

# Simulacija termičko-hidrauličkih efekata na matičnu stijenu i inženjerske barijere odlagališta istrošenog nuklearnog goriva

---

Slaviček, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:220081>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij geološkog inženjerstva

**SIMULACIJA TERMIČKO-HIDRAULIČKIH EFEKATA NA MATIČNU  
STIJENU I INŽENJERSKE BARIJERE ODLAGALIŠTA ISTROŠENOG  
NUKLEARNOG GORIVA**

Diplomski rad

Josip Slaviček

GI 374

Zagreb, 2021.

SIMULACIJA TERMIČKO-HIDRAULIČKIH EFEKATA NA MATIČNU STIJENU I INŽENJERSKE  
BARIJERE ODLAGALIŠTA ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA

Josip Slaviček

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

Sažetak

U diplomskom radu opisan je koncept odlaganja visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva u duboke geološke formacije, razvijen u cilju sigurne i dugoročne izolacije radionuklida te zaštite ljudi i okoliša od negativnog radiološkog utjecaja. Pri izgradnji dubokog geološkog odlagališta primjenjuje se najbolja tehnologija te iskustva stečena u projektima vodećih nuklearnih programa. Za potrebe ovog rada izrađen je numerički model u programu Plaxis2D koji simulira širenje topline iz spremnika u odlagalištima istrošenog nuklearnog goriva. Za izradu su korišteni podaci in-situ mjerenja toplinskih karakteristika stijenske mase i inženjerskih barijera. Podaci su analizirani, a rezultat predstavljen u radu.

Ključne riječi: visoko radioaktivni otpad, istrošeno nuklearno gorivo, duboko geološko odlagalište, bentonit, in-situ ispitivanje, senzori, numerički model

Završni rad sadrži: 46 stranice, 2 tablica, 37 slika, i 38 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF  
Doc. dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF

Ocjenjivači: Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF  
Doc. dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF  
Izv. prof. dr. sc. Dario Perković, izvanredni profesor RGNF

SIMULATION OF THERMAL-HYDRAULIC EFFECTS ON THE HOST ROCK AND ENGINEERING  
BARRIERS OF THE SPENT NUCLEAR REPOSITORY

Josip Slaviček

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

Abstract

This thesis describes the concept of high radioactive waste and spent nuclear fuel disposal in deep geological formations, developed for the purpose of safe and long-term isolation of radionuclides and protecting people and the environment from negative radiological impacts. The high technology and experience gained in the projects of leading nuclear programs are applied in the construction of a deep geological repository. For the purposes of this paper, a numerical model was developed in the Plaxis2D program, which simulates the spread of heat from a disposal canister in a spent nuclear fuel repository. In-situ measurement data of thermal characteristics of rock mass and engineering barriers were used for the construction. The data were analyzed, and the result was presented in the paper.

Keywords: high level waste, spent nuclear fuel, deep geological facility, bentonite, in-situ testing, sensors, numerical model

Thesis contains: 46 pages, 2 tables, 37 figures, 38 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor  
PhD Želimir Veinović, Assistant Professor

Reviewers: PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor  
PhD Želimir Veinović, Assistant Professor  
PhD Dario Perković, Associate Professor

*S punom odgovornošću izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora, doc.dr.sc. Želimira Veinovića i doc.dr.sc. Dubravka Domitrovića.*

*Zahvaljujem se docentu Dubravku Domitroviću i docentu Želimiru Veinoviću na prilici da diplomski rad izradim pod njihovim vodstvom. Njihovi stručni komentari, korisni savjeti i primjedbe uvelike su doprinijeli izradi ovog diplomskog rada..*

*Zahvaljujem se kolegama i prijateljima na podršci i nezaboravnom vremenu tijekom cijelog studija.*

*Na kraju, posebno bih se želio zahvaliti roditeljima, sestrama i djevojci na bezrezervnoj podršci i razumijevanju tijekom mog sveučilišnog obrazovanja.*

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. ZBRINJAVANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA</b> .....	3
<b>2.1. Klasifikacija radioaktivnog otpada</b> .....	3
<b>2.2. Otpad iz nuklearnog gorivog ciklusa i proizvodnje nuklearnog goriva</b> ...	5
<b>2.3. Visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo</b> .....	6
<b>2.4. Skladištenje istrošenih gorivih elemenata</b> .....	8
<b>2.5. Odlaganje radioaktivnog otpada</b> .....	10
<b>2.6. Koncepti odlaganja VRAO-a i ING-a</b> .....	12
<b>2.7. In-situ modeli odlaganja visokoradioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva</b> .....	18
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO (IN-SITU SIMULACIJA TERMIČKO-HIDRAULIČKIH EFEKATA U MATIČNOJ STIJENI I INŽENJERSKIM BARIJERAMA)</b> .....	22
<b>3.1. Geološka građa odabrane lokacije in-situ simulacije</b> .....	22
<b>3.2. Koncept in-situ pokusa</b> .....	23
<b>3.3. Izrada i umjeravanje grijaćeg tijela i senzora</b> .....	24
<b>3.4. Instalacija grijaćeg tijela</b> .....	29
<b>3.5. Mjerenje temperature i vlažnosti</b> .....	32
<b>4. NUMERIČKI MODEL IN-SITU ISPITIVANJA</b> .....	34
<b>4.1. Općenito o programu <i>Plaxis</i></b> .....	34
<b>4.2. Numerički model i rubni uvjeti</b> .....	34
<b>4.3. Rezultati numeričkog modela</b> .....	35
<b>5. ANALIZA REZULTATA</b> .....	41
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	43
<b>7. POPIS LITERATURE</b> .....	44

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Nuklearni gorivi ciklus.....	5
Slika 2-2. Gorivi element.....	6
Slika 2-3. Bazen s bornom vodom za privremeno skladištenje ING-a.....	8
Slika 2-4. Bazeni za mokro skladištenje u Središnjem privremenom skladištu za ING u Švedskoj.....	9
Slika 2-5. Spremnici za suho skladištenje istrošenog nuklearnog goriva.....	10
Slika 2-6. Konceptualno rješenje za izolaciju VRAO-a (Veinović et al., 2015).....	13
Slika 2-7. Tip odlagališta s obzirom na položaj spremnika u tunelu: horizontalni (narančasto) ili vertikalni (plavo) (Končić, 2013).....	14
Slika 2-8. Odlaganje u vertikalne bušotine (lijevo), odlaganje u horizontalne bušotine desno) (Baldwin et al., 2008).....	15
Slika 2-9. Aksijalno odlaganje (lijevo), aksijalno postavljen superkontejner (desno) (Baldwin et al., 2008).....	15
Slika 2-10. Aksijalno postavljen superkontejner, betonska ispuna hodnika (lijevo), aksijalno postavljen superkontejner veliki promjer (desno) (Baldwin et al., 2008).....	15
Slika 2-12. Odlaganje u duboke vertikalne bušotine (lijevo), hidraulički kavez (desno) (Baldwin et al., 2008).....	16
Slika 2-11. Galerije, odlaganje čeličnih višenamjenskih kontejnera (lijevo), odlaganje kanistara ili kanistara s betonskom oblogom (desno) (Baldwin et al., 2008).....	16
Slika 2-13. Prikaz modela odlagališta KBS-3V.....	17
Slika 2-14. Koncept odlaganja VRAO-a i ING-a u projektu FEBEX I (Grimsel, 2020).....	19
Slika 2-15. Ugradnja grijača u bentonitni blok (Grimsel, 2020).....	20
Slika 2-16. Prikaz senzorskih očitavanja (Grimsel, 2020).....	20
Slika 3-1. Koncept eksperimenta (žuto – grijaće tijelo, zeleno – bentonitna ispuna, plavo – matična stijena).....	23
Slika 3-2. Postav umjeravanja grijaćeg tijela.....	24
Slika 3-3. a) Ispunjavanje grijaćeg tijela kvarcnim pijeskom b) Dopunjavanje i nivelacija razine kvarcnog pijeska u grijaćem tijelu.....	25
Slika 3-4. Saturacija pijeska uljem.....	26
Slika 3-5. Širenje topline na grijaćem tijelu (a): (b) ispunjenim uljem, (c) ispunjenim pijeskom, (d) ispunjenim pijeskom saturiranim uljem i raspored topline na realnom spremniku s ING-om (e).....	27

Slika 3-6. Umjeravanje senzora za mjerenje vlažnosti .....	27
Slika 3-7. Rezultati umjeravanja senzora .....	28
Slika 3-8. Raspored senzora za mjerenje temperature i mjernih senzora na grijaćem tijelu .....	29
Slika 3-9. Raspored senzora za mjerenje temperature, kontrolnih/regulacijskih senzora i senzora za vlažnost na cijelom eksperimentu .....	29
Slika 3-10. Ugradnja senzora, bentonitne ispune i razvrstavanje kablova .....	30
Slika 3-11. Centralna bušotina prije spajanja struje na grijač.....	31
Slika 3-12. Spajanje senzora za mjerenje temperature i vlažnosti.....	31
Slika 3-13. Puštanje sustava u rad .....	32
Slika 4-1. Rezultati in-situ mjerenja .....	36
Slika 4-2. Dijagram promjene temperature u vremenu za numerički model.....	37
Slika 4-3. Prikaz temperature u modelu prije grijanja .....	37
Slika 4-4. Prikaz temperatura prvog dana grijanja .....	38
Slika 4-5. Prikaz temperatura petog dana grijanja .....	38
Slika 4-6. Prikaz temperatura dvadesetog dana grijanja.....	39
Slika 4-7. Dijagram ovisnosti temperature o udaljenosti od grijača.....	39
Slika 4-8. Poprečni presjek kretanja temperature prvi, peti i dvadeseti dan grijanja .....	40



## POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Klasifikacija RAO-a (NN 12/2018).....	4
Tablica 4-1. Vrijednosti parametara materijala korištenih pri izradi modela .....	35

## POPIS KRATICA

EU - Europska unija

IAEA - *International Atomic Energy Agency*, Međunarodna agencija za atomsku energiju

IMI - Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada

ING - istrošeno nuklearno gorivo

IRB - Institut Ruđer Bošković

KBS-3H - *kärnbränslesäkerhet*, sigurnost nuklearnog goriva, horizontalno, švedski koncept odlaganja u horizontalno aksijalno u tunelu

KBS-3V - *kärnbränslesäkerhet*, sigurnost nuklearnog goriva, vertikalno, švedski koncept odlaganja u vertikalnim bušotinama

NEK - Nuklearna elektrana Krško

NN - Narodne novine

NRAO - niskoradioaktivni otpad

ORAO - otpušteni radioaktivni otpad

RAO - radioaktivni otpad

RH - Republika Hrvatska

RS - Republika Slovenija

SKB - *Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag*, švedska tvrtka koja se bavi upravljanjem i odlaganjem radioaktivnog otpada

SRAO - srednje radioaktivni otpad

VKRAO - vrlo kratkoživi radioaktivni otpad

VNRAO - vrlo niskoradioaktivni otpad

VRAO - visoko radioaktivni otpad

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

Oznaka	Opis	Jedinica
$\gamma$	jedinična težina	N/m <sup>3</sup>
$\lambda$	toplinska vodljivost	W/mK
$\nu$	Poissonov koeficijent	-
$\rho$	gustoća	kg/m <sup>3</sup>
$c$	specifični toplinski kapacitet	J/kgK
$E$	Youngov modul elastičnosti	Pa
$t$	temperatura	°C
$T$	temperatura	K
$A$	aktivnost radioaktivnoga izvora (radioaktivnost)	Bq

## 1. UVOD

Prema definiciji Međunarodne agencije za atomsku energiju (*International Atomic Energy Agency – IAEA*) pod pojmom radioaktivni otpad (RAO) podrazumijevaju se materijali koji sadrže ili su kontaminirani radionuklidima u koncentracijama koje su iznad graničnih vrijednosti minimalno dozvoljene radioaktivnosti određene zakonskim propisima od strane nadležnih tijela i kao takvi nisu predviđeni za daljnju uporabu (IAEA, 2009). Radioaktivni otpad je vrsta opasnog otpada koji nastaje korištenjem radionuklida koji vremenom gube intenzitet zračenja (ovisno o vremenu poluraspada), a time i efikasnost i korisnost. Proizvedeni otpad uglavnom potječe iz industrije, medicinskih uređaja za liječenje i dijagnostiku, znanstveno - istraživačkih ustanova, vojnih i oružanih programima, pri rudarskim radovima primjerice vezanim uz dobivanje uranove rude, a može se pojaviti u širokom rasponu koncentracije radionuklida te u različitim fizikalnim i kemijskim oblicima. Najveće količine RAO-a nastaju kao posljedica aktivnosti svake od faza nuklearnog gorivog ciklusa (Levanat, 1997).

Za razliku od gospodarenja radioaktivnim otpadom niske i srednje aktivnosti za kojeg se može reći da je riješeno u svim tehnološkim, sigurnosnim i ekološkim aspektima, problem odlaganja istrošenog nuklearnog goriva (ING) i vitrificiranog visoko radioaktivnog otpada (VRAO) još uvijek se nalazi u statusu intenzivnog istraživanja i razvoja. Istraživanja se uglavnom odnose na izbor takve geološke formacije koja će svojim izolacijskim svojstvima garantirati imobilizaciju otpada kroz dugi vremenski period (10 000 godina za VRAO i 100 000 do 1 000 000 godina za ING) dok je razvoj usmjeren na izbor visoko otpornih materijala i tehnologije odlaganja.

Republika Hrvatska, kao zemlja članica Europske unije (EU), ima obvezu na tehnološki siguran, ekološki prihvatljiv i organizacijski učinkovit način zbrinuti institucionalni radioaktivni otpad (radioaktivni otpad iz medicine, industrije, znanosti, vojne i javne uporabe) koji je privremeno skladišten u Institutu Ruđer Bošković (IRB) te Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI) u Zagrebu, iskorištene izvore ionizirajućeg zračenja te sanirati lokacije na kojima se nalaze prirodno radioaktivni materijali (Strategija, 2014).

U skladu s bilateralnim sporazumom između Republike Hrvatske (RH) i Republike Slovenije (RS) o uređenju statusnih i drugih pravnih odnosa vezanih uz ulaganje, iskorištavanje i razgradnju Nuklearne elektrane Krško (NEK) predviđenu za 2023., RH je kao suvlasnica NEK-a dužna fizički preuzeti te na učinkovit način zbrinuti polovicu RAO-a i ING-a nastalog tijekom rada i nakon razgradnje nuklearne elektrane Krško.

Sukladno zakonskim obvezama Europske unije, Vlada Republike Hrvatske donijela je 2014. godine Strategiju zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva (NN 125/14) uz pomoć koje se nastoji upotpuniti nacionalni sustav zbrinjavanja navedenog otpada te uspostaviti ujednačeni standardi za odgovorno i sigurno zbrinjavanje, a zatim 2018. i Nacionalni program provedbe Strategije (NN 100/18) kojim se predviđa uspostava Centra za zbrinjavanje radioaktivnog otpada koji bi na jednoj lokaciji objedinio sva postrojenja za potrebe zbrinjavanja RAO-a i istrošenih izvora iz RH, a potom i dugoročnog skladištenja RAO-a iz NE Krško.

Cilj ovog diplomskog rada je izrada modela toplinskog ponašanja stijene kao potencijalnog medija za odlaganje visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva na temelju podataka prikupljenih provođenjem in-situ mjerenja toplinskih karakteristika stijenske mase i inženjerskih barijera.

## **2. ZBRINJAVANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA**

### **2.1. Klasifikacija radioaktivnog otpada**

Međunarodna agencija za atomsku energiju (eng. IAEA) smatra se vodećim savjetodavnim tijelom po pitanju radioaktivnog otpada i nuklearne energije. IAEA-ina dokumenta nisu obvezujući, međutim mnogim državama služe kao temelj za razvoj i uspostavu vlastitih legislativnih okvira. Kroz rad agencije nekoliko puta modificirana je shema klasifikacije RAO-a da bi se ispravili nedostaci utvrđeni u prethodnoj shemi te primijenila nova iskustva stečena kroz rad i razvoj postrojenja za odlaganje RAO-a. Vrijeme poluraspada i ukupna aktivnost radionuklida zastupljenih u otpadu su parametri na temelju kojih je, prema dokumentu „*Classification of Radioactive Waste*“, izdvojeno šest kategorija otpada, koje se koriste kao osnova za daljnje klasifikacijske sustave (IAEA, 2009).

Klasifikacijski sustav RAO-a u Republici Hrvatskoj (tablica 2-1) objavljen u Pravilniku o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora (NN 12/18) usuglašen je s preporukom IAEA-e iz 2009. koja za generalni kriterij klasifikacije uzima referentna tehnička rješenja za odlaganje RAO-a. Razlika klasifikacijskog sustava koji se smatra zakonskim u RH minimalna je u odnosu na IAEA-ine podjelu iz 2009., prema tome može se smatrati kako se u Hrvatskoj koristi međunarodno predložena klasifikacija otpada prema kojoj je rađena većina IAEA-ina dokumenta (prijedlozi i preporuke).

U većini država, pa tako i u RH, istrošeno nuklearno gorivo ne klasificira se kao otpad. Kao glavni razlog za obrazloženje takve odluke navodi se mogućnost prerade ING-a. Bez obzira što se ING tretira na sličan način kao VRAO te se u većini slučajeva ne namjerava prerađivati, ipak se vodi kao zasebna kategorija materijala (Uroić, 2019).

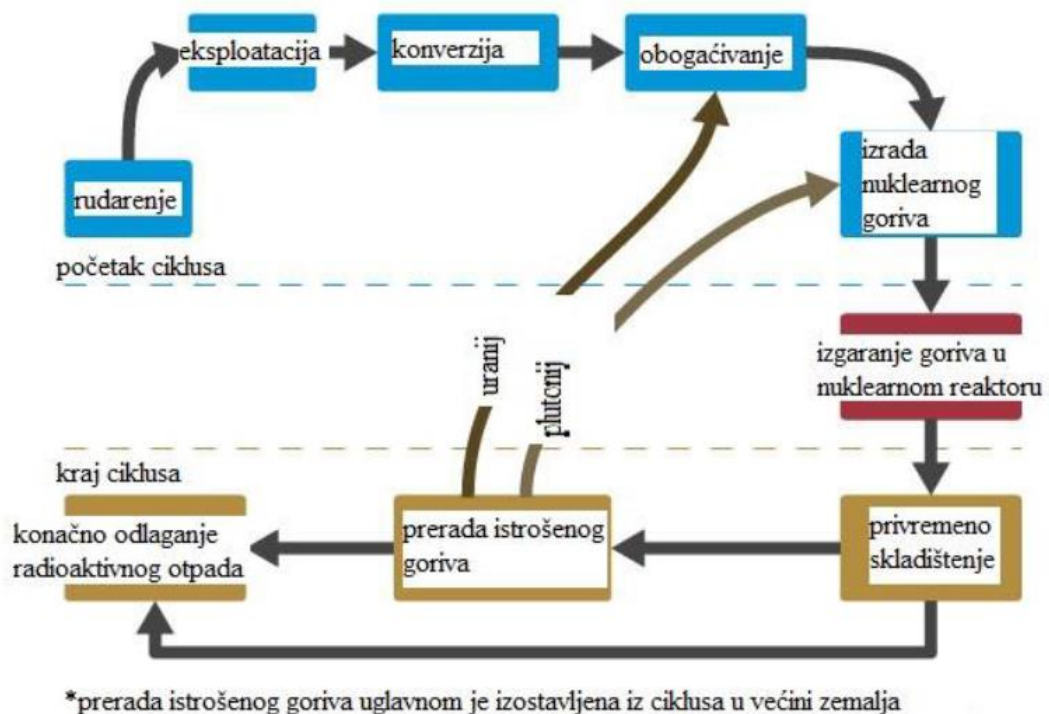
Tablica 2-1. Klasifikacija RAO-a (NN 12/2018)

Klasa	Tipična svojstva	Načini zbrinjavanja
Otpušteni radioaktivni otpad (ORAO)	Radioaktivni otpad koji udovoljava uvjetima za otpuštanje iz regulatornog nadzora.	Otpuštanje iz regulatornog nadzora. Jednom otpušten iz nadzora ovaj se materijal više ne smatra radioaktivnim otpadom.
Vrlo kratkoživi radioaktivni otpad (VKRAO)	Sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 100 dana.	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom otpuštanje iz regulatornog nadzora. Ovom radioaktivnom otpadu će se skladištenjem kroz nekoliko godina koncentracija aktivnosti smanjiti na ili ispod propisanih graničnih vrijednosti
Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO)	Radioaktivni otpad s većim koncentracijama aktivnosti od VKRAO. Koncentracije dugoživućih radionuklida u ovoj kategoriji otpada su zanemarive.	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom otpuštanje iz regulatornog nadzora. Ovom radioaktivnom otpadu će se skladištenjem kroz nekoliko desetaka godina granične koncentracije aktivnosti smanjiti na ili ispod propisanih graničnih vrijednosti.
Nisko radioaktivni otpad (NRAO)	Radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 30 godina i ograničene koncentracije aktivnosti dugoživućih radionuklida (4.000 Bq/g u pojedinom pakiranju, odnosno 400 Bq/g za kompletnu masu radioaktivnog otpada). Proizvodnja topline u ovom otpadu niža je od 2 kW/m <sup>3</sup> .	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u površinskom ili podzemnom odlagalištu.
Srednje radioaktivni otpad (SRAO)	Radioaktivni otpad koji sadrži veće koncentracije aktivnosti od NRAO.	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u podzemnom odlagalištu na dubini od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara ispod površine.
Visoko radioaktivni otpad (VRAO)	Radioaktivni otpad u kojem je proizvodnja topline iznad 2 kW/m <sup>3</sup> .	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u podzemnom odlagalištu smještenom u stabilnoj geološkoj formaciji na dubini od nekoliko stotina metara ispod površine.

## 2.2. Otpad iz nuklearnog gorivog ciklusa i proizvodnje nuklearnog goriva

Osim u slučaju nesreća ili primjene nuklearnog oružja, najveće količine RAO-a nastaju u nuklearnom gorivom ciklusu, odnosno pri proizvodnji nuklearnog goriva.

Pod pojmom nuklearnog gorivog ciklusa podrazumijevaju se svi tehnološki postupci koji se primjenjuju u procesu proizvodnje električne energije u nuklearnim elektranama. Nuklearni gorivi ciklus započinje pridobivanjem uranove rude, a završava odlaganjem istrošenog nuklearnog goriva (ili visoko radioaktivnog otpada preostalog iz procesa prerade ING-a) u dubokim geološkim formacijama (Feretić et al., 2000) (slika 2-1).



Slika 2-1. Nuklearni gorivi ciklus

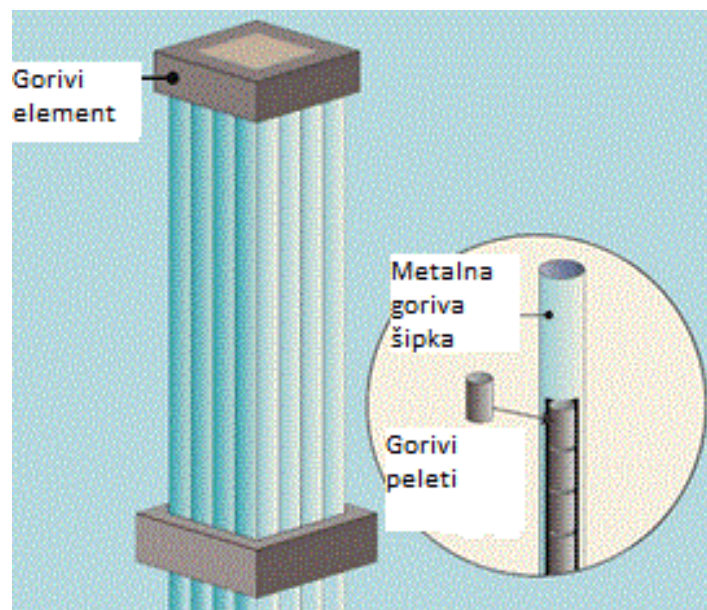
S obzirom na vrijeme nastanka, RAO iz nuklearnih elektrana dijeli se na pogonski otpad koji nastaje tijekom pogona i redovitog održavanja (remonta) elektrane, i na dekomisijski otpad koji će se izdvojiti u procesu razgradnje (dekomisije) elektrane. Otpad koji potječe iz pogona nuklearnih elektrana odnosi se na kategoriju kratkoživućeg nisko i srednje radioaktivnog otpada, dok se otpad koji potječe iz postrojenja za preradu nuklearnog goriva svrstava u kategoriju visoko radioaktivnog otpada (Feretić et al., 1995).

Najveći dio dekomisijskog otpada svrstava se u kategoriju kratkoživućeg RAO-a niske i srednje aktivnosti, dok preostali manji dio dekomisijskog otpada spada u kategoriju VRAO-a. Ukupne količine dekomisijskog otpada mogu biti veće, ali i manje od ukupnih količina pogonskog radioaktivnog otpada što ovisi o izabranom scenariju razgradnje i o tehnologijama dekontaminacije koje se tijekom razgradnje nuklearne elektrane planiraju primijeniti (Feretić et al., 2000).

Do danas je u nuklearnoj elektrani Krško privremeno pohranjeno oko 2500 m<sup>3</sup> (superkompaktiranog) NSRAO. Ukupna količina radioaktivnog otpada u trenutku razgradnje postrojenja procijenjena je na 18 000 m<sup>3</sup>, s ukupnom aktivnošću od 15,3 TBq i to: 53% NRAO, 36% SRAO i 11% VRAO. U NEK trenutno je popunjeno oko 60% bazena za skladištenje i hlađenje VRAO (istrošeno nuklearno gorivo) (NEK, 2020).

### 2.3. Visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo

Nuklearno gorivo je tvar koja podliježe fisijskoj ili fuzijskoj lančanoj reakciji, oslobađajući pritom energiju atomske jezgre. Međutim, zasad se u tehničke svrhe koristi samo energija fisije, pa se za pojam nuklearno gorivo podrazumijeva samo fisijsko nuklearno gorivo, a sastoji se od gorivih peleta uranija ili smjese uranija-plutonija promjera 8–15 mm smještenih unutar metalnih cijevi koje se grupiraju u gorive elemente (slika 2-2).



Slika 2-2. Gorivi element



Radioaktivnost goriva značajno se povećava tijekom rada nuklearnog reaktora. Vrijeme zadržavanja nuklearnog goriva u reaktoru ovisi o obogaćenju i tipu reaktora. Nakon otprilike pet godina smanjuje se korisnost gorivih elemenata u smislu nemogućnosti održavanja spontane nuklearne reakcije što stvara potrebu za uklanjanjem goriva iz reaktora. Godišnje se vadi otprilike 1/3 gorivih elemenata i zamjenjuje svježim (Feretić et al., 2000).

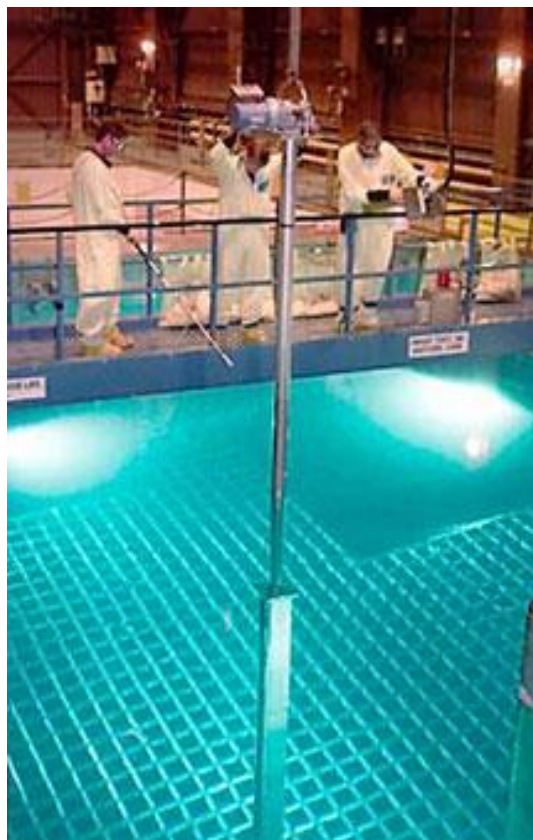
Istrošeno nuklearno gorivo (ING) sastoji se od gorivih elemenata u kojima je udio fisibilnih izotopa izgaranjem u jezgri nuklearnog reaktora smanjen do te mjere da se više ne može osigurati samoodržavajuća fisijska reakcija. Prema svom aktivitetu takvo gorivo spada u visoko radioaktivni otpad te ispušta znatnu količinu topline (termalna aktivnost iznad 2 kW/m<sup>3</sup>) zbog čega se privremeno skladišti u posebno izgrađenim bazenima unutar nuklearnog kompleksa. Određena količina korisnih fisibilnih nuklida koji su sadržani u istrošenom nuklearnom gorivu može se preradom ING-a izdvojiti i ponovno koristiti za pripremu novog nuklearnog goriva. Takav način korištenja nuklearnoga goriva naziva se zatvorenim gorivim ciklusom. U otvorenom gorivom ciklusu ING se ne prerađuje već se tretira kao visoko radioaktivni otpad te se odmah pristupa skladištenju. Vremenski period skladištenja goriva kod otvorenog ciklusa je relativno dug, može trajati od 40 pa sve do 100 godina odnosno dok se ne donese konačna odluka o odlaganju istrošenih gorivih elemenata (Živković i Kovačević Zelić, 2002).

Visoko radioaktivni otpad ima razinu koncentracije aktivnosti dovoljno visoku da generira značajne količine topline u procesu radioaktivnog raspada (termalna aktivnost veća od 2 kW/m<sup>3</sup>) ili sadrži velik udio dugoživućih radionuklida (> 4 Bq/t tj. 4000 Bq/g) u obliku fisijskih produkata i transuranijskih elemenata nastalih u jezgri reaktora što je potrebno uzeti u obzir prilikom projektiranja odlagališta za takvu vrstu otpada. Takve karakteristike otpada zadržat će se u pravilu još stotinama godina bez obzira na smanjivanje radioaktivnosti tijekom vremena. Osim radioaktivnog zračenja VRAO emitira i toplinsku energiju koja nastaje prilikom interakcije energije radioaktivnog zračenja s okolnim materijalom, stoga je pri skladištenju potrebno predvidjeti odgovarajući odvod topline na okolni materijal i voditi računa o zagrijavanju tog materijala. VRAO najvećim dijelom nastaje u postrojenjima za preradu ING-a i potencijalna je opasnost za stanovništvo i okoliš za razdoblje od više tisuća godina. Kao moguće rješenje dugoročnog zbrinjavanja VRAO-a prihvaćena je tehnologija odlaganja u duboke, stabilne geološke formacije s niskom hidrauličkom propusnošću, koje karakterizira prisutnost podzemne vode s niskom koncentracijom soli, te imaju slabe alkalne

reakcije i reduktivna svojstva, uobičajeno na dubinama od nekoliko stotina metara ispod površine. Za odlaganje se preporučaju tri vrste geoloških medija: kamena sol, sedimentne stijene (npr. glina, lapori, vulkanski sedimenti, škriljavci) i kristalinične stijene (npr. granit, gnajs) (Veinović et al., 2015; Levanat, 1997; IAEA, 2009).

#### **2.4. Skladištenje istrošenih gorivih elemenata**

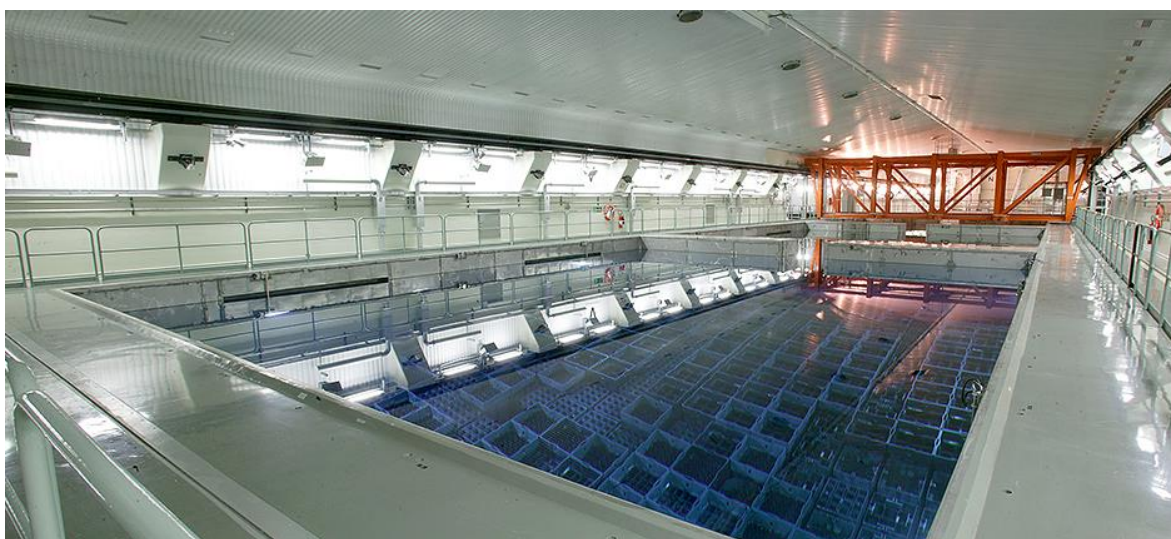
Istrošeni gorivi elementi vrlo su radioaktivni te oslobađaju znatnu količinu topline. Iz tog razloga privremeno su pohranjeni u bazenima s bornom vodom koji su smješteni unutar nuklearnog kompleksa što je prikazano na slici 2-3. Dubina bazena kreće se uglavnom između 12 i 15 metara. Borna voda ima dvostruku funkciju - služi kao zaštita od intenzivnog radioaktivnog zračenja te kao rashladno sredstvo za odvođenje topline. Minimalno razdoblje pohrane ING-a u vodi iznosi šest mjeseci, no u praksi je taj period mnogo dulji pa traje desetak ili više godina (Krpan-Lisica, 2001).



Slika 2-3. Bazen s bornom vodom za privremeno skladištenje ING-a

U slučaju ponovnog korištenja ING se transportira u postrojenja za preradu gdje se gorivi elementi i gorive šipke rastavljaju na dijelove i kemijski razgrađuju nakon čega kao produkt dobivamo četiri osnovna proizvoda: uranij, plutonij, visoko radioaktivni otpad i ostali otpad. Uranij i plutonij se ponovo koriste kao nuklearno gorivo, a VRAO-om treba biti rukovano na odgovarajući način.

Postoje dvije mogućnosti za skladištenje ING-a na površini: suho skladištenje u betonskim ili metalnim strukturama i mokro skladištenje u bazenima ispunjenim vodom. Mokro skladištenje je stara metoda koja će vjerojatno biti u upotrebi još dugu niz godina s obzirom na činjenicu da planiranje dubokih geoloških odlagališta teče relativno sporo. Kako do sada nisu uočeni značajniji problemi s mokrim skladištenjem ING-a, neke države su produžile programe mokrog skladištenja na nekoliko desetaka pa i stotinjak godina. Ipak, vrlo je važan stalni nadzor nad ovim postrojenjima, edukacija i primjena stečenog iskustva na projektiranju budućih postrojenja (slika 2-4).



Slika 2-4. Bazeni za mokro skladištenje u Središnjem privremenom skladištu za ING u Švedskoj

Suho skladištenje je mlađa tehnologija upravljanja ING-om koja je značajnije razvijena tek posljednjih 20-ak godina. S obzirom da se unutar ovih postrojenja ING sprema u betonske silose ili cijevi gdje nisu okruženi vodom, u ovom slučaju mnogo je manja mogućnost rasipanja i odvođenja topline od gorivih elemenata u odnosu na mokra skladišta. Prednost ove metode je ta što izgradnja ovakvih postrojenja može biti postupna, u skladu s potrebnim kapacitetima. Također, zbog jednostavnijeg sustava hlađenja u ovim postrojenjima izdaci vezani za održavanje su znatno manji (IAEA, 2006) (slika 2-5).



Slika 2-5. Spremnici za suho skladištenje istrošenog nuklearnog goriva

Bez obzira na početno razdoblje brzog opadanja topline i intenziteta zračenja radioaktivnog otpada u skladištu, dio RAO-a opasan je za ljude i okoliš još tisućljećima. Iz tog razloga velik broj država razmatra opciju odlaganja RAO-a i ING-a u povoljnim geološkim formacijama duboko u podzemlju. Dosad spomenute metode osiguravaju izolaciju ING-a desetak ili maksimalno stotinjak godina i ta postrojenja izložena su prirodnim katastrofama i ljudskom faktorom u usporedbi s dubokim geološkim odlagalištima. Zahvaljujući prethodnoj obradi, pakiranju i različitim barijerama izgrađenima radi sprječavanja prodiranja u okoliš, a ponajviše zahvaljujući prirodnim svojstvima nepropusnosti odabrane lokacije odlagališta, radioaktivni otpad ostat će trajno izoliran od okoliša dugi niz godina (Levanat, 1997).

## 2.5. Odlaganje radioaktivnog otpada

Odlaganje radioaktivnog otpada podrazumijeva smještanje otpada u objekt kojem je osnovna funkcija osigurati dugoročnu izolaciju radioaktivnog materijala od okoliša, odnosno sprječavanje izlaženja radionuklida u biosferu. To se postiže kondicioniranjem otpada (postizanje kemijske inertnosti), korištenjem pomno odabranog načina pakiranja, postavljanjem višestrukih barijera između radioaktivnog otpada i okolnog geološkog medija te odabirom što prikladnije geološke strukture u koju će otpad biti pohranjen. Odlagališta radioaktivnog otpada moraju biti projektirana i izgrađena u skladu s prihvaćenim standardom o sprječavanju bilo kakvog nepovoljnog utjecaja na okoliš (Szakálos et al., 2008).

U skladu s navedenim faktorima koji omogućuju izolaciju radioaktivnog otpada te vrsti otpada predviđeni su različiti tipovi odlagališta (površinsko, pripovršinsko i duboko geološko odlagalište te odlaganje u duboke bušotine). Površinska i pripovršinska odlagališta primjenjuju se za odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada, odlaganje u bušotine zbog problema izvođenja bušotina potrebnih dubina i promjera zasad nije prihvatljivo, dok se za zbrinjavanje visoko radioaktivnog otpada kao jedino prihvatljivo rješenje u neposrednoj budućnosti nudi odlaganje u stabilne geološke formacije (Krpan-Lisica, 2001).

Najveći problem vezan uz svojstva materijala u koje se odlaže RAO je pitanje njihove postojanosti tijekom duljih vremenskih razdoblja. Uzme li se u obzir da VRAO ostaje radioaktivan i 1 000 000 godina, logično je za pretpostaviti da će na slojeve u koje je otpad odložen djelovati cijeli niz prirodnih procesa, uključujući i oledbe. Prilikom projektiranja odlagališta, potrebno je uzeti u obzir sve buduće geomehaničke pojave (klimatske promjene, neotektonika, seizmika, vulkanska aktivnost) koje bi na bilo koji način mogle utjecati na matičnu stijenu do te mjere da se dovede u pitanje izolacijska sposobnost cjelokupnog sustava. Također je bitno sagledati šire hidrološko i geološko okruženje: nepoželjne su česte kiše, blizina rijeka i podzemnih voda te vodopropusno tlo. Sastav tla ne smije pogodovati koroziji materijala od kojih se izrađuju spremnici za RAO (Szakálos et al., 2008).

Poznato je da su neki tipovi tla poput granitnih stijena, glinenih i slanih naslaga te škriljavaca osobito pogodni za odlagališta. Preporuke predviđaju da odlagališta moraju zadržati svoje povoljne strukturne karakteristike kroz dulji vremenski period koji odgovara vremenu radioaktivnosti raspada nestabilnih nuklida. U sigurnosnim analizama odlagališta otpada kao temeljni put prodiranja radionuklida u okoliš pretpostavljaju se podzemne vode, koje u konačnici dolaze u kontakt s lokalnim naseljima, stoga izvedbeni plan odlagališta RAO-a mora svesti na minimum mogućnost izlučivanja radionuklida na ovaj način. Isto tako potrebno je eliminirati blizinu vodotoka (Szakálos et al., 2008).

Slojevi koji su u neposrednom kontaktu s odlagalištem opasnog otpada moraju imati koeficijent propusnosti  $k < 1 \times 10^{-9}$  cm/s, što znači da su takvi slojevi gotovo nepropusni. Stijena u koju se odlaže RAO ne smije sadržavati agresivne elemente koji bi eventualno mogli pospješiti ili izazvati koroziju metalnih dijelova koji se nalaze u sklopu odlagališta. Odlagalište treba biti prilagođeno stijenskoj strukturi, što znači da odlagališni tuneli i bušotine ne smiju biti smješteni unutar diskontinuiteta izloženih posmičnim naprezanjima (Živković i Kovačević Zelić, 2002).

U odlagalištima radioaktivnog otpada primjenjuje se koncept višestrukih sigurnosnih barijera gdje su za sprječavanje ispuštanja radionuklida u okoliš, osim lokalnih stijena podjednako zaslužne inženjerske barijere. Upravo takva kombinacija prirodnih i umjetnih barijera osigurava potrebnu razinu sigurnosti.

Temeljem teoretskih razmatranja i praktičnih znanja došlo se do zaključka da je najpovoljnije radioaktivni otpad odlagati u čvrstom tlu. Današnja znanost i tehnologija omogućuju pronalaženje pogodnih geoloških lokacija i dopremu radioaktivnih materijala do njih. Odlagališta u čvrstom tlu ne samo da su prikladnija za nadgledanje nego je moguće i predvidjeti smjer kretanja radioaktivnog materijala ukoliko dođe do njegovog neplaniranog ispuštanja. U idealnom bi slučaju sav radioaktivni otpad bio zbrinut u podzemnom, vrlo dubokom, stabilnom geološkom odlagalištu. No, tip odlagališta koji će neka država uvrstiti u svoj nuklearni program zbrinjavanja RAO-a ovisi o nekoliko čimbenika poput količine i vrste otpada, lokalnih geoloških uvjeta, mogućnosti skladištenja, ekonomskoj isplativosti prerade i kondicioniranja RAO-a te u konačnici stavu prema nuklearnoj energiji (Szakálos et al., 2008).

## **2.6. Koncepti odlaganja VRAO-a i ING-a**

Odlaganje VRAO-a i ING-a u duboke geološke formacije smatra se najboljim načinom zbrinjavanja ovih materijala iz više razloga (Veinović et al., 2015):

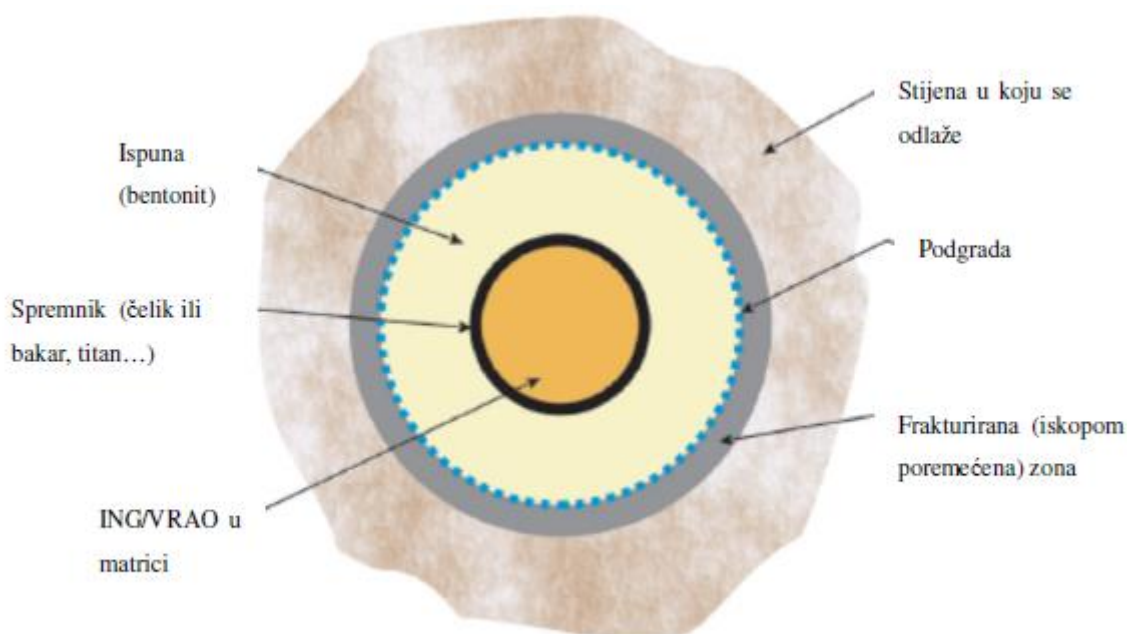
- Predviđena dubina odlaganja 400 - 1000 m podrazumijeva dugi put za radionuklide te samim time osigurava da eventualno stizanje radionuklida u biosferu bude na takvoj razini da mogući radiološki utjecaj u budućnosti bude prihvatljivo nizak, jednako kao i značajno smanjenu mogućnost ljudskog upada
- Dobro odabrana geološka sredina (slabopropusne magmatske, sedimentne ili metamorfne stijene) značit će manju brzinu transporta radionuklida prema površini;
- Inženjerske barijere (spremnik i materijal ispune između stijene i spremnika) predstavljaju dodatnu barijeru koja će sama po sebi usporiti migracije radionuklida

Uzimajući u obzir da se odlagalište VRAO-a i ING-a, odnosno trajnost sustava odlaganja, projektira na period od 100 000 do 1 000 000 godina, prethodno navedeni razlozi za odabir dubokih geoloških odlagališta također idu u prilog trajnosti odlagališta. Očekivani pad aktivnosti VRAO-a i ING-a na razinu uranijeve rude, što se smatra prihvatljivim iznosom u



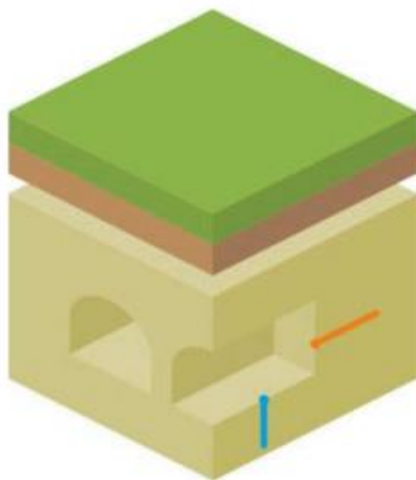
trenutku dolaska radionuklida iz odlagališta na površinu, bit će već nakon 10 000 godina za VRAO i na oko 100 000 godina za ING, ali u oba slučaja odlagališta se projektiraju na 100 000 do 1 000 000 godina. Odlaganje istrošenog nuklearnog goriva i vitrificiranog otpada izdvojenog u procesu prerade tehnološki je vrlo zahtjevno, ali izvedivo (Uroić, 2019).

Izolacija VRAO-a i ING-a u dubokim podzemnim odlagalištima temelji se na primjeni koncepta višestrukih prirodnih i inženjerskih barijera. Metalni spremnik u koji je pohranjen visokoradioaktivni otpad predstavlja prvu barijeru. Matična stijena u koju se taj spremnik trajno odlaže čini prirodnu barijeru, nakon čega slijedi ispunjavanje slobodnog prostora različitim izolacijskim materijalima, primjerice bentonitom koji predstavlja drugu inženjersku barijeru (slika 2-6). Korištenjem višestrukih sigurnosnih barijera osigurava se učinkovitija izolacija te ukoliko jedna barijera ne obavi u potpunosti svoju funkciju, ostale barijere i dalje osiguravaju sigurnost cijelog sustava. Na sigurnosnu funkciju utječu fizičke i kemijske karakteristike barijera. Fizičke karakteristike (oblik otpada, način pakiranja i vrsta stijene) osiguravaju i ograničavaju migraciju radionuklida u biosferu, dok kemijske karakteristike utječu na procese topljenja, korozije i brzinu ispiranja (IAEA, 2011).



Slika 2-6. Konceptualno rješenje za izolaciju VRAO-a (Veinović et al., 2015)

Generalno je moguće odabrati 2 načina postavljanja spremnika u odnosu na tunele za odlaganje – horizontalno i vertikalno (slika 2-7).



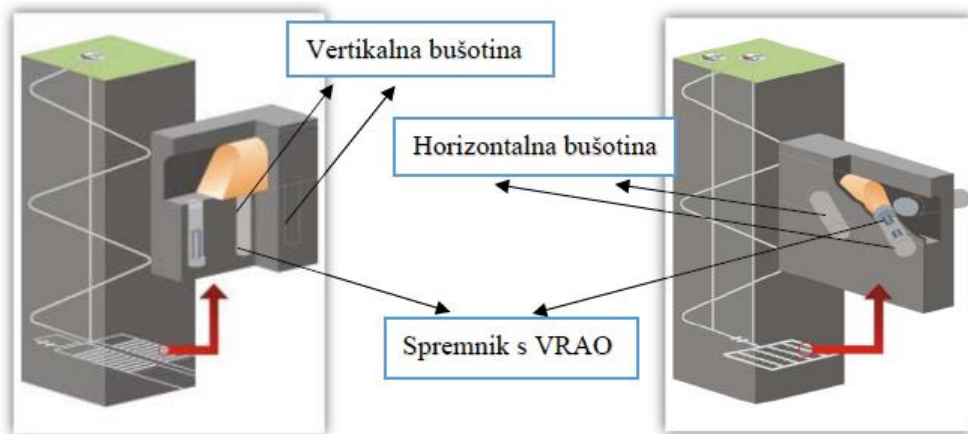
Slika 2-7. Tip odlagališta s obzirom na položaj spremnika u tunelu: horizontalni (narančasto) ili vertikalni (plavo) (Končić, 2013)

Različite geološke sredine dovele su do razvijanja različitih koncepata za odlaganje VRAO-a i ING-a u duboka geološka odlagališta. Postoji čitav niz koncepata od kojih su danas neki potpuno napušteni, a neki su zaživjeli kao eksperimentalno odlagalište.

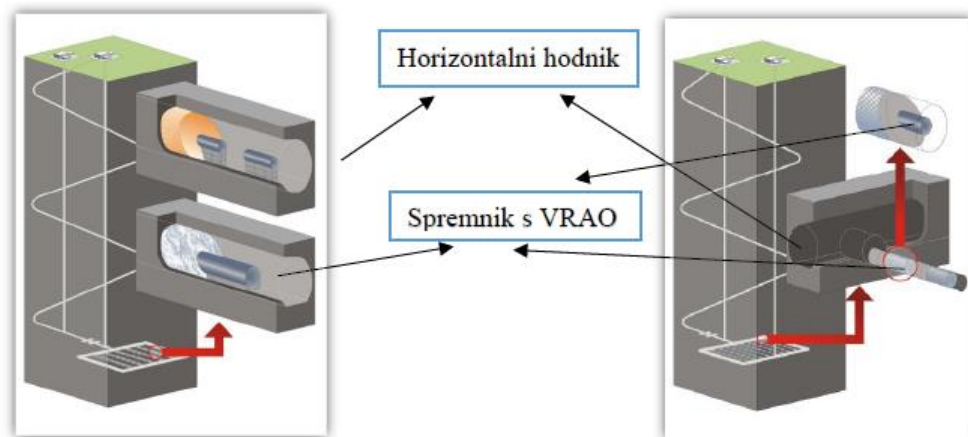
Koncepti odlaganja radioaktivnog otpada u podzemna odlagališta prema Baldwin et al., 2008:

- Tunel – odlaganje u vertikalne bušotine (slika 2-8)
- Tunel – odlaganje u horizontalne bušotine (slika 2-8)
- Tunel – aksijalno odlaganje spremnika (slika 2-9)
- Tunel – aksijalno postavljen superkontejner (slika 2-9)
- Tunel – aksijalno postavljen superkontejner s betonskom ispunom (slika 2-10)
- Tunel – aksijalno postavljen superkontejner, veliki promjer (slika 2-10)
- Tunel – vertikalne duboke bušotine (slika 2-11)
- Galerije – odlaganje u čelične višenamjenske kontejnere (slika 2-12)
- Galerije – odlaganje u čelične kanistre ili kanistre s betonskom oblogom (slika 2-12)
- Hidraulički kavez (slika 2-11)

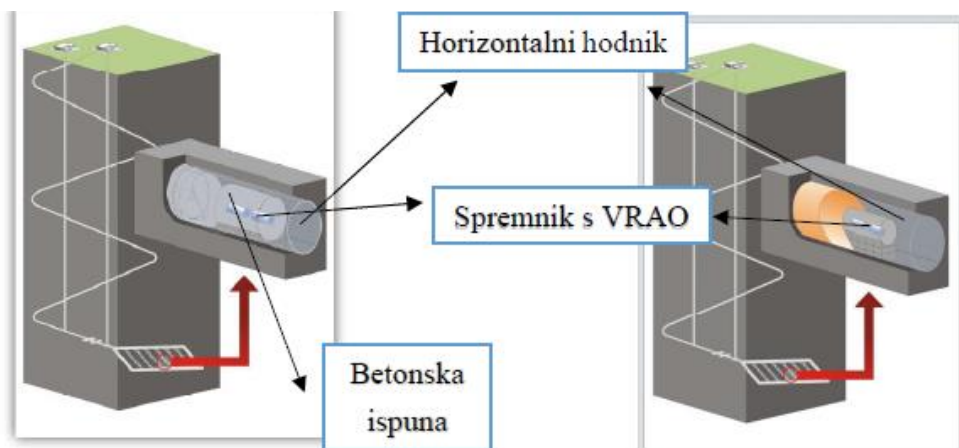




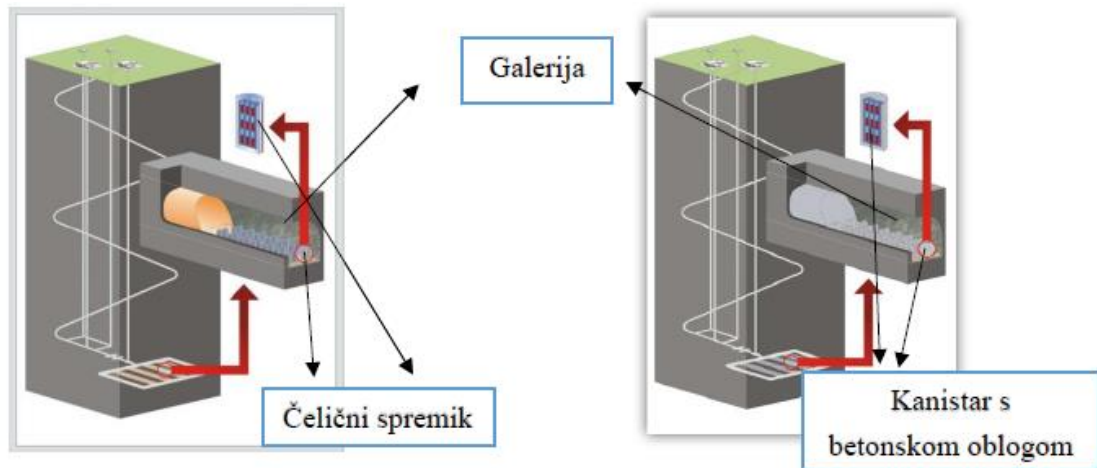
Slika 2-8. Odlaganje u vertikalne bušotine (lijevo), odlaganje u horizontalne bušotine (desno) (Baldwin et al., 2008)



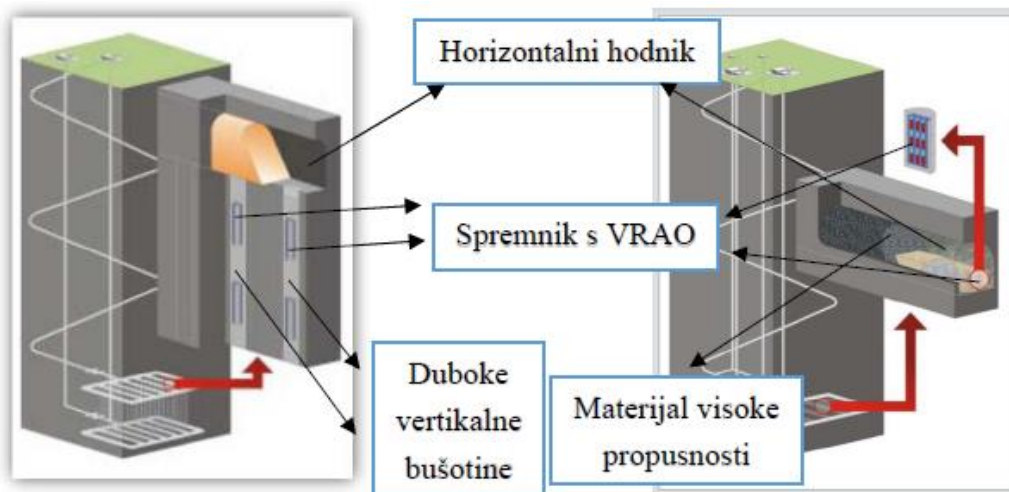
Slika 2-9. Aksijalno odlaganje (lijevo), aksijalno postavljen superkontejner (desno) (Baldwin et al., 2008)



Slika 2-10. Aksijalno postavljen superkontejner, betonska ispuna hodnika (lijevo), aksijalno postavljen superkontejner veliki promjer (desno) (Baldwin et al., 2008)



Slika 2-12. Galerije, odlaganje čeličnih višenamjenskih kontejnera (lijevo), odlaganje kanistara ili kanistara s betonskom oblogom (desno) (Baldwin et al., 2008)



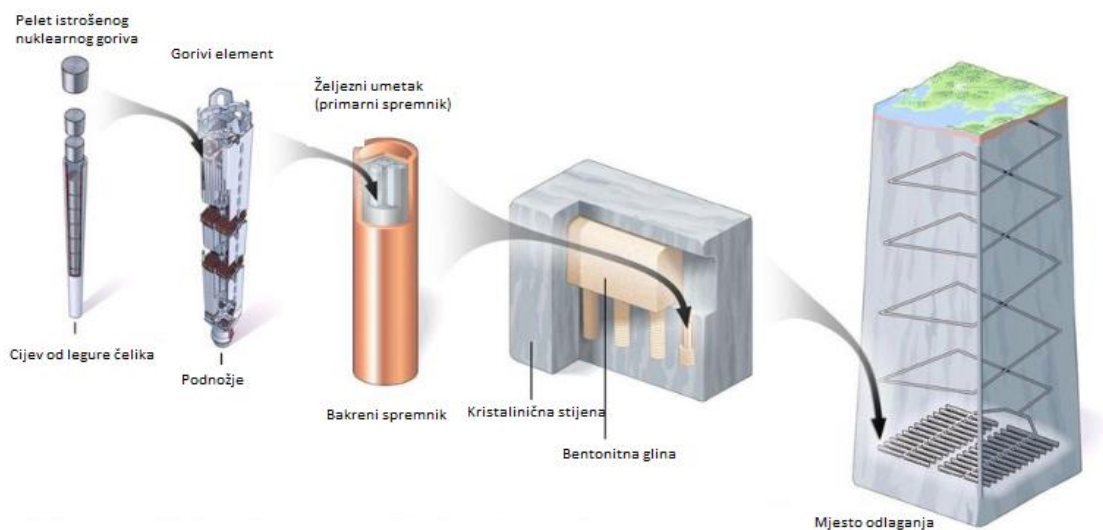
Slika 2-11. Odlaganje u duboke vertikalne bušotine (lijevo), hidraulički kavez (desno) (Baldwin et al., 2008)

Unatoč različitim karakteristikama geoloških sredina sve države u sklopu svojih nuklearnih programa nastoje projektirati odlagališta RAO-a na način da se izbjegnu lokacije u čijoj blizini se nalazi podzemna voda koja bi kao potencijalan medij za brzo širenje radionuklida otežala čitav proces.

Bez obzira što postoji cijeli niz koncepata razvijenih za odlaganje VRAO-a i ING-a u podzemna odlagališta, koji se do određene mjere razlikuju, ova dva principa: odlaganje u plitke bušotine iz tunela (KBS-3V) ili odlaganje aksijalno u tunelu (KBS-3H), su tehnološki

najmanje zahtjevna (Veinović et al., 2015). Oba koncepta razvila je švedska tvrtka za upravljanje nuklearnim gorivom i otpadom – SKB. Koncept KBS-3V je prihvaćen u Finskoj i Ujedinjenom Kraljevstvu i pojednostavljeno podrazumijeva izradu odlagališnih hodnika na dubini od 400 (500) do 1 000 m, s time da će broj hodnika za odlaganje zavisiti o količini potrebnih spremnika za ING, odnosno VRAO.

Na slici 2-13 prikazane su inženjerske barijere ugrađene u odlagalište. Sustav višestrukih barijera je sljedeći: cijevna obloga unutar bakrenog spremnika → bakreni spremnik → tamponski materijal (bentonitna glina) → sloj kompaktne čvrste stijene debljine 400 – 700 m.



Slika 2-13. Prikaz modela odlagališta KBS-3V

Njemačka predviđa koncept odlaganja spremnika s otpadom u vertikalne bušotine duboke oko 300 m u kojima bi se spremnici VRAO-a slagali jedan na drugi, s tamponskom zaštitom između svakog spremnika.

Švicarski dizajn referentnog odlagališta VRAO-a i ING-a temelji se na primjeni sustava višestrukih barijera. Uz prirodnu geološku barijeru sastoji se i od nekoliko konstruiranih barijera poput spremnika izgrađenih od debelog čelika (12-14 cm) horizontalno postavljenih u tunelima dugim do 800 m (Ø 2,8 m) i ugrađenih u prikladni tamponski materijal, zatim zasipa od visoko zbijene granulirane smjese bentonita između svakog spremnika i nekoliko brtvi. Francuski i belgijski koncept predlažu horizontalne bušotine duge oko 40 m.

Trenutno u svijetu postoji samo jedno odlagalište ING-a (i ni jedno VRAO-a), koje je dobilo građevinsku i uporabnu dozvolu: Onkalo u Finskoj. Do sada su iskopani pristupni tuneli i podzemna galerija na dubini od 455 metara, a odlaganje ING-a trebalo bi započeti 2023. godine.

## **2.7. In-situ modeli odlaganja visokoradioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva**

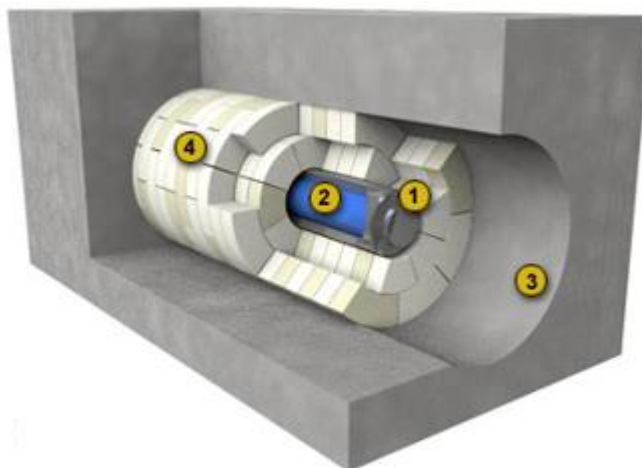
U današnje vrijeme gotova svaka država s definiranim nuklearnim programom razvila je laboratorijske simulacije odlagališta VRAO-a i ING-a u skladu sa svojim mogućnostima korištenja dostupnih tehnologija, količini otpada te geološkim karakteristikama potencijalnih odlagališta. Jedan od primjera simulacije odlagališta VRAO-a i ING-a razvijen je opsežnim istraživanjima u sklopu projekta FEBEX.

Unutar strukture granita u južnom dijelu Alpa u Švicarskoj izgrađen je podzemni laboratorij Grimsel kao centar za podzemna istraživanja i razvoj, koji podržava širok raspon istraživačkih projekata vezanih za zbrinjavanje RAO-a. Ukupna dužina laboratorijskih tunela podzemnog testnog poligona je oko jednog kilometra, gdje se provođenjem raznih projekata omogućuje razvoj i testiranje opreme, metodologije i koncepta odlaganja u potpuno realnim uvjetima analognim odlagalištima VRAO-a i ING-a.

U jednom od projekata na temu geološkog zbrinjavanja RAO-a unutar podzemnog laboratorija Grimsel, poznatim pod imenom FEBEX (skraćeno od eng. *Full-Scale Engineered Barriers Experiment*), pristupilo se projektiranju i konstruiranju inženjerskih barijera koje bi se koristile u odlagalištima VRAO-a i ING-a. U sklopu projekta FEBEX rađena su dva veća ispitivanja: FEBEX I i FEBEX II.

U eksperimentu FEBEX postavljeno je više ciljeva. Jedan od njih bio je ispitati stabilnost inženjerskih barijera te izvedivost njihovog sastavljanja koji su bazirani na španjolskom konceptu odlaganja ING-a u kristaliničnim stijenama. Drugi cilj bio je razvijanje metodologije i modela za procjenu termo-hidro-mehaničkih i termo-hidro-geokemijskih utjecaja inženjerskih barijera u slučaju horizontalnog odlaganja spremnika u tunele, te monitoring.

Koncept za odlaganje VRAO-a i ING-a u projektu FEBEX I (slika 2-14) uključuje: (1) čelični spremnik unutar kojeg je pohranjen VRAO ili ING (2), horizontalno pozicioniran unutar tunela (3), okružen barijerom sastavljenom od glinenih blokova od zbijenog bentonita (4).



Slika 2-14. Koncept odlaganja VRAO-a i ING-a u projektu FEBEX I (Grimsel, 2020)

Projekt je započeo „in-situ“ (1:1) ispitivanjem gdje se koristio grijač koji predstavlja toplinu generiranu iz spremnika radioaktivnog otpada, blokovi bentonita te više od 600 senzora koji kontinuirano očitavaju bitne parametre poput temperature, sadržaj vode u bentonitu, stupanj bubrenja i dr. Paralelno s in-situ ispitivanjem u Grimselu, izvodio se „Mock-up“ test u Madridu (omjera 1/4 u odnosu na Grimsel) te niz drugih laboratorijskih ispitivanja.

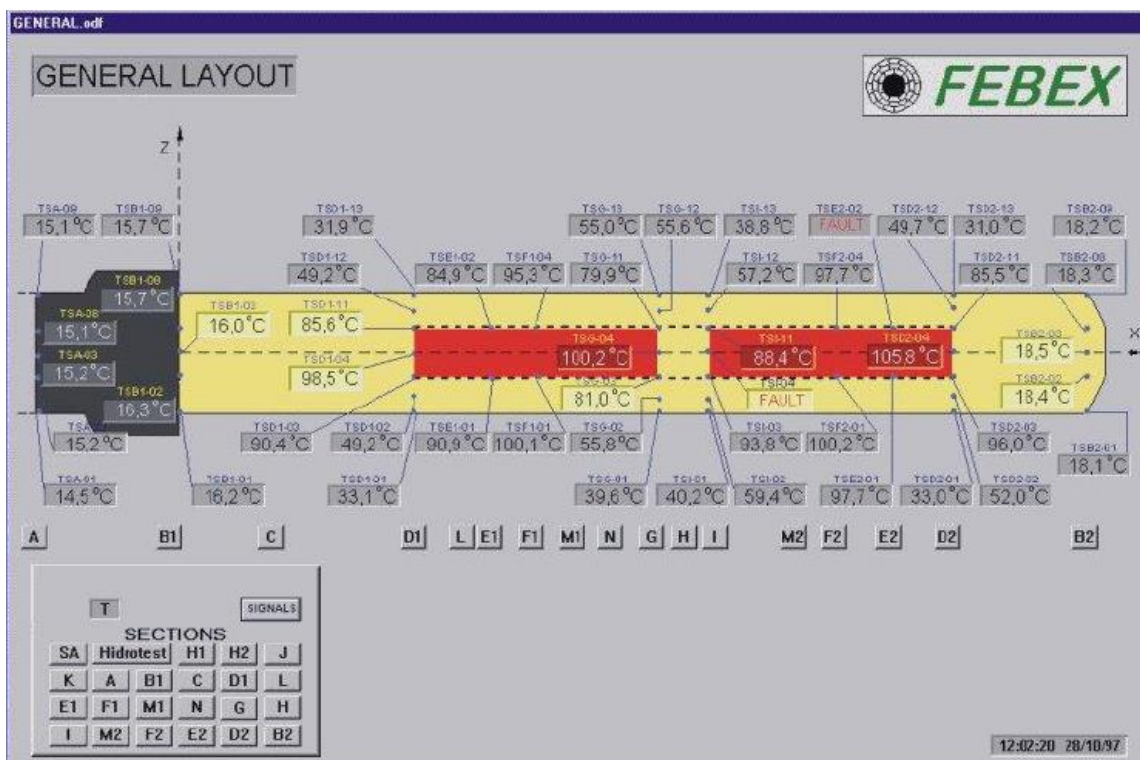
Fizikalne komponente eksperimenta čine tunel, sustav grijanja, glinene barijere, potrebna oprema te sustav za monitoring i kontrolu. Eksperiment je započeo ugradnjom grijača u tunelu promjera 2,28 metara iskopanom u sjevernoj zoni testnog poligona Grimsel. Grijač duljine 4,5 metara težine 12 t, ugrađen je horizontalno u bušotinu ispunjenu kompaktnim bentonitom. Ugradnja grijača prikazana je na slici 2-15. Na slici su također vidljivi kablovi za monitoring postavljeni s obje strane grijača.

U prvoj fazi zagrijavanja u periodu od 5 godina grijači su održavali konstantnu temperaturu na 100 °C, dok se bentonit polagano hidratizirao vodom iz granita. Razvijanje topline, saturacija bentonita, relativna vlaga, porni tlak te pomaci praćeni su s više od 600 senzora postavljenih u bentonitu i stijeni. Na slici 2-16 prikazani su rezultati petogodišnjeg ispitivanja u posebno izrađenom programu za FEBEX eksperiment.





Slika 2-15. Ugradnja grijača u bentonitni blok (Grimsel, 2020)



Slika 2-16. Prikaz senzorskih očitavanja (Grimsel, 2020)

Na kraju čitavog eksperimenta doneseni su zaključci FEBEX I:

- Promjer odlagališnog tunela od 2,28 m poprilično je ograničavajući te bi zahtijevao veoma profinjen dizajn te oprezan transport opreme kao i njeno rukovanje

- Utjecaj relativne vlage na mehaničku stabilnost bentonitnih blokova je bitan, na što se mora obratiti pozornost prilikom skladištenja, prijevoza i postavljanja bentonitnih blokova u odlagalište
- kritični faktor tijekom postavljanja spremnika u odlagališni tunel je poravnavanje spremnika s osi tunela i transportnih tračnica
- oprema je pokazala zadovoljavajuće rezultate

Kao nastavak uspješnog FEBEX I eksperimenta pokrenut je FEBEX II. Prvotni plan bio je iskop oba grijača, no s obzirom da je još uvijek oko 80 % senzora bilo u funkciji donesena je odluka o nastavku grijanja samo s jednim grijačem, a da se drugi ukloni.

Zadani ciljevi FEBEX II eksperimenta su:

- Istraživanje geokemijskih procesa i validacija relevantnih numeričkih kodova i baza podataka
- Istraživanje potencijalnih promjena ključnih parametara tamponskog materijala
- Istraživanje procesa proizvodnje i transporta plina
- Proučavanje procesa korozije
- Proučavanje promjena u hidrauličkom režimu stijenske mase
- Istraživanje i ispitivanje tehnoloških procesa vezanih za iskop spremnika

Prva faza u projektu FEBEX II bilo je probijanje betonskog čepa koji je služio kao zaštita za vrijeme eksperimenta iza kojeg se neposredno nalazio bentonit. Druga faza uključivala je uklanjanje bentonitnih blokova kako bi se mogao izvaditi prvi grijač pri čemu je bilo važno pažljivo rukovati opremom kako se ne bi oštetili instrumenti za monitoring ugrađeni unutar barijera. Nakon završetka prve i druge faze provedeno je detaljno uzorkovanje te je uzeto više od 1000 uzoraka pomoću kojih je dobiven niz podataka korisnih za daljnje analize. Treća faza eksperimenta odnosila se na vađenje grijača što je zbog dimenzija i težine grijača predstavljalo zahtjevan proces. Zamjena grijača je uspješno završena te je primjenom nove tehnike brizganja betona izrađen novi betonski čep. Eksperiment se još uvijek provodi i zasad daje uspješne rezultate.

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO (IN-SITU SIMULACIJA TERMIČKO-HIDRAULIČKIH EFEKATA U MATIČNOJ STIJENI I INŽENJERSKIM BARIJERAMA)**

Glavni cilj provedbe eksperimenta bio je izraditi numerički model koji bi prikazao simulaciju termo-hidrauličkih utjecaja na matičnu stijenu i inženjerske barijere za odlaganje VRAO-a i ING-a. Uspostavljeni model kalibriran je pomoću in-situ ispitivanja termo-hidrauličkih utjecaja na matičnu stijenu i inženjerske barijere.

#### **3.1. Geološka građa odabrane lokacije in-situ simulacije**

Matična stijena dio je Zagorske-Mid-Transdanubijske zone, a sadrži elemente Unutrašnjih i Vanjskih Dinarida i Alpa (Palinkaš et al., 2010). Čine ju gornjopaleozojske, mezozojske, paleogenske i neogenske naslage uz pojave željezne i bakrene rude.

Mineralizaciju rudnog ležišta čine tri dijela:

- žični podrazumijeva sideritno-polisulfidno-baritno-kvarcnu mineralizaciju i galenitno-baritne žice koje su nastale u kasnijim stadijima formacije ležišta
- stratabound dio predstavljaju sideritno-piritno-baritno-kvarcni slojevi
- stratiformni dio odnosi se na hematitno-baritni slojeve te slojeve gipsa i anhidrita

Mineralizacija je nastala riftovanjem duž pasivnog kontinentalnog ruba Gondvane. Stijena domaćin mineralizacije je permski siliciklastični sediment koji se nalazi ispod slojeva gipsa i anhidrita (Palinkaš et al., 2010).

Prema načinu postanka, sideritna i hematitna rudna tijela sedimentno-ekshalativnog su podrijetla (SEDEX) i nalaze se unutar siliciklastičnog sedimenta i evaporita permske starosti. U vršnim dijelovima siliciklastične sekvence nalazi se sloj gipsa i anhidrita debljine do 45 metara. Dolomit i anhidrit s gipsom nalaze se uglavnom stratigrafski iznad glavnih pojava ruda bakra i željeza. U vrijeme gornjeg perma dolazi do postepenog oplićavanja mora i do prodora hidrotermalnih otopina u more koje su formirane primarno iz evaporitizirane morske vode, i dodatno su izmijenjene u interakciji sa stijenama domaćinima. Oplićavanje mora praćeno je slabim tektonskim pritiscima zbog kojih nastaju pukotine pružanja sjever-jug u kojima su hidrotermalnom aktivnošću nastale rudne žice. Glavni elementi koji su doneseni hidrotermalnim otopinama u more bili su željezo i silicij, a manjim dijelom i barij.

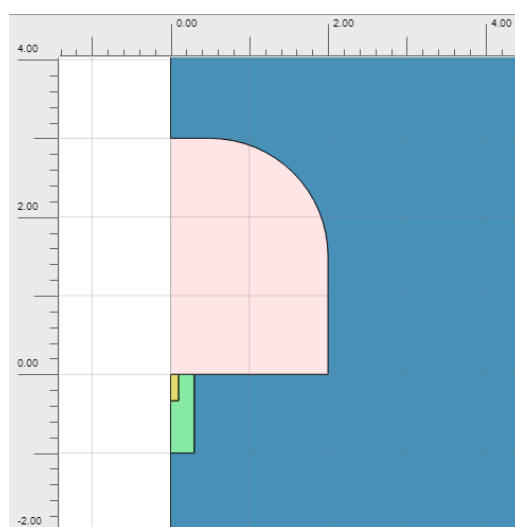


Minimalne temperature kristalizacije stratiformnog dijela mineralizacije bile su 150-230 °C. Prema kraju hidrotermalne aktivnosti temperature padaju, pa je tako stratabound tip mineralizacije kristalizirao pri minimalnim temperaturama 60-160 °C, dok su kasne baritno – galenitne žice kristalizirale pri temperaturama 110-140 °C. Na temelju parageneze željezne rude može se zaključiti da su hidrotermalne otopine imale relativno nisku temperaturu i sulfatno-hidrokarbonatni karakter. Željezo je taloženo pretežito u formi siderita i hematita (Šinkovec, 1971).

### 3.2. Koncept in-situ pokusa

U ovom eksperimentu za odlaganje spremnika predviđen je KBS-3 model koji se temelji na primjeni koncepta višestrukih barijera.

Za potrebe provođenja eksperimenta, načinjen je fizikalni model spremnika s VRAO-om i ING-om koji se sastoji od grijača kojim je simulirano širenje topline radioaktivnog otpada i bakrene košuljice cilindričnog oblika te je na odabranoj lokaciji iskopan tunel promjera 2 m unutar kojeg je izrađena bušotina namijenjena umetanju električnog grijaćeg tijela. Izrada bušotine provedena je krunom za bušenje promjera 20 cm. Grijaće tijelo postavljeno je vertikalno u bušotinu na posteljicu od zbijenog bentonita na jednakoj udaljenosti od stijenki bušotina. Prostor između grijaćeg tijela i okolne stijene ispunjen je bentonitom. Koncept eksperimenta prikazan je na slici 3-1 uzdužnim presjekom polovice računalnog modela bušotine.



Slika 3-1. Koncept eksperimenta (žuto – grijaće tijelo, zeleno – bentonitna ispuna, plavo – matična stijena)

### 3.3. Izrada i umjeravanje grijaćeg tijela i senzora

Grijaće tijelo namijenjeno korištenju u ovom in-situ eksperimentu cilindričnog je oblika visine 60 cm i promjera 14 cm, a izrađeno je od bakrene košuljice, električnog grijača, kape za zaštitu kontakata grijača i ručke za prenošenje grijaćeg tijela. Kapa za zaštitu kontakata i ručka za prenošenje izrađeni su na 3D printeru u PET-G materijalu kako bi mogli podnijeti uvjete u odlagalištu i bili dovoljno izdržljivi s obzirom na masu grijaćeg tijela i opterećenja.

Po sastavljanju grijaćeg tijela pristupilo se ulijevanju termo ulja koje predstavlja medij za prijenos topline od grijača prema košuljici. Odmah nakon spajanja sustava za kontrolu zagrijavanja grijača i početku umjeravanja grijaćeg tijela primijećeno je pregrijavanje gornjeg dijela u odnosu na ostatak grijaćeg tijela. Zbog dizanja toplijeg ulja dolazi do raslojavanja i presporog miješanja odnosno konvekcije topline, pri čemu bi grijaće tijelo imalo različite temperature po visini tijekom in-situ eksperimenta i ne bi se postigao efekt ravnomjernog širenja topline od cijelog grijaćeg tijela, već bi koncentracija topline bila u gornjem dijelu, što bi bitno odudaralo od realnih uvjeta. Iz tog razloga termičko ulje je zamijenjeno kvarcnim pijeskom kao medijem za prijenos topline.

Da bi se potvrdila teorija o nejednakom režimu zagrijavanja, grijaće tijelo je u ciklusima zagrijavano i snimano termo kamerom. Postav mjernog sustava za umjeravanje grijaćeg tijela predstavljen je na slici 3-2.



Slika 3-2. Postav umjeravanja grijaćeg tijela

Prije ispunjavanja grijaćeg tijela drugim medijem čitav sustav je opran i dekontaminiran. Tijelo grijača potom je ispunjeno kvarcnim pijeskom (slika 3-3a), najprije do polovine svoje visine, nakon čega je ugrađen grijač, a zatim se lijevkom ostatak kvarcnog pijeska nekoliko sati usipavao u grijaće tijelo sve dok nije bilo u cijelosti ispunjeno (slika 3-3b). Umjeravanje grijaćeg tijela je nakon punjenja kvarcnim pijeskom nastavljeno, pri čemu se pokazalo da kvarcni pijesak radi znatno prigušenje, što dovodi do pregrijavanja grijača dok se bakrena košuljica nije zagrijala ni na desetinu tražene temperature (80-90 °C). Mjerenje temperature na grijaču provedeno je digitalnim termometrima ugrađenim u cjevčicu namijenjenu smještaju termostata, a temperature tijela digitalnim termometrima spojenim na tijelo grijača.

S obzirom da se čisti kvarcni pijesak također nije pokazao kao najbolji medij za prijenos topline odlučeno je da će se grijaće tijelo dodatno dopuniti termičkim uljem koje bi ispunilo pore u strukturi ugrađenog pijeska.



Slika 3-3. a) Ispunjavanje grijaćeg tijela kvarcnim pijeskom b) Dopunjavanje i nivelacija razine kvarcnog pijeska u grijaćem tijelu

Punjenje uljem (slika 3-4) ovaj put trajalo je oko 72 sata. Kako je ideja bila popuniti uljem sve pore u pijesku unutar cijelog grijaćeg tijela i time napraviti homogenu cjelinu u kojoj

neće dolaziti do strujanja medija već samo do konduktivno-konvektivnog prijenosa topline, proces nije mogao biti ubrzan obrnutim putem – sipanjem pijeska u tijelo napunjeno uljem.

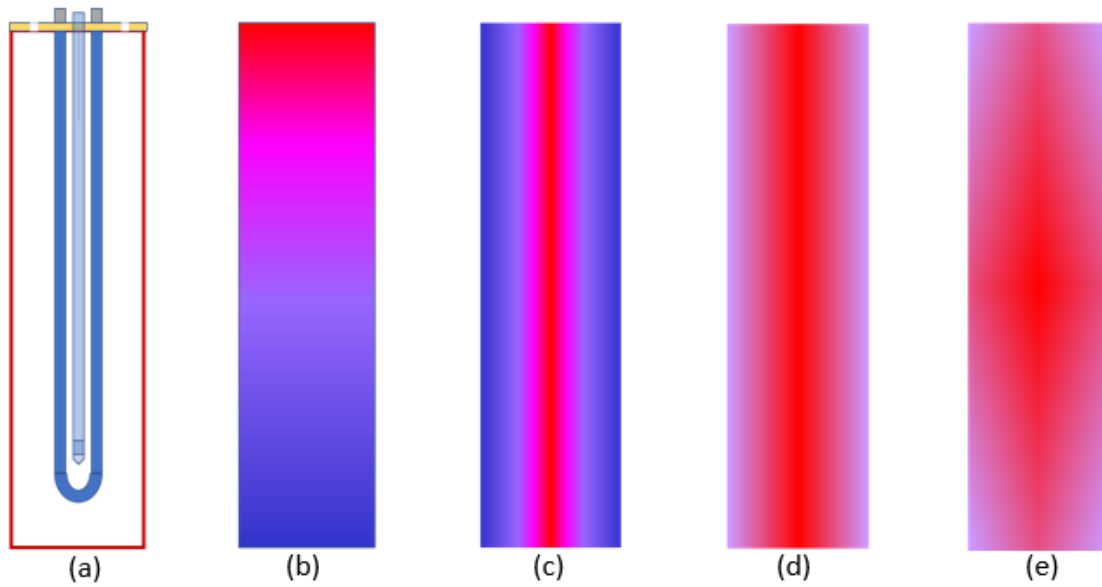


Slika 3-4. Saturacija pijeska uljem

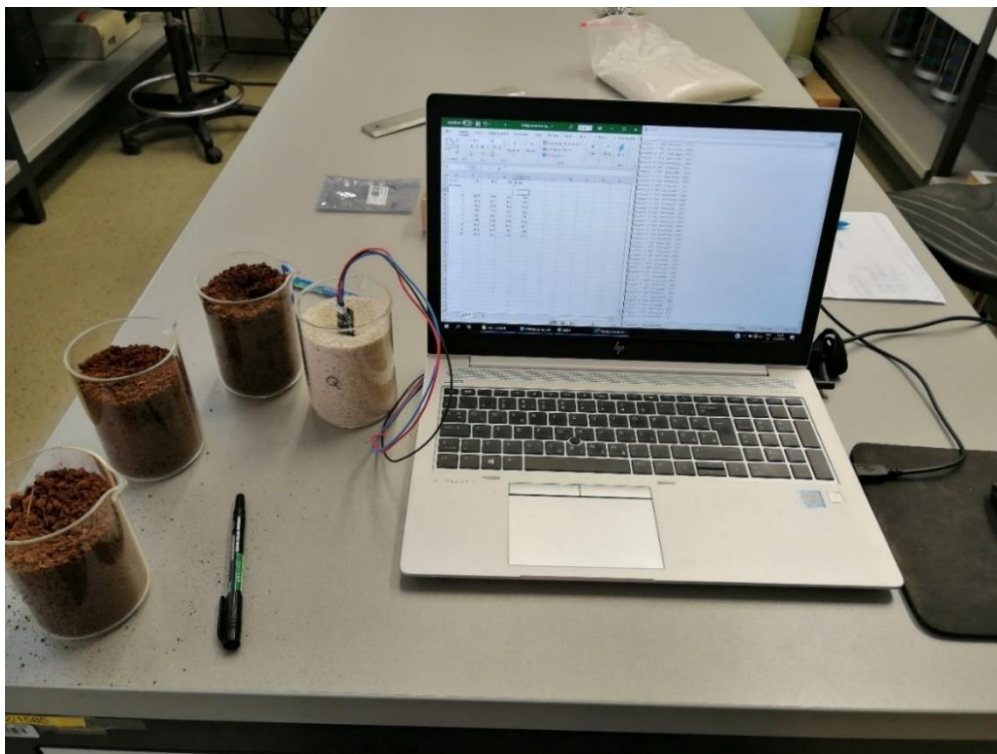
Nakon ponovnog umjeravanja digitalni termometri pričvršćeni su na tijelo aluminijskom samoljepljivom trakom, a da bi se smanjio gubitak topline s grijaćeg tijela radijacijom i konvekcijom zraka, tijelo je obloženo kartonom. Po završetku umjeravanja, grijaće tijelo opremljeno je sensorima za mjerenje temperature na bakrenoj košuljici.

Širenje topline grijaćim tijelom ovisno o materijalu koji je korišten kao medij za prijenos topline prikazano je na slici 3-5.

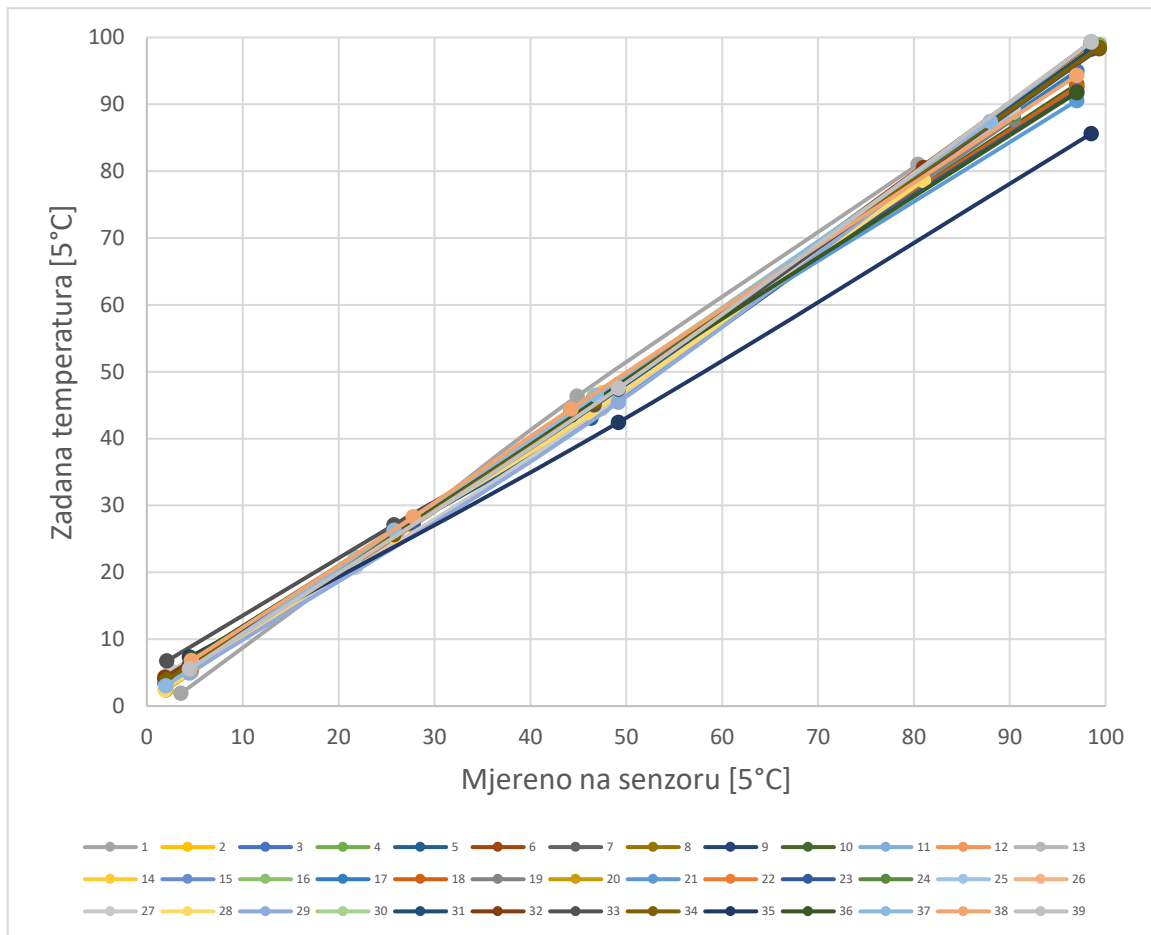
Za detektiranje porasti vlažnosti (saturacije) bentonitne ispune u in-situ mjerenjima korišteni su kapacitivni senzori, budući da se od otpornih senzora odustalo iz razloga što su podložni koroziji. Umjeravanje senzora prikazano je na slici 3-6, a rezultati umjeravanja na slici 3-7.



Slika 3-5. Širenje topline na grijaćem tijelu (a): (b) ispunjenim uljem, (c) ispunjenim pijeskom, (d) ispunjenim pijeskom saturiranim uljem i raspored topline na realnom spremniku s ING-om (e)



Slika 3-6. Umjeravanje senzora za mjerenje vlažnosti

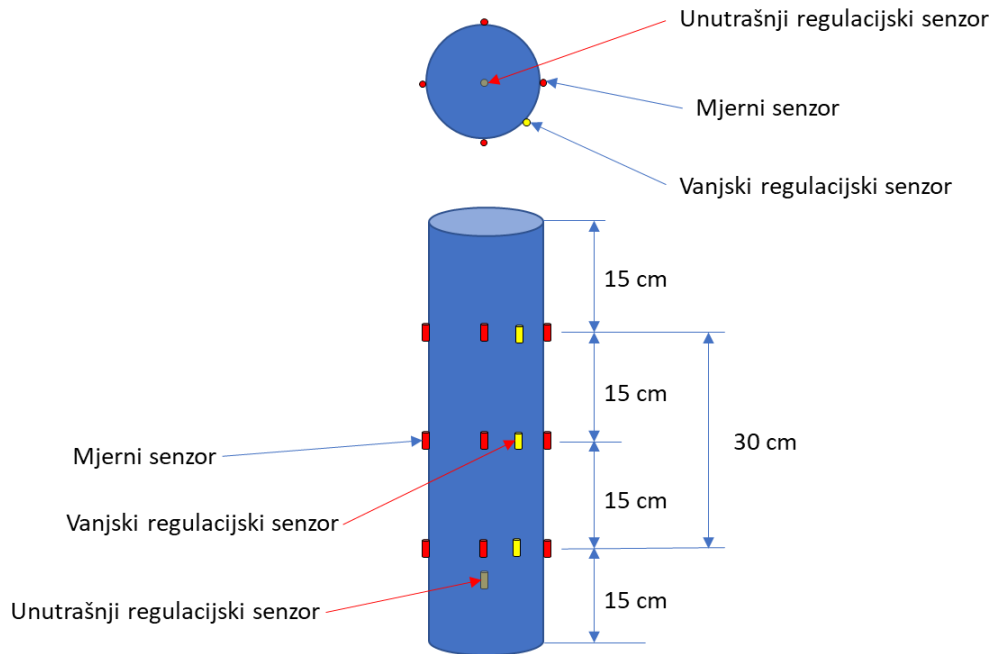


Slika 3-7. Rezultati umjeravanja senzora



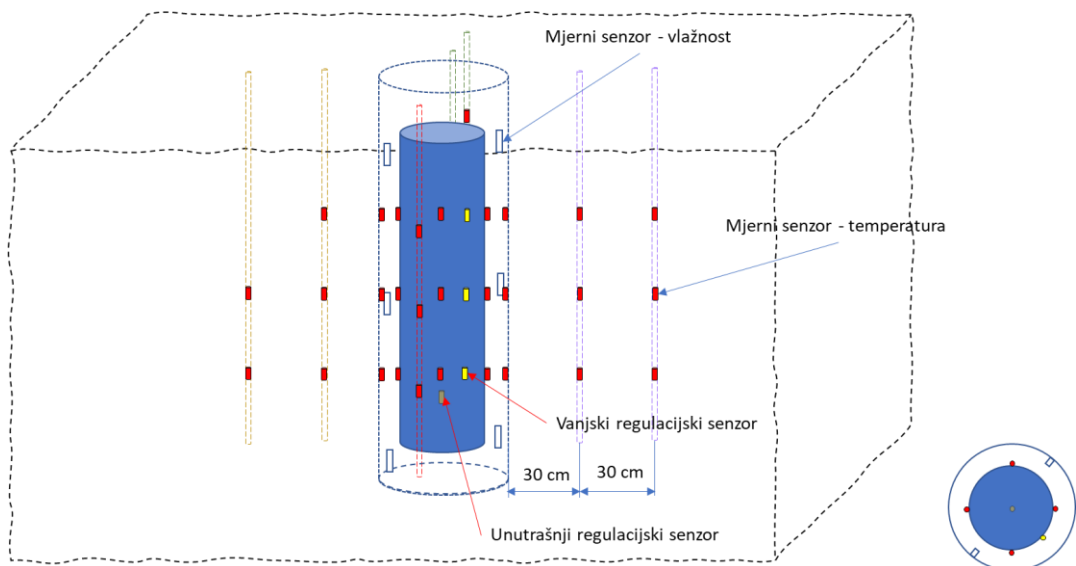
### 3.4. Instalacija grijaćeg tijela

Raspored senzora za mjerenje temperature i kontrolnih/mjernih senzora prikazan je na slici 3-8.



Slika 3-8. Raspored senzora za mjerenje temperature i mjernih senzora na grijaćem tijelu

Smještaj grijaćeg tijela i mjernih senzora u stijeni prikazan je slikom 3-9.



Slika 3-9. Raspored senzora za mjerenje temperature, kontrolnih/regulacijskih senzora i senzora za vlažnost na cijelom eksperimentu

Instalacija eksperimenta započela je izradom posteljice od bentonita te ugradnjom prva dva senzora za mjerenje vlažnosti koji se nalaze na najvećoj dubini u bušotini.

Grijaće tijelo postavljeno je u bušotinu pomoću sustava koji je osigurao vertikalnost grijaćeg tijela i jednoliku udaljenost od stijenki bušotine. Debljina bentonitne ispune iznosila je 20 cm. U bentonit je na kontaktu bentonit-stijena ugrađeno šest senzora za mjerenje temperature, a uz njih i senzori za mjerenje vlažnosti što je zahtijevalo sustavno razvrstavanje kablova (slika 3-10).



Slika 3-10. Ugradnja senzora, bentonitne ispune i razvrstavanje kablova

Za potrebu ugradnje mjernih senzora za temperaturu izrađeno je sedam bušotina u stijeni na udaljenosti od 30 cm i 60 cm u odnosu na stijenske bušotine (slika 3-9). Nakon ugradnje svih mjernih senzora provedeno je cementiranje bušotina što je praksa kojom se osigurava prijanjanje senzora uz bušotinu i konduktivni prijenos topline sa stijene na senzor. Ušće centralne bušotine s grijaćim tijelom zatvoreno je plastičnom vrećom s obzirom da nije do kraja završeno njeno ispunjavanje bentonitom.

Nakon povezivanja senzora s mjernim sustavom i ugradnje zaštitne kape, centralna bušotina je zatvorena i montiran je poklopac od pleksiglasa koji je odignut od površine terena kako bi se osiguralo hidratiziranje bentonita vlagom iz zraka, a spriječilo raznošenje materijala i ugrožavanje eksperimenta. Na slici 3-11 prikazana je centralna bušotina prije spajanja struje na grijač.





Slika 3-11. Centralna bušotina prije spajanja struje na grijač

Ormarić s upravljačkim sklopom opremljen je dovodom električne energije potrebne za pogon grijača, a posebnim kabelom povezan je sa sustavom za slanje podataka GSM servisom na server. Spajanje je prikazano na slici 3-12.



Slika 3-12. Spajanje senzora za mjerenje temperature i vlažnosti

### 3.5. Mjerenje temperature i vlažnosti

Paralelno s mjerenjima u stijeni i ispuni provedena su mjerenja atmosferskih parametara na lokaciji, budući da mikroklimatski uvjeti djeluju na kvalitetu dobivenih podataka. Mjerenja su obavljena u trajanju od nešto više od 3 dana tijekom studenog 2020. godine. U tom periodu temperatura zraka u tunelu kretala se oko 13,6 °C, zabilježena vlažnost zraka bila je oko 92 %, dok su vrijednosti barometarskog tlaka bile u rasponu 982-996 hPa.

Nakon pripreme čitavog eksperimenta i spajanja opreme na računalo sustav je pušten u rad (slika 3-13). Uključen je grijač i namješten na temperaturu od 80 °C.



Slika 3-13. Puštanje sustava u rad

Za očitavanje senzora temperature i vlažnosti u okolini bakrenog cilindra koristi se zasebna jedinica *Arduino Leonardo*. Temperature svih 40 postavljenih senzora očitavaju se putem *OneWire* protokola te su svi senzori spojeni na jedan digitalni ulaz. Šest senzora za mjerenje vlažnosti su analognog tipa i priključeni su zasebno na pojedinačni ADC ulaz. Podaci sa senzora očitavaju se u zadanom intervalu od 10 minuta. Za održavanje zadane temperature na plaštu bakrenog cilindra koristi se *Arduino* model *Nano*.

## 4. NUMERIČKI MODEL IN-SITU ISPITIVANJA

### 4.1. Općenito o programu *Plaxis*

*PLAXIS* je vodeći geotehnički softver razvijen posebno za analize metodom konačnih elemenata u području geotehničkog inženjerstva, uključujući deformacija tla i stijena, stabilnost, tok vode te širenje topline. Poznat po jednostavnosti upotrebe i točnosti koristi se za učinkovito optimiziranje dizajna u odnosu na primjene tradicionalnih konzervativnih metoda izračuna (Bentley, 2020).

Geotehničke primjene često zahtijevaju napredne konstitutivne modele za simulaciju nelinearnog, vremenski ovisnog i anizotropnog ponašanja tla i stijena. Uz tradicionalne Mohr-Coulombove i linearne elastične materijale, posebno su razvijeni daljnji modeli s parametrima koji se mogu lako odrediti pomoću standardnih metodologija ispitivanja tla.

*PLAXIS* ima 2D i 3D verzije, s opcijama dinamičkih analiza, hidrauličkih analiza kod toka podzemne vode te dodatno s termalnim modulom koji su dostupni zasebno ili u paketu, te specijalni program *PLAXIS MoDeTo* za projektiranje podvodnih temelja.

### 4.2. Numerički model i rubni uvjeti

Za izradu numeričkog modela u računalnom programu *Plaxis* 2D korišten je osno-simetrični model dok su kao ulazni podaci unesene dimenzije podzemne prostorije, bušotine i grijaćeg tijela te parametri za 3 vrste materijala korištenih u in-situ eksperimentu (matična stijena, bentonit i bakar). Izvor topline namješten je na 80 °C s koeficijentom prijelaza topline od 0,015 kW/m<sup>2</sup> /°C. Numerički model prikazuje rezultate širenja topline za vrijeme zagrijavanja u trajanju od 20 dana. Razina podzemne vode pretpostavljena je na 5 metara dubine od izvora topline.

Na temelju ulaznih podataka dimenzija modela i parametara materijala dobiven je dijagram promjene temperature u vremenu za razdoblje od 20 dana. Postupnim uspoređivanjem s rezultatima in-situ mjerenja mijenjane su vrijednosti parametara kako bi se kalibrirao numerički model odnosno odredili uvjeti u matičnoj stijeni i inženjerskoj barijeri koji najrealnije simuliraju širenje topline u stijeni u odnosu na fizikalni model korišten u in-situ mjerenjima.

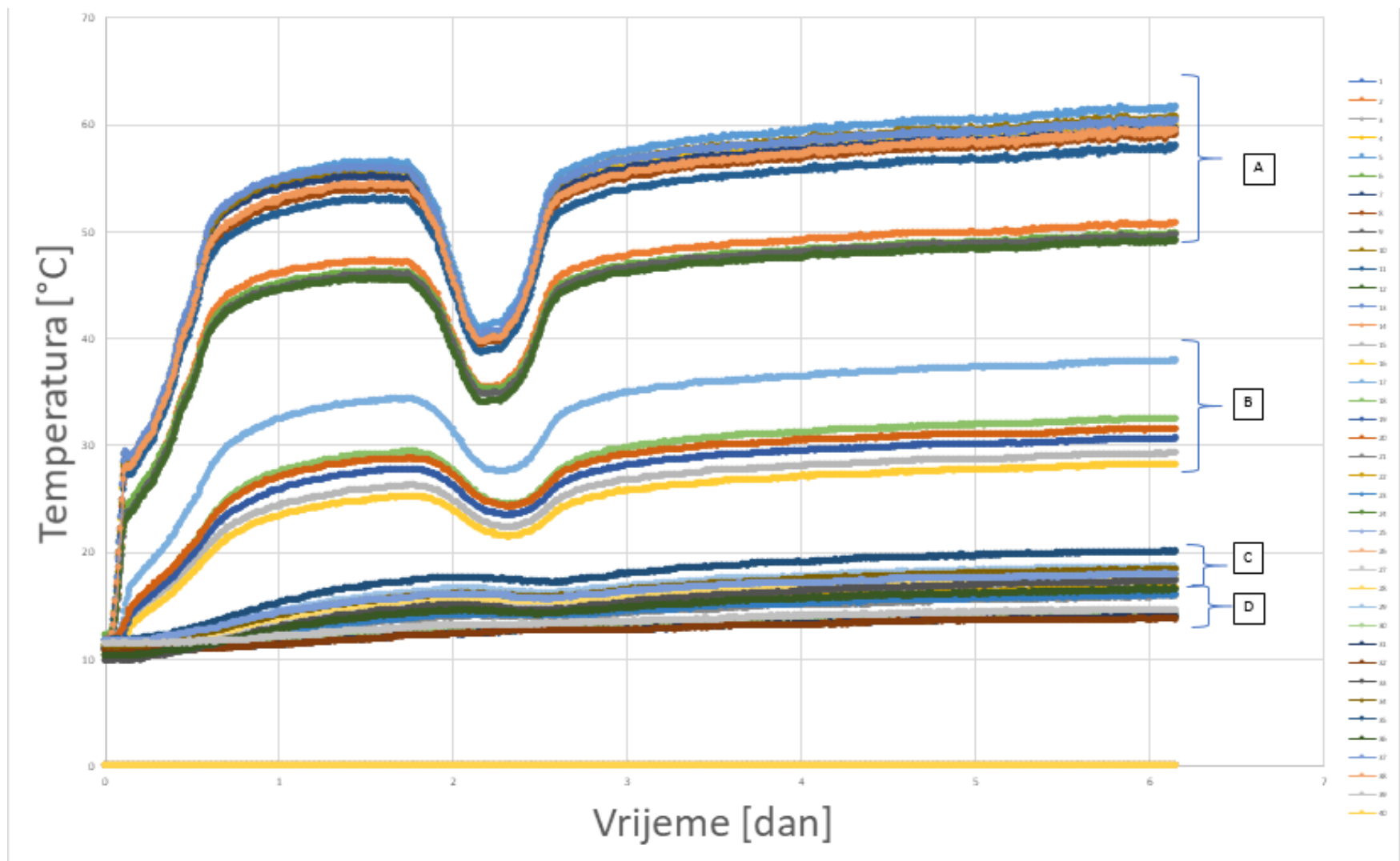
Konačne vrijednosti parametara materijala koji su korišteni pri izradi modela prikazani su u tablici 4-1.

Tablica 4-1. Vrijednosti parametara materijala korištenih pri izradi modela

		Matična stijena	Bentonit	Bakar
Specifični toplinski kapacitet	$C_s$ (kJ/t/°C)	800	750	700
Toplinska vodljivost	$\lambda_s$ (kWm/°C)	0,004	0,002	0,5
Gustoća	$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	2,7	2,6	9,0
Youngov modul elastičnosti	$E'$ (kN/m <sup>2</sup> )	250 000	30 000	300 000
Poissonov koeficijent	$\nu$ (-)	0,2	0,3	0,2
Težina popuno nesaturiranog tla	$Y_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	22,0	17,0	95,0
Saturirana jedinična težina	$Y_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	23,0	20,0	90,0

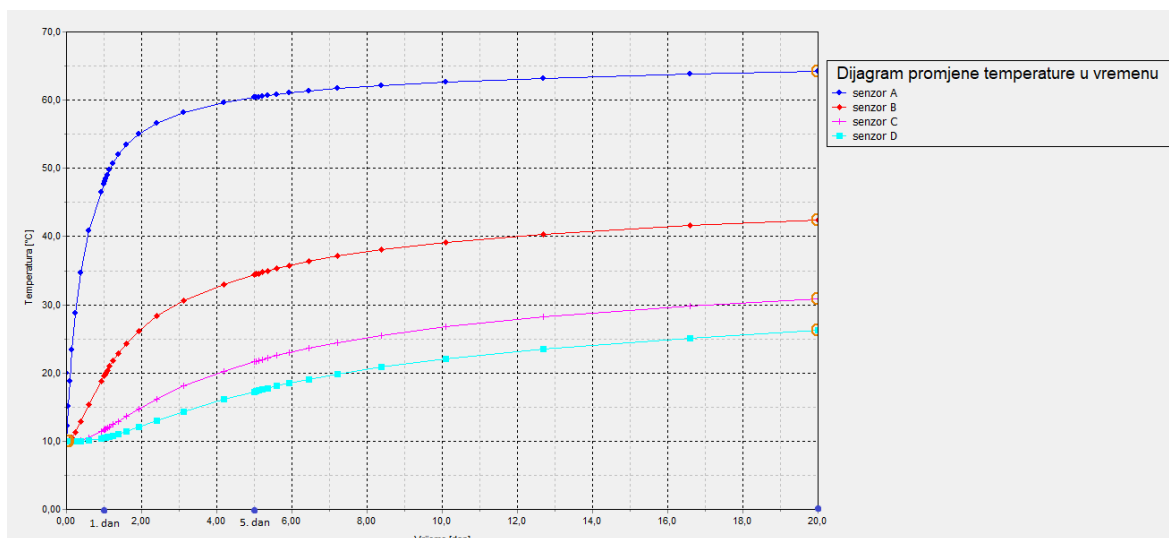
### 4.3. Rezultati numeričkog modela

Obradom podataka prikupljenih u in-situ mjerenjima dobiveni su rezultati koji su grafički prikazani na slici 4-1. Slika 4-2 prikazuje dijagram promjene temperature u vremenu dobiven na temelju numeričkog modela. Analiza rezultata predstavljena je u poglavlju 5.



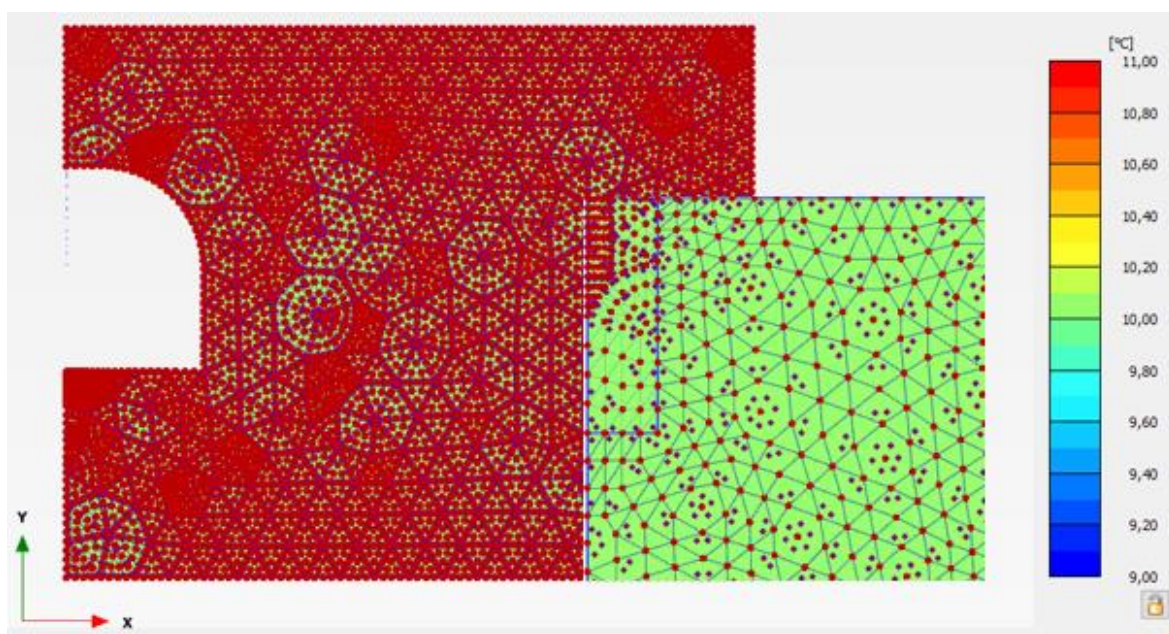
Slika 4-1. Rezultati in-situ mjerenja



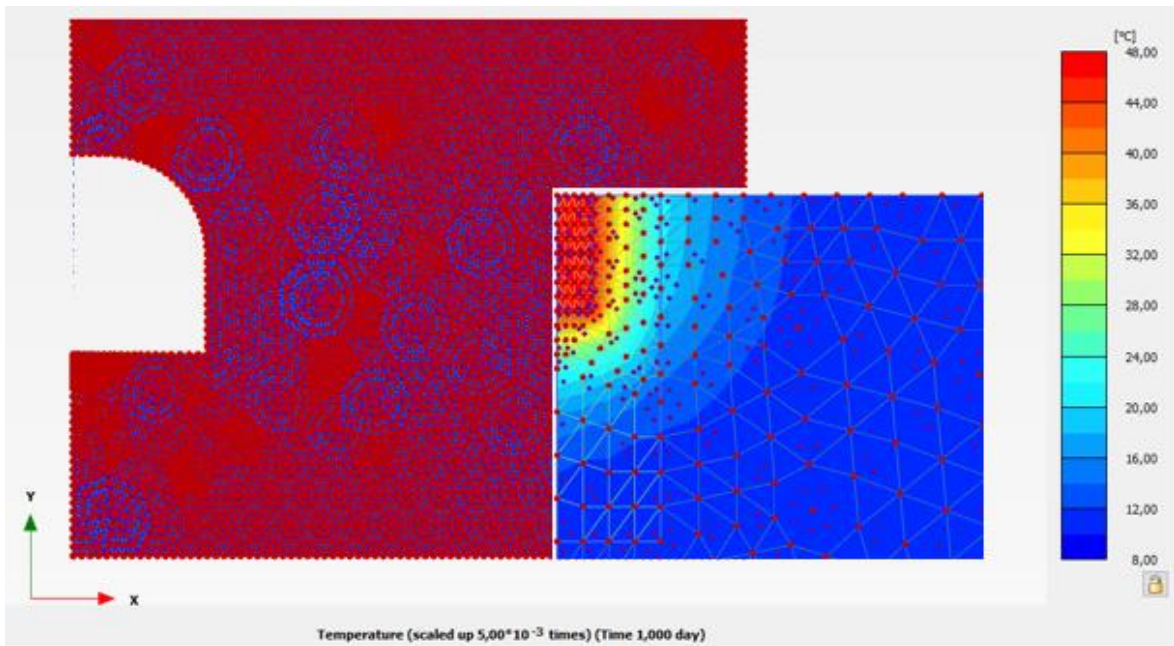


Slika 4-2. Dijagram promjene temperature u vremenu za numerički model

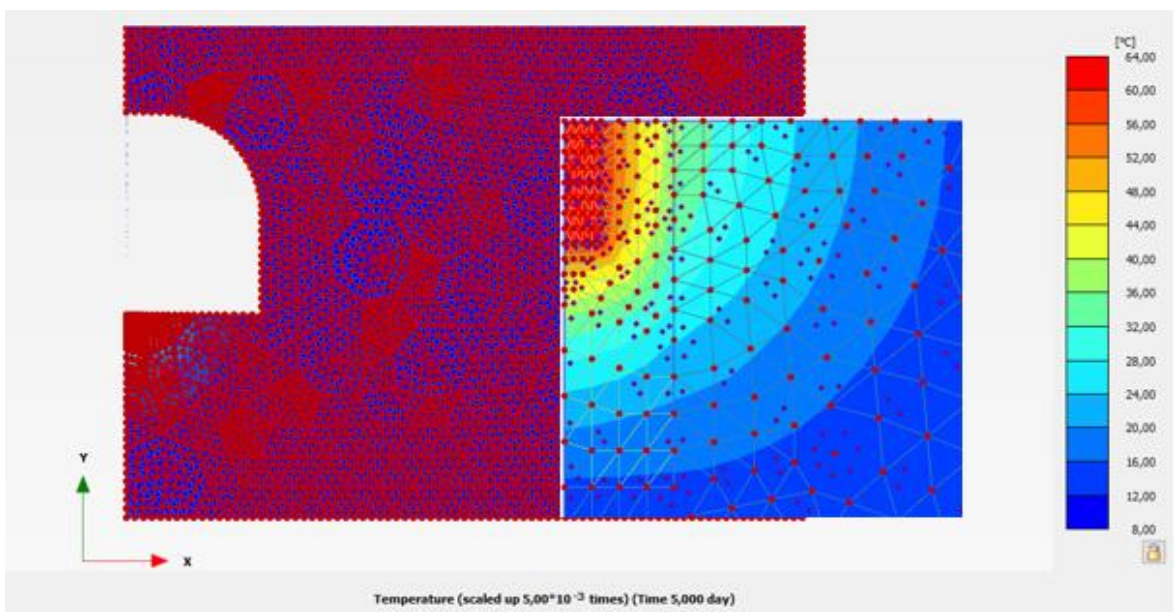
Slika 4-3 prikazuje izmjerene temperature u modelu prije početka emitiranja topline iz grijača, slika 4-4 prikazuje temperature prvog dana grijanja, slika 4-5 odnosi se na peti dan grijanja, a slika 4-6 na dvadeseti dan grijanja. Za prikaz rasporeda temperatura korišten je uzdužni presjek modela bušotine.



Slika 4-3. Prikaz temperature u modelu prije grijanja

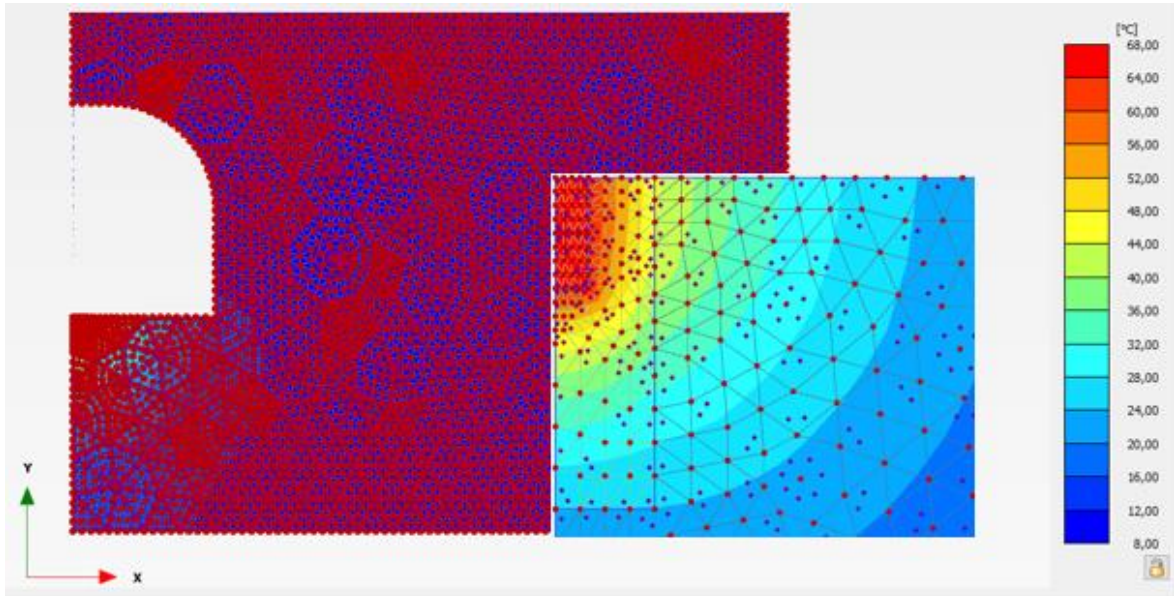


Slika 4-4. Prikaz temperatura prvog dana grijanja



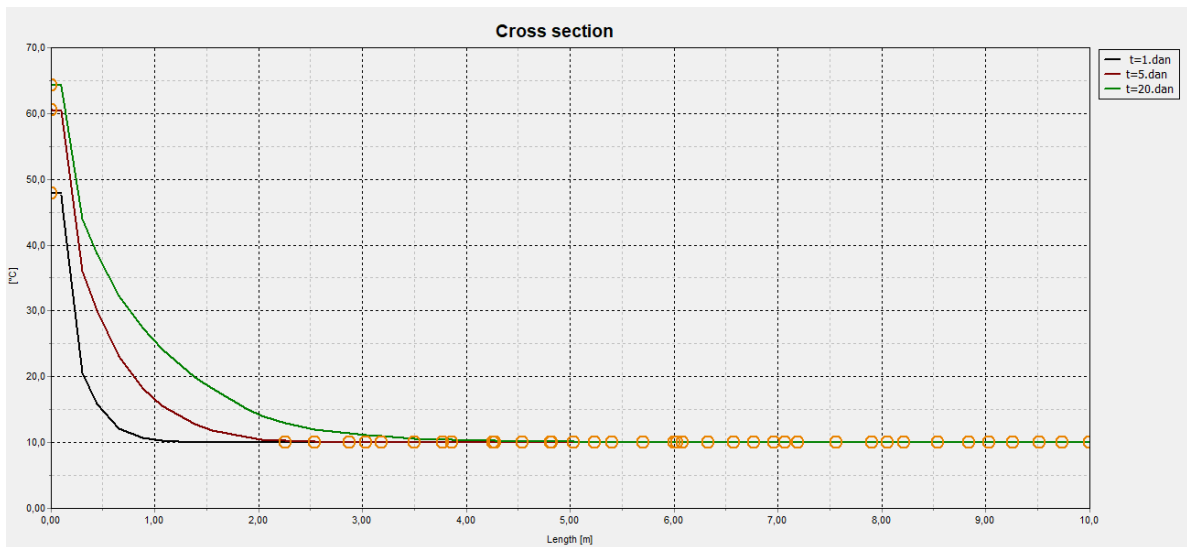
Slika 4-5. Prikaz temperatura petog dana grijanja





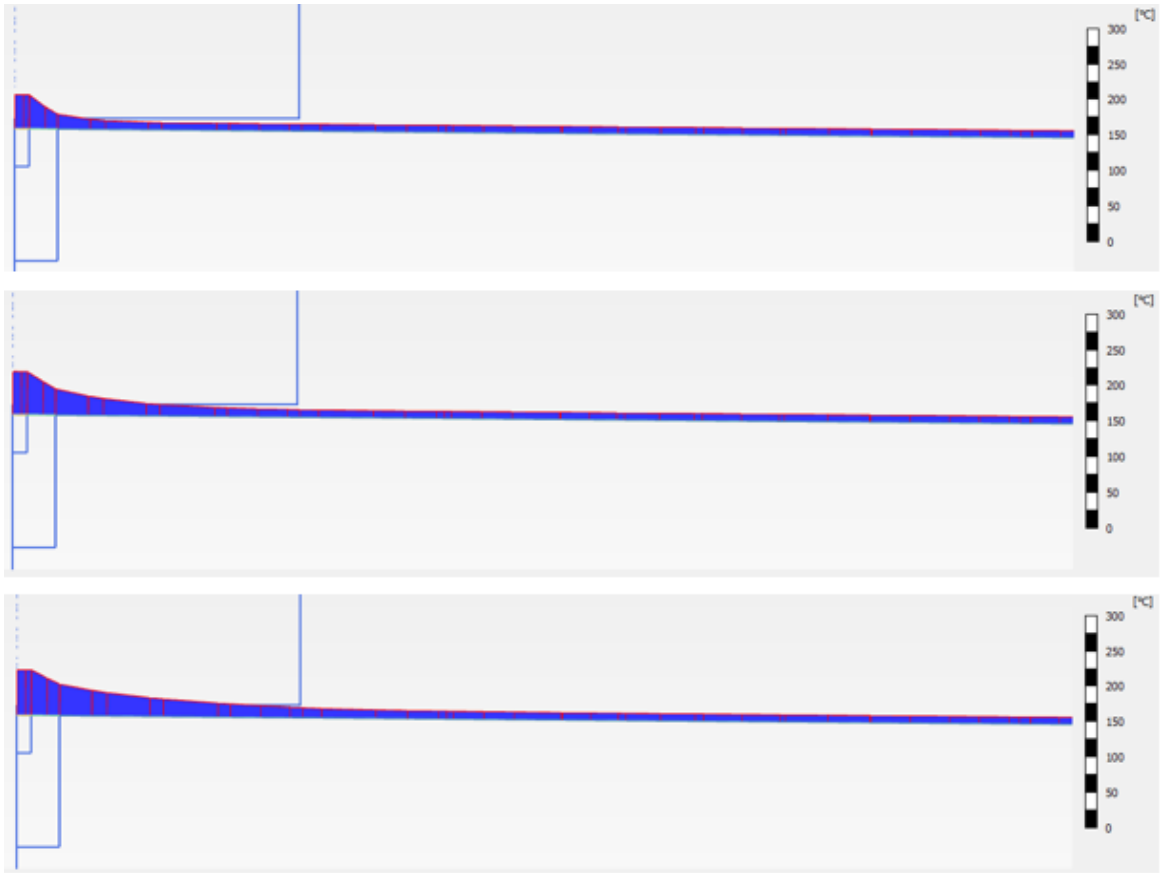
Slika 4-6. Prikaz temperatura dvadesetog dana grijanja

Na slici 4-7 prikazan je dijagram ovisnosti temperature o udaljenosti od izvora topline.



Slika 4-7. Dijagram ovisnosti temperature o udaljenosti od grijača

Na slici 4-8 prikazan je poprečni presjek modela s kretanjima temperature za 1., 5. i 20. dan grijanja.



Slika 4-8. Poprečni presjek kretanja temperature prvi, peti i dvadeseti dan grijanja

## 5. ANALIZA REZULTATA

Rezultati sa slike 4-1 dobiveni su analizom podataka prikupljenih u in-situ mjerenjima te su podijeljeni na 4 grupe senzora: (A) – senzori na plaštu cilindra, (B) – senzori na granici bentonita i stijene, (C) – senzori u stijeni na 30 cm od ruba bušotine, (D) – senzori u stijeni na 60 cm od ruba bušotine. Iz dijagrama je vidljivo da je temperatura očitana s gotovo svih senzora postavljenih na različitim udaljenostima od grijača prije grijanja bila približno 10 °C, i ova vrijednost uzeta je kao početna temperatura matične stijene. Nakon aktivacije grijaćeg tijela uočava se porast temperature. Prvog dana mjerenja zabilježene temperature senzora koji su se nalazili na plaštu bakrenog cilindra ukazuju na najveći temperaturni rast, temperature očitane sa senzora na kontaktu bentonit/stijena također su prikazivale konstantan rast međutim ne u tolikoj mjeru, dok su se temperature senzora postavljenih na većim udaljenostima od grijača povećavale za znatno manje iznose. Nakon početnog naglog skoka temperature, u narednom periodu grijanja kada temperatura grijača dosegne zadanu vrijednost, porast temperature spremnika se znatno usporava i nakon otprilike 1-2 dana temperatura se stabilizira. Za vrijeme zagrijavanja dolazi do prijenosa topline s bakrenog spremnika na bentonit, te s bentonita na okolnu stijenu. Krivulje C i D grupa senzora imaju blagi nagib što znači da se tijekom zagrijavanja temperature koje očitava senzor povećavaju za jako male iznose. Na temelju dijagrama možemo zaključiti da se toplina najbrže širi u materijalima najbliže grijaču, a na većim udaljenostima od grijača porast temperature odvija se sporo, odnosno dolazi do približavanja krivulje rasta temperature horizontali. Iz dijagrama se također može uočiti da je u jednom trenutku došlo do pada temperature na svim sensorima što bi značilo da je u tom periodu došlo do deaktivacije grijača.

Dijagram na slici 4-2 dobiven je kao rezultat simulacije grijanja u periodu od 20 dana u uvjetima opisanim u numeričkom modelu. Na dijagramu su prikazane četiri krivulje, za isto tako četiri grupe senzora koji se nalaze na različitim udaljenostima od grijača. Temperature sa senzora na različitim udaljenostima u modelu prije nego što je aktiviran grijač iznose 10 °C. Već prvi dan grijanja bilježi se nagli rast temperature. Za A grupu senzora porast temperature je najveći, dok je za D grupu koja je najudaljenija od grijača najmanji. Nakon što temperatura grijača dosegne određenu vrijednost ne bilježe se više nagli porasti, već se temperature povećavaju za mnogo manje iznose do kraja mjerenja. Vidljivo je da senzori koji se nalaze najbliže grijaču imaju najveće temperature i one do kraja predviđenog mjerenja od 20 dana dosežu otprilike 65 °C, B grupa senzora do kraja mjerenja ima

temperaturu oko 42 °C, C grupa približno 30 °C, i temperature D grupe senzora kreću se oko 25 °C. Takvo kretanje temperature približno se podudara s kretanjima temperature u fizikalnom modelu in-situ eksperimenta.

Na slikama od 4-3 do 4-6 je na uzdužnom presjeku bušotine prikazano širenje topline za period grijanja od jednog, pet i dvadeset dana, gdje su različitim vrijednostima temperature pridružene različite boje (crveno označava najvišu temperaturu, plavo najnižu). Takav način prikaza također daje isti rezultat: temperatura se smanjuje s udaljenošću od izvora topline i prijenos topline se sporije odvija.

Slika 4-7 također prikazuje ovisnost temperature o udaljenosti od izvora topline. S obzirom na poznate dimenzije spremnika i ispune iz dijagrama se lako može očitati koliki je pad temperature kroz bentonit. U ovom slučaju radi se o padu temperature od približno 23 °C na temelju čega se može zaključiti da je bentonit prilično dobar izolator.

## 6. ZAKLJUČAK

Radioaktivni otpad predstavlja opasnost za okoliš i zdravlje ljudi ukoliko se ne zbrine na adekvatan način. Upravo zbog toga sigurno i trajno zbrinjavanje RAO-a smatra se jednim od najvećih izazova suvremene civilizacije. Konačno odlaganje VRAO-a i ING-a vrlo je složena inženjerska problematika te je predmet intenzivnog istraživanja u svijetu. S obzirom na rezultate svih dosadašnjih istraživanja kao optimalno rješenje problema zbrinjavanja VRAO-a i ING-a nameće se odlaganje u duboke geološke formacije. Pri samom odabiru lokacije namijenjene za izgradnju takvog odlagališta mora se zadovoljiti niz kriterija. Svaka država ima obvezu zbrinuti radioaktivni otpad nastao na svom teritoriju. Iako zahtijeva dugotrajna istraživanja i pripremu, ovaj problem još uvijek u Hrvatskoj nije aktualan.

U ovom radu je na temelju rezultata in-situ ispitivanja izrađen numerički model koji simulira širenje topline koju emitira VRAO ili ING pohranjen u bakrenom spremniku s bentonitnim inženjerskim barijerama, vertikalno postavljenim u bušotinu. Numerička simulacija provedena je za prvih 20 dana od postavljanja grijaćeg tijela. S obzirom na vrijeme provođenja eksperimenta i funkcionalnost opreme može se reći da su dobiveni rezultati zadovoljavajući.

Ostavlja se prostora za unaprjeđenje eksperimenta u budućnosti dodavanjem novih senzora. Za dobivanje pouzdanijih podataka koji bi se mogli iskoristiti u nacionalnom programu potrebna su istraživanja i numeričke simulacije za duža vremenska razdoblja. Numerički model odlaganja VRAO-a i ING-a dobiven u ovom radu može se smatrati preliminarnim podatkom za buduća istraživanja.

## 7. POPIS LITERATURE

### Članci, knjige, poglavlja iz knjiga

BALDWIN, T., CHAPMAN, N., NEALL, F. 2008: Geological disposal options for high-level waste and spent fuel. Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority.

FERETIĆ, D., ČAVLINA, N., DEBRECIN, N., 1995. Nuklearne elektrane. Zagreb: Školska knjiga.

FERETIĆ, D., TOMŠIĆ, Ž., ŠKANATA, D., ČAVLINA, N., SUBAŠIĆ, D., 2000. Elektrane i okoliš. Element (Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu), Zagreb.

IAEA, 2006. IAEA safety standards: Geological disposal of radioactive waste. Vienna, Austria: IAEA, Safety Requirements, No. WS-R-4.

IAEA, 2009. IAEA safety standards: Classification of Radioactive Waste, Vienna, Austria: IAEA, General Safety Guide GSG-1.

IAEA, 2011. IAEA safety standards: Disposal of radioactive waste. Vienna, Austria: IAEA, Safety Requirements, No. SSR-5.

KONČIĆ, A., 2013. Mogućnosti za odabir lokacije podzemnog istraživačkog laboratorija u Hrvatskoj. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

KRPAN – LISICA, D., 2001. Osnove energetike. Zagreb: Hinus

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

LEVANAT, I., 1997. Radioaktivni otpad. Agencija za posebni otpad (APO), Zagreb: posebno izdanje APO-novosti ISSN 1330-5743.

PALINKAŠ, L., BOROJEVIĆ ŠOŠTARIĆ, S., STRMIĆ PALINKAŠ, S., PROCHASKA, W., SPANGENBERG, J., CUNA, S. & ŠINKOVEC, B. (2010): Permian-polysulphide-siderite-baritehaematite deposit Rude in samoborska Gora Mts., Zagorje-Mit-Transdanubian zone of the Internal Dinarides, Geologia Croatica, 63, 93-115, Zagreb

SZAKÁLOS, HULTQUIST, and WIKMARK, 2008. The corrosion of copper in water – impacts on the safety of the repository. Royal Institute of Technology in Stockholm: KTH, Kungliga Tekniska Högskolan, have published articles (Szakálos, 2007, Hultquist, 2008).

ŠINKOVEC, B. (1971): Geologija ležišta željezne i bakrene rude u Rudama kraj Samobora, Geološki vjesnik, 24, 165-181

UROIĆ, G., 2019. Termičko-hidro-mehanički efekti na odlagalištu istrošenog nuklearnog goriva. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

VEINOVIĆ, Ž., KOVAČEVIĆ ZELIĆ, B., DOMITROVIĆ, D. 2015. Deep geological disposal of spent nuclear fuel and high-level waste : current state and future challenges. Handbook of research on advancements in environmental engineering. Gaurina-Međimurec, Nediljka (ur.). Hershey : IGI Global, 2015. Str. 367-399.

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

### **Zakonski dokumenti**

Narodne novine. 2014. Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva (NN 125/2014). Zagreb.

Narodne novine. 2018. Odluka o donošenju Nacionalnog programa provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva (Program za razdoblje do 2025. godine s pogledom do 2060. godine) (NN 100/2018). Zagreb.

Narodne novine. 2018. Pravilnik o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora (NN 12/2018). Zagreb.

### **WWW**

GRIMSEL TEST SITE, 2020. Full-scale engineered barriers experiment (FEBEX) I. URL: <http://grimsel.com/gts-phase-v/febex/febex-i-introduction> (16.12.2020.)

NEK, 2020. Nisko i srednje radioaktivni otpad. Slovenija: Nuklearna elektrana Krško. URL: <http://www.nek.si/hr>. (10.12.2020.)

BENTLEY, 2020. PLAXIS Geotechnical Analysis Software URL:  
<https://www.bentley.com> (18.12.2020.)





KLASA: 602-04/20-01/257  
URBROJ: 251-70-03-21-2  
U Zagrebu, 11.02.2021.

**Josip Slaviček, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/257, UR. BROJ: 251-70-14-20-1 od 30.11.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

### **SIMULACIJA TERMIČKO-HIDRAULIČKIH EFEKATA NA MATIČNU STIJENU I INŽENJERSKE BARIJERE ODLAGALIŠTA ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA**

Za voditelje ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu dr. sc. Dubravko Domitrović, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i doc. dr. sc. Želimir Veinović.

**Voditelj**

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

(potpis)

Doc. dr. sc. Želimir Veinović

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Stanko Ružičić

(titula, ime i prezime)

**Predekan za nastavu i  
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)