceptu v trdni kamnini, tj. na globini 500 m, število odlagalnih tunelov pa je prilagojeno inventarju IG iz NEK. Odlagalni del objekta je za osnovni scenarij sestavljen iz šestih odlagalnih tunelov za odlaganje IG. Odlagalni vsebniki z IG bodo nameščeni vodoravno v odlagalnih vrtinah z medsebojno razdaljo treh metrov.

Po vstavitvi in namestitvi odlagalnega vsebnika v odlagalne vrtine se izvede zasipanje in zatesnitev. Ko so odloženi in zatesnjenimi vsi vsebniki z IG se odlagalni tunel zapolni z bentonitnim materialom in zapre.

Druge dejavnosti aktivnega in pasivnega institucionalnega nadzora (vključno z zaščitnimi ukrepi) bodo enake kot pri odlaganju IG v trdni kamnini.

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

3 VSEBINA IN OBSEG PROJEKTA

Projekt je razdeljen na glavne 3 faze, pri čemer prva faza traja približno pol leta, druga in tretja faza pa po eno leto. Cilj razdelitve na faze je omogočiti sistematičen razvoj metodologije zagotavljanja varstva pred kritičnostjo, od začetne zasnove do validacije in priprave končnih priporočil.

Faza I (predvideno trajanje 1 leto**) – Določitev predpostavk referenčnega modela**

Izgorevalni del:

- Pregled trenutnega stanja IG iz NEK, vključno z določitvijo faznega prostora ključnih parametrov (masa, obogatitev, izgorelost, prisotnost gorljivih absorberjev, fizikalni parametri obratovalne zgodovine).
- Ocena parametrov goriva, ki bo nastalo ob prihodnjem obratovanju NEK do konca njene življenjske dobe.

Odlagalni del:

- Določitev koncepta smiselnega generičnega odlagalnega vsebnika in njegove okolice.
- Opredelitev dimenzijskih in materialnih parametrov vsebnika ter ocena proizvodnih negotovosti in koncentracij materialnih nečistoč.

Faza II (predvideno trajanje 1 leto**) – Modeliranje ter analiza možnih scenarijev v odlagališču in analiza občutljivosti**

Modeliranje:

- Priprava osnovnega koncepta odlagališča.
- Postavitev referenčnega modela za izračun z Monte Carlo transportnim programom ter določitev pomnoževalnega faktorja za referenčni primer odlaganja izrabljenega goriva.

Preliminarna analiza negotovosti:

- Primerjava rezultatov, dobljenih z uporabo različnih knjižnic jedrskih podatkov (ENDF/B-VII.0, VII.1, VIII.0, VIII.1 in JEFF).
- Analiza propagacije negotovosti podatkov iz knjižnice ENDF/B-VIII.1 skozi celotno življenjsko dobo goriva (uporaba kovariančnih matrik presekov, negotovosti pri cepitvenih produktih in razpadnih konstantah).

Analiza možnih scenarijev v odlagališču naj obsega:

- Uporaba FEP (“Features, Events and Processes”) metodologije za identifikacijo možnih dogodkov in procesov v odlagališču.
- Razvoj metodologije za analizo vplivov teh scenarijev (npr. vdor vode, korozijske spremembe, degradacija in preboj inženirskih barier).
- Preliminarna ocena kritičnosti izbranih nezgodnih scenarijev in določitev tistih, ki so z vidika varstva pred kritičnostjo najbolj omejujoči.

Analiza vpliva različnih negotovosti na pomnoževalni faktor vsebnika naj obsega:

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

- Parametri goriva (npr. obogatitev, sestava).
- Zgodovina izgorevanja.
- Dimenzijske negotovosti goriva in vsebnika.
- Materialne negotovosti (začetna izotopska sestava, prisotnost nečistoč).
- Poenostavitve v modelih.

Faza III (predvideno trajanje 1 leto**) – Optimizacija in validacija ter določitev polnitvene krivulje**

Z namenom optimizacije računskih modelov in optimizacije lastnosti vsebnikov naj izvajalec izvede:

- Optimizacijo računskih modelov glede na pridobljene rezultate.
- Optimizacijo geometrije in sestave vsebnikov.
- Validacijo izračunov z uporabo ustreznih primerjalnih metod s testnimi (“benchmark“) primeri.

Po končani optimizaciji modelov in vsebnikov naj izvajalec določi polnitveno krivuljo:

Določitev metodologije za izračun polnitvene krivulje ob upoštevanju “burnup credit” (BUC) koncepta.

- Izračun konkretne polnitvene krivulje za izrabljeno gorivo iz NEK ob upoštevanju negotovosti jedrskih podatkov, rezultatov občutljivostnih analiz ter analiz nezgodnih scenarijev.

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

4 KONČNI REZULTATI NALOGE

Končni rezultat naloge bodo izračuni in poročilo o izvedenih delih po zaključku vsake faze projekta. Poročilo bo izvajalec predal v papirnati in elektronski obliki. Pred končno izdelavo poročil, morajo biti ARAO predstavljeni preliminarni rezultati, ki jih bo izvajalec poslal ARAO v pregled vsaj 10 dni pred predstavitvijo. Morebitne pisne pripombe ARAO na osnutek vmesnih poročil in končnega poročila, mora izvajalec ustrezno upoštevati, jih uskladiti z ARAO in smiselno vključiti v končne verzije izdelanih poročil.

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

5 TEHNIČNE ZAHTEVE ZA ANALIZO

Izvajalec mora imeti na voljo za izvedbo naloge kvalificirano programsko opremo, uveljavljeno v mednarodni strokovni javnosti. Predvideva se uporaba stohastičnega (Monte Carlo) programa za transport nevtronov kot npr. Serpent2, eventualno MCNP, ter uporaba najsodobnejših knjižnic jedrskih podatkov (predvidoma ENDF/B-VIII.1 [7]). Izvajalec mora imeti za izvedbo naloge ustrezno usposobljen kader, kar bo dokazoval z referencami v okviru dokumentacije za javno naročanje.

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

6 POGOJI IN OMEJITVE

ARAO in izvajalec bosta z izdelano dokumentacijo ravnala kot z intelektualno lastnino, ki je skupna last, kar pomeni, da dokumentov ne bosta posredovala tretjim osebam, brez vnaprejšnjega pisnega soglasja nasprotne strani. ARAO dovoljuje izvajalcu naloge objavo najpomembnejših izsledkov v mednarodnih revijah in na znanstvenih konferencah.

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab

7 REFERENCE

[1] Pravilniku o ravnanju z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom, Uradni list RS, št. 125/21 in 74/24

[2] Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV-1) Uradni list RS, št. 76/17, 26/19, 172/21 in 18/23 – ZDU-1O

[3] "Costing Study for Disposal of Spent Fuel and High-level Radioactive Wastes from the Krško Nuclear Power Plant in Deep Geological Repository – Multinational Repository".

[4] Pravilnik o dejavnikih sevalne in jedrske varnosti, Uradni list RS, št. 56/24

[5] „Criticality effects of long-term changes in material compositions and geometry in disposal canisters, SKB Technical Report, TR 16-06, 2016".

[6] „Criticality safety analysis of the NPP Krško spent fuel in the disposal facility at nominal conditions (Analiza kritičnosti v odlagališču za izrabljeno jedrsko gorivo iz NEK pri normalnih pogojih), IJS, IJS-DP-10839, 2012".

[7] https://www.nndc.bnl.gov/endf-releases/?version=B-VIII.1, dostop 04/07/2025

577d4f67525b6fd646ce39033a23c1294e51fbc6b94328a69372390b5fbc91a9683ce6ab