

Laboratorijski model odlaganja visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva

Nogolica, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:769095>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-18**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij Rudarstva

**LABORATORIJSKI MODEL ODLAGANJA VISOKO RADIOAKTIVNOG
OTPADA I ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA**

Diplomski rad

Ivan Nogolica

R106

Zagreb, 2015.

LABORATORIJSKI MODEL ODLAGANJA VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA I
ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA

IVAN NOGOLICA

Diplomski rad je 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 na temelju poznatih svjetskih programa konačnog odlaganja u duboko geološko odlagalište. Duboko geološko odlagalište radioaktivnog otpada u kristaličnim stijinama, koje bi osiguralo dugoročnu izolaciju radionuklida i zaštitu ljudi i okoliša, još uvijek nije izgrađeno ni u jednoj zemlji. U radu je prezentiran laboratorijski model odlaganja visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva. Naglasak je stavljen na analizu kondukcijskog širenja topline kroz stijenu. Fizikalni model uključuje uzorak bazaltne stijene u koju je ugrađen grijač i senzori za mjerenje temperature. Podaci su analizirani te prikazani kao rezultati eksperimenta.

Ključne riječi: visoko radioaktivni otpad, istrošeno nuklearno gorivo, laboratorijski model, čelik, bentonit, duboko geološko odlagalište, senzori

Diplomski rad sadrži: 60 stranica, 4 tablice, 50 slika i 66 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr.sc. Želimir Veinović, docent RGNF-a
Pomogao pri izradi: Indramani Sharma, Dipl.ing.mat., asistent

Ocijenjivači: Dr.sc. Želimir Veinović, docent RGNF-a
Dr.sc. Dalibor Kuhinek, docent RGNF-a
Dr.sc. Trpimir Kujundžić, izvanredni profesor RGNF-a

Datum obrane 17. srpnja 2015.

LABORATORY MODEL OF DISPOSAL OF HIGH RADIOACTIVE WASTE AND
SPENT NUCLEAR FUEL

IVAN NOGOLICA

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

Summary

The concept of disposal of high radioactive waste and spent nuclear fuel described in this paper is based on world famous programs for final disposal in a deep geological facility. The concept of deep geological radioactive waste, in crystalline rocks that would ensure long-term isolation of radionuclides and protect people and the environment is still not implemented in any country. The paper presents a laboratory model of the disposal of high level radioactive waste and spent nuclear fuel. Emphasis is placed on analysis of the conductive heat spreading through the rock. The physical model includes a sample of basalt rock incorporating a heater and sensors for measuring temperature. Data were analyzed and shown as results of the experiment.

Keywords: high level waste, spent nuclear fuel, laboratory model, steel, bentonite, deep geological facility, sensors

Thesis contains: 60 pages, 4 tables, 50 pictures and 66 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor
Technical support and assistance: Indramani Sharma, BSc, Assistant

Reviewers: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor
PhD Dalibor Kuhinek, Assistant Professor
PhD Trpimir Kujundžić, Associate Professor

Date of defence: July 17, 2015

Posebnu zahvalnost dugujem mentoru dr. sc. Želimiru Veinoviću na velikoj susretljivosti, pruženom znanju te dragocjenoj pomoći koju mi je nesebično pružao tijekom mog studiranja na RGN fakultetu te same izrade ovog rada. Bila mi je čast učiti od Vas.

Veliku zahvalnost dugujem asistentu dipl. Ing. Indramaniju Sharmi na informacijama i pomoći pri izvedbi eksperimentalnog dijela rada, kao i na izradi sustava za mjerenje.

Zahvaljujem doc.dr.sc. Daliboru Kuhineku i prof.dr. sc. Trpimiru Kujundžiću na pruženom prostoru, vremenu i opremi koji su osigurali izradu ovog rada. Također zahvaljujem doc.dr.sc Vesni Garašić na analizi stijene korištene za eksperiment.

Gospodi Veranu Matošinu i Ivici Juraiću zahvaljujem na tehničkoj pomoći pri pripremi eksperimenta.

Hvala svim prijateljima i kolegama koji su mi pomagali tijekom studija i uljepšali ovo životno razdoblje.

Najveća zahvala ide mojoj obitelji za strpljenje i bezrezervnu podršku tijekom čitavog studiranja, bez vas ništa od ovog ne bi bilo moguće.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA.....	VI
1. UVOD.....	1
2. VISOKO RADIOAKTIVNI OTPAD (VRAO) I ISTROŠENO NUKLEARNO GORIVO (ING).....	2
2.1 Klasifikacija radioaktivnog otpada.....	2
2.2 Topli radioaktivni materijali – visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo.....	4
2.3 Mogućnosti zbrinjavanja visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva.....	7
2.4 Gospodarenje s radioaktivnim otpadom u Republici Hrvatskoj.....	11
3. TEHNOLOGIJA ODLAGANJA VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA I ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA U MAGMATSKE (KRISTALINIČNE) STIJENE.....	13
4. LABORATORIJSKI MODELI ODLAGANJA VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA I ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA U KRISTALINIČNE STIJENE.....	17
4.1.1 Češka.....	17
4.1.2 Švicarska.....	21
5. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE UTJECAJA GRIJAČA NA BENTONIT I STIJENU – MODEL ODLAGANJA VRAO I ING.....	28
5.1 Priprema eksperimenta.....	28
5.2 Mjerni uređaji i sustav za grijanje.....	32
6. MJERENJA I REZULTATI.....	49
7. RASPRAVA I ZAKLJUČAK.....	56
8. LITERATURA.....	58

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Privremeno skladištenje ING u bazenu s bornom vodom (USA, 2011).....	5
Slika 2-2. Konceptualno rješenje za izolaciju VRAO (Veinović et al., 2014).....	8
Slika 2-3. KBS-3V (plavo) i KBS-3H (narančasto) tip odlagališta (SKB) (Končić et al., 2013)	9
Slika 2-4. Finski dizajn bakreno-željeznog spremnika za VRAO (Quintessa, 2013)	10
Slika 2-5. Koncept odlaganja istrošenog nuklearnog goriva (Quintessa, 2013)	10
Slika 2-6. Geografski smještaj Trgovske gore (Google Earth, 2015).	12
Slika 3-1. Metode uzlaznog i silaznog bušenja (Kujundžić, 2012).	16
Slika 4-1. Vertikalni presjek eksperimenta (Svoboda i Vasicek, 2008).	18
Slika 4-2. Horizontalni presjek eksperimenta (Svoboda i Vasicek, 2008).	19
Slika 4-3. Uzorkovanje (Svoboda i Vasicek, 2008).	20
Slika 4-4. Koncept odlaganja VRAO i ING u projektu FEBEX 1 (Grimsel, 2015)	22
Slika 4-5. Lokacija FEBEX eksperimenta (Grimsel, 2015)	23
Slika 4-6. Pogled na tunel prilikom ugradnje spremnika (Grimsel, 2015).	23
Slika 4-7. Ugradnja grijača u bentonitni blok (Grimsel, 2015)	24
Slika 4-8. Prikaz senzorskih očitavanja (Grimsel, 2015)	25
Slika 4-9. Betonski čep (Grimsel, 2015)	26
Slika 5-1. Fizikalni model eksperimenta (Veinović, 2015).....	28
Slika 5-2. Bušenje glavne bušotine.....	29
Slika 5-3. Glavna bušotina.....	29
Slika 5-4. Uzorak stijene	30
Slika 5-5. Pomoćne bušotine (označene strelicama).	30
Slika 5-6. Skica uzorka stijene s odnosima dimenzija i razmaka bušotina.	31
Slika 5-7. Uzorak stijene s betonom dodanim radi korekcije oblika glavne bušotine.....	31
Slika 5-8. Dodavanje bentonitne ispune	32

Slika 5-9. Senzor <i>Dallas DS18B20</i> s feritnom jezgrom.	33
Slika 5-10. Čvorište	34
Slika 5-11. <i>Arduino Nano</i>	34
Slika 5-12. Postupak umjeravanja senzora.	35
Slika 5-13. Umjeravanje senzora na temperaturi od 90°C.	36
Slika 5-14. Sučelje pri kontroli umjeravanja jednog od senzora kontrolirano programom <i>LabVIEW</i> na 60°C.	36
Slika 5-15. Sustav za grijanje.	37
Slika 5-16. umjeravanje sustava za grijanje.	38
Slika 5-17. Shematski prikaz SiO ₄ -tetraedar – lijevo i mreža SiO ₄ -tetraedara desno (Murray, 2007).	40
Slika 5-18. Shematski prikaz Al-oktaedra – lijevo i mreža Al-oktaedara – desno (Murray, 2007).	40
Slika 5-19. Struktura montmorilonita (Murray, 2007).	41
Slika 5-20. Korišteni bentonit <i>Volclay MX80</i>	42
Slika 5-21. Uzorak stijene na kojem je provedeno istraživanje.	42
Slika 5-22. Primarni fenokristal plagioklasa (Pl).	44
Slika 5-23. Vulkansko staklo devitrificirano velikim dijelom u klorit.	44
Slika 5-24. Dio vulkanskog stakla sa žuto-smeđim sferulitima	45
Slika 5-25. Sferuliti nastali procesom devitrifikacije	45
Slika 5-26. Žilice u stijeni	46
Slika 5-27. Duž pukotina je na par mjesta iz hidrotermalnih otopina oboren barit	46
Slika 5-28. Kristalizacija prehnita (Prh) u žilicama uzorka.	47
Slika 6-1. Početak eksperimenta.	48
Slika 6-2. Pokretanje mjerenja i bilježenja podataka	48
Slika 6-3. Grafikon temperatura pokusnog mjerenja.	50
Slika 6-4. Grafikon TEMPERATURA/VRIJEME drugog mjerenja	52

Slika 6-5. Pad temperature s udaljenošću od grijača (0-2 cm bentonit, 2-20 cm bazalt)	53
Slika 6-6. Pukotina između bentonitnog tampona i stijene, nastala nakon završetka ispitivanja i hlađenja sustava	53

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Klasifikacija RAO (Veinović et al., 2014; Levanat, 1997; IAEA, 2009).	3
Tablica 3-1. Usporedba koncepata za duboko geološko odlaganje visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva (Kujundžić, 2012).	14
Tablica 4-1 Specifikacije grijača (Grimsel, 2015)	25
Tablica 5-1. Rezultati umjeravanja senzora (prosječne mjerene temperature očitane na pojedinim senzorima u odnosu na zadanu)	35

POPIS KRATICA

APO - Agencija za opasni otpad

DZRNS - Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost

IAEA - International Atomic Energy Agency (Međunarodna agencija za nuklearnu energiju)

IMI - Institut za medicinska istraživanja

ING - Istrošeno nuklearno gorivo

IRAO - Izuzeti otpad

IRB - Institut Ruđer Bošković

NEK - Nuklearna elektrana Krško

NN - Narodne novine

NRAO - Nisko radioaktivni otpad

NSRAO - Nisko i srednje radioaktivni otpad

RAO - Radioaktivni otpad

RH - Republika Hrvatska

RS - Republika Slovenija

SRAO - Srednje radioaktivni otpad

UFC - Used Fuel Container (prototip spremnika istrošenog nuklearnog goriva)

VKRAO - Vrlo kratkoživi otpad

VNRAO - Vrlo nisko radioaktivni otpad

VRAO - Visoko radioaktivni otpad

1. UVOD

Pod radioaktivnim otpadom (RAO) prema definiciji Međunarodne agencije za atomsku energiju (*International Atomic Energy Agency* – IAEA) podrazumijevaju se oni onečišćeni materijali koji nisu predviđeni za daljnje korištenje, a koji sadrže radioaktivne izotope u koncentracijama koje su iznad graničnih vrijednosti minimalno dozvoljene radioaktivnosti određene posebnim zakonskim propisima od strane nadležnih tijela (IAEA, 2009).

RAO uključuje materijale koji nisu predviđeni za daljnje korištenje, a koji sadrže radioaktivne izotope specifičnih aktivnosti većih od granične vrijednosti propisane zakonom. RAO može nastati u raznim djelatnostima (medicini, industriji, istraživanjima, vojnoj industriji, rudarskim radovima i dr.), a može se pojaviti u širokom rasponu koncentracije radionuklida i u različitim fizičkim i kemijskim oblicima. Iskorišteno nuklearno gorivo (ING) može se definirati kao: nuklearno gorivo koje je prošlo fisijski gorivi ciklus u nuklearnom reaktoru, više ne podržava energetske iskoristivu nuklearnu reakciju, a emitira znatnu količinu topline i radijacije te sadrži potomke fisibilnih materijala (Nogolica i Veinović 2015). Najveće količine RAO nastaju u procesu proizvodnje električne energije (u nuklearnim reaktorima). Mogućnosti gospodarenja RAO-m i ING-om su brojne.

Republika Hrvatska (RH) i Republika Slovenija (RS) suvlasnice su nuklearne elektrane Krško (NEK). U skladu s bilateralnim sporazumom svaka od republika ima odgovornost za konačno odlaganje polovine RAO koji nastaje tijekom rada i nakon razgradnje nuklearne elektrane Krško predviđene za 2023. godinu. Ukupna količina otpada procijenjuje se na 18 000 m³ (Strategija, 2014). Osim RAO iz NEK, Hrvatska mora zbrinuti i otpad iz industrije, medicine i istraživanja. U slučaju izgradnje vlastitog odlagališta NRAO i SRAO kao najizglednija lokacija u RH nameće se Trgovska Gora, dok se lokacija za odlaganje VRAO i ING nije tražila do sada.

Cilj ovog diplomskog rada je izrada laboratorijskog modela odlagališta VRAO i ING te razvijanje tehnologija za in situ mjerenja.

2. VISOKO RADIOAKTIVNI OTPAD (VRAO) I ISTROŠENO NUKLEARNO GORIVO (ING)

2.1 Klasifikacija radioaktivnog otpada

U državama u kojima se koristi nuklearna tehnologija, približno 90 % nastalog otpada je NRAO koji doprinosi 1 % ukupnoj radioaktivnosti, 7 % je SRAO koji doprinosi 4 % ukupnoj radioaktivnosti i 3 % je VRAO koji doprinosi 95 % ukupnoj radioaktivnosti (McGinnes, 2007).

Tijekom vremena razvili su se različiti sustavi za klasificiranje RAO temeljeni na svojstvima koja su od značaja isključivo za pojedina postrojenja ili okolnosti u kojima se javlja RAO. U određenim slučajevima, međusobno različiti klasifikacijski sustavi mogu uzrokovati poteškoće pri uspostavi dosljedne i koherentne nacionalne politike gospodarenja otpadom i provedbi strategije gospodarenja, a potencijalno mogu dovesti i do smanjenja razine sigurnosti. Ujedno, time je otežana komunikacija na nacionalnoj i međunarodnoj razini. Međunarodna agencija za atomsku energiju (*International Atomic Energy Agency*– IAEA) djeluje najviše kao međunarodno savjetodavno tijelo, po pitanju RAO i nuklearne energije IAEA-ini dokumenti nisu obvezujući, već služe kao vodilja državama da razviju i uspostave vlastite legislativne okvire. Pristup IAEA kao kriterij za kategorizaciju otpada izdvaja vrijeme poluraspada radionuklida, brzinu kontaktne doze, razinu toplinske snage u otpadu i intenzitet zračenja koji bitno utječe na vrstu i debljinu štitova i barijera koji su potrebni kako bi se sigurno rukovalo s otpadom i kako bi se izolirao otpad (IAEA, 1994). U skladu s definiranim smjernicama, izvedeno je šest kategorija otpada koje se koriste kao osnova za daljnje klasifikacijske sustave (IAEA, 2009), a predstavljene su u tablici 2-1.

Prema Uredbi o uvjetima te načinu zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih zatvorenih radioaktivnih izvora i izvora ionizirajućeg zračenja (NN 44/08) koji se namjeravaju dalje koristiti, radioaktivni otpad je u Republici Hrvatskoj klasificiran je u skladu s klasifikacijom Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA).

Tablica 2-1. Klasifikacija RAO (Veinović et al., 2014; Levanat, 1997; IAEA, 2009).

Naziv	Skraćenica	Opis
Izuzeti radioaktivni otpad	IRAO	Otpad koji zadovoljava kriterije za izuzimanje ili isključenje iz regulatornog nadzora.
Vrlo kratkoživi radioaktivni otpad	VKRAO	Otpad koji može biti zbrinut nekoliko godina i naknadno izuzet iz regulatorne kontrole u skladu s nalogom odobrenim od strane regulatornog tijela.
Vrlo nisko radioaktivni otpad	VNRAO	Otpad koji ne mora nužno zadovoljiti kriterije IRAO, no ne zahtjeva visoku razinu izolacije. Pogodan je za zbrinjavanje u pripovršinskim odlagalištima uz umjerenu regulatornu kontrolu. Takva odlagališta također mogu sadržavati i druge vrste opasnog otpada. Tipičan otpad u ovoj kategoriji sadrži zemljane materijale i jalovinu s niskom razinom aktivnosti. Koncentracije dugoživičih radionuklida općenito su vrlo ograničene.
Nisko radioaktivni otpad	NRAO	Otpad koji je iznad razine izuzimanja, ali s ograničenim količinama dugoživičih radionuklida. Ovaj otpad zahtjeva robustan sustav izolacije. Pogodan je za zbrinjavanje u umjetnim pripovršinskim postrojenjima u trajanju od nekoliko stotina godina. NRAO može sadržavati kratkožive radionuklide na višim razinama aktivnosti kao i dugožive radionuklide na relativno niskim razinama aktivnosti.
Srednje radioaktivni otpad	SRAO	Otpad koji zbog svog sadržaja, posebno dugoživičih radionuklida, zahtjeva veći stupanj izolacije od one osigurane pripovršinskim odlagalištem. Međutim, toplina nastala radioaktivnim raspadom uopće nije regulirana ili je samo djelomično regulirana. SRAO može sadržavati dugožive radionuklide, posebno radionuklide koji se neće raspasti na razinu aktivnosti prihvatljivu za pripovršinska odlagališta za vrijeme u kojem se moguće osloniti na institucionalnu kontrolu. Stoga otpad u ovoj kategoriji zahtjeva odlaganje na većim dubinama, od nekoliko desetaka metara do nekoliko stotina metara.
Visoko radioaktivni otpad	VRAO	Otpad s razinama aktivnosti dovoljno velikim da radioaktivnim raspadom proizvodi značajne količine topline ili otpad s velikim količinama dugoživičih radionuklida. Opće priznata opcija za odlaganje VRAO je zbrinjavanje u dubokim i stabilnim geološkim formacijama, obično na dubini od 400 do 1000 metara. Prema Uredbi o uvjetima te načinu zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih zatvorenih radioaktivnih izvora izvora ionizirajućeg zračenja koji se ne namjeravaju dalje koristiti (NN 44/08) radioaktivni otpad u Republici Hrvatskoj (RH) klasificiran je u skladu s klasifikacijom Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA).

2.2 Topli radioaktivni materijali – visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo

Visoko radioaktivni otpad (VRAO) ima visok aktivitet, te stoga generira značajne količine topline koja nastaje radioaktivnim raspadom (termalna aktivnost veća od 2 kW/m^3) ili sadrži visoku koncentraciju dugoživućih radionuklida ($> 4 \text{ Bq/t}$ tj. 4000 Bq/g) koju treba uzeti u obzir prilikom projektiranja odlagališta za takav otpad. Unatoč smanjivanju radioaktivnosti tijekom vremena, takva će obilježja u pravilu zadržati još stoljećima. VRAO najvećim dijelom nastaje u postrojenjima za preradu ING i potencijalna je opasnost za stanovništvo i okoliš za razdoblje od više tisuća godina. VRAO je izvor ne samo radioaktivnog zračenja nego i toplinske energije (energija radioaktivnog zračenja se kod interakcije s okolnim materijalom pretvara u toplinu), pa treba pri skladištenju predvidjeti i odgovarajući odvod topline na okolni materijal i računati sa zagrijavanjem tog materijala. Odlaganje u duboke, stabilne geološke formacije sa niskom propusnošću, koje sadrže podzemne vode s niskom koncentracijom soli, te imaju slabe alkalne reakcije i reduktivna svojstva na dubinama od 400 do 1000 m ispod površine prihvaćeno je kao tehnologija kojom se može dugoročno riješiti problem visoko radioaktivnog otpada. Za odlaganje se uzimaju u obzir tri vrste geoloških medija: kamena sol, sedimentne stijene (npr. glina, lapori, škriljavci) i kristalinične stijene (npr. granit, gnajs) (Veinović et al., 2014; Levanat, 1997; IAEA, 2009).

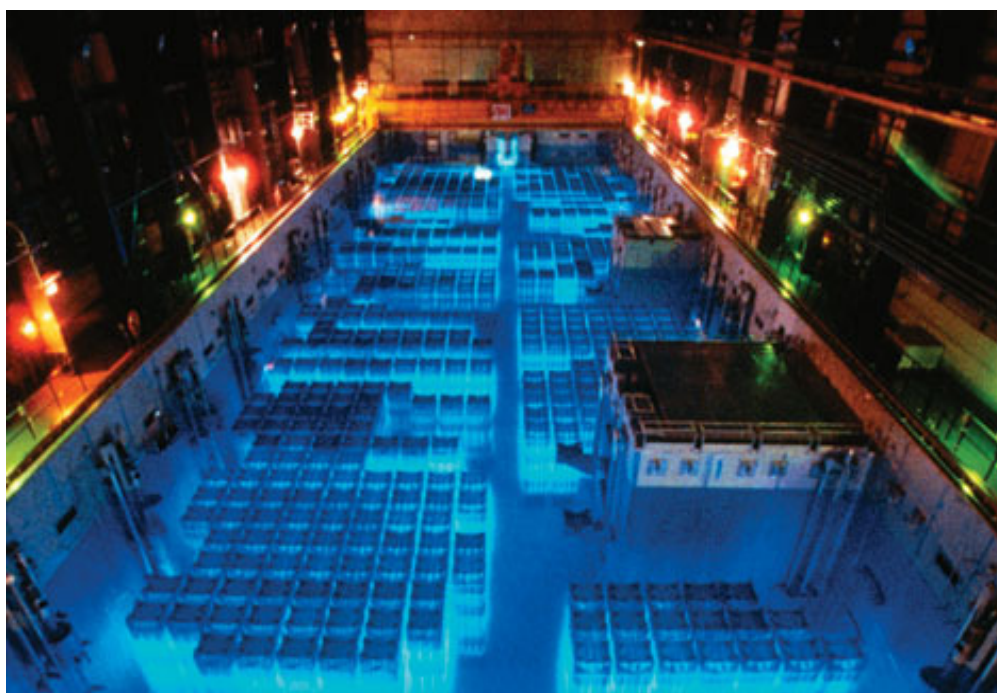
Istrošeno nuklearno gorivo (ING) se sastoji od gorivih elemenata koji su dosegili tehničku i ekonomsku granicu, sadrži značajne količine fisijskih materijala, druge aktinide i fisijske produkte. Ispušta veliku količinu topline (termalna aktivnost iznad 2 kW/m^3) zbog čega se privremeno skladišti u posebno izgrađenim bazenima – općenito unutar nuklearnog kompleksa. Ograničenje iskoristivosti goriva uvjetovano je sljedećim pojavama (Feretić et al., 2000):

- zatrovanjem goriva (fisijski proizvodi gomilaju se u gorivu kao jaki apsorber neutrona, što bi s vremenom dovelo do prekida lančane reakcije)
- tehnološkim oštećenjima gorivog materijala (promjene kristalne rešetke materijala, zbog intenzivnog razornog bombardiranja neutronima)
- oštećenja ostalih materijala u jezgri reaktora uslijed intenzivnog ozračivanja, korozije i dr.

Postoji mogućnost reprocesiranja istrošenog goriva kako bi se iz njega odvojilo gorivo koje se može ponovo koristiti u reaktoru čime nastaje visokoradioaktivni otpad, plutonij, novo gorivo i neke druge vrste otpada. Iako se mijenjaju značajke istrošenog goriva, reprocesiranje ne otklanja potrebu za geološkim odlagalištem (Levanat, 1997).

U slučaju da se prerada vrši “obogaćivanjem” radi djelomičnog ponovnog korištenja onda se radi o zatvorenom gorivom ciklusu. Preradom istrošenog nuklearnog goriva iskorištava se njegova preostala energetska vrijednost, a u suprotnom istrošeno nuklearno gorivo predstavlja materijal koji se ne naziva otpadom, ali se s njim postupa kao s otpadnim (nekorisnim) materijalom.

Otvoreni gorivi ciklus je onaj ciklus u kojem se ne koristi iskorišteno gorivo nego se odmah pristupa skladištenju. Vremenski period skladištenja goriva kod otvorenog ciklusa je relativno dug, može trajati od 4 godine sve dok se ne donese konačna odluka o odlaganju istrošenih gorivih elemenata. Takvo gorivo, prema svojem aktivitetu, predstavlja materijal nalik na VRAO. Aktivnost ING izjednačuje se nakon 1000-10 000 godina skladištenja s aktivnošću radioaktivnosti izvorne rude urana (Feretić et al. 1995; Neall et al., 2008). ING se u većem broju zemalja ne smatra RAO-m, već se razmatra kao zasebna kategorija (Veinović et al., 2014).



Slika 2-1. Privremeno skladištenje ING u bazenu s bornom vodom (USA, 2011)

Kod suhih spremnika kao glavni problem se nameće rasipanje preostale topline koju generira ING. Temperatura goriva mora biti održavana ispod 160°C kako bi se izbjegla njegova oksidacija. Postoje tri načina prijenosa topline koja se treba uzeti u obzir pri pohrani ING u spremnik: kondukcija, konvekcija i radijacija (zračenje). Kondukcija i konvekcija su dominantni načini prijenosa topline na površinu spremnika. Prijenos topline zračenjem postaje značajan kada je temperatura goriva vrlo visoka (Hussain i Sait, 2012). Maksimalna temperatura šipki za gorivo unutar spremnika iznosi oko 300°C, računa se pod pretpostavkom prijenosa topline zračenjem i kondukcijom kroz plin između šipki goriva i spremnika. Maksimalne površinske temperature spremnika kreću se između 100 °C i 125 °C. Temperatura ove bimetalne strukture se u odlagalištu smanji u roku od nekoliko tisuća godina od najviše 100 °C do oko + 10 °C (Posiva, 2005).

Za privremeno odlaganje VRAO i ING koriste se bazeni s bornom vodom (slika 2-1). Mokro skladištenje zahtijeva posebnu brigu za održavanje optimalne kemije vode (npr. PH vrijednost, uklanjanje kloridnih i sulfatnih nečistoća, vodljivost). Također je utvrđeno da je kontroliranje temperature vode ključno za održavanje strukturnog integriteta ING te također za izbjegavanje strukturnih oštećenja sa samom postrojenju. Kao posljedica lošeg održavanja kemije vode javlja se korozija koja može izazvati značajne probleme i oštećenja na postrojenju te samim time i povećati troškove cijelog postupka. VRAO i ING moraju provesti najmanje 5-10 godina u bazenu s bornom vodom prije nego se pristupi suhom skladištenju (Hussain i Sait, 2012).

Za potrebu provedbe eksperimentalnog dijela izrade diplomskog rada pretpostavljeno je da će se odlagati iskorišteno nuklearno gorivo, s temperaturom na površini spremnika 90°C. Razlozi za to su:

1. Prerada ING iz nuklearne elektrane Krško (NEK) je malo vjerojatna, budući da je gorivo u startu bilo nisko obogaćeno (poradi specifičnosti vezanih uz *Westinghouse*-ov reaktor).
2. Gorivo će se do daljnjeg (trenutka odlaganja) skladištiti prvo u bazenu, a potom u suhom skladištu pa s obzirom na ne postojanje programa za zbrinjavanje ING iz NEK u ovom trenutku, za pretpostaviti je da će se temperatura ING spustiti toliko da na površini stijenke spremnika bude oko 100°C.
3. Slične temperature korištene su i u drugim eksperimentima ovog tipa (vidi poglavlje: 4.2).

2.3 Mogućnosti zbrinjavanja visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva

Zajednička osobina svih strategija za gospodarenje ING ili VRAO je trajno odlaganje u duboke geološke formacije s malom propusnošću. VRAO, bilo u vitrificiranom obliku, ili u obliku ING, najopasniji je neiskoristivi produkt nuklearnog gorivog ciklusa. Iako je teoretski VRAO moguće odlagati u pripovršinskim odlagalištima, toplina nastala raspadom dugoživućih radionuklida negativno bi utjecala na sustav barijera i u konačnici izložila otpad okolišu (IAEA 2003). U većini zemalja, vrijeme za koje je potrebno dokazati sigurnost i trajnost spremnika za odlaganje iznosi 10 000 godina. Stoga se osobita pozornost daje izboru lokacije (tj. geološke formacije) u kojoj će odlagalište biti smješteno. Neke geološke strukture kao što su granit, bazalt, tuf (sedra), glina i posebno solne formacije su stabilne nekoliko milijuna godina, što ih čini pogodnim za odlaganje ING i VRAO. Odlaganje ING i VRAO izdvojenog u procesu prerade tehnološki je vrlo zahtjevno ali izvedivo (Szakálos et al., 2008).

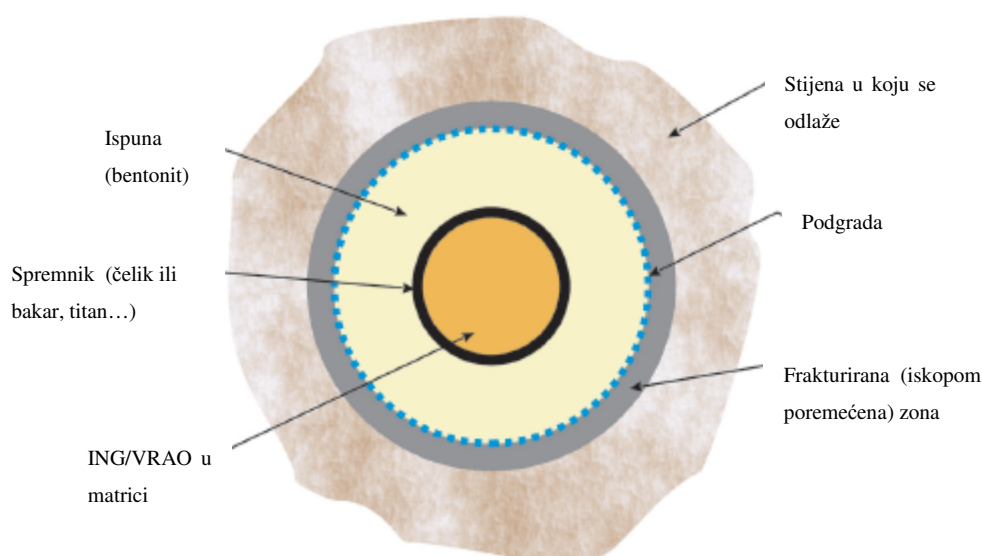
Ciljevi dubokog geološkog odlaganja (IAEA, 2006) su:

- izolirati otpad dok većina radioaktivnosti ne opadne na prihvatljivu razinu (10 000-100 000 godina)
- izolacija otpada od biosfere i značajno smanjena vjerojatnost nenamjernog ljudskog upada
- odgađanje značajne migracije radionuklida u biosferu do vremena u dalekoj budućnosti kada će veliki dio radioaktivnosti biti zanemarivo mala
- osigurati da eventualno stizanje radionuklida u biosferu bude na takvoj razini da mogući radiološki utjecaj u budućnosti bude prihvatljivo nizak.

Koncept dubokih podzemnih odlagališta temelji se na principima izgradnje rudnicima sličnih objekata. Objekti se otvaraju oknima ili spiralnim niskopima u kojima su instalirani izvozni strojevi dimenzionirani za spuštanje teških spremnika s visoko radioaktivnim otpadom i posebnim sustavom za vjetrenje, uz filtriranje zraka za takvu vrstu objekata. Razrada horizontalnih prostorija za odlaganje sastoji se od sustava hodnika podijeljenih u odlagališna polja (Živković i Kovačević Zelić, 2002).

Osnovni tehnološki koncept odlaganja visoko radioaktivnog otpada temelji se na principu višestrukih prirodnih i inženjerskih barijera (slika 2-2). Prva inženjerska barijera

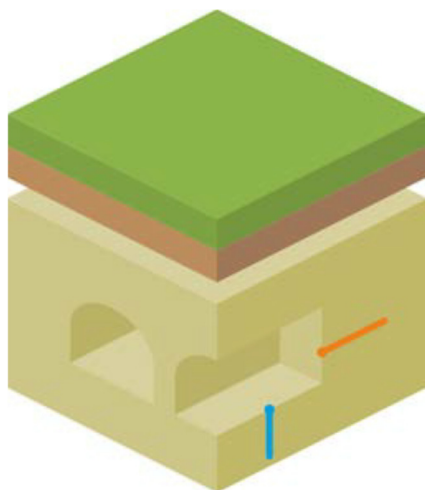
predstavlja kapsuliranje visokoaktivnog otpada u metalne spremnike. Nakon toga slijedi njihovo pohranjivanje u odlagališta izrađena u dubokim geološkim formacijama koje čine prirodnu barijeru te ispunjavanje slobodnog prostora različitim izolacijskim materijalima npr. bentonitom koji predstavlja drugu inženjersku barijeru. Potencijalnoj izgradnji odlagališta prethode dugotrajni i opsežni istražni radovi koji se u prvom redu odnose na izbor lokacije po vrlo zahtjevnim kriterijima. Nakon toga slijede ispitivanja u podzemnim laboratorijima radi utvrđivanja geoloških karakteristika izabrane lokacije.



Slika 1-2. Konceptualno rješenje za izolaciju VRAO (Veinović et al., 2014)

Odlagalište treba biti prilagođeno stijenskoj strukturi, što znači da odlagališni tuneli i bušotine ne smiju biti smještene unutar ili vrlo blizu glavnih (vodonosnih) diskontinuiteta izloženih posmičnim naprezanjima.

U švedskom i finskom konceptu odlagališta, istrošeno gorivo se odlaže u kratke vertikalne bušotine izbušene u podini odlagališnog tunela (KBS-3V) ili u horizontalnim bušotinama izbušenim u bokovima tunela (KBS-3H) (slika 2-3). Oko spremnika se nalazi bentonitni tampon. Funkcija tampona je ograničiti tok podzemne vode i zaštititi spremnik. Odlagališni tuneli se nakon ugradnje otpada zatrpavaju smjesom bentonita i matične stijene kako funkcija barijera ne bi bila ugrožena te kako bi se onemogućio tok podzemne vode hodnicima odlagališta. Materijal zapune mora posjedovati nisku propusnost, nisku stlačivost i dovoljan tlak bubrenja da kontakt između materijala zapune i stijene bude nepropustan. Osim toga, zatrpavanje mora biti dugoročno stabilno i ne smije štetno utjecati na barijere (Končić et al., 2013).



Slika 2-3. KBS-3V (plavo) i KBS-3H (narančasto) tip odlagališta (SKB)

(Končić et al., 2013)

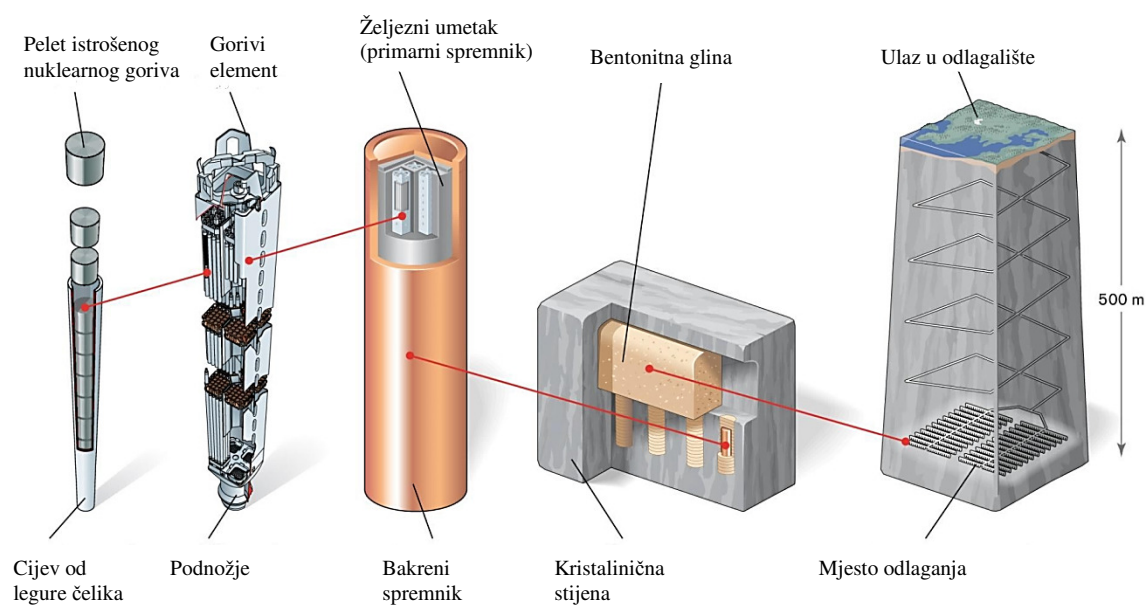
U Njemačkoj bi vertikalne bušotine trebale biti duboke oko 300 m te bi se spremnici VRAO trebali slagati jedan na drugi, sa tamponskom zaštitom između svakog spremnika.

Francuski i Belgijski dizajn predlažu horizontalne bušotine duge oko 40 m, a Švicarski dizajn može uključivati smještaj spremnika radijalno između zapune hodnika. U nekim slučajevima plitke i duge bušotine bi trebale biti napravljene bez podgrade tako da spremnik bude u izravnom kontaktu sa stijenom u kojoj se odlaže. Programi nekih zemalja sugeriraju upotrebu galerija kao velikih prostorija za odlaganje, brojni spremnici bili bi smješteni u blizini jedni drugih i odvojeni tampon materijalima (Veinović et al., 2014). Izbor materijala i dizajna za izradu spremnika za VRAO varira od kompozitnog (bakar-željezo) (slika 2-4) pa do egzotičnog kao što je titan.

Odnosi i položaji spremnika, gorivih elemenata i goriva u njima, unutar odlagališta ING (švedski model), prikazani su na slici 2-5.



Slika 2-4. Finski dizajn bakreno-željeznog spremnika za VRAO (Quintessa, 2013)



Slika 2-5. Koncept odlaganja istrošenog nuklearnog goriva (Quintessa, 2013)

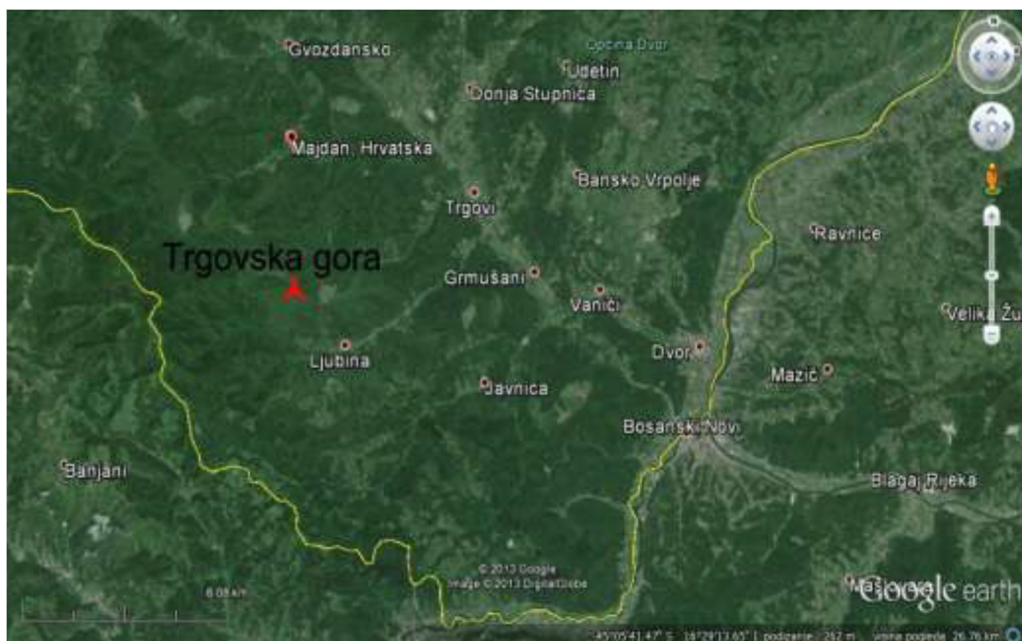
2.4 Gospodarenje s radioaktivnim otpadom u Republici Hrvatskoj

Prema podacima Državnog zavoda za radiološku sigurnost (DZRNS) i Agencije za opasni otpad (APO), godišnje se u RH uveze izvora aktivnosti od približno 10 TBq, osobito u obliku otvorenih izvora zračenja za medicinsku uporabu. Ostatak RAO nastaje istraživačkim aktivnostima, približno 200 l tekućeg otpada godišnje, aktivnosti 500 MBq uglavnom kontaminiranog s ^{14}C i ^3H (Strategija, 2014).

Radioaktivnog otpada koji je nastao na području Republike Hrvatske ima razmjerno malo i on potječe iz različitih područja primjene kao što su medicina (83%), industrija (15 %) te znanstveno-istraživački instituti (2%) (Strategija, 2009). DZRNS zadužen je za uspostavu i održavanje sustava zbrinjavanja RAO nastalog obavljanjem djelatnosti s radioaktivnim izvorima zračenja i pronalaženje i zbrinjavanje izvora bez posjednika. U Hrvatskoj je postavljeno i oko 60.000 ionizirajućih javljača dima te oko 500 radioaktivnih gromobrana na više od 1.500 zgrada i drugih objekata (Kučar-Dragičević et al., 1996). Do danas je privremeno uskladišteno oko 60 m³ radioaktivnog otpada i to na Institutu Ruđer Bošković (IRB) te Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI) u Zagrebu. Skladište na IRB ovlašteno je za obavljanje poslova skladištenja RAO od 1990. Raspoloživog je volumena od približno stotinjak m³, od čega je trenutno raspoloživo oko 75% za skladištenje (Strategija, 2009).

Budući da se radi o vrlo malim količinama otpada, gradnja odlagališta samo za taj RAO ne bi bila isplativa. Kako je Hrvatska suvlasnik Nuklearne elektrane Krško, javlja se potreba za izgradnjom odlagališta u koji bi se zbrinula i polovina NSRAO otpada nastalog u elektrani.

Nakon dugog eliminacijskog procesa, kao preferentna lokacija za odlaganje NSRAO u Hrvatskoj odabrana je Trgovska Gora. Trgovska gora smještena je 80 km jugoistočno od Zagreba u Sisačko-moslavačkoj županiji. Zauzima područje od oko 350 km² i pripada slivu rijeke Une (slika 2-6). Sjeveroistočna granica područja je uz potok Žirovac, a na jugozapadu i jugoistoku graniči s Bosnom i Hercegovinom.



Slika 2-6. Geografski smještaj Trgovske gore (Google Earth, 2015).

Lokacija za odlaganje VRAO i ING u RH nije tražena do sada, ali s vremenom će i taj problem postati aktualan. Kao neke od mogućih lokacija nameću se one sa stabilnim magmatskim stijenama (npr. Psunj, Papuk) čiji bi odabir za posljedicu imao primjenu „švedskog“ modela odlagališta (slika 2-3). Iz navedenog razloga u ovom radu se prezentira laboratorijski model odlaganja VRAO/ING u magmatskoj stijeni s bentonitom kao tamponskim materijalom (materijalom ispune).

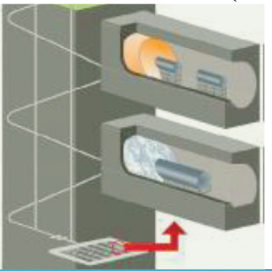
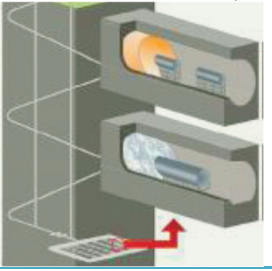
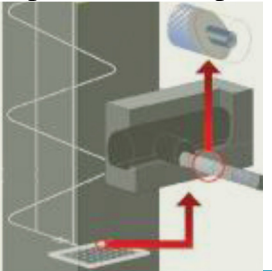
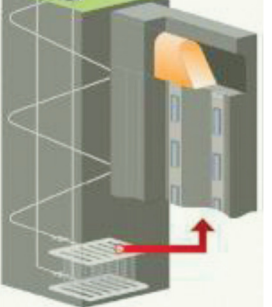
3. TEHNOLOGIJA ODLAGANJA VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA I ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA U MAGMATSKE (KRISTALINIČNE) STIJENE

Metamorfne i magmatske (kristalinične) stijene imaju nisku poroznost i visoku mehaničku čvrstoću te omogućuju stabilne uvjete rada tijekom faze izgradnje podzemnog odlagališta otpada. U tektonski poremećenim područjima mogu biti znatno raspucale (npr. japanski graniti) što se može odrediti u fazi istraživanja i što čini stijenu nepogodnom za odlagalište RAO (Veinović 2015). Posebno interesantne stijene za potencijalno odlagalište su metamorfozirani vulkanski tufovi i filiti. Po svojim geotehničkim svojstvima, filiti sa manjim udjelom kvarca nalaze se između šejla i izrazito metamorfoziranih stijena, odnosno granita. Relativno su male čvrstoće, male propusnosti i pokazuju potencijal samozatvaranja pukotina pod opterećenjem. Osim u tektonski poremećenim područjima, druge pukotine nisu prisutne (Šostarić i Neubauer, 2012).

Različite geološke sredine u različitim zemljama su dovele do različitih koncepata odlaganja. Glavna karakteristika najrazvijenijih koncepata odlaganja je da se spremnici sa istrošenim nuklearnim gorivom odlažu u vertikalne ili horizontalne bušotine, odnosno lateralno u hodnike. Tehnologija bušenja bušotina za odlaganje ovisi o konceptu odlaganja te geološkim i geomehaničkim karakteristikama stijene. Bušotine se iskopavaju mehanički strojevima koji daju puni profil bušotina, jer metoda iskopa bušenjem i miniranjem nije u skladu sa zahtjevima obzirom na hrapavost stjenki, širinu zone poremećene iskopom itd (Kujundžić, 2012).

U tablici 3-1. uspoređeno je nekoliko koncepata dubokog geološkog odlaganja VRAO i ING u različitim državama. Opisi u tablici uključuju: dizajn, podrijetlo, zrelost koncepta, konstrukcijske, operacijske i okolišne aspekte te koje države imaju koje koncepte u svojim programima. Neki od navedenih koncepata su dobro istraženi, dok se neki pojavljuju samo kao ideja mogućeg odlaganja. Izvedivost koncepta najviše će ovisiti o stijeni u kojoj se planira primijeniti kao i o obučenosti radnika, budući da izvedivost ne podrazumijeva samo mogućnost iskopa već i osiguranje dugotrajne sigurnosti odlagališta i trajnosti sustava u smislu ograničenja migracije radionuklida. Nije isključeno da će se u nekom od budućih odlagališta koristiti i dva različita koncepta odlaganja, zavisno o tome kakvi su spremnici i koja vrsta materijala se odlaže (VRAO i/ili ING).

Tablica 3-1. Usporedba koncepata za duboko geološko odlaganje visokoradioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva (Kujundžić, 2012).

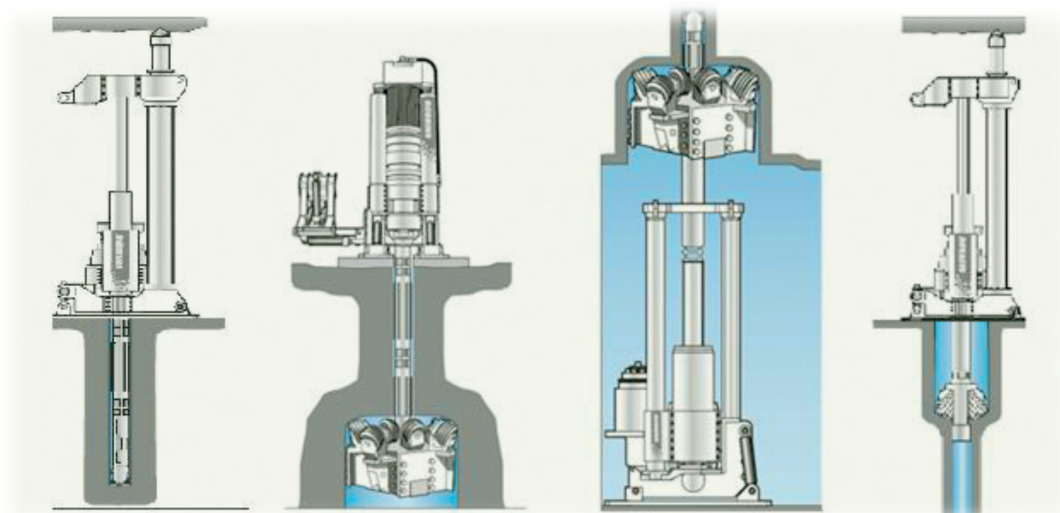
Ime i ilustracija koncepta (Baldwin et al. 2008).	Dimenzionalne karakteristike odlagališta	Razvoj koncepta
1. U tunelu (vertikalna bušotina) 	Sustav horizontalnih tunela na dubini od 400-700m. Tuneli oko 250m dugi i raspoređeni na udaljenosti od 40m. Na podu tunela, vertikalne bušotine u koje se odlaže će biti raspoređene na svakih 6m, svaka duboka 8m. Svaka bušotina je 1.75m u promjeru.	Švedska, Finska
2. U tunelu (aksijalno) 	Promjer tunela za odlaganje 3.7m za kristalinične stijene. Duljina tunela je 800m. Razmak između tunela za odlaganje je oko 40m.	Švicarska
3. U tunelu (aksijalno) 	Ovaj koncept je vrlo sličan konceptu 2. ali koristi dugoživući bakreni ili titanski spremnik sa dodatkom željeza kako bi se povećala mehanička čvrstoća spremnika.	Kanada
4. U tunelu (aksijalno) sa super spremnikom 	Spremnici su odloženi u horizontalnim bušotinama (Ø 1.75m duljine 7.83m) bušenim u oba zida odlagališnog tunela. Razmak između odlagališnih tunela je 60m.	Švedska, Finska
5. Duboke bušotine 	Otpadni paketi se odlažu u duge vertikalne bušotine, koje su kopane iz duboke unutrašnjosti, ili direktno iz odlagališnog tunela ili između gornje i donje radne galerije. U potonjem slučaju se rade bušotine velikog promjera (1.5 do 2m).	Kanada, Japan

Koncepti 2. i 3. podrazumijevaju tunele s relativno velikim kružnim promjerom za odlaganje spremnika s VRAO-om i ING-m, iako je samo koncept 2 dovoljno „zreo“ za provedbu s obzirom na 30 godina sustavnog istraživanja i razvoja. Bušotine velikog promjera karakteristične su i za ostale (1, 4 i 5) koncepte. Kao i koncept 3, koncept 1 je temeljen na dugotrajnim istraživanjima, dok koncept 4 još nije dovoljno zreo za provedbu iako je u velikom dijelu baziran na znanjima i iskustvima iz koncepta 1. Na konceptu 5 se provode dugotrajna istraživanja čije glavne smjernice uključuju testove sigurnosti i razvoj metoda koje će spriječiti da težina gornjih otpadnih paketa utječe na one ispod sebe (Kujundžić, 2012).

Nakon usporedbe relevantnih koncepata odlaganja u kristalinične stijene razvijenih od strane različitih država, vidljivo je korištenje velikih promjera bušotina (~ 0,6 do 2 m) za odlaganje spremnika VRAO-a i ING-a. Orijentacija bušotina može biti vertikalna, horizontalna ili pod blagim kutem, dok njihove duljine mogu varirati od 8 ili 9 do preko 200 metara. Unatoč različitim uvjetima u geološkim sredinama, sve države nastoje projektirati odlagalište na način da se izbjegne podzemna voda koja na razne načine otežava čitav proces. Odlaganje u kristalinične stijene je kvalitetno istraženo i spremno za provedbu (Kujundžić, 2012).

Tehnologija za iskop odlagališnih bušotina ovisi o odabranom konceptu odlaganja. Dizajn spremnika (za VRAO i ING) i tamponskog materijala kojim se oblaže značajno utječu na promjer bušotine. Iskop odlagališnih bušotina zahtijeva visok stupanj preciznosti u odnosu na ravninu bušenja, toleranciju na odstupanje od promjera bušotine i glatkoću površine stijenke (Kujundžić, 2012).

Švedska kompanija SKB je provela istraživanje na metodama za iskop dubokih odlagališnih bušotina za vlastito ING, te je predložena metoda uzlaznog bušenja. Uzlazno bušenje je kontinuirano, mehanička metoda vertikalnog (ili gotovo vertikalnog) bušenja otvora koji se koriste za ventilaciju, puteva za ljude te otvora za transport rude ili otpada iz rudnika. Strojevi za uzlazno bušenje su korišteni u rudarskim i u građevinskim projektima za bušotine promjera 0,6 – 6 metara te do 1000 metara duljine, također imaju mogućnost bušenja pod kutem od 45° od horizontale. U upotrebi su tri metode (prikazane na slici 3.1) uzlaznog bušenja: konvencionalno uzlazno bušenje, „slijepo“ bušenje i bušenje s proširenjem prema dolje.



Slika 3-1. Metode uzlaznog i silaznog bušenja (Kujundžić, 2012)

Konvencionalna metoda bušenja je najčešće korištena metoda od tri navedene. Prvo se buši „vodeća“ bušotina između gornje i donje razine. Nakon što je izbušena uklanja se svrdlo te se na glavu stavlja proširivač, koji rotira i kreće se vertikalno prema gore. Uslijed gravitacije bušenjem otklonjeni materijal pada na nižu razinu.

„Slijepo“ bušenje je najteža metoda uzlaznog bušenja, koristi se kod iskopavanja tamo gdje je ograničen ili nema pristupa gornjoj razini. Nakon što je stroj postavljen, puni promjer bušenja odvija se prema gore. Uslijed gravitacije bušenjem otklonjeni materijal pada prema dolje, odbija se od stroja, te se prikuplja na donjoj razini. Noviji strojevi su sad u mogućnosti izbušiti „vodeću“ bušotinu te je zatim proširiti.

Kod metode proširivanjem prema dolje, „vodeća“ bušotina se buši vertikalno prema dolje dok se ne spoji sa donjom razinom pristupa. Završni promjer bušotine povećava se proširenjem iz smjera gornje razine prema donjoj. Bušenjem otklonjeni materijal pada prema dolje kroz „vodeću“ bušotinu. Geometrijski zahtjevi bušotine se postižu gornjim i donjim stabilizatorima.

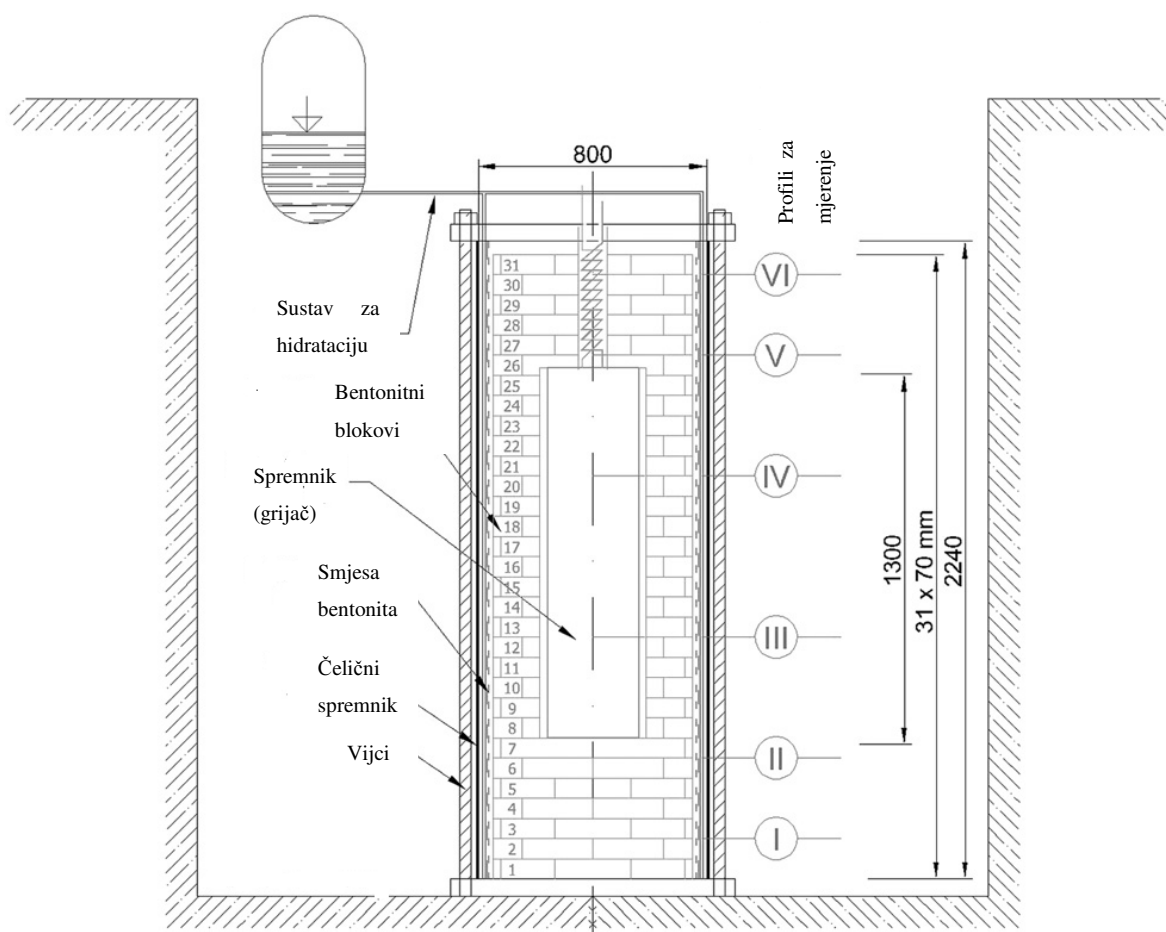
4. LABORATORIJSKI MODELI ODLAGANJA VISOKO RADIOAKTIVNOG OTPADA I ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA U KRISTALINIČNE STIJENE

U svijetu postoji više različitih laboratorijskih simulacija za odlaganje VRAO i ING. Svaka država ih razvija na način tako da zadovolji svoje potrebe u smislu tehnologije odlaganja, količine otpada te dostupne geologije odlagališta. U poglavljima koja slijede dano je par primjera laboratorijskih simulacija.

4.1. Češka

Na sveučilištu u Pragu je proveden tzv. *Mock-Up experiment*, u kojem je simuliran vertikalni položaj spremnika s radioaktivnim otpadom. Fizikalni model se sastoji od barijera sastavljenih od bentonitnih blokova, bentonitne zapune u prahu, grijača te sustava za hidrataciju i monitoring. Osnovni materijal koji se koristio u eksperimentu je češki bentonit sa Rokle nalazišta (85%), kvarcni pijesak (10%) i grafit (5%) (Svoboda i Vasicek, 2008).

U prvoj fazi eksperimenta uključen je samo grijač (slika 4-1) bez unosa vode. Nakon 6 mjeseci započela je druga faza uvođenjem vode kroz hidrationski sustav. Ova faza je trajala otprilike tri godine, nakon čega je grijač isključen. Nakon 30 dana hlađenja, započeta je faza demontaže. Postupak demontaže proveden je u skladu s vrlo detaljnim rasporedom projekta i u velikoj mjeri je dokumentiran. Prilikom demontaže uzeti su različiti uzorci iz eksperimenta te su podvrgnuti multidisciplinarnim ispitivanjima kako bi se dobilo što više informacija o utjecaju cijelog procesa na materijale u eksperimentu. Kao bitni parametri uzeti su: promjena distribucije gustoća, distribucija vodenog sadržaja, propusnost, promjene u tekućim granicama, tlak oticanja te toplinska vodljivost. Promjene u navedenim svojstvima su dobar pokazatelj promjena strukture ili sastava materijala (Svoboda i Vasicek, 2008). Uvjeti u eksperimentu nisu bili homogeni, glavni razlog je u tome što je temperatura grijača bila niža u dnu eksperimenta te zato što se temperaturni gradijent nalazio između središnje osi i vanjske površine. Kako bi se dobiveni rezultati uskladili s uvjetima koji su vladali u eksperimentu korištene su „karte“ distribucije topline. Korištenje ove tehnike olakšalo je ispitivačkom timu da lakše prepoznaju promjene koje se događaju u eksperimentu. Danas je poznato da se najveći broj promjena dogodio u neposrednom području gornje trećine grijača koji se koristio u eksperimentu (Svoboda i Vasicek, 2008).



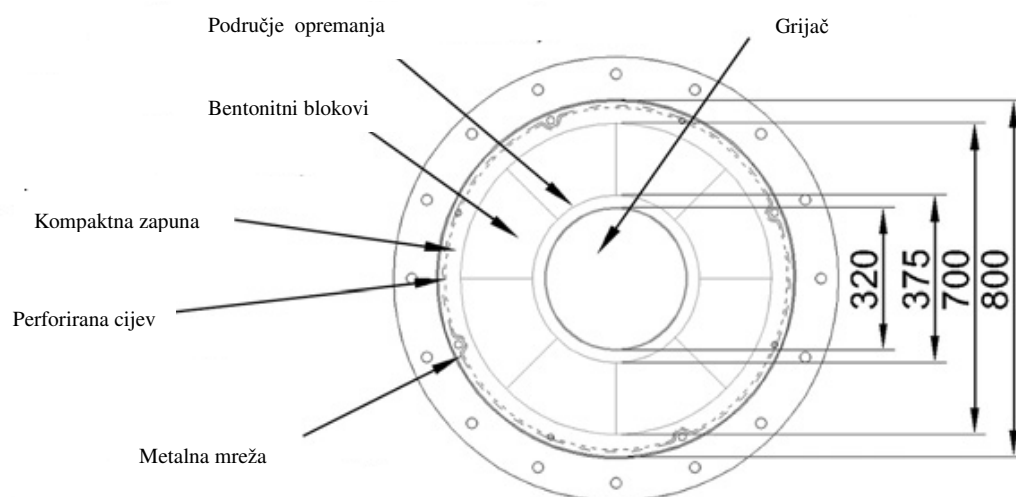
Slika 4-1. Vertikalni presjek eksperimenta (Svoboda i Vasicek, 2008)

Eksperiment se izvodio u čeličnom cilindričnom spremniku (slika 4-2) dizajniranom da izdrži velike tlakove za koje se očekivalo da će se pojaviti uslijed bubrenja bentonita. Debljina stijenke cilindričnog spremnika je iznosila 7,7 mm, dok je vanjski promjer spremnika iznosio 800 mm. Dno spremnika se sastojalo od 50 mm debele baze zavarene za dno spremnika (Svoboda i Vasicek, 2008). Veći dio prostora između grijača i vanjske stijenke spremnika bio je ispunjen s preko 300 blokova bentonita, ostatak prostora su popunjavali konstrukcijski spojevi (zračni raspori) između blokova i grijača kao i vanjsko punjenje koje se sastojalo od ručno zbijenog bentonitnog praha. Bentonitni blokovi su bili 70 mm debljine i klinastog oblika kako bi što kvalitetnije okružili grijač i zračne raspore koji su značajno olakšali proces u trenutku kad je trebalo ubaciti grijač u već izrađenu barijeru. Nekoliko bentonitnih blokova je ubačeno ispod i iznad grijača. Grijač je bio izveden te ugrađen kao dvije grijuće spirale unutar cilindra. Unutarnje stijenke cilindričnog spremnika su bile opremljene hidratacijskim sustavom, izvedenim u obliku četiri

perforirane cijevi, što je omogućavalo konstantno zasićenje bentonitne barijere vodom. Hidrationski sustav je bio odvojen od bentonitne barijere s dvije čelične (filtracijske) mreže, jednom grubom i jednom finom te je time omogućena jednolika raspodjela vode po čitavom obodu barijere. Eksperiment je bio osiguran pomoću 50 mm debelog gornjeg poklopca kroz koji je prolazilo 16 vijaka debljine 22 mm spajajući ga s gornjom pločom. Prostor između ploče i poklopca je bio osiguran brtvom (Svoboda i Vasicek, 2008).

Mineraloški sastav Ca-Mg bentonita s nalazišta Rokle je imao sljedeću raspodjelu: montmorilonit 64 %, ilit 10 %, kaolinit 5 %, kvarc 19% i kalcit 2% (Svoboda i Vasicek, 2008).

Monitoring Mock-Up eksperimenta je vršen uz pomoć 135 senzora. Instalirani uređaji sastojali su se od: 52 termometra , 50 tlačnih stanica, 13 indikatora vlažnosti i 20 tenzometara. Smješteni su u šest vodoravnih profila (slika 4-1), od kojih su dva bila montirana ispod grijača, dva uzduž svog vertikalnog profila i dva iznad grijača kako bi se osigurala maksimalna pokrivenost. Interval očitavanja iz senzora je iznosio 10 minuta te je pohranjen u bazu podataka u svrhu daljnje analize. Ukupno 36 korozivnih uzoraka (18 bakrenih, 18 na čeličnim limovima) se nalazilo u 5 profila (uz isključenje donjeg profila).



Slika 4-2. Horizontalni presjek eksperimenta (Svoboda i Vasicek, 2008)

Eksperiment je bio opremljen s 19 lukova za uzorkovanje s promjerima 32 mm ili 16 mm, koji su bili pozicionirani u tri horizontalna sloja. Temeljni uzorci su uzeti sa svih lokacija serijom preciznih rezova (slika 4-3), duljina svakog reza je iznosila oko 6 cm (Svoboda i Vasicek, 2008).

Blizu grijača (temperatura bentonita najbližeg grijaču nije prelazila 95°C) sadržaj gravimetrijske vode je pao s početnih 8-10% na 3%, dok se u ostatku bentonita sadržaj vode povećao na 21%. Ove vrijednosti su dobivene bušenjem i mjerenjem na kraju prve faze eksperimenta (Svoboda i Vasicek, 2008).

Nakon šest mjeseci započela je druga faza eksperimenta puštanjem vode kroz hidratacijski sustav. Voda je injektirana pod tlakom od 1 Mpa, dok je temperatura održavana jednakom kao i u prvoj fazi eksperimenta. Nakon završetka druge faze započeta je demontaža koja je trajala 35 dana, nakon koje je proveden te se još provodi niz testova na dobivenim uzorcima. Do danas su završeni testovi gustoće i testovi koji pokazuju sadržaj vode u eksperimentu, rezultati pokazuju da saturacija prelazi 90% dok je bentonit pokazao zadovoljavajuća svojstva, te je popunio sve nastale šupljine tijekom eksperimenta. Druge geotehničke analize koje su u tijeku pokazuju da nije bilo vidljivog učinka na propusnost materijala, dok test Attenbergovih granica pokazuje blage varijacije, ipak nije zabilježena jasna ovisnost o temperaturi. Vrijednosti toplinske vodljivosti se kreću u granicama od 2,0-2,6 W/mK (Svoboda i Vasicek, 2008).

Demontaža Mock-Up eksperimenta je pružila golemu količinu novih podataka o ponašanju bentonitnih materijala u funkciji inženjerskih barijera. Također podaci prikupljeni tijekom eksperimenta pružaju vrijednu osnovu za provjeru niza matematičkih modela i sigurnosnih provjera te za cijeli niz multidisciplinarnih testova koji će se još provesti. Testovi koji su još uvijek u tijeku pokazuju da su se odvijale blage promjene u bentonitnom materijalu, ali te promjene nisu imale gotovo nikakav utjecaj na njegovu funkciju (Svoboda i Vasicek, 2008).

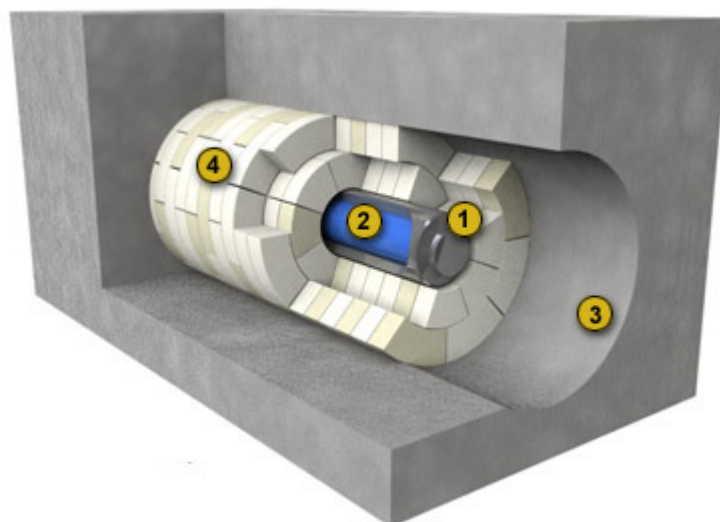


Slika 4-3. Uzorkovanje (Svoboda i Vasicek, 2008)

4.2 Švicarska

Podzemni testni poligon Grimsel nalazi se u Švicarskim alpama, osnovan je 1984 godine kao centar za podzemna istraživanja i razvoj, podržava širok raspon istraživačkih projekata o geološkom zbrinjavanju RAO. Laboratorij Grimsel pruža uvjete analogne odlagalištu VRAO i ING te tako omogućuje razvoj i testiranje opreme, metodologije i modela pod potpuno realnim uvjetima . Međunarodni partneri iz Europe, Azije i Sjeverne Amerike zajedno rade na ovom jedinstvenom pogonu.

U sklopu projekata o geološkom zbrinjavanju RAO proveden je projekt FEBEX, u kojem se pristupilo projektiranju i izradi inženjerskih barijera koje bi se koristile pri odlaganju VRAO i ING (slika 4-4). Projekt je podijeljen na dva dijela FEBEX 1 i FEBEX 2.



Slika 4-4. Koncept odlaganja VRAO i ING u projektu FEBEX 1 (Grimsel, 2015)

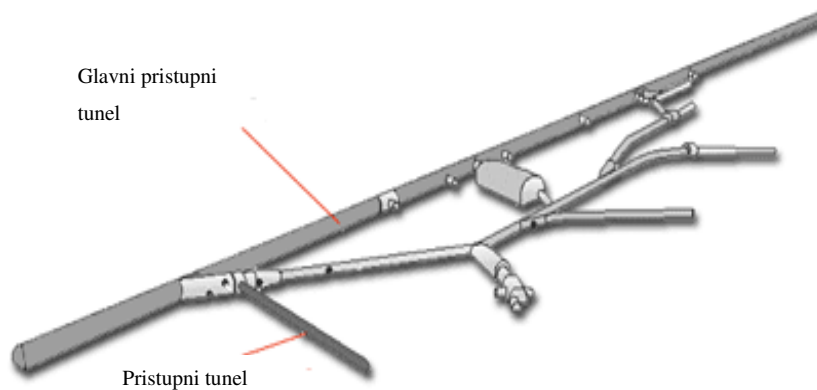
Koncept za odlaganje VRAO i ING u eksperimentu FEBEX 1 uključuje (slika 4-4): čelični spremnik (1), koji sadrži VRAO i ING (2) postavljen u horizontalnoj ravnini (3), okružen glinenom barijerom sastavljenom od glinenih blokova (4) napravljenih od zbijenog bentonita visoke gustoće. Odlaze se u duboke kristalinične stijene.

Osnovni cilj eksperimenta FEBEX bio je:

- demonstracija izvedivosti (proizvodnja i montaža) inženjerskih barijera temeljenih na Španjolskom konceptu odlaganja ING u kristalinične stijene
- razvijanje metodologije i modela za procjenu termo-hidro-mehaničkih i termo-hidro-geokemijskih svojstava projektiranih inženjerskih barijera
- monitoring.

Eksperiment se sastojao od „in situ“ (1:1) ispitivanja koristeći grijač za generiranje topline kao zamjenu za zračenje iz radioaktivnog spremnika, inženjerskih bentonitnih blokova te više od 600 senzora koji kontinuirano prate relevantne parametre (npr. temperaturu, sadržaj vode, tlak oticanja itd). Uz to se u Madridu izvodi Mock-Up test (omjera 1/4 u odnosu na Grimsel) te još niz laboratorijskih testova.

„In-situ“ ispitivanja provodila su se u tunelu iskopanom u sjevernoj zoni testnog poligona Grimsel (slika 4-5).

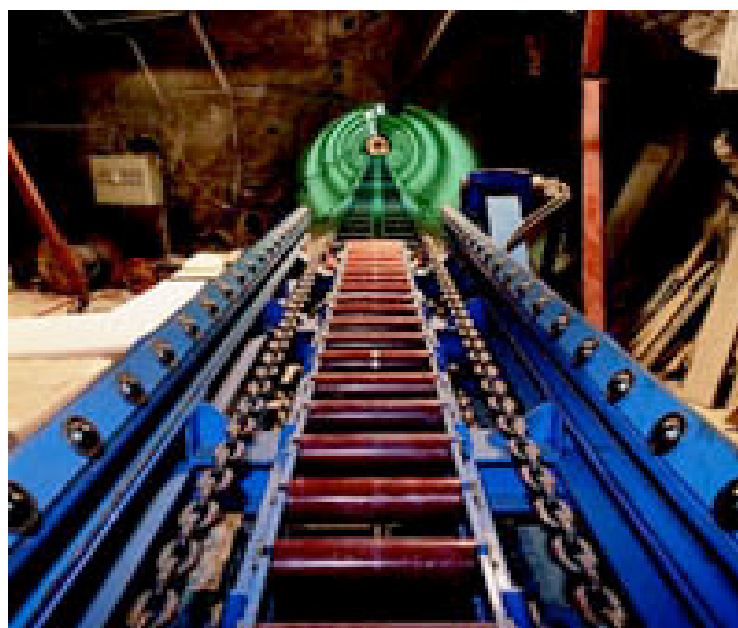


Slika 4-5. Lokacija FEBEX eksperimenta (Grimsel, 2015)

Fizikale komponenta eksperimenta sastojale su se od pet osnovnih dijelova:

- tunela
- sustava grijanja
- glinenih barijera
- potrebne instrumentacije
- sustava za monitoring i kontrolu.

Eksperiment je započeo ugradnjom i pozicioniranjem grijača u za to izrađenom tunelu (slika 4-6).



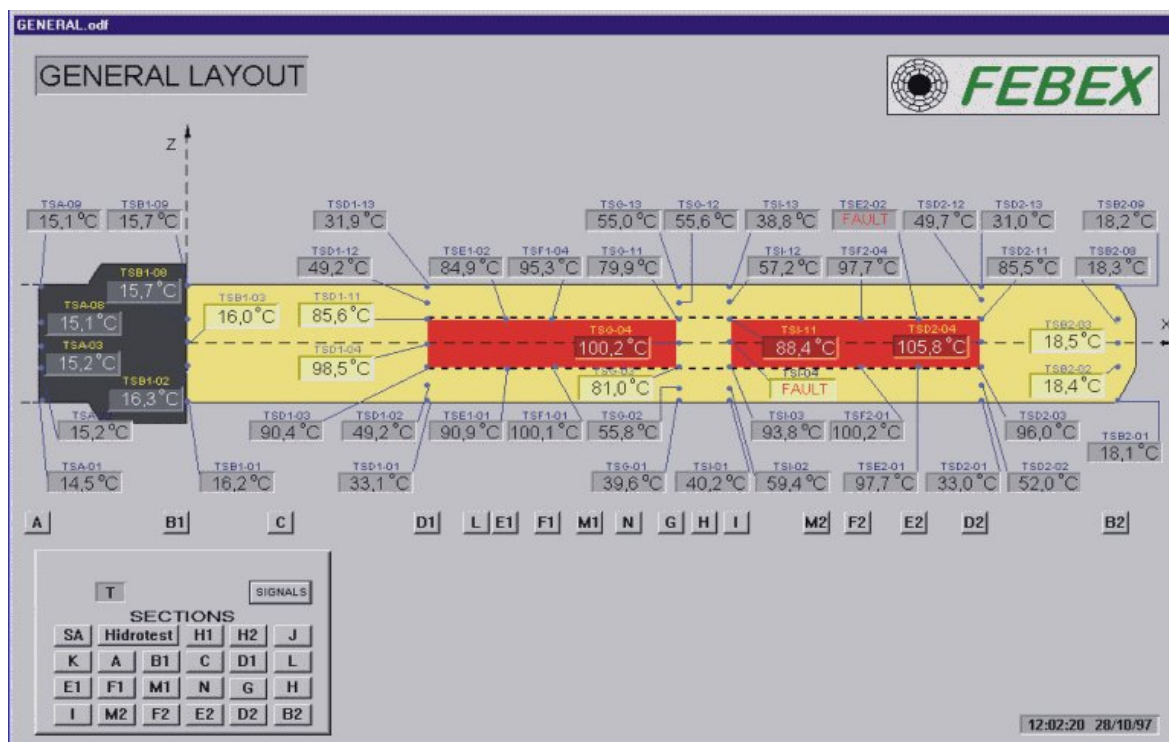
Slika 4-6. Pogled na tunel prilikom ugradnje spremnika (Grimsel, 2015)

Tunel je promjera 2.28 metara, na slici 4-6 je prikazan transporter kojim su grijači ugrađeni u tunel. Jedan grijač je težio 12 tona, te je bio 4.5 metara dug. Na slici 4-7 je prikazana ugradnja grijača u bentonitni blok, s obje strane je prikopčan niz kabela uz pomoć kojih se obavlja monitoring eksperimenta.

Prva faza zagrijavanja je trajala oko 5 godina, temperatura nije prelazila 100°C. Monitoring se vršio s više od 600 senzora koji su kontinuirano očitavali relevantne parametre te ih prikazivali uz pomoć posebno izrađenog programa za FEBEX eksperiment (slika 4-8).



Slika 4-7. Ugradnja grijača u bentonitni blok (Grimsel, 2015)



Slika 4-8. Prikaz senzorskih očitavanja (Grimsel, 2015)

Specifikacije grijača korištenog u FEBEX 1 eksperimentu prikazane su u tablici 4-1

Tablica 4-1 Specifikacije grijača (Grimsel, 2015)

Vanjski promjer	0,34 m
Duljina	1,625 m
Materijal	Ugljični čelik
Debljina stijenke	0,04 m
Radni tlak	9,0 MPa
Elementi	Čelično kućište, 3 grijača elementa i 9 točaka za mjerenje temperature
Maksimalna snaga	2800 W
Masa	475 kg

Zaključci na kraju FEBEX 1 eksperimenta:

- promjer tunela od 2.28 metara je poprilično restriktivan, te bi zahtijevao vrlo profinjen dizajn i oprezan transport opreme
- očit je utjecaj relativne vlage na mehaničku čvrstoću bentonita, te se na to mora obratiti posebna pozornost prilikom izrade i rukovanja odlagalištem VRAO i ING
- kritični faktor za ugradnju spremnika je poravnavanje čeličnog kućišta sa osi tunela, te tračnicama i opremom za ugradnju
- oprema je pokazala zadovoljavajuće rezultate, nakon 3 godine eksperimenta otkazalo je oko 10 % senzora.

Eksperiment FEBEX 2 se pokrenuo kao nastavak uspješnog FEBEX 1 eksperimenta. Prvotni plan je bio iskop oba grijača, međutim kako je 80% senzora bilo još uvijek u funkciji odlučeno je da se nastavi s fazom grijanja s jednim grijačem, te da se iskopa drugi grijač.

Glavne odrednice FEBEX 2 eksperimenta su:

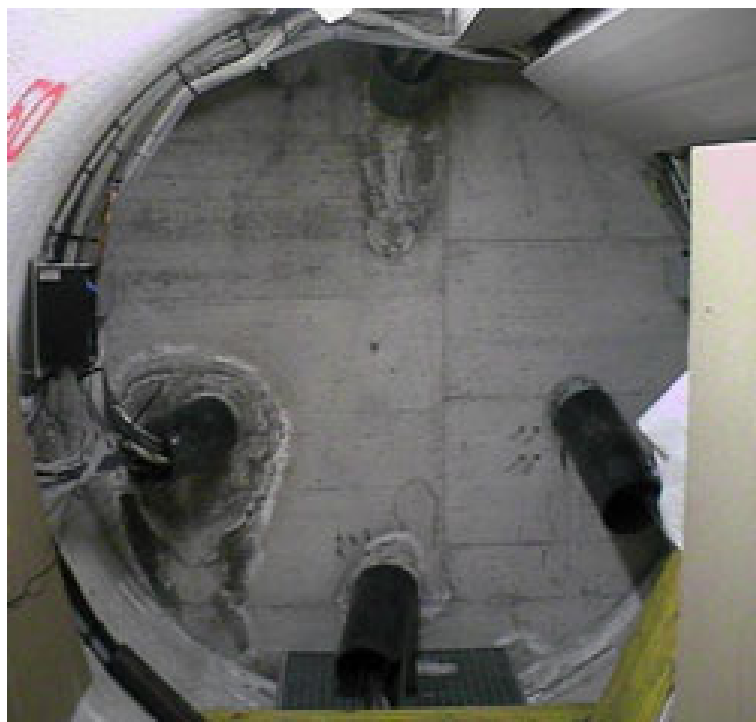
- Istraživanje geo-kemijskih procesa i vrednovanje relevantnih brojčanih kodova i podataka
- Istraživanje o mogućim promjenama u ključnim parametrima tampon materijala
- Istraživanje procesa proizvodnje i transporta plina
- Proučavanje procesa korozije
- Istraživanje i ispitivanje tehnoloških procesa vezanih za iskop spremnika.

Prva faza u ovom procesu je bilo probijanje betonskog čepa koji je služio kao zaštita tijekom eksperimenta, neposredno iza kojeg se nalazio bentonit (slika 4-9).

Cilj druge faze bilo je uklanjanje bentonitnih blokova, kako bi se mogao izvaditi prvi grijač. Ovaj zadatak je zahtijevao vrlo pažljivo rukovanje opremom kako ne bi došlo do oštećenja na instrumentima za monitoring koji su bili ugrađeni unutar samih inženjerskih barijera.

Po završetku i prve i druge faze eksperimenta izvršeno je detaljno uzorkovanje te je uzeto preko 1000 uzoraka (npr .okolne stijene, bentonita, područja između betonskog čepa i bentonita) iz kojih je dobiven niz korisnih podataka, te je proslijeđen na daljnje analize.

U trećoj fazi eksperimenta krenulo se s vađenjem grijača, što je predstavljalo kompliciran proces zbog težine i dimenzija grijača. Zamjena grijača je uspješno izvršena, te se za izradu novog betonskog čepa uspješno primijenila nova tehnika brizganja betona. Tehnika uključuje prskanje specijalizirane betonske smjese preko postojećeg bentonita. Eksperiment je još uvijek u tijeku i za sad daje zadovoljavajuće rezultate.



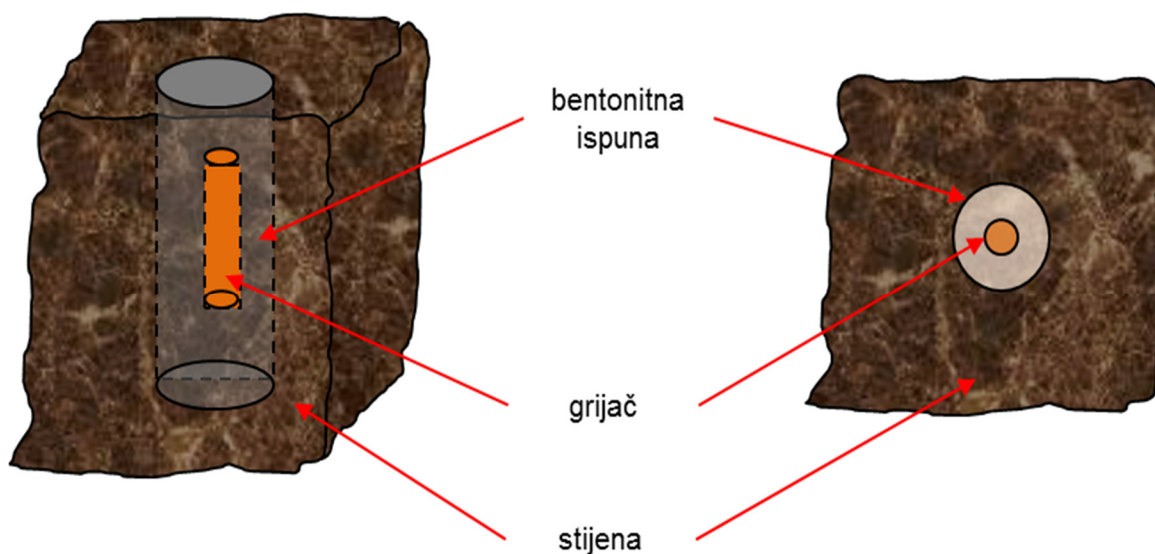
Slika 4-9. Betonski čep (Grimsel, 2015)

5. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE UTJECAJA GRIJAČA NA BENTONIT I STIJENU – MODEL ODLAGANJA VRAO I ING

5.1 Priprema eksperimenta

Ideja provedbe eksperimenta bila je simulirati ponašanje spremnika s VRAO/ING u sustavu glina/stijena. Fizikalni model sastoji se od grijača, kojim je simulirano širenje topline radioaktivnog otpada umetnutog u čelični spremnik (slika 5-1). Oko čeličnog spremnika dodana je bentonitna ispuna kao tampon između tijela grijača i stijene.

Prva faza eksperimenta sastojala se od bušenja glavne bušotine u stijeni, kako bi se napravio prostor za umetanje grijača koji simulira spremnik i bentonitnog tampona. Bušenje je provedeno na RGN fakultetu dijamantnom krunom unutrašnjeg promjera 90 mm (slika 5-2).



Slika 5-1. Fizikalni model eksperimenta (Veinović, 2015)



Slika 5-2. Bušenje glavne bušotine

Bušenje je trajalo 15 minuta, a nakon odvajanja jezgre zaključeno je da dobivena bušotina zadovoljava kriterije za ugradnju elemenata potrebnih za eksperiment (slika 5-3).



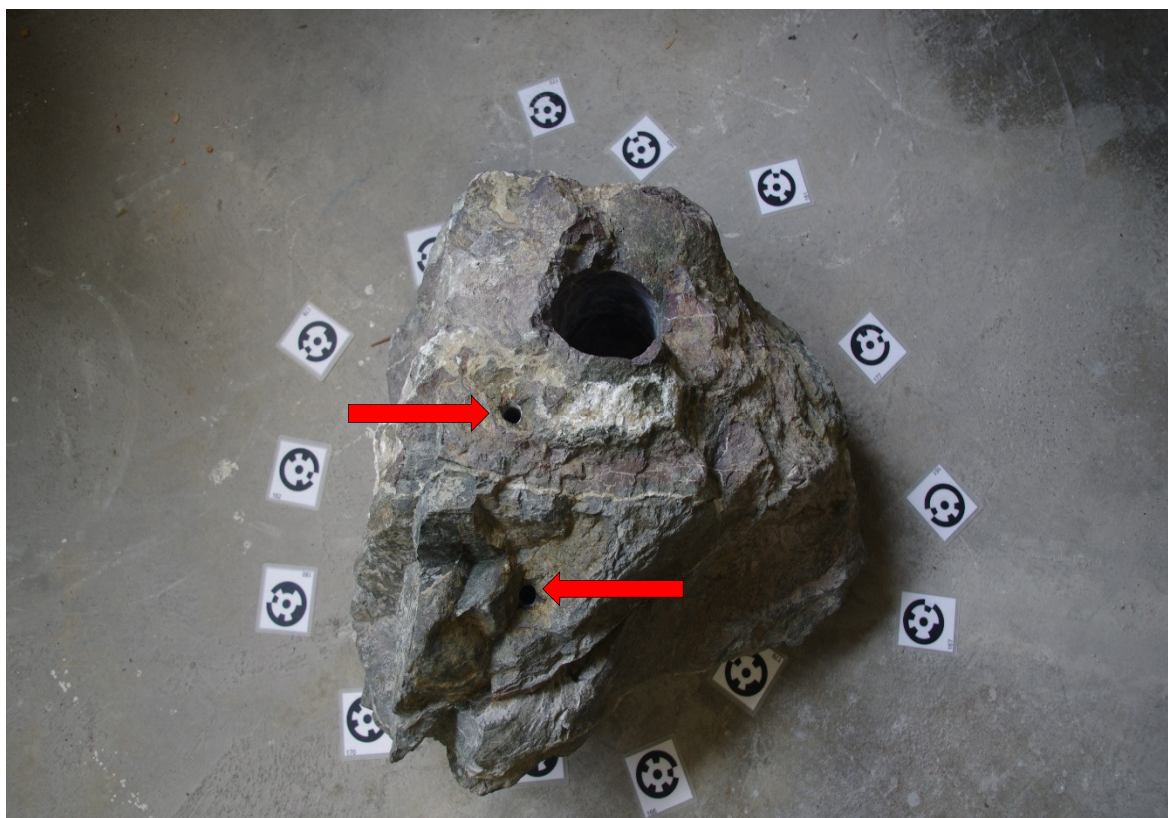
Slika 5-3. Glavna bušotina

Pri bušenju je došlo do loma jezgre, a kasnijom analizom utvrđeno je da je do loma došlo uzduž kalcitne žile u stijeni koja je djelovala kao diskontinuitet. Unatoč tome, dobiveni uzorak (slika 5-4) je zadovoljio kriterije, te je iskorišten za preciznu deteminaciju stijene.

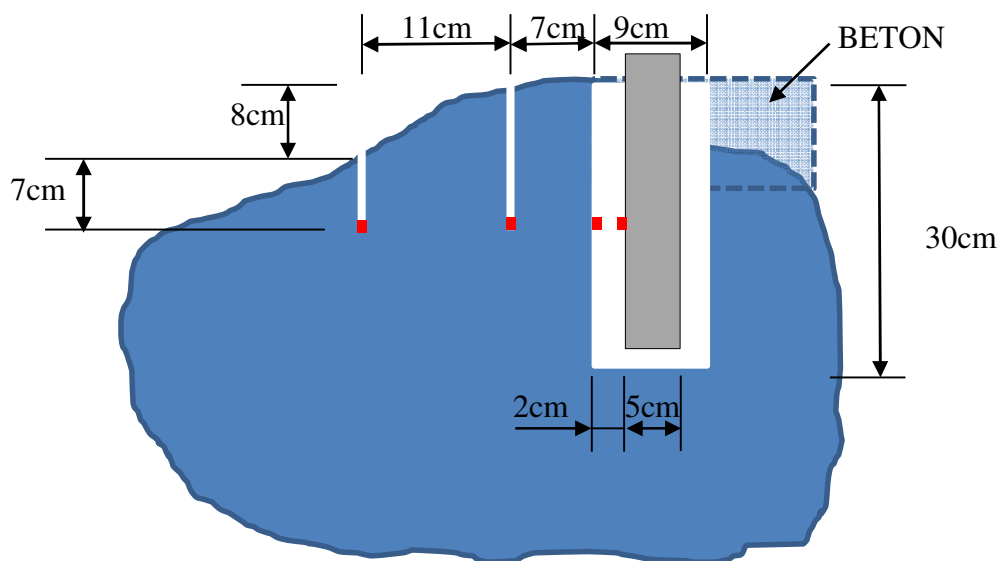
U stijeni su izbušene dvije pomoćne bušotine (promjera 14mm) namijenjene ugradnji senzora za mjerenje temperature (slika 5-5). Udaljenosti i dubine prikazane su skicom na slici 5-6.



Slika 5-4. Uzorak stijene



Slika 5-5. Pomoćne bušotine (označene strelicama)



Slika 5-6. Skica uzorka stijene s odnosima dimenzija i razmaka bušotina (■ senzor za temperaturu, ■ grijač, ■ stijena)

Uzorak stijene nije pravilnog oblika, što dobrim dijelom otežava eksperiment, ali budući da je to bio jedini donekle adekvatan uzorak na raspolaganju – korišten je u eksperimentu. Valjanost uzorka opravdana je tipom stijene (kristalinična, opširnije u poglavlju 5.3.3). S obzirom da uzorak nije odgovarao oblikom te da bi bez modifikacija glavna bušotina bila neadekvatna, betonom je „popravljen“ oblik uzorka, uz pretpostavku sličnih svojstava, posebno termičke vodljivosti. S obzirom da se u betonu nije mjerila temperatura te da je služio samo kao nadopuna u fizičkom smislu, smatra se da je pretpostavka valjana. Na slici 5-7 prikazan je uzorak s dodanim betonom.



Slika 5-7. Uzorak stijene s betonom dodanim radi korekcije oblika glavne bušotine

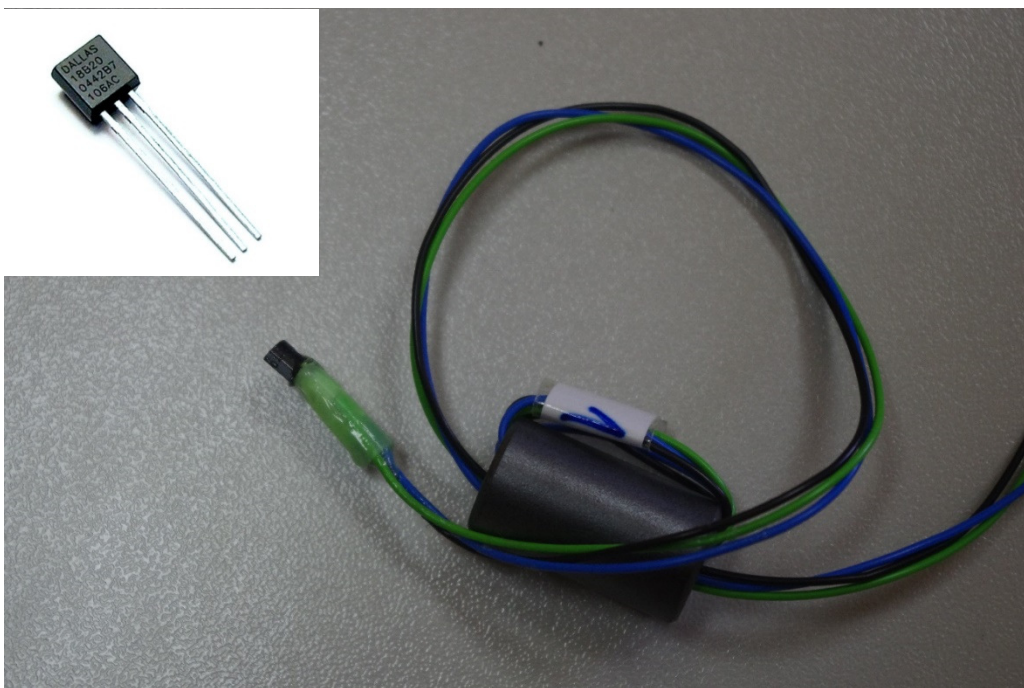
U sljedećem koraku su u pomoćne bušotine umetnuti senzor 5 u dalju i senzor 4 u bližu (glavnoj bušotini) bušotinu te zaliveni i time fiksirani cementnom smjesom. Nakon 48 sati, koliko je bilo potrebno da se betonska smjesa stvrdne, nastavljena je ugradnja grijača te senzora 3 i 2. Tijelo grijača je centrirano u glavnoj bušotini tako da je ostavljeno 2 cm između njega i tijela stijene te je umetnut senzor 3 uz tijelo grijača te senzor 2 uz stjenku bušotine. Svi senzori (osim senzora 1 koji je služio za mjerenje sobne temperature) su pri umetanju smješteni u istoj horizontalnoj ravnini na polovini dubine glavne bušotine. Prazni prostor je zapunjen bentonitom (slika 5-8).



Slika 5-8. Dodavanje bentonitne ispune

5.2. Mjerni uređaji i sustav za grijanje

Kao mjerni uređaji u eksperimentu korišteni su senzori tvrtke *Maxim IC*. Korišteno je ukupno pet senzora, četiri senzora tipa *Dallas DS18B20* (kraći, plavo zeleni provodnici) namijenjeni očitavanju temperatura na/u uzorku stijene i jedan tipa *Dallas DS18S20* (dulji, plavo crveni provodnik), namijenjen za očitavanje sobne (kontrolne) temperature (slika 5-8).



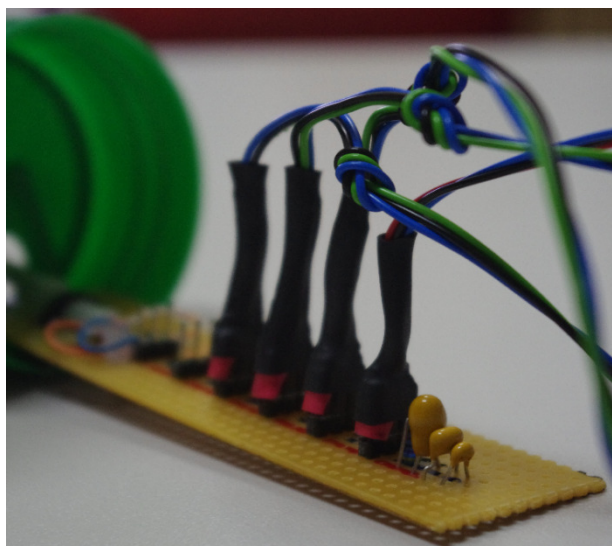
Slika 5-9. Senzor *Dallas DS18B20* s feritnom jezgrom

DS18B20 i *DS18S20* su zapravo digitalni termometri koji nude 9-bitna do 12-bitna mjerenja temperature u °C te imaju mogućnost signalizacije u slučaju kada vrijednosti izmjerene temperature izlaze iz unaprijed programiranog intervala.

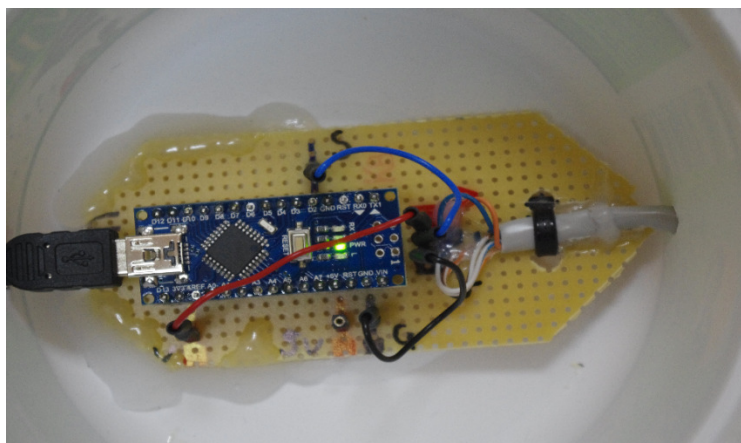
DS18B20 i *DS18S20* komuniciraju preko tzv. 1-Wire protokola, koji po definiciji zahtijeva samo jednu žicu za prijenos podataka (i uzemljenje) za komunikaciju sa središnjim mikroprocesorom. To znači da već ima programiran softver u kontroleru te na obradu šalje već gotove digitalne podatke. Svaki *DS18B20* i *DS18S20* ima jedinstveni 64-bitni serijski broj, koji omogućuje da više senzora funkcionira preko jednog 1-Wire protokola, te time omogućuje istodoban rad većem broju uređaja. Žice senzora su provučene i nekoliko puta omotane oko feritne jezgre, koja ima funkciju zaštite protoka podataka od smetnji koje mogu prouzrokovati radiovalovi.

Radna temperatura ovih uređaja se kreće između -55°C do +125°C, a u rasponu od -10°C do +85°C odstupanja se kreću u rasponu od $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Za izolaciju na spoju senzora s vodičima korišteno je dvokomponentno epoksidno ljepilo.

Senzori očitane podatke prvo šalju na tzv. *Hub*, tj. čvorište (slika 5-9) na koji su spojeni paralelno, a funkcija mu je mehanički i električki spojiti senzore s ostatkom opreme.



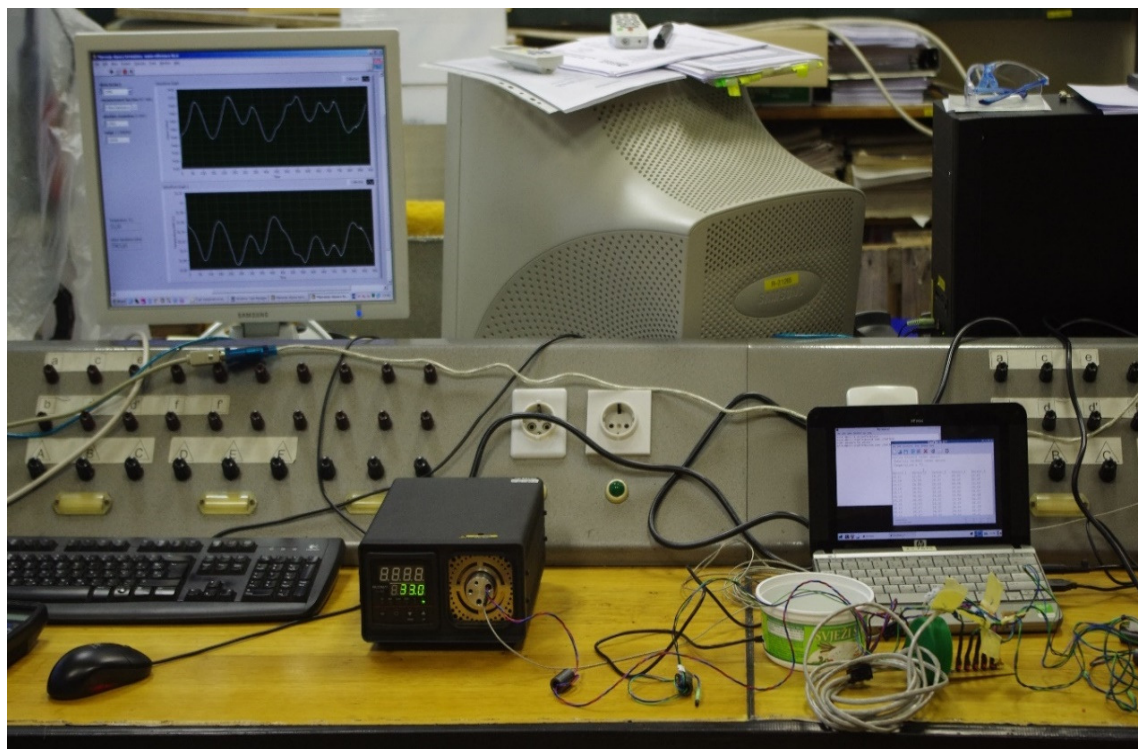
Slika 5-10. Čvorište



Slika 5-11. *Arduino Nano*

Čvorište je mrežnim kabelom povezan sa sklopom *Arduino Nano* (slika 5-10) u kojem se odvija obrada podataka te slanje istih na računalu. Sklop je povezan sa računalom putem mini USB kabela. Operativni sustav na računalu je *Debian Linux*.

Arduino Nano je modul dizajniran na osnovi *ATmega328p* mikrokontrolera. Namjena modula je upravljanje uređajima i procesima, pa u sebi ima integriran mikroprocesor, memoriju, digitalne i analogne ulaze i izlaze, digitalne satove, brojače, oscilatore, komunikacijske sklopove i druge dodatke za koje je nekada bio potreban niz posebnih integriranih sklopova. Mikrokontroler normalno radi u kontrolnoj petlji, očitava ulaze i zatim podešava izlaze u skladu sa svojim programom. Petlja se stalno ponavlja dok traje kontrola procesa.



Slika 5-12. Postupak umjeravanja senzora

Prije puštanja senzora u rad, potrebno je napraviti postupak njihovog umjeravanja (slika 5-12), kako bi se odredila odstupanja senzora pri mjerenju temperature.

Postupak započinje povezivanjem senzora na prijenosno računalo, te pokretanjem programa koji prikuplja podatke s *arduina*. Svaki senzor se pojedinačno smješta u temperaturni kalibrator (suhi blok, Voltcraft TC-150) koji se zagrijava na zadanu temperaturu, te tako simulira uvjete koji se pretpostavljaju u eksperimentu. Umjeravanje je provedeno na temperaturi od 33°C, 60°C, 80°C te 90°C. U tablici 5-1 prikazane su izmjerene vrijednosti, odnosno odstupanja senzora od umjerene referentne temperature sonde (NTC sekundarni etalon Hart 5665 J). Podaci o otporu referentne sonde prikupljani su preko računala- programa *LabVIEW*. Računalo je bilo spojeno na multimetar Fluke 8846A koji ima serijsku vezu na računalo sa programom. U programu se nalazi procedura za preračun otpora sonde u temperaturu i prikaz vremenske ovisnosti temperature.

Tablica 5-1. Rezultati umjeravanja senzora (prosječne mjerene temperature očitane na pojedinim sensorima u odnosu na zadanu)

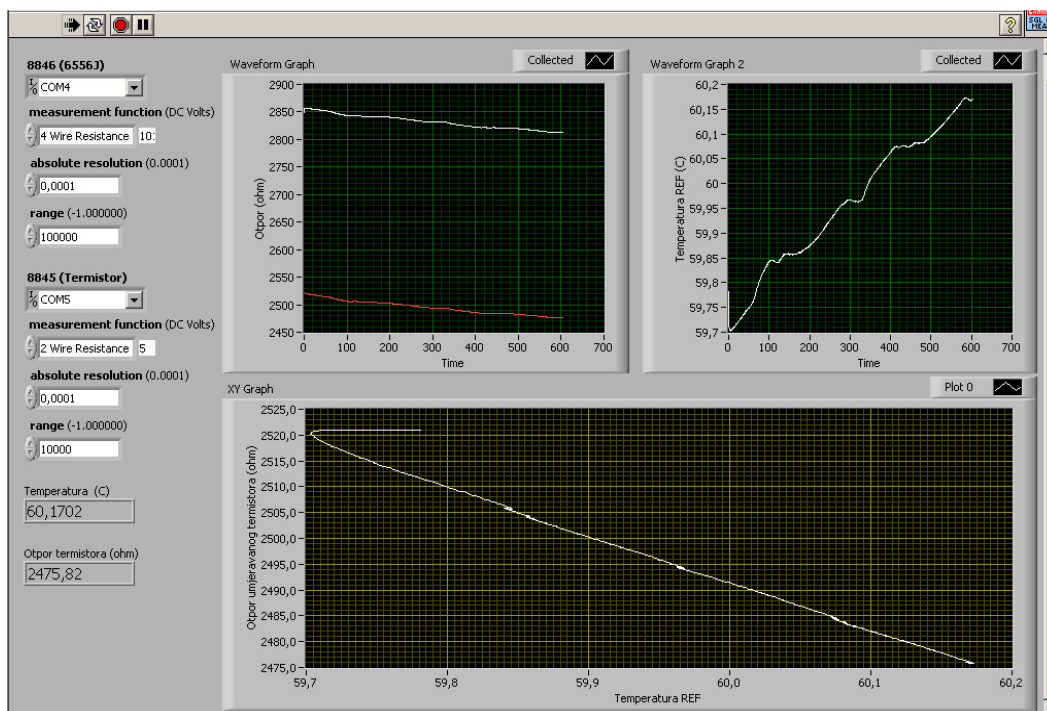
Zadana temperatura	33°C	60°C	80°C
Senzor broj 1	32,75 °C	58,38 °C	79,69 °C
Senzor broj 2	32,15 °C	58,70 °C	79,69 °C
Senzor broj 3	32,44 °C	59,00 °C	79,81 °C
Senzor broj 4	31,25 °C	58,00 °C	78,19 °C
Senzor broj 5	32,01 °C	59,81 °C	79,94 °C

Kako je već spomenuto, gornja granica pri kojoj je odstupanje ovih senzora $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ je 85°C . Stoga je napravljena provjera kako se ponašaju na temperaturi koja prelazi propisanu gornju granicu. Mjerenja su napravljena na temperaturi od 90°C . Senzor je umočen u vodu koja je prethodno zagrijana na 90°C , a uz njega je u vodu postavljena i umjerena sonda koja je na kontrolnom računalu prikazivala temperaturu vode (slika 5-12).

Na ovoj temperaturi senzori su pokazali velika odstupanja ($8\text{--}10^{\circ}\text{C}$) te su time potvrđene njihove eksperimentalne mogućnosti. Na slici 5-13 prikazano je sučelje pri umjeravanju jednog od senzora programom izrađenim u *LabVIEW-u* u trenutku kad je temperatura bila 60°C .



Slika 5-13. Umjeravanje senzora na temperaturi od 90°C



Slika 5-14. Sučelje pri kontroli umjeravanja jednog od senzora kontrolirano programom *LabVIEW* na 60°C

Sustav za grijanje stijene izrađen je po narudžbi (slika 5-14) od grijača koji se koristi u pećnicama, snage 2000 W. Razlog za odabir ove vrste grijača je u jednostavnosti izvedbe, s obzirom da neće pregorjeti u slučaju da nije u izravnom kontaktu s medijem za konduktivno odvođenje topline. Temperatura grijača kontrolira se termostatom, a kao medij za prijenos topline s grijača na čeličnu stjenku kućišta odabran je kvarcni pijesak. Za buduća ispitivanja planirano je korištenje kućišta grijača od bakra, bakrene strugotine kao medija za prijenos topline unutar kućišta, kao i određivanje korozijskog ponašanja materijala od kojih je izrađeno tijelo (stjenka) grijača.

Na slici 5-15 prikazano je umjeravanje sustava za grijanje. Namješten na maksimalnu temperaturu (90°C na termostatu sustava) grijač je postizao navedenu temperaturu s ciklusima paljenja i gašenja u rasponu 90-80°C (80°C u trenutku ponovnog paljenja).



Slika 5-15. Sustav za grijanje



Slika 5-16. Umjeravanje sustava za grijanje

5.3 Materijali

Za provođenje eksperimenta bilo je potrebno odlučiti koje materijale koristiti, kako bi se čim više približilo realnim uvjetima u budućem odlagalištu VRAO/ING. Poradi nedostatka sredstava za opremanje eksperimenta u maksimalno sličnim uvjetima (materijali), odabrana je pojednostavljena, ali moguća kombinacija materijala. Umjesto bakrenog tijela grijača uporabljen je čelik (opcija u programima odlaganja zemalja koje neće uporabiti bakar), a kao stijena uporabljen je raspoloživi uzorak bazalta.

5.3.1. Čelik

Željezo je tehnički najznačajniji metal, a maseni udio željeza u Zemljinoj kori iznosi 5%. Današnji život i proizvodnja nezamislivi su bez materijala na bazi željeza, osobito čelika. Prema Europskoj normi EN 10 021-1 nelegirani željezni metali dijele se na ugljične čelike s $< 2\%$ ugljika i na željezne ljevove s $> 2\%$ ugljika. Legiranje kod ugljičnog čelika i željeznog lijeva se provodi kromom, niklom, manganom, molibdenom, silicijem, aluminijem i dr. zbog poboljšanja korozijskog ponašanja. Prema EN 10 021-1 čelici su naznačeni kao legirani ako u rastaljenom stanju imaju određeni iznos ukupnog sadržaja legirajućih komponenata. Niskolegirani čelici imaju ukupno do 5% dodataka, a visokolegirani čelici preko 5% u koje spadaju nehrđajući čelici koji imaju povećanu otpornost prema koroziji, i čiji je sadržaj ugljika $\leq 0,2\%$, te sadržaj kroma mora biti $> 12\%$ Cr. U odnosu na ugljični čelik, nehrđajući čelik ima prednost zbog mogućnosti trajnog stanja pasivnosti prema koroziji u mnogim sredinama samo zahvaljujući tom visokom sadržaju kroma (Stupnišek - Lisac, 2007).

Željezo je termodinamički nepostojano u kontaktu s kisikom. Kao i kod bakra, najvažnije svojstvo koje se od željeznih i čeličnih spremnika za odlaganje nuklearnog otpada ispituje je otpornost na koroziju.

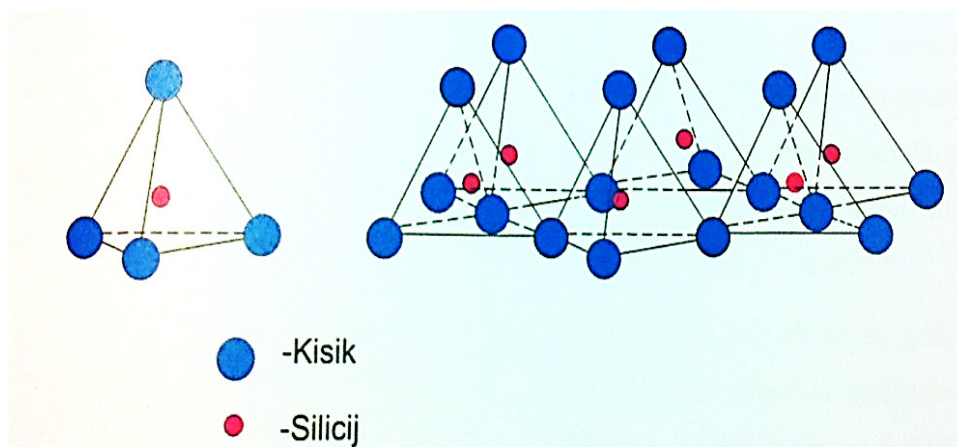
Kao i za Cu spremnik, došlo je do niza procjena životnog vijeka od C-čelika spremnika (UFC) u raznim međunarodnim programima nuklearnog gospodarenja otpadom. Zanimljivo je napomenuti da predviđena maksimalna dubina korozije ima tendenciju smanjivanja jer je sve više informacija postalo dostupno o ponašanju korozije C-čelika u odlagališnim uvjetima. Ovaj trend može i dovesti do razmatranja C-čelika spremnika kao dugovječnu opciju spremnika (King, 2005).

Predviđeni maksimalni prodori u stjenku konstrukcijskog materijala ugljičnog čelika variraju između 86 mm i 231 mm u 1000 godina. Maksimalni prodor u stjenku spremnika kod zbrinjavanja u morskim sedimentima je predviđen da je samo 33 mm u 1000 godina, prije svega zbog korozije koja je došla pod aktivnim umjesto pasivnim uvjetima. Aktivni su uvjeti pretpostavljeni više zbog odsutnosti oksidansa za održavanje pasivnosti za ovaj dizajn odlagališta, nego zbog bilo kakvog učinka na višoj koncentraciji $[Cl^-]$. Maksimalni prodor, zbog toga, može se očekivati 12 mm, u 1000 godina, a 21 mm u 10 000 godina (King, 2005). Ukupna visina jednolike i lokalizirane korozije prema Kingu (2005) bila je 24,6 do 31,8 mm u 1000 godina, ovisno o tipu dubokog geološkog odlagališta.

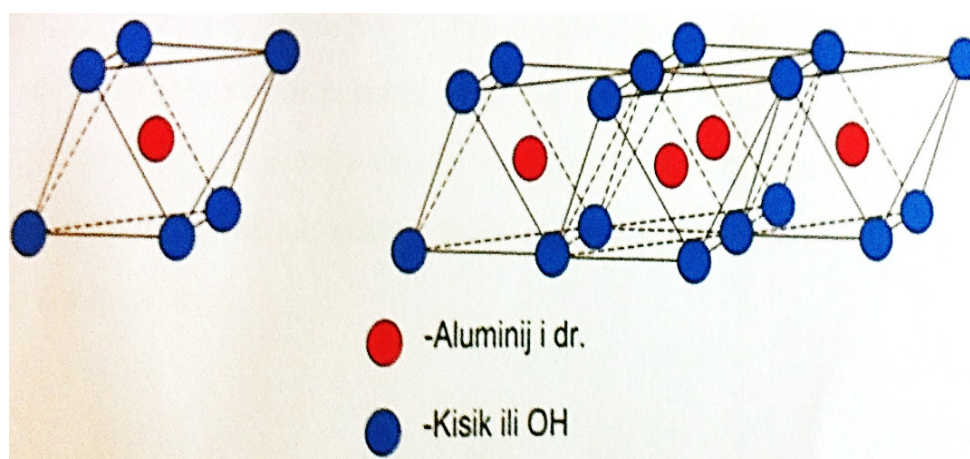
5.3.2 Bentonitna glina

Temeljna struktura svih minerala glina je složen paket sastavljen od mreže SiO_4 -tetraedara (slika 5-16) i mreže Al-oktaedara (slika 5-17). U mreži SiO_4 -tetraedara svaki silicij je okružen s četiri atoma kisika. Atom Si^{+4} može biti zamijenjen s Al^{+3} te rjeđe s Fe^{+3} . U mreži Al-oktaedara svaki atom aluminijske je okružen sa šest pozicija na kojima se nalaze atomi O^{2-} ili ioni OH^- . Centralni kationi oktaedrijskih mreža, osim Al^{+3} mogu biti i Mg^{+2} , Fe^{+3} , Fe^{+2} kao i ostali kationi kao Li^+ , Ti^{+4} , V^{+3} , V^{+4} , V^{+5} , Cr^{+3} , Mn^{+2} , Co^{+2} , Ni^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} . Mreže tetraedara i oktaedara su međusobno spojene preko O^{2-} i OH^- , koje mreže međusobno dijele. Dvije tetraedrijske mreže te jedna oktaedrijska mreža čini tromrežni sloj dok kombinacija jedne tetraedrijske i jedne oktaedrijske mreže čini dvomrežni sloj (Domitrović, 2012).

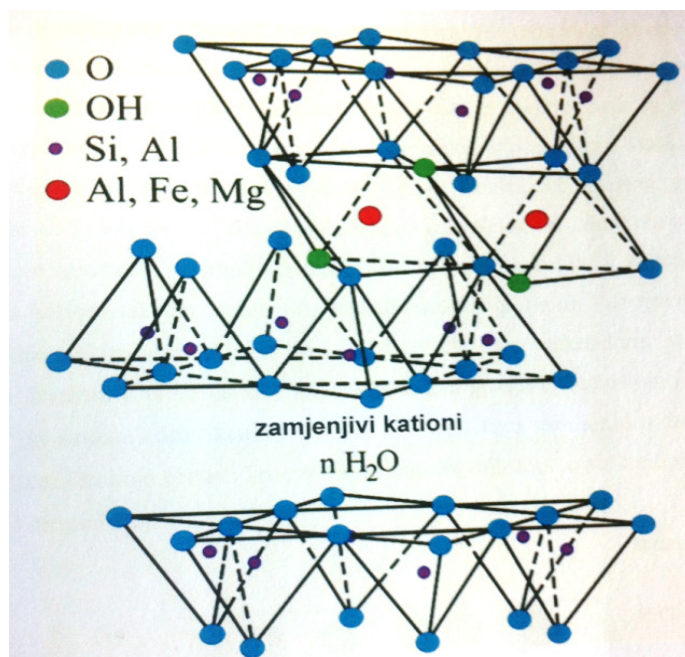
Minerali glina klasificiraju se u grupe obzirom na broj mreža i njihovu kristalnu strukturu u jediničnom paketu. Svaka grupa se dodatno dijeli u podgrupe prema kemijskom sastavu oktaedrijskih mreža, te dalje u pojedine vrste minerala glina. Bentonit je alumosilikatna glina sastavljena od koloidalnih i plastičnih glina, pretežno od minerala montmorilonita. Osim montmorilonita, bentonit sadži i feldspate, biotit, kaolinit, ilit, piroksen, cirkon i kristalni kvarc. Montmorilonit je najčešći član podgrupe dioktaedrijskih smektita. Na svakih Al^{+3} dolazi do jedne zamjene s Mg^{+2} u oktaedrijskoj mreži, u tetraedrijskoj mreži dio Si^{+4} može biti zamijenjen s Al^{+3} (slika 5-18) (Domitrović, 2012).



Slika 5-17. Shematski prikaz SiO_4 -tetraedar – lijevo i mreža SiO_4 -tetraedara desno (Murray, 2007)



Slika 5-18. Shematski prikaz Al-oktaedra – lijevo i mreža Al-oktaedara – desno (Murray, 2007).



Slika 5-19. Struktura montmorilonita (Murray, 2007)

Kada otopina dođe u kontakt s bubrivim mineralima glina, na kontaktu čvrste i tekuće faze dolazi do sorpcije iona i molekula. Bubrenje odnosno interakcija s vodom bitna su svojstva grupa vermikuliti i smektiti (među koje spada i montmorilonit). Oni sadrže veliki broj međuslojnih prostora u koje, tijekom kontakta s vodom, ulaze molekule vode privučene negativnim nabojem na površinama. Molekule vode i međuslojni kationi tvore djelomično uređene strukture s tim da međuslojni kationi ujedno imaju najvažniju ulogu kod interakcije gline i vode. Bubrenje dovodi do razdvajanja jediničnih paketa sve do postizanja ravnoteže pri zadanom tlaku. Povećanje debljine jediničnog paketa uslijed bubrenja ovisi prije svega o međuslojnim kationima. Ukoliko su međuslojni kationi jednovalentni, odbijanje slojeva je veće pa je i bubrenje veće (Domitrović, 2012).

Glavni sastojak bentonitnih glina je montmorilonit odnosno minerali glina smektitne skupine. Jedinični naboj i koloidalna veličina čestica imaju za posljedicu da ova skupina minerala ima veliki afinitet prema molekulama vode. Rado ih vežu pa tako mogu i višestruko povećati svoj volumen (Domitrović, 2012). U kontaktu s vodom pa čak i uslijed povećane vlažnosti zraka, natrijske bentonitne gline bubre i do 15 puta u odnosu na dehidratizirano stanje. Bubrenjem se popunjavaju njezine pore osiguravajući time vrlo malu hidrauličku i plinsku provodljivost odnosno omogućavajući njezinu primjenu kao brtvene barijere u različitim inženjerskim zahvatima.

Bentonit se poradi svojih svojstava planira primijeniti kao tampon između spremnika ING/RAO i kristalinične stijene, odnosno matične gline na lokaciji odlagališta. Bentonit odabran za eksperimentalni dio izrade ovog rada je natrijem aktivirani *Volclay MX80* (slika 5-19).



Slika 5-20. Korišteni bentonit *Volclay MX80*

5.3.3 Bazalt

Uzorak stijene (slika 5-20) uzet za provedbu eksperimenta podrijetlom je s lokacije „Hruškovec“ kraj Ljubeščice, inače kamenoloma dijabaza i gabra.

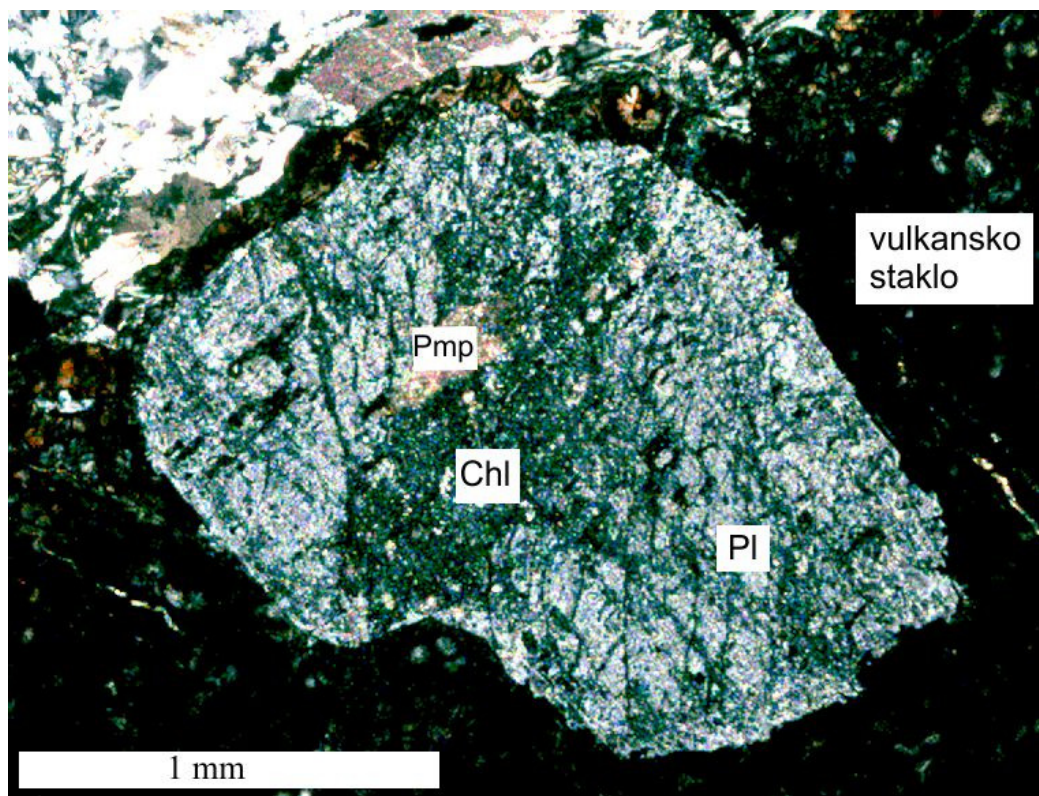


Slika 5-21. Uzorak stijene na kojem je provedeno istraživanje

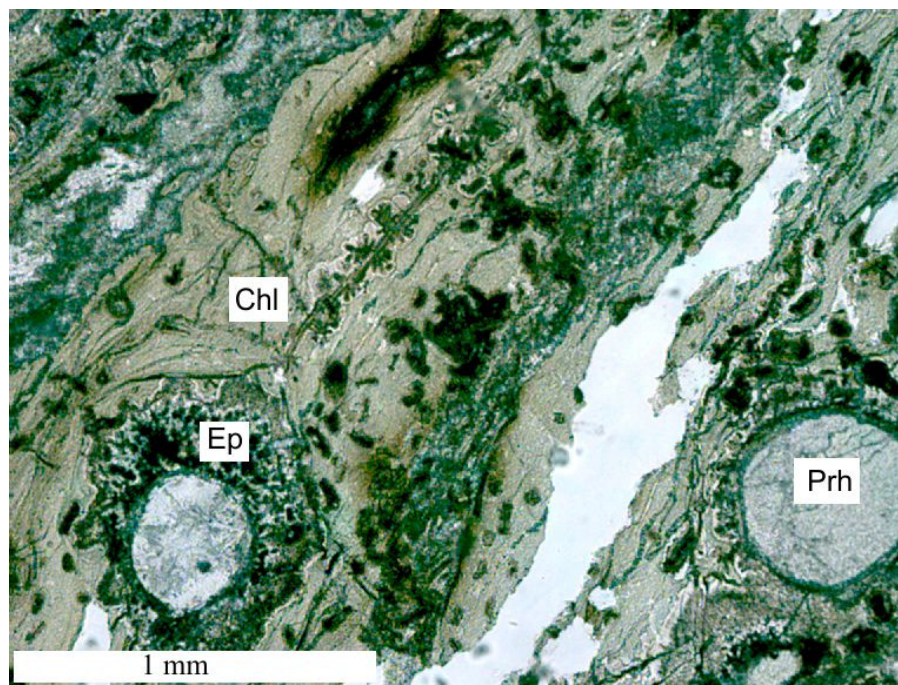
Na temelju mikroskopske analize uzorka ŽV-1 (provedena od strane Doc.dr.sc. Vesnice Garašić na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu) ustanovljeno je da se radi o bazaltnoj stijeni nastaloj kristalizacijom bazaltne lave eruptirane u submarinskoj okolini. Prema izvješću mikroskopske analize Doc.dr.sc. Vesnice Garašić:

Stijena je bila izložena intenzivnoj hidrotermalnoj alteraciji. Stoga su od primarnih minerala ostali samo na par mjesta sačuvani veliki fenokristali plagioklasa $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (slika 5-21) ali velikim dijelom alterirani u klorit $(\text{Fe}, \text{Mg})_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$, kalcit CaCO_3 , prehnit $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ i mjestimice pumpellyit $\text{Ca}_4(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Al}_5\text{Si}_6\text{O}_{23}(\text{OH})_{3 \times 2}\text{H}_2\text{O}$, a feromagnezijski minerali nisu uočeni. Dimenzije fenokristala plagioklasa su oko $1,75 \times 1,5$ mm. Stijena sadrži dosta veliku količinu vulkanskog stakla devitrificiranog u klorit (slika 5-22), manjoj mjeri u epidot $\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$ i vulkanskog stakla mjestimice alteriranog u palagonit (slika 5-23). Kao posljedica devitifikacije na nekoliko mjesta su razvijeni sferuliti sa nekompletnom radijacijom, a koji se sastoje od tankih, izduženih štapića odnosno mikrolita plagioklasa (duljine oko 0,2 mm) između kojih se nalazi vulkansko staklo izmijenjeno u crvenkasto-smeđi palagonit (slika 4). Stijena sadrži i vezikule, nastale oslobađanjem plinova iz lave, koje su naknadno ispunjene sekundarnim kalcitom ili prehnitom ili kvarcom SiO_2 ili epidotom ili kombinacijom ovih minerala (slika 5-24) (Garašić, 2015).

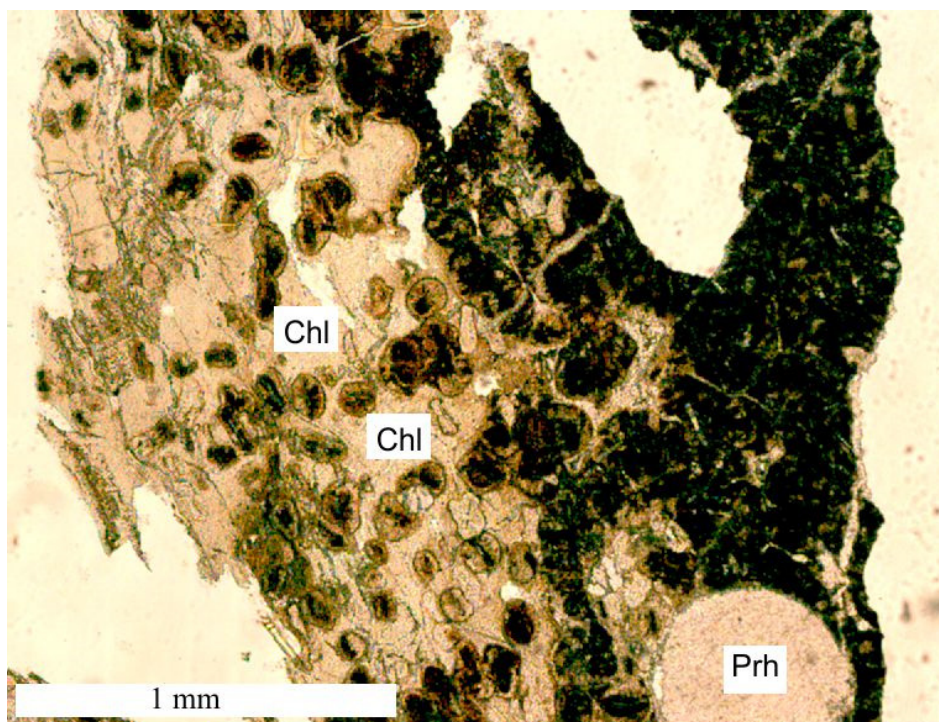
Stijena je karakterizirana s mnogobrojnim žilicama sekundarnih minerala nastalim obaranjem iz hidrotermalnih otopina koje su cirkulirale duž pukotina. Žilice se sastoje od različitih sekundarnih minerala, pri čemu se najčešće na rubovima žilica nalazi kvarc, a u njihovim jezgrama kalcit (slika 5-25). Postoje i žilice koje pored kvarca i kalcita sadrže i barit BaSO_4 (Slika 5-26). A javljaju se i žile ispunjene samim prehnitom ili samim kalcitom ili samim kvarcom (slika 5-27). Dijelovi uzorka stijene su obojeni tamno crveno ukazujući na prisutnost željeza u Fe^{3+} oksidacijskom stanju (Garašić, 2015).



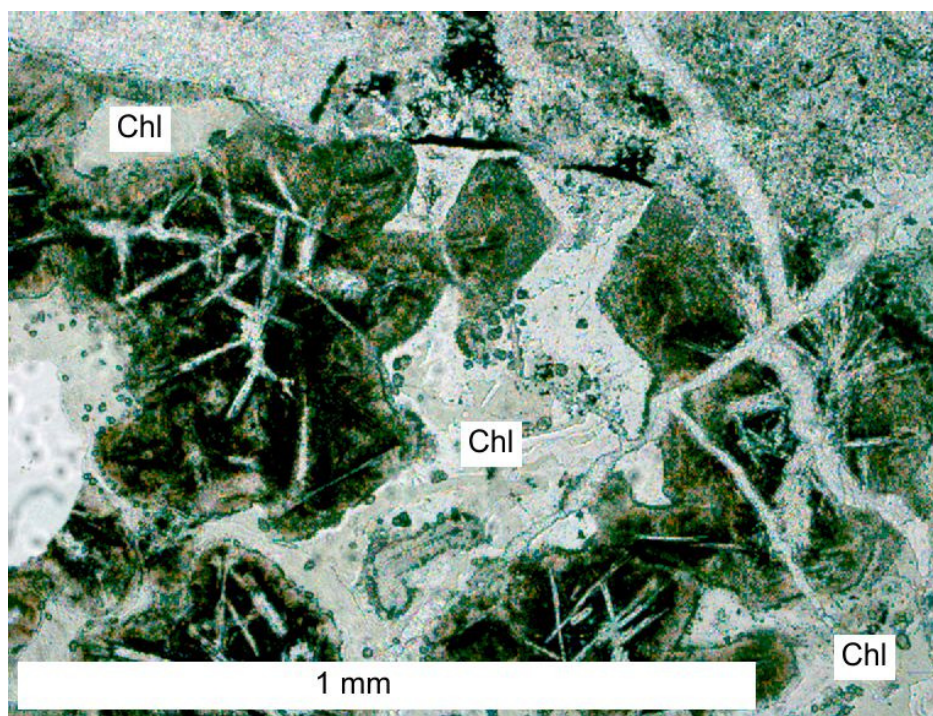
Slika 5-22. Primarni fenokristal plagioklasa (Pl) djelomice alteriran u klorit (Chl) i pumpellyit (Pmp). Snimak s ukrštenim nikolima (Garašić, 2015)



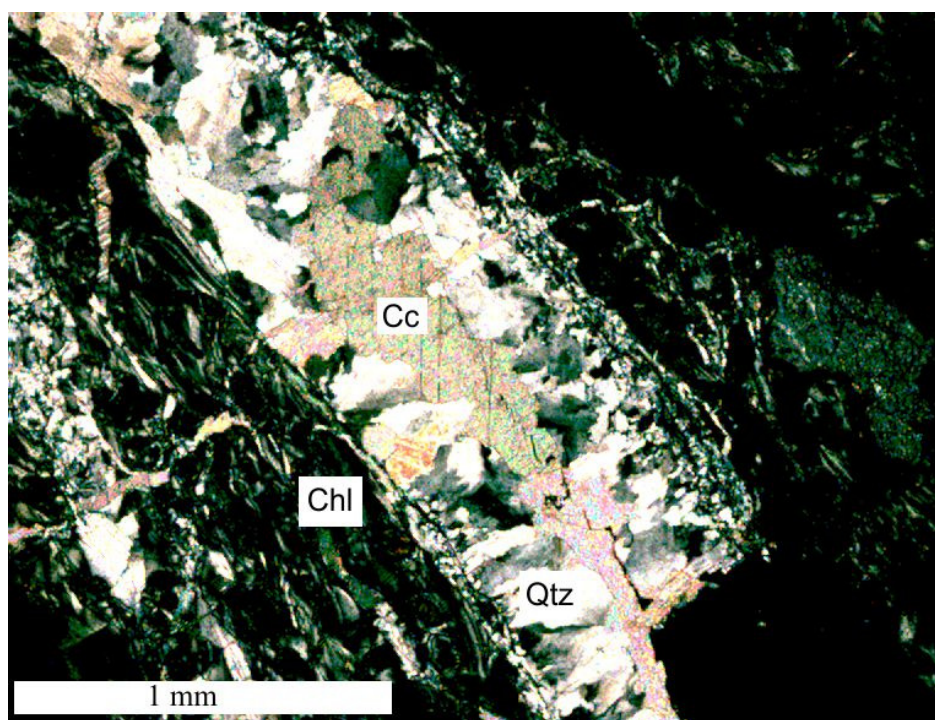
Slika 5-23. Vulkansko staklo devitrificirano velikim dijelom u klorit (Chl) te u manjoj mjeri u epidot (Ep). Na slici su vidljive i vezikule ispunjene sekundarnim prehnitom (Garašić, 2015)



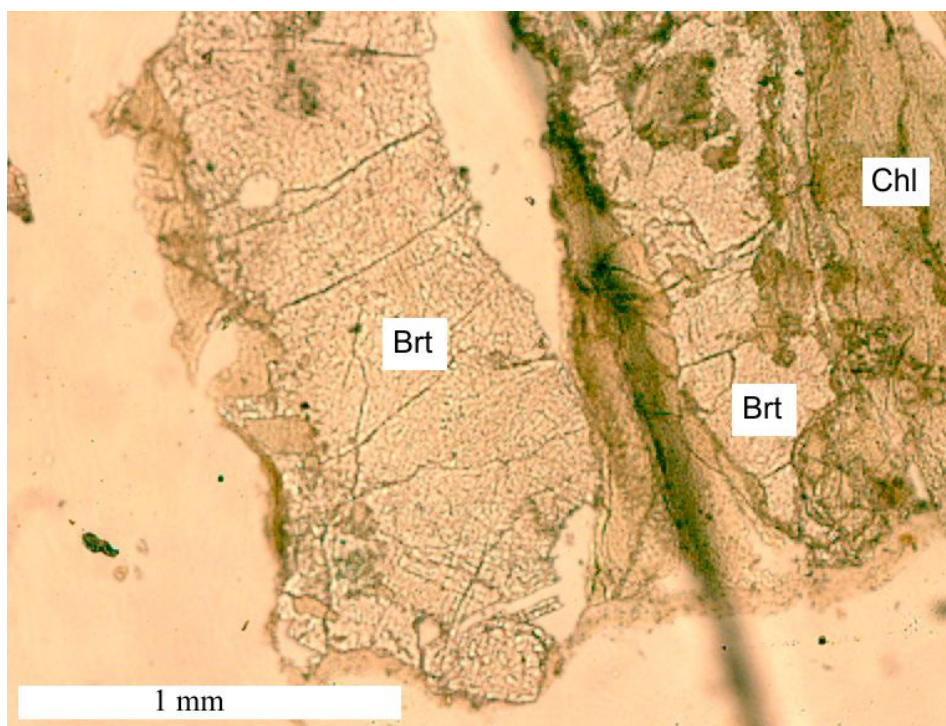
Slika 5-24. Dio vulkanskog stakla je devitrificiran u klorit (Chl), sa sporadično razvijenim žuto-smeđim sferulitima, u kojima se kao i na krajnjem desnom dijelu fotografije razvija palagonit. Na slici je vidljiva i pravilna okrugla vezikula ispunjena prehnitom (Prh) (Garašić, 2015)



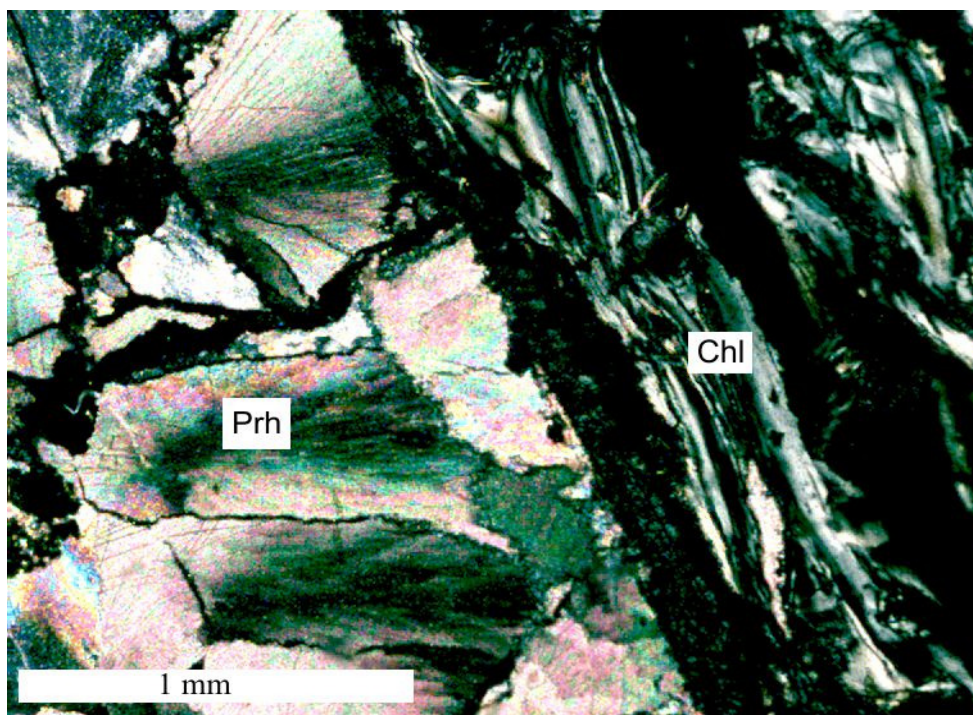
Slika 5-25. Sferuliti nastali procesom devitrifikacije u kojima su vidljivi mikroliti plagioklasa između kojih je vulkansko staklo alterirano u palagonit, a sve se nalazi u vulkanskom staklu devitrificiranom u klorit (Chl) (Garašić, 2015)



Slika 5-26. Žilice u stijeni. Ova je karakterizirana prisustvom kvarca na rubu (Qtz) te kalcitom (Cc) u jezgri žilice. Snimak s ukrštenim nikolima (Garašić, 2015)



Slika 5-27. Duž pukotina je na par mjesta iz hidrotermalnih otopina oboren barit (Brt) (Garašić, 2015)



Slika 5-28. Kristalizacija prehnita (Prh) u žilicama uzorka. Snimak s ukrštenim nikolima (Garašić, 2015)

Bazalt je jedna od kristaliničnih stijena koje su razmatrane za odlaganje VRAO/ING. Najpoznatiji primjer razmatranja ove stijene svakako je *Basalt Waste Isolation Project*. *The Columbia River* bazalti ispod mjesta Hanford u Sjedinjenim Američkim Državama su među vrstama stijena koje je Američko ministarstvo energetike razmatralo kao prvo komercijalno odlagalište visoko radioaktivnog otpada. *Basalt Waste Isolation Project* bavi se sveobuhvatnom procjenom izvedivosti odlagališta u bazaltima te odabirom prave tehnologije potrebne za izgradnju cijelog odlagališta. Jedna od komponenti ovog projekta je razrada geomehaničkog programa ispitivanja stijena, kako bi se olakšalo projektiranje odlagališta, dobila karakterizacija područja i zahtjevi za procjenu performansi. Geomehaničke informacije potrebne za provođenje projekta zahtijevaju obilježja in situ područja stresa i mehanička svojstva stjenske mase. Priroda bazalta na pretpostavljenim dubinama odlagališta (oko 970 m) nameće neke relativno neobične zahtjeve što se tiče metoda ispitivanja koje se obično koriste za procjenu stanja naprezanja i deformabilnosti stjenske mase. Očekivani uvjeti u ispitnim mjestima predviđaju najveća in situ naprezanja od 60 Mpa, tlačnu čvrstoću intaktne stijene oko 300 Mpa. Q klasifikacija stjenske mase se očekuje u rasponu od 0,5 do 1,9. Temperatura na toj dubini je oko 50° C, a stjenska masa se smatra potpuno saturiranom (USA, 1988).

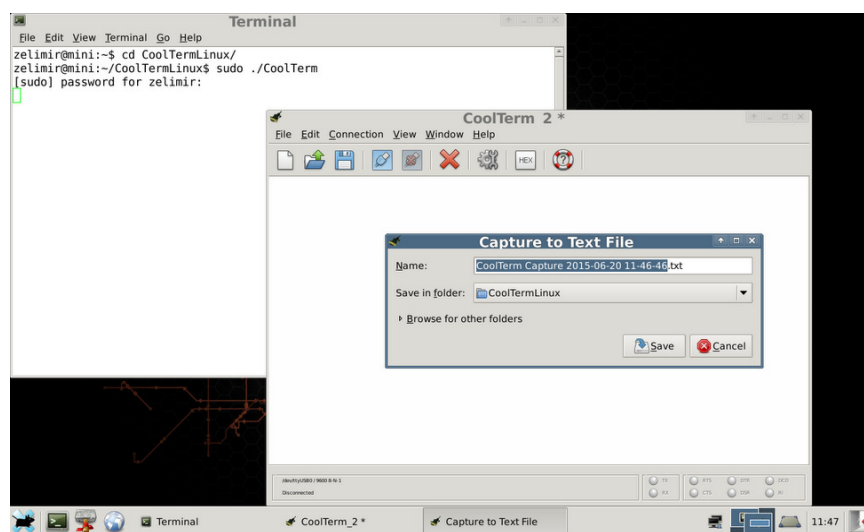
6. MJERENJA I REZULTATI

Nakon pripreme cijelog eksperimenta oprema je spojena na računalo (slika 6-1), grijač je upaljen i namješten na temperaturu od 80° C.

Mjerenja su provedena u dva navrata, prvo je provedeno pokusno mjerenje u trajanju od oko 4,5 sata kako bi se ustanovilo funkcionira li sva oprema i daje li mjerenje čitljive i jasne rezultate. Kao program za kontrolu mjerenja i prikupljanje podataka korišten je *Cool Term* (slika 6-2) na operativnom sustavu *Debian Linux*.



Slika 6-1. Početak eksperimenta



Slika 6-2. Pokretanje mjerenja i bilježenja podataka

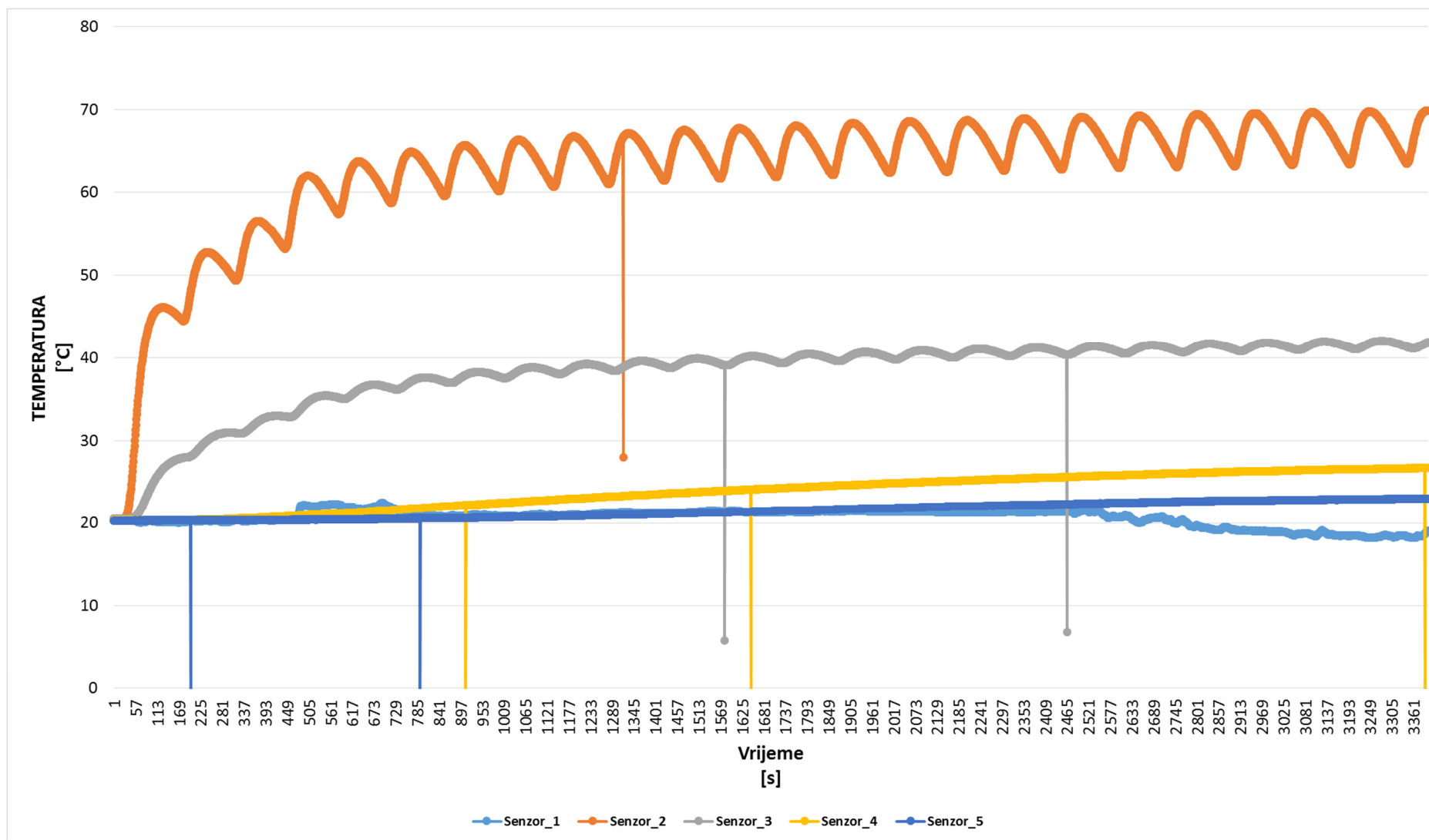
Kako je već navedeno, pokusno mjerenje provedeno je isključivo u svrhu provjere uspješnosti postavljanja opreme i rada sustava za mjerenje temperature. Nakon što je utvrđen ispravan rad sustava mjerenje je obustavljeno. Sklop *Arduino Nano* podešen je da šalje očitavanja temperature na računalo u intervalu od svakih pet sekundi. Neposredno nakon početka mjerenja primijećeno je da senzor 2, kojem je pozicija bila na grijaču, registrira značajan porast temperature. Nakon 10 minuta mjerenja je i senzor 3 (uz tijelo stijene) počeo prikazivati konstantan temperaturni rast. Senzor 4 (pomoćna bušotina bliža glavnoj) i senzor 5 (pomoćna bušotina dalja od glavne) bilježili su sporiji temperaturni rast. Proces mjerenja temperature u stijeni prikazan je na slici 6.3.

Iz grafikona je vidljivo da paljenje i gašenje grijača pomoću termostata za posljedicu ima zagrijavanje sustava stijena/bentonit u intervalu od oko 7 °C, a ne na konstantnu temperaturu. Uslijed toga i očitavanje na senzoru br. 2 (kontakt bentonit/stijena) ima skokove i padove koji su vidljivi okom. Senzori ugrađeni u stijenu (sekundarne bušotine) imaju ravniju krivulju zagrijavanja s laganim porastom.

Senzor br.1 koji je očitavao vanjsku temperaturu pokazuje prvo njen porast, a zatim pad. Razlog za to je „traženje“ optimalnog položaja za mjerenje temperature okoline. Zaključeno je da bi idealan položaj senzora bio na visini uzorka. Pad temperature pod kraj probnog mjerenja pripisuje se padu temperature u atmosferi uslijed promjene vremena.

Zaključeno je da treba provesti duže mjerenje kojim bi se sustav stavio u konstantnije uvjete i u kojem bi se očitali maksimumi porasta temperatura, odnosno približavanje krivulja rasta temperature horizontali.

S obzirom na nedostatak iskustva u provođenju eksperimenta određeno je da period od dva dana (48 sati) treba biti dostatan za postizanje stabilnosti u grijanom sustavu.

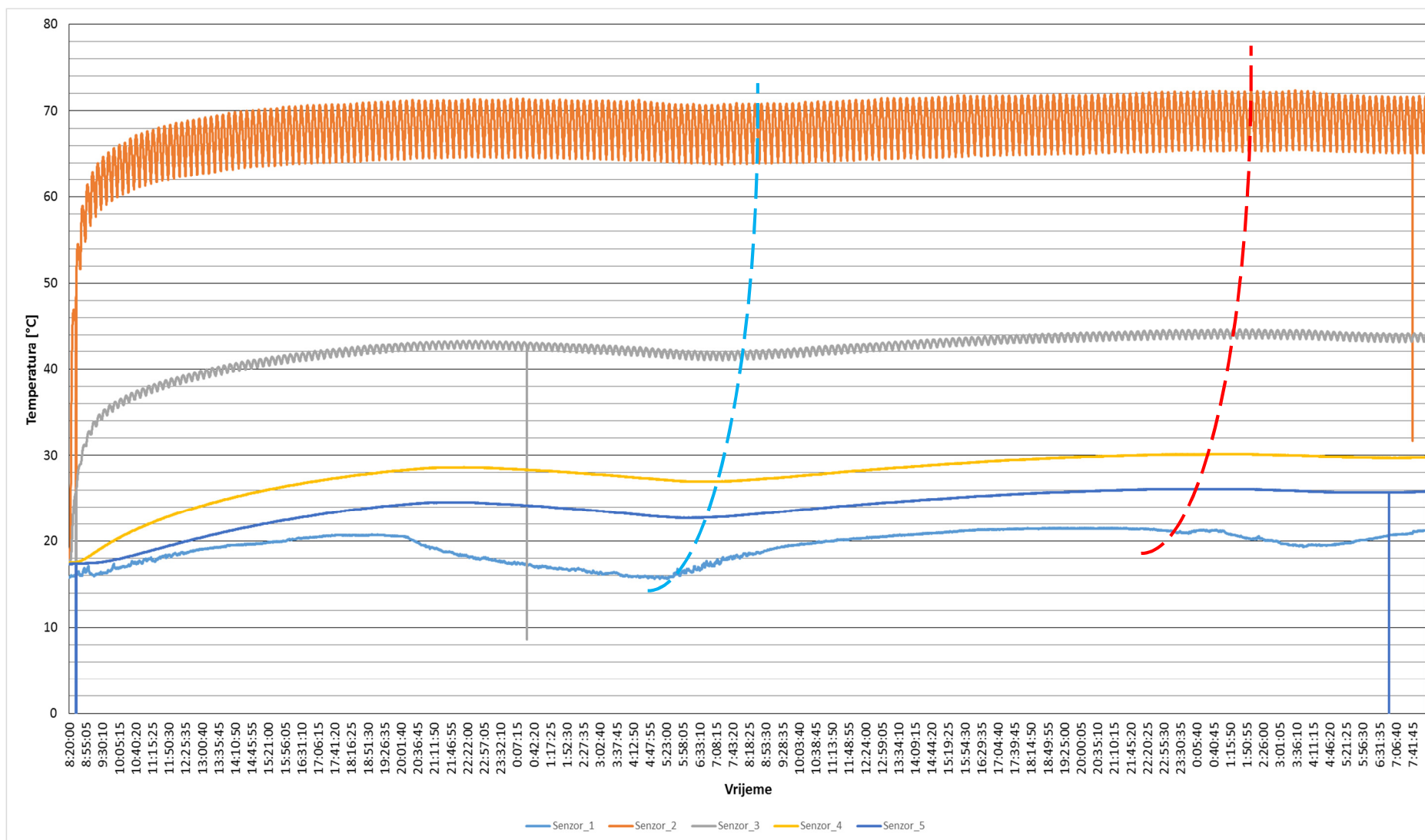


Slika 6-3. Grafikon temperatura pokusnog mjerenja

Nakon 12 sati od završetka prvog testnog mjerenja, ponovljen je cijeli postupak puštanja eksperimenta u rad te je započeto drugo mjerenje koje je trajalo otprilike 48 sati.

Kako je na grafikonu na slici 6-4. prikazano, temperatura očitana senzorom na stjenci grijača rasla je logaritamski dok se nije „ustalila“ na prosječnoj temperaturi od oko 67,5°C. Moguće je primijetiti kako temperatura nakon postizanja maksimuma ipak nije linearna te kako se mijenja u skladu s promjenom temperature okoline. Isto vrijedi i za ostale senzore. Moguće je povući krivulju, kojom se povezuju minimumi, odnosno maksimumi temperatura, koja ukazuje na pomak, odnosno sporije reagiranje senzora bližih grijaču i brže hlađenje/grijanje onih bližih granicama sustava (trend minimuma i trend maksimuma).

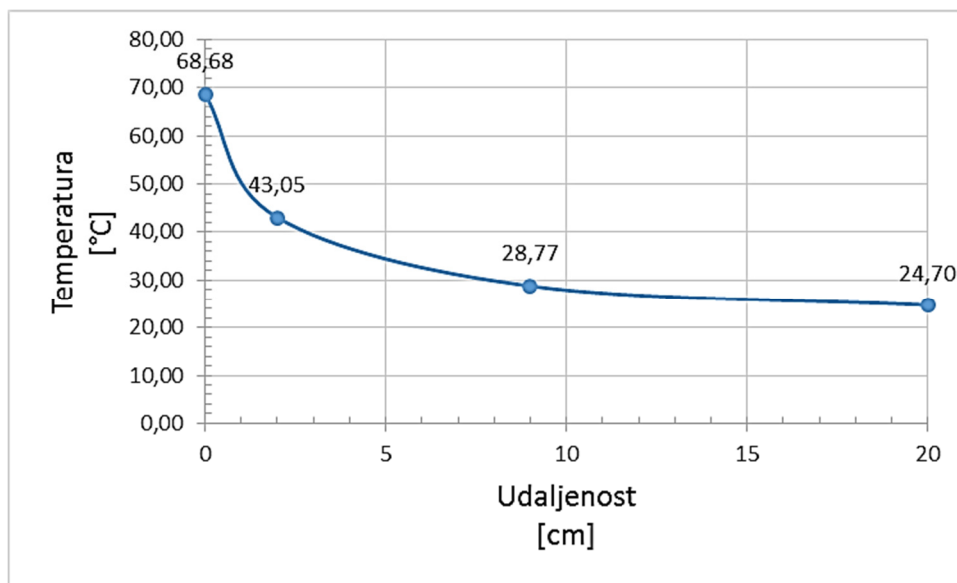
S obzirom da mjerenja nisu rađena in situ na podzemnom poligonu s konstantnom temperaturom okoline, nelinearnost grafikona se može popraviti procjenom srednje temperature, zavisno o njenoj promjeni korigiranom za promjene vanjske temperature. Može se zaključiti da u postojećim uvjetima, bez održavanja mikroklimatskih uvjeta u laboratoriju stabilnima, nije moguće dobiti linearne vrijednosti „zasićenja uzorka stijene toplotom“.



Slika 6-4. Grafikon TEMPERATURA/VRIJEME drugog mjerenja
(--- trend minimuma, --- trend maksimuma)

Na slici 6-5 prikazan je odnos *prosječnih stabilnih temperatura* na senzorima prema udaljenosti od grijača. Iz grafikona se može zaključiti kako je bentonitna glina prilično dobar izolator (pad temperature u iznosu od 25,63°C) dok je pad temperature kroz bazalt daleko blaži.

Nakon prestanka pokusa primijećena je pukotina nastala između bentonita i stijene (slika 6-6). Ista se objašnjava različitim koeficijentom širenja bazalta i bentonita.



Slika 6-5. Pad temperature s udaljenošću od grijača (0-2 cm bentonit, 2-20 cm bazalt)



Slika 6-6. Pukotina između bentonitnog tampona i stijene, nastala nakon završetka ispitivanja i hlađenja sustava

Uzme li se u obzir da će temperatura spremnika biti sličnog reda veličine kao kod spremnika iz pokusa, može se očekivati da će i raspored temperatura biti sličan. Svakako bi u nastavku ispitivanja trebalo modificirati cijeli niz parametara, kako bi se ispitivanje približilo realnim uvjetima, i pozornost obratiti na bentonit kao medij u izravnom dodiru s grijačem.

7. RASPRAVA I ZAKLJUČAK

Konačno odlaganje VRAO i ING je kompleksna inženjerska problematika te je predmet intenzivnog istraživanja u cijelom svijetu. S obzirom na trenutni razvoj tehnologije i mogućnosti za gospodarenje VRAO-om i ING-om kao optimalno rješenje nameće se odlaganje u duboke geološke formacije koje moraju zadovoljiti niz uvjeta prije završnog odabira. Svaka zemlja ima odgovornost razraditi nacionalni program zbrinjavanja svog RAO. U Hrvatskoj ovaj problem još nije postao aktualan iako se radi o vrlo ozbiljnom projektu koji zahtijeva dugotrajna istraživanja i pripremu. Također postoji mogućnost plaćanja drugoj državi za zbrinjavanje RAO, međutim to je puno skuplje rješenje koje bi palo na teret poreznih obveznika.

Kao važan moment pri provedbi ovakvog projekta svakako treba istaknuti pravovremeno informiranje i edukaciju javnosti. Edukacija i informiranje stanovništva po ovom pitanju dugotrajan su proces te bi kroz razne kanale trebalo upoznati javnost s problematikom. Kao sredstva se mogu koristiti ankete, brošure, reklame, WEB stranice, predavanja i radionice na fakultetima i u školama. U suprotnom postoji velika mogućnost za nerazumijevanje i strah javnosti što može uzrokovati nezadovoljstvo, prosvjede pa čak i raseljavanje stanovništva.

U Hrvatskoj se kao potencijalne lokacije spominju one sa stabilnim magmatskim stijenama (Psunj i Papuk). Posljedica njihovog odabira bila bi primjena „švedskog“ modela odlagališta. U ovom radu je napravljen laboratorijski model odlaganja VRAO i ING koji simulira odlaganje u takvim stijenama.

Ovaj eksperiment je proveden u laboratorijskim uvjetima, sa dostupnim komadom stijene, na sobnoj temperaturi s ograničenim vremenom za mjerenja. Ipak je pokazao zadovoljavajuće rezultate s obzirom na funkcionalnost cijele opreme te očite razlike između dva provedena mjerenja. Drugo mjerenje, u trajanju od oko 50 sati, prikazalo je stabiliziranje temperature na senzorima najudaljenijim od grijača nakon osam sati grijanja. iz toga se može zaključiti da je potreban period od oko 8 sati za stabilizaciju sustava glina/stijena po pitanju porasta temperature. Bentonit se pri tome pokazao kao značajan izolatorski materijal, s obzirom da je temperatura na 2 cm debljine bentonitnog tampona imala pad od oko 25 °C, dok je pad na 7, odnosno 11 cm stijene iznosio 14, odnosno 7,5 °C. Mjerni uređaji korišteni u radu pokazali su se točnim i pouzdanim tijekom čitavog eksperimenta.

Usljed ograničenih raspoloživih sredstava i tehničkih mogućnosti pri provedbi ovog eksperimenta, ostavlja se mogućnost za nekoliko preinaka koje su izvedive u budućnosti:

- Odabir materijala za ispitivanje (stijena) svakako bi trebao biti vođen poznavanjem mogućih lokacija za potencijalno duboko geološko odlagalište VRAO/ING.
- Oblik stijene korišten u radu je poprilično nepovoljnog oblika, te bi se u budućnosti trebalo razmisliti o većem bloku stijene pravilnog oblika (kocka ili prizma). To bi značajno olakšalo izradu 3D modela eksperimenta te bi se stvorilo prostora za veći broj bušotina i samim time za više opreme i mjernih uređaja koji bi poboljšali kvalitetu cijelog eksperimenta.
- Pri bušenju glavne bušotine treba nastojati dobiti dovoljnu dubinu kako bi u nju stalo cijelo tijelo grijača čime se maksimalno reducira potreba za betoniranjem.
- Predlaže se dodavanje praha izbušene matične stijene u cementnu smjesu, kako bi se beton za ispunu oko senzora što više približilo svojstvima stijene.
- Ugradnja bentonitnog tampona bi se mogla izvesti mlaznim načinom ili spuštanjem prešanih prstenova male razlike promjera u odnosu na bušotinu/tijelo grijača.
- U bentonitnom tamponu bi svakako trebalo mjeriti vlažnost.
- Poznavanje plinopropusnosti (a time i vodopropusnosti) stijene kao i njenog poroziteta pomoglo bi u matematičkom modeliranju eksperimenta.
- Kako bi se što više približilo uvjetima koji vladaju u podzemnim odlagalištima predlaže se uranjanje stijene u posudu ispunjenu vodom. To bi omogućilo kvalitetnija dodatna ispitivanja na npr. koroziju spremnika, poroznost stijene, hidrataciju bentonitnog tampona i td..

Za dobivanje pouzdanijih podataka, koji bi mogli biti korišteni u nacionalnom programu zbrinjavanja VRAO i ING potrebna je primjena navedenih preinaka i duži vremenski period provedbe eksperimenta (od oko 2 godine).

8. LITERATURA

Baldwin, T., Chapman, N., Neall, F., 2008. Geological disposal options for high-level waste and spent fuel. Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority.

Borojević Šostarić, S. & Neubauer, F., 2012. Principle Rock Types for Radioactive Waste Repositories, Zbornik Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, 24. Zagreb, str. 11-18.

Domitrović, D., 2012. Utjecaj bubrenja bentonitne gline na njezina mehanička svojstva. Doktorski rad, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

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.

Garašić, V., 2015. Mikroskopska analiza uzorka. Izvješće. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Grimsel, 2015. Full-scale engineered barriers experiment (FEBEX) I. URL: <http://www.grimsel.com/gts-phase-v/febex/febex-i-introduction-> (8.4.2015.)

Hussain, A., Sait, H., 2012. CFD Modelling of the Dry Spent Fuel Storage of a Pressurized Heavy Water Reactor. Mechanical Engineering Department, King Abdulaziz University, Rabigh.

IAEA International Atomic Energy Agency, 1994. Classification of Radioactive Waste, Vienna: A Safety Guide, Safety Series No. 111 – G – 1. 1.

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

IAEA (International Atomic Energy Agency), 2003, Scientific and Technical Basis for Geological Disposal of Radioactive Wastes, STI/DOC/010/413, Vienna.

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

King, F., 2005. Overview of the corrosion behavior of copper and steel used fuel containers in a deep geological repository in the sedimentary rock of the Michigan Basin. Supporting Technical Report, Report No: 06819-REP-01300-10101-R00.

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

Kučar-Dragičević, S., 1996. Low- and Intermediate Level Radioactive Waste Repository in Croatia: Zagreb: Technical Design, Treći simpozij društva za zaštitu od zračenja.

Kujundžić, T., Korman, T., Macenić, M., 2012. Sadašnje spoznaje o bušenju bušotina velikog promjera za odlaganje otpada visokog stupnja radioaktivnosti i istrošenog nuklearnog goriva. , Zagreb: Rudarsko- geološko- naftni fakultet.

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.

McGinnes, D. F., 2007. Waste Sources and Classification, Iz: Alexander, W. R. & McKinley, L. E. eds., Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Amsterdam: Elsevier, str. 8-40.

Narodne novine br. 44/2008. Uredba o uvjetima te načinu zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih zatvorenih radioaktivnih izvora i izvora ionizirajućeg zračenja, Zagreb: Narodne novine d.d.

Neall, F., Pastina, B., Snellman, M., Smith, P., Gribo, P., Johnson, L., 2008. Safety assessment of a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto. Stockholm, Sweden: SKB.

Posiva, 2005. Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel Design Report, Olkiluoto, Finland: VTT Processes, ISBN 951-652-134-7.

Quintessa, 2013. Quintessa Supports SSM's Regulatory Review of SKB's SR-Site Safety Assessment. URL: <https://www.quintessa.org/latest-news/quintessa-supports-ssms-regulatory-review-of-skbs-sr-site-safety-assessment.html> (22.3.2015)

Strategija zbrinjavanja otpada i istrošenog nuklearnog goriva Republike Hrvatske, 2009.

Strategija zbrinjavanje radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva (NACRT, 2014). Zagreb: Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost.

Stupnišek - Lisac, E., 2007. Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala, Zagreb: FKIT.

Svoboda, J., Vasicek, R., 2008. Preliminary geotechnical results from the Mock-Up-CZ experiment, Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Prag: Centre of Experimental Geotechnics.

Szakálos, Hultquist, and Wikmark, 2008. The corrosion of copper in water – impacts on the safety of the repository. Stockholm: Royal Institute of Technology.

USA, 2011. Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor Fuel in the United States URL: <http://dissidentvoice.org/wp-content/uploads/2011/03/3-spent-fuel-rods-in-pool1.jpg>. (22.3.2015)

USA. 1988. Information Report On the Basalt Waste Isolation Project for High-level Nuclear Waste Disposal at Hanford, Washington.

Veinović, Ž., Kovačević Zelić, B., Domitrović, D., 2014. Deep geological disposal of spent nuclear fuel and high level waste – Current state and future (u objavljivanju).

Živković, S.A., Kovačević Zelić, B., 2002. Podzemno odlaganje otpada: interna skripta. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.