Modeliranje termo-hidro-mehaničkih efekata u programu FLAC

Pajnić, Mark Daniel

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:169:345211

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

MODELIRANJE TERMO-HIDRO-MEHANIČKIH EFEKATA U PROGRAMU FLAC

Diplomski rad

Mark Daniel Pajnić

R 203

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

MODELIRANJE TERMO-HIDRO-MEHANIHKIH EFEKATA U PROGRAMU FLAC

Mark Daniel Pajnić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Rudarstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U radu je opisan koncept odlaganja istrošenog nuklearnog goriva i visoko radioaktivnog otpada u duboke geološke strukture čija je zadaća zaštititi okoliš od negativnog i dugotrajnog utjecaja radijacije. Odlaganje takve vrste otpada predstavlja ozbiljan inženjerski problem u svim zemljama s nuklearnim energetskim programom, a koncepti odlagališta se kontinuirano razvijaju i nadopunjuju. Za potrebe ovog rada napravljen je matematički model u programu FLAC koji prati širenje topline u odlagalištu kao i mehaničke deformacije geološke sredine. Model predstavlja odlaganje istrošenog nuklearnog goriva u bakrenom spremniku, s bentonitnom glinom kao dodatnom inženjerskom barijerom, aksijalno postavljenima u odlagališnom tunelu u granitu kao geološkoj sredini. Rezultati su analizirani i predstavljeni u radu.

Ključne riječi: istrošeno nuklearno gorivo, visoko radioaktivni otpad, granit, bentonit, model, duboko geološko odlaganje, toplina

Diplomski rad sadrži: 75 stranice, 3 tablica, 69 slika, 1 prilog, i 39 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF

Pomagao pri izradi: Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF
Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent, RGNF
Dr. sc. Tomislav Korman, docent, RGNF

Datum obrane 21. Veljače, 2019, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

MODELLING THERMO-HYDRO-MECHANICAL EFFECTS IN FLAC SOFTWARE

Mark Daniel Pajnić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, geology and petroleum engineering
Mining engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The concept of the disposal of spent nuclear fuel and highly radioactive waste in the deep geological structures, whose task is to protect the environment from the negative and long-lasting effects of radiation, is presented in thesis. Disposal of this type of waste represents serious engineering problem in all countries with nuclear energy program, and disposal concepts are constantly developed and improved. A mathematical model was developed in the FLAC program which tracks the spread of heat and mechanical deformations in the repository. The model represents the disposal of spent nuclear fuel in a copper cask, with bentonite clay as an additional engineering barrier, axially positioned in disposal tunnel within the granite as geological environment. The results are analysed and presented in the thesis.

Keywords: spent nuclear fuel, highly radioactive waste, bentonite, model, deep geological disposal, heat

Thesis contains: 75 pages, 3 tables, 69 figures, 1 appendixes, i 39 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Assistant Professor, Želimir Veinović, PhD, RGNF
Associate Professor Name Surename, PhD

Tech. assistance: Assistant Professor, Dubravko Domitrović, PhD, RGNF
Assistant Name Surename

Reviewers: Assistant Professor, Želimir Veinović, PhD, RGNF
Assistant Professor, Dubravko Domitrović, PhD, RGNF
Assistant Professor, Tomislav Korman, PhD, RGNF

Defence date: February 21, 2019, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. RADIOAKTIVNI OTPAD I ISTROŠENO NUKLEARNO GORIVO 2
2.1. Podjela radioaktivnog otpada 2
2.2. Istrošeno nuklearno gorivo (ING) 6
3. KONCEPTI ODLAGANJA ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA 11
3.1. Idejna rješenja 15
3.2. Koncept NAGRA (aksijalno odlaganje) 19
3.3. Termo-hidro-mehanički efekti (THM efekti) 30
4. MODELIRANJE 36
4.1. FLAC 36
4.2. Dizajn modela i odabir parametara 37
4.3. Simulacije 42
4.4. Rezultati i rasprava 46
4.4.1. Rezultati simulacije mehaničkih efekata 46
4.4.2. Rezultati temperaturne analize za bušotinu promjera 2.5 m gdje bentonit ima 26.7% sadržaja vode 49
4.4.3. Rezultati temperaturne analize za bušotinu promjera 2.5 m gdje bentonit ima 70% sadržaja vode 57
4.4.4. Rezultati temperaturne analize za bušotinu promjera 3.5 m gdje bentonit ima 26.7% sadržaja vode 62
4.4.5. Rezultati temperaturne analize za bušotinu promjera 3.5 m gdje bentonit ima 70% sadržaja vode 67
5. ZAKLJUČAK 72
6. POPIS LITERATURE 73

POPIS SLIKA

Slika 2—1 Grafički prikaz podjele radioaktivnog otpada (IAEA, 2009). 3
Slika 2—2 Skladištenje u bazenu s bornom vodom u La Hague, Francuska (Nuclear engineering international, 2018) 7

Slika 2—3 Metalni spremnik tipa Castor Geo razvijen od strane Njemačke firme GNS (GNS, 2019). 8
Slika 2—4 Grafički prikaz nuklearnog goriva (U.S. NRC, 2019). 9
Slika 3—1 Grafički prikaz dubokog geološkog odlagališta (ENSI, 2019) 11
Slika 3—2 Grafički prikaz KBS-3 koncepta odlaganja u matičnoj stijeni granita (SKB, 2019) 13
Slika 3—3 Primjer spremnika za istrošeno nuklearno gorivo (Carbonbrief, 2015) 14
Slika 3—4 Grafički prikaz višestrukih barijera. (M. Sanchez i dr., 2009) 15
Slika 3—5 Grafički prikaz tipova uzlaznog bušenja (Kujundžić i dr., 2012) 17
Slika 3—6 Horizontalno proširivanje s povlačenjem (Kujundžić i dr., 2012) 18
Slika 3—7 Shematski prikaz horizontalnog bušenja uz proširivanje potiskivanjem (Posiva, 2018) 18
Slika 3—8 Grafički prikaz ispunjavanja bušotina i hodnika bentonitnom glinom (Posiva, 2019) 19
Slika 3—9 Lokacija potencijalnog dubokog geološkog odlagališta u strukturi granita (NAGRA, 1994) 20
Slika 3—10 Idejni prikaz dubokog geološkog odlagališta u granitu (NAGRA, 1994) 21
Slika 3—11 Grafički prikaz sustava barijera (NAGRA, 1994) 22
Slika 3—12 Shematski prikaz čeličnog spremnika (NAGRA, 1994) 24
Slika 3—13 Prikaz bakrenog spremnika dizajniranog od strane Švedskog SKB (SKB, 2010.) 25
Slika 3—14 Grafički prikaz zatvaranja bušotine granuliranim betnonitom. (Grimsel test site, 2019.) 28
Slika 3—15 Bušeći stroj korišten u Onkalu (Posiva, 2019). 30
Slika 3—16 Koncept odlaganja VRAO ili ING-a unutar projekta FEBEX: 1) čelični spremnik, unutar kojeg se nalazi VRAO ili ING, 2) horizontalno pozicioniran unutar tunela, 4) okružen glinenom barijerom u obliku blokova 4) glineni blokovi su napravljeni od kompaktiranog bentonita visoke gustoće (Grimsel test site, 2019) 32
Slika 3—17 postavljanje grijača u bušotinu ispunjenu kompaktiranim bentonitom (Grimesl test site, 2019) 32
Slika 3—18 prikaz rezultata očitanja ispitivanja FEBEX I (Grimsel test site, 2019) 33
Slika 3—19 Modeliranje THM efekata u računalnom programu CODE-BRIGHT mock up testa-konture saturacije u različitim vremenima (Grimsel test site, 2019) 34
Slika 4—1 Sučelje softvera FLAC (ITASCA, 2019.) 36

Slika 4—2 Primjer unosa podataka putem programskog jezika FISH (ITASCA, 2019 37
Slika 4—3 prikaz modela netaknute stijene granita 38
Slika 4—4 Prozor za odabir parametara stijene granita. 38
Slika 4—5 Prozor za odabir parametara granuliranog bentonita 39
Slika 4—6 Prozor za odabir parametara kompaktiranog bentonita..... 40
Slika 4—7 Prozor za odabir parametara bakrenog spremnika 40
Slika 4—8 Model s nanesenim naprezanjima. 42
Slika 4—9 Bušotina unutar matične stijene granita promjera 3.5 m. 43
Slika 4—10 Bušotina unutar matične stijene granita promjera 2.5 m. 43
Slika 4—11 spremnik s glinenom ispunom unutar bušotine promjera 3.5 m. 44
Slika 4—12 spremnik s glinenom ispunom unutar bušotine promjera 2.5 m. 44
Slika 4—13 Kontrolne točke 45
Slika 4—14 Vektori vertikalnog pomaka netaknute stijene 46
Slika 4—15 Vektori vertikalnog pomaka nakon izbušene bušotine promjera 3.5 m 47
Slika 4—16 Vektori vertikalnog pomaka nakon izbušene bušotine promjera 2.5 m 47
Slika 4—17 Vektori pomaka unutar stijene promjera 3.5 m 48
Slika 4—18 Vektori pomaka unutar bušotine promjera 2.5 m 48
Slika 4—19 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za 2 mj. 50
Slika 4—20 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 2 mj za bušotinu. ... 51
Slika 4—21 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za 6 mj. 52
Slika 4—22 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 6 mj. 53
Slika 4—23 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka u periodu od godinu dana 54
Slika 4—24 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od godinu dana. 55
Slika 4—25 Profil širenja topline u ravnini bušotine u periodu od godinu dana. 56
Slika 4—26 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka u periodu 2mj. 57
Slika 4—27 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 2 mj. 58
Slika 4—28 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka u periodu 6mj. 59
Slika 4—29 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 6 mj. 59

Slika 4—30 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka u periodu godine dana..... 60
Slika 4—31 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od godine dana. 61
Slika 4—32 Profil širenja topline u ravnini bušotine u periodu od godine dana. 62
Slika 4—33 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za period od 2 mj. 62
Slika 4—34 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu 2 mj. 63
Slika 4—35 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za period od 6 mj. 63
Slika 4—36 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu 6 mj. 64
Slika 4—37 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za period od godine dana..... 65
Slika 4—38 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu godine dana. 65
Slika 4—39 Profil širenja topline u ravnini bušotine u periodu od godine dana. 66
Slika 4—40 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za 2 mj. 67
Slika 4—41 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 2 mj. 68
Slika 4—42 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za 6 mj. 68
Slika 4—43 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 6 mj. 69
Slika 4—44 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za period od godine dana..... 70
Slika 4—45 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od godine dana. 70
Slika 4—46 Profil širenja topline u ravnini bušotine u periodu od godine dana. 71

POPIS TABLICA

Tabela 2—1 Podjela radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj 4
Tabela 3—1 Koncepti dubokog odlaganja VRAO i ING-a (Kujundžić i dr.,2012)..... 16
Tabela 4—1 Tablica toplinskih parametara..... 41

POPIS PRILOGA

Prilog 1 Predložak omota za CD

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
σ_v	Pa	vertikalno naprezanje
λ	W/mK	toplinska propusnost
E	Pa	modul elastičnosti
G	Pa	modul posmika
α	°C	Koeficijent termalne ekspanzije
c_p	J/kg°C	specifični toplinski kapacitet
T	°C	temperatura
E	Sv	efektivna doza
Q	kW	toplinska energija

1. UVOD

Prema zakonu o izmjenama i dopunama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 130/17) radioaktivnim otpadom (RAO) smatra se otpadna tvar u plinovitom, tekućem ili krutom stanju za koju nije predviđena daljnja uporaba te koja sadrži radioaktivne tvari čija je aktivnost ili koncentracija aktivnosti iznad granične vrijednosti za otpuštanje iz nadzora koju pravilnikom propisuje ravnatelj zavoda. Prema tome, radioaktivni otpad treba adekvatno zbrinuti, odnosno odložiti uzimajući u obzir svojstva otpada. Glavna zadaća odlaganja RAO je sprječavanje ulaska aktivnih radionuklida u biosferu te su stoga razvijene brojne metode odlaganja koje ispunjavaju tu zadaću. Cilj ovog rada je prikazati utjecaj termo-hidro-mehaničkih efekata na inženjerskim i geološkim barijerama nakon odlaganja istrošenog nuklearnog goriva (ING), odnosno visoko radioaktivnog otpada (VRAO) kroz određeni vremenski period. Iz tog razloga napravljen je model u programu FLAC na primjeru kojeg su prikazane deformacije uslijed mehaničkih naprezanja kao i širenje topline kroz vremenski period od godinu dana. Ovim radom želi se prikazati brzina širenja toplinske energije generirane ING-a kroz višestruke barijere te dokazati termo-hidro-mehanička stabilnost tih barijera koje se koriste prilikom odlaganja u duboke geološke barijere.

2. RADIOAKTIVNI OTPAD I ISTROŠENO NUKLEARNO GORIVO

Problem odlaganja radioaktivnog otpada, specifično istrošenog nuklearnog goriva, izazvan karakteristikama njegovog sastava, aktiviteta i dugovječnosti radionuklida detaljno će biti obrađen u ovom poglavlju.

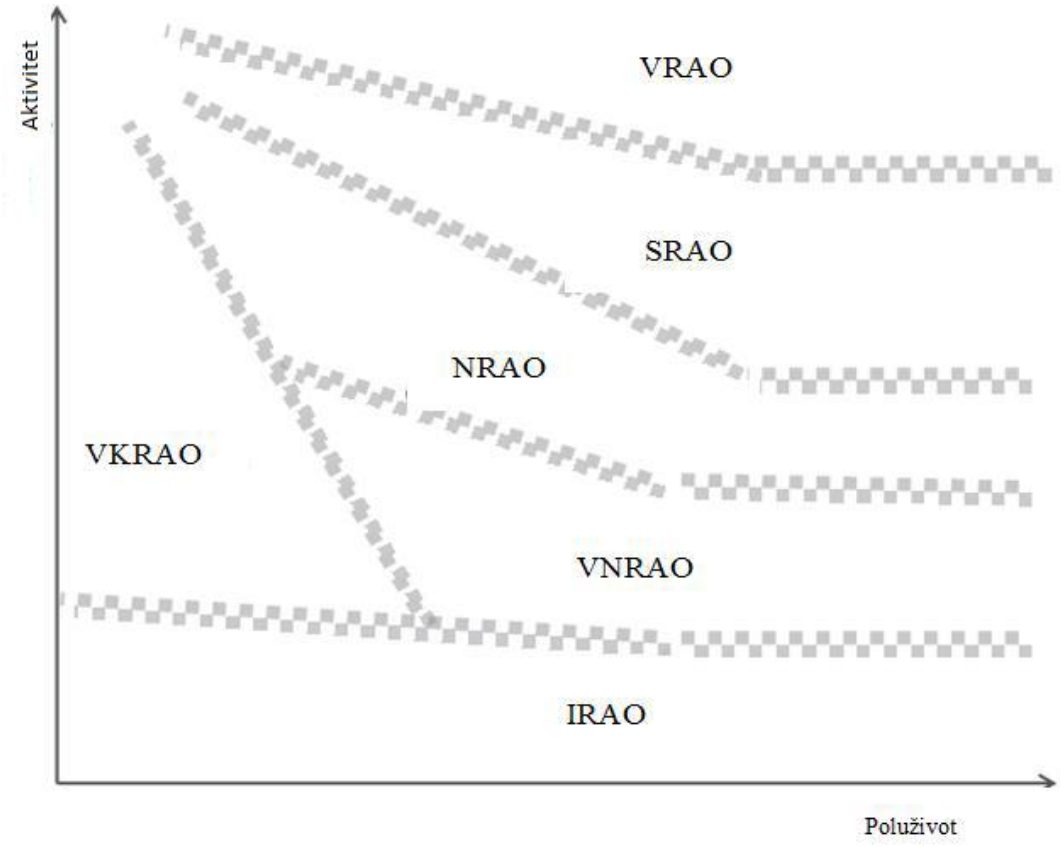
2.1. Podjela radioaktivnog otpada

Radioaktivni otpad dijeli se po mjestu nastanka, koncentraciji i aktivitetu radionuklida, kemijskom sastavu otpada, agregatnom stanju te dugovječnosti radionuklida. Podjele se razlikuju ovisno o državi, stoga može doći do problema u komunikaciji između određenih država. Iz tog razloga IAEA (*International Atomic Energy Agency*) razvila je internacionalnu podjelu kao bazu za podjele unutar država objavljenu u publikaciji IAEA *Safety Standards „Classification of radioactive waste*, 2009". U navedenom standardu radioaktivni otpad je podijeljen u šest skupina:

1. **Izuzeti otpad (IRAO):** Otpad koji sadrži radioaktivne izotope čije su aktivnosti ispod ili jednake propisanim graničnim vrijednostima te su pritom izuzeti od obveze regulatornog nadzora za potrebe zaštite zračenja. Čim otpad ne ulazi pod regulatorni nadzor za potrebe zaštite zračenja on se više ne smatra radioaktivnim otpadom.
2. **Vrlo kratkoživući otpad (VKRAO):** U ovu skupinu pripada otpad koji sadrži radionuklide kratkog vremena poluraspada. On se odlaže na kraći period vremena do nekoliko godina, nakon čega se izdvaja iz regulatornog nadzora, odlaže ili koristi. Takav otpad uglavnom nastaje prilikom istraživanja ili kao rezultat medicinskih potreba.
3. **Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO):** Otpad s niskom razinom radioaktivnosti. Takav otpad ne zahtijeva odlaganje u odlagalištima s višestrukim barijerama već ga se odlaže u površinskim i pripovršinskim odlagalištima.
4. **Nisko radioaktivni otpad (NRAO):** Otpad koji može sadržavati kratkoživuće radionuklide s višim razinama aktiviteta i dugoživuće radionuklide s razmjerno niskim razinama aktiviteta stoga ga je potrebno odlagati u pripovršinskim odlagalištima s većom razinom izolacije u razdoblju od nekoliko stotina godina.

5. **Srednje radioaktivni otpad (SRAO):** Otpad koji sadrži dugoživuće radionuklide, zahtijeva veću razinu izolacije te nalaže nadzor niske razine zbog generiranja topline tijekom skladištenja i odlaganja. Sadrži alfa emitere koji radioaktivnim raspadom ne smanjuju svoj aktivitet na razinu zadovoljavajuću za pripovršinsko odlaganje u vremenskom period unutar kojeg se provodi institucionalni nadzor. Iz tog razloga ovaj se otpad odlaže na dubinama od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara.
6. **Visoko radioaktivni otpad (VRAO):** Otpad koji sadrži visoke koncentracije dugoživućih radionuklida visokog aktiviteta koji generira značajne količine topline svojim radioaktivnim raspadom. Prilikom projektiranja odlagališta uzimaju se u obzir navedene karakteristike te se takav otpad odlaže u stabilnim geološkim formacijama na većim dubinama od nekoliko stotina metara.

Na slici 2-1 prikazana je grafička shema klasifikacije otpada dana u IAEA-inom standardu. Y-os prikazuje aktivitet otpada, dok X-os prikazuje poluživot radionuklida.



Slika 2—1 Grafički prikaz podjele radioaktivnog otpada (IAEA, 2009).

Podjela objavljena od strane IAEA u danom standardu služi kao baza po kojoj bi se ostale države trebale voditi kako bi olakšale unutarnju komunikaciju, kao i komunikaciju s ostalim državama. U Republici Hrvatskoj krovni zakon radiološke i nuklearne sigurnosti je Zakon o izmjenama i dopunama zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 130/2017) kojeg pripisuje Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS), a potvrđuje ga Hrvatski sabor. DZRNS je regulatorno tijelo zaduženo za praćenje i kontrolu radiološkim materijama unutar Republike Hrvatske. Krovnim zakonom definirani su glavni pojmovi, mjerne jedinice vezane za radioaktivne materijale te konačno postupanje, odnosno gospodarenje radioaktivnim materijalima unutar Republike Hrvatske. Na temelju krovnog zakona raspisuju se razni pravilnici kako bi se detaljnije definirale određene stavke propisane krovnim zakonom od kojih će biti spomenuto par pravilnika koji su bitni za potrebe ovog diplomskog rada. Pravilnikom o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i istrošenih izvora (NN 12/2018) propisane su sadržaj otpada, monitoring, uvjeti i načini zbrinjavanja radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva, odnosno gospodarenje istim. Pravilnikom su propisane granične vrijednosti radioaktivnih elemenata i njihove koncentracije ispod kojih se otpad ispušta iz nadzora te se više ne smatra radioaktivnim otpadom. Unutar istog pravilnika također je određena podjela radioaktivnog otpada prikazana u tablici 2-1. Propisana podjela slijedi podjelu po agregatnom stanju, s obzirom na njegova tipična svojstva i predviđeni način zbrinjavanja, podijeljena u šest skupina.

Tabela 2—1 Podjela radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj

KLASA	TIPIČNA SVOJSTVA	NAČINI ZBRINJAVANJA
Otpušteni radioaktivni otpad (ORAO)	Radioaktivni otpad koji udovoljava uvjetima za otpuštanje iz regulatornog nadzora.	Otpuštanje iz regulatornog nadzora. Jednom otpušten iz nadzora ovaj se materijal više ne smatra radioaktivnim otpadom.
Vrlo kratkoživući radioaktivni otpad (VKRAO)	Sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 100 dana.	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom otpuštanje iz regulatornog nadzora. Ovom radioaktivnom otpadu će se skladištenjem kroz nekoliko godina koncentracija aktivnosti smanjiti na ili ispod vrijednosti propisanih u Prilogu 1 ovog Pravilnika.
Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO)	Radioaktivni otpad s većim koncentracijama aktivnosti od VKRAO. Koncentracije dugoživućih radionuklida u ovoj kategoriji otpada su zanemarive.	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom otpuštanje iz regulatornog nadzora. Ovom radioaktivnom otpadu će se skladištenjem kroz nekoliko desetaka godina granične koncentracije aktivnosti smanjiti na ili ispod vrijednost propisanih u Prilogu 1 ovog Pravilnika.
Nisko radioaktivni otpad (NRAO)	Radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 30 godina i ograničene koncentracije aktivnosti dugoživućih radionuklida (4.000 Bq/g u pojedinom pakiranju, odnosno 400 Bq/g za kompletnu masu radioaktivnog otpada). Proizvodnja topline u ovom otpadu niža je od 2 kw/m3.	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u površinskom ili podzemnom odlagalištu.
Srednje radioaktivni otpad (SRAO)	Radioaktivni otpad koji sadrži veće koncentracije aktivnosti od NRAO.	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u podzemnom odlagalištu na dubini od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara ispod površine.
Visoko radioaktivni otpad (VRAO)	Radioaktivni otpad u kojemu je proizvodnja topline iznad 2 kw/m3.	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u podzemnom odlagalištu smještenom u stabilnoj geološkoj formaciji na dubini od nekoliko stotina metara ispod površine.

Usporedbom podjele propisane u IAEA-inom standardu i podjele Republike Hrvatske evidentno je da ne postoje značajne razlike. Pravilnikom o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog zračenja (NN 38/2018) propisane su granične vrijednosti izloženosti za pojedinog stanovnika kao i za izložene radnike ionizirajućem zračenju, definicije vezane za određivanje graničnih vrijednosti,

efektivne doze (efektivne doze predstavljaju zbroj težinskih ekvivaletnih doza u tkivima i organima tijela kao posljedica unutarnjeg i vanjskog zračenja (DZRNS, 2017)) pojedinca, način određivanja, način vođenja evidencije, rokovi mjerenja kao i vrste zračenja. Mjerenja obavljaju ovlašteni dozimetrijski stručni servisi kako bi odredili operativne dozimetrijske veličine potrebne za procjenu vanjskog i unutarnjeg zračenja osoba, npr. efektivna doza (E) izloženosti radnika je 20 mSv/god. Krovnim zakonom definirane su prirodne radioaktivne tvari (NORM) koji su uglavnom prirodni minerali koji sadrže uranij, torij i cirkon, te prirodne radioaktivne tvari sa svojstvima koja se mijenjaju korištenjem tehnoloških postupaka (TENORM), npr. rezidui koji nastaju kao ostaci prilikom tehnoloških procesa koji su onečišćeni prirodnim radioaktivnim materijalima ili ga u sebi sadrži. Iz tog razloga bitno je razlikovati otpad po mjestu nastanka. Radioaktivni otpad nastaje (Pravilnik o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu, NN 40/2018; Veinović i dr., 2018)

- **U industrijskim procesima** koji koriste radioaktivne materijale u svojim procesima kao što su proizvodnja cementa, proizvodnja geotermalne energije, talionice kositra/olova/bakra, proizvodnja nuklearnog goriva, postrojenjima za obradu istrošenog nuklearnog goriva, energanama na ugljen itd.
- **U istraživačkim ustanovama** za istraživanje utjecaja zračenja koji stvaraju otpad te u istraživačkim koji se razlikuje od industrijskog radioaktivnog otpada
- **U bolnicama** koje koriste radioaktivne materijale u svrhu otkrivanja malignih bolesti kao i prilikom liječenja pacijenata radioaktivnim materijalima
- **U vojnim postrojenjima** koje koriste radioaktivne materijale u svrhu naoružanja
- **U nuklearnim elektranama** gdje prilikom dekomisije, odnosno razgradnje postrojenja nastaju značajne količine NiSRAO te također prilikom samoga rada nuklearne elektrane.
- **U rudarskim** radovima prilikom eksploatacije radioaktivnih ruda kao i u postrojenjima za njihovu obradu

2.2. **Istrošeno nuklearno gorivo (ING)**

Nuklearno gorivo koristi se u nuklearnim reaktorima zbog svog fisijskog karaktera. Nastankom lančane fisijske reakcije dolazi do cijepanja jezgre atoma neutronima prilikom čega se oslobađa znatna količina energije. Nakon što gorivo dostigne vrhunac fisijskog potencijala, ono se vadi i zamjenjuje novim gorivom. Primjerice u nuklearnoj elektrani Krško (NEK) koristi se *Westinghouse* lakovodni tlačni reaktor (*PWR reactor*) gdje se

godišnje vadi trećina gorivih elemenata i zamjenjuje novim. ING nakon vađenja iz reaktora sadrži preostale fisijske produkte, aktivacijske produkte kao i aktinide (aktinidi predstavljaju teške nuklide s rednim brojem iznad 89 (Feretić i dr., 1995)) te generira značajne količine topline uzrokovane raspadanjem radioaktivnih izotopa (*IAEA safety standards- Classification of radioactive waste, 2009*). Gorivo iz NEK provede u reaktoru 3 godine te nakon vađenja generira toplinsku energiju (Q) oko 10 kW (Feretić i dr., 2000). Temperatura ING-a se kreće od 800 °C do 1200 °C, ovisno o vijeku boravljenja u reaktoru i tipu reaktora (Manaktala, 1993). Postoje tri tipa prijenosa topline kod spremnika ING-a, kondukcija, konvekcija i prijenos topline zračenjem. Kondukcija i konvekcija su dominatni tipovi prijenosa topline na površini spremnika. Prijenos topline zračenjem postaje dominantan kada je temperatura istrošenog goriva vrlo visoka (Hussain i dr., 2012). Iz tog razloga istrošeno nuklearno gorivo se skladišti u bazenima s bornom vodom (slika 2-2) radi hlađenja.



Slika 2—2 Skladištenje u bazenu s bornom vodom u La Hague, Francuska (Nuclear engineering international, 2018)

Proces hlađenja u bazenima traje u prosjeku od 5 do 10 godina unutar reaktorske zgrade ili izvan nje u posebno sagrađenim zgradama za rukovanje istrošenim gorivom, gdje postoji mogućnost izgradnje bazena većih kapaciteta. Prema IAEA-inom sigurnosnom standardu iz 2012. godine (*IAEA Safety standards- Storage of spent nuclear fuel, 2012*) bazen mora hladiti istrošeno nuklearno gorivo, štititi od radioaktivnog zračenja radnike izvan bazena te

služiti kao medij neutrona iz zaostalih fisija kako bi se onemogućila kritičnost. Dodatno propisuje unaprijed razvijene planove uslijed izvanrednih akcidenata kao i metode manipuliranja spremnika ING-a i ostalih sigurnosnih zahtijeva koje skladište mora ispuniti. Dubina bazena je od 12 do 15 m, a zidovi i dno su obloženi nehrđajućim čelikom kako bi se zaštitilo od korozije i neželjenog propuštanja rashladne vode. Sustav za hlađenje i pročišćavanje održava temperaturu vode unutar 30° do 50° C te ju održava kemijski čistom i bistrom kako bi se spriječila korozija metalnih dijelova goriva. Period skladištenja u bazenu s bornom vodom traje od 5 do 10 godina. (Feretić i dr., 2000).

Nakon hlađenja ING u bazenu, kreće faza suhog skladištenja. ING se pohranjuje u metalne, cementne ili višenamjenske spremnike (slika 2-3) te se odlaže u skladište otvorenog tipa ili zatvorenog, odnosno bunkerskog tipa.

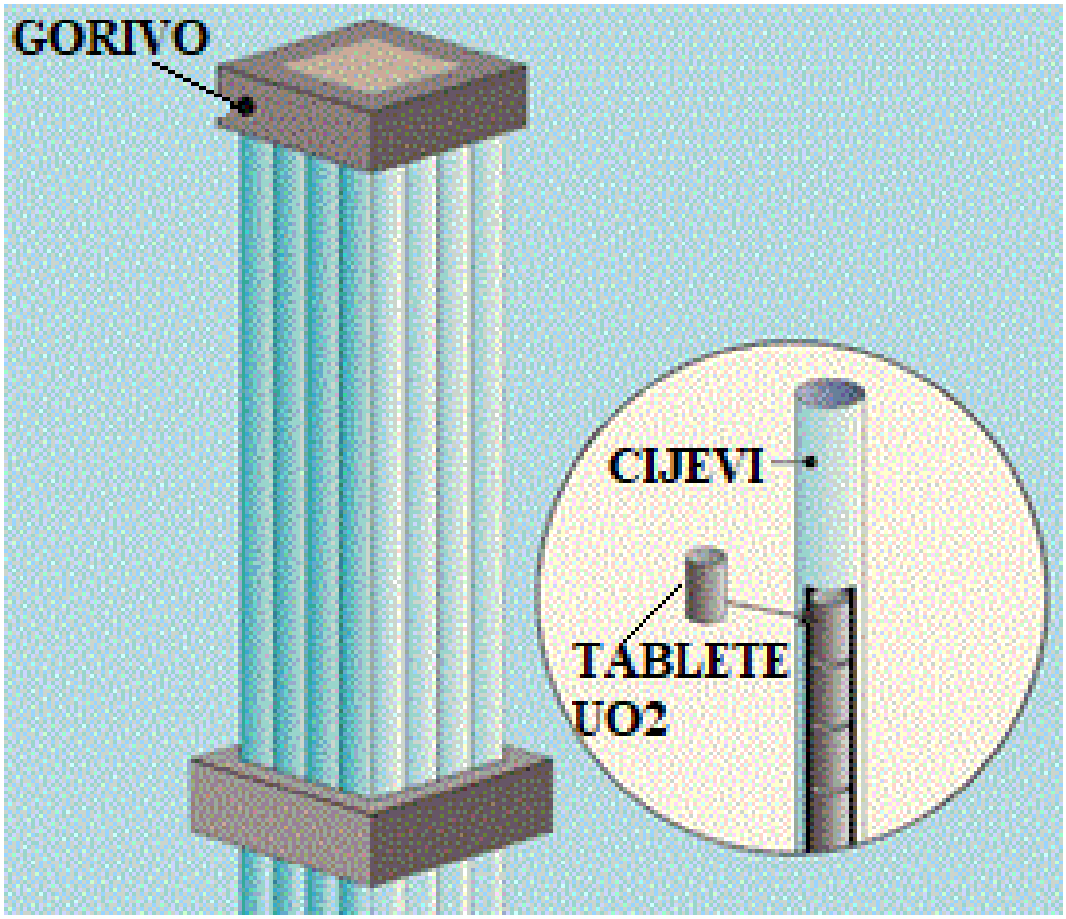


Slika 2—3 Metalni spremnik tipa Castor Geo razvijen od strane Njemačke firme GNS (GNS, 2019).

ING i dalje generira značajnu količinu topline, stoga je temperaturu potrebno održavati ispod 400 °C kako ne bi došlo do oštećenja spremnika te neželjenog ispuštanja radionuklida. Iz tog razloga spremnici moraju biti opremljenim rashladnim sustavom kod kojih se uzima u obzir prijenos topline konvekcijom, kondukcijom i radijacijom te je poželjno promatranje ponašanja spremnika kroz period suhog skladištenja. Suha skladišta

se uglavnom projektiraju na period do 100 godina, odnosno sve dok se ne odredi način konačnog odlaganja ING-a. Radioaktivnost ING-a izjednačuje se nakon 1 000 i 10 000 godina skladištenja s radioaktivnošću izvorne rude urana (Feretić i dr. 1995 i 2000; Manaktala, 1993), dok se u većini slučajeva odlagališta trebaju projektirati na 100 000 do 1 000 000 godina (Veinović, osobna komunikacija, 14. siječnja 2019).

Nuklearno gorivo je prikazano na slici 2-4. Sastavljeno je od cijevi izrađenih iz legure cirkonija (zircalloy) te tableta od uranijeva dioksida (UO_2) koje su dobivene kemijskim postupcima iz heksafluorida urana (UF_6). Cijevi se pune tabletama, evakuiraju, pune helijem pod tlakom te na kraju zatvaraju zavarivanjem čepova (Feretić i dr. 1995). Duljina cijevi se kreće oko 4 m, promjera 9-13 mm, dok su tablete UO_2 promjera oko 1 cm, no te dimenzije mogu varirati o konstrukcijskim zahtjevima određenih reaktora.



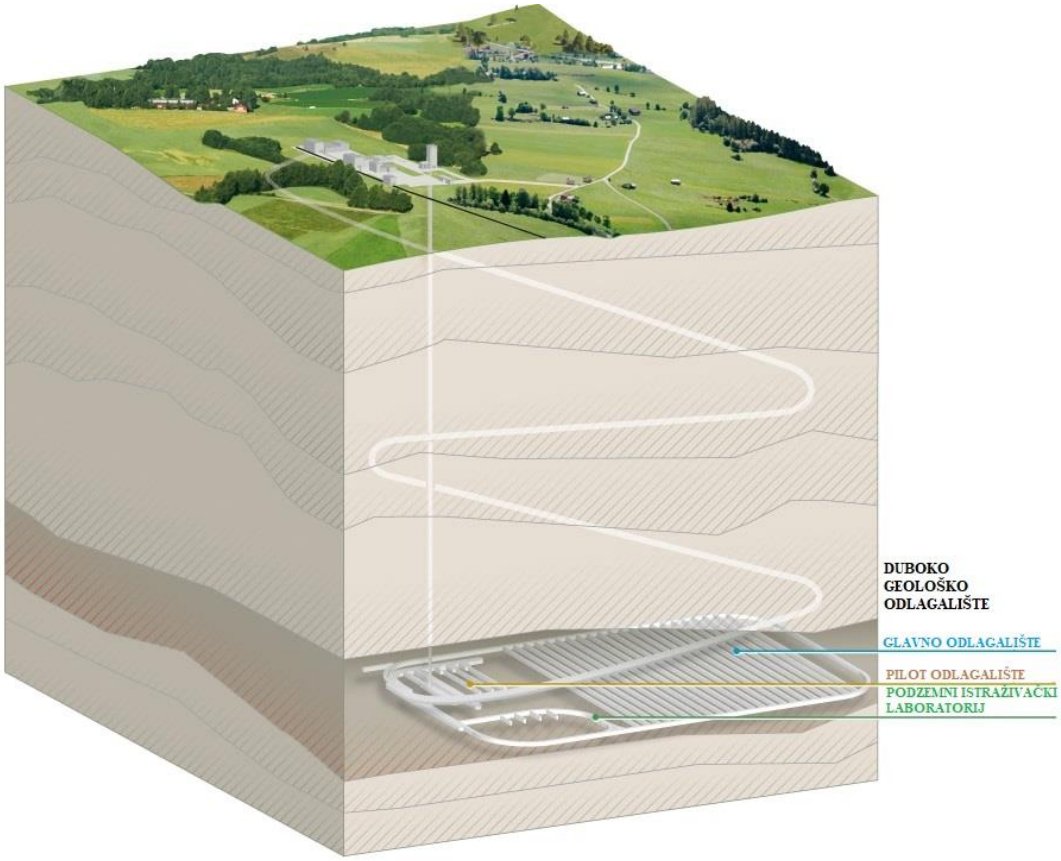
Slika 2—4 Grafički prikaz nuklearnog goriva (U.S. NRC, 2019).

Kod nuklearnog goriva postoji otvoreni i zatvoreni gorivi ciklus. Oba ciklusa prate gorivo od iskapanja i obrade rude, nastanka gorivih elemenata, njenu upotrebu te skladištenje. Bitnu razliku čini činjenica da otvoreni gorivi ciklus podrazumijeva da se ING na kraju smatra otpadom dok se u zatvorenom ciklusu otpad reciklira, ponovno obogaćuje te u konačnici upotrebljava. Prilikom prerade istrošenog nuklearnog goriva kao produkti dobiju se uran i plutonij. Uz njih nastaje znatna količina VRAO. Postupci uključuju rezanje gorivih cijevi, odvajanje obloge od tableta, otapanje tableta u dušičnoj kiselini te se ekstrakcijom iz otopine dobiju uranij i plutonij. Nakon što se dobiju željeni produkti uranij i plutonij ponovno se obogaćuju prilikom čega se od uranija dobije uranijev dioksid, a obogaćivanjem plutonija dobije se oksid plutonija koji se miješa s oksidom americija kako bi se dobilo MOX gorivo tvz. mixed oxide gorivo. Jedan od najčešće primjenjivanih postupaka je *purex* razvijen u SAD-u. VRAO koji nastaje prilikom i nakon preradbe nalazi se u svim agregatnim stanjima a to su (Feretić i dr. 1995):

1) plinoviti-tricij, izotopi joda i plemeniti plinovi,
2) kruti-šipke te
3) tekući-fisijski proizvodi unutar otopine.

3. KONCEPTI ODLAGANJA ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA

Države s nuklearnim programima stvaraju značajne količine kako RAO tako i ING-a, te shodno tome moraju imati nacionalnu strategiju gospodarenja RAO. U sklopu te strategije propisan je plan odlaganja RAO koji nastaje pri radu NE. Odlaganje se može provoditi unutar vlastite države ili, kao na primjeru NEK, moguće je dogovoriti međunarodno odlagalište u jednoj od država vlasnica elektrane. Metode koje se ističu kod odlaganja VRAO i ING-a su odlaganje u dubokim geološkim odlagalištima s višestrukim inženjerskim barijerama (slika 3-1) te odlaganje u dubokim bušotinama.



Slika 3—1 Grafički prikaz dubokog geološkog odlagališta (ENSI, 2019)

Kod projektiranja odlagališta otpada poput ING-a i VRAO zahtjevi su stroži nego prilikom odlaganja manje radioaktivnog otpada, što je uzrokovano karakteristikama takvog otpada,

kao na primjer toplina koja nastaje raspadanjem radionuklida iz spremnika otpada te dugovječnost tih radionuklida, koja doseže razmjere do nekoliko desetaka tisuća godina. Iz tog razloga potrebno je dokazati sigurnost odlagališta na minimalan rok od 100 000 godina. U takvom dužem periodu očekuje se degradacija umjetnih materijala, stoga je jedan od bitnijih koraka izbor matične stijene kao prirodne barijere. Matična stijena trebala bi maksimalno usporavati putovanje preostalih radionuklida u biosferu. Stijene koje se ističu prilikom planiranja navedenog tipa odlagališta su granitne stijene, glina te solne naslage. Svaka od tih formacija ima svoje prednosti i mane, najznačajnije od kojih su (Borojević Šoštarić i Neubauer, 2012; Miller i dr., 2000):

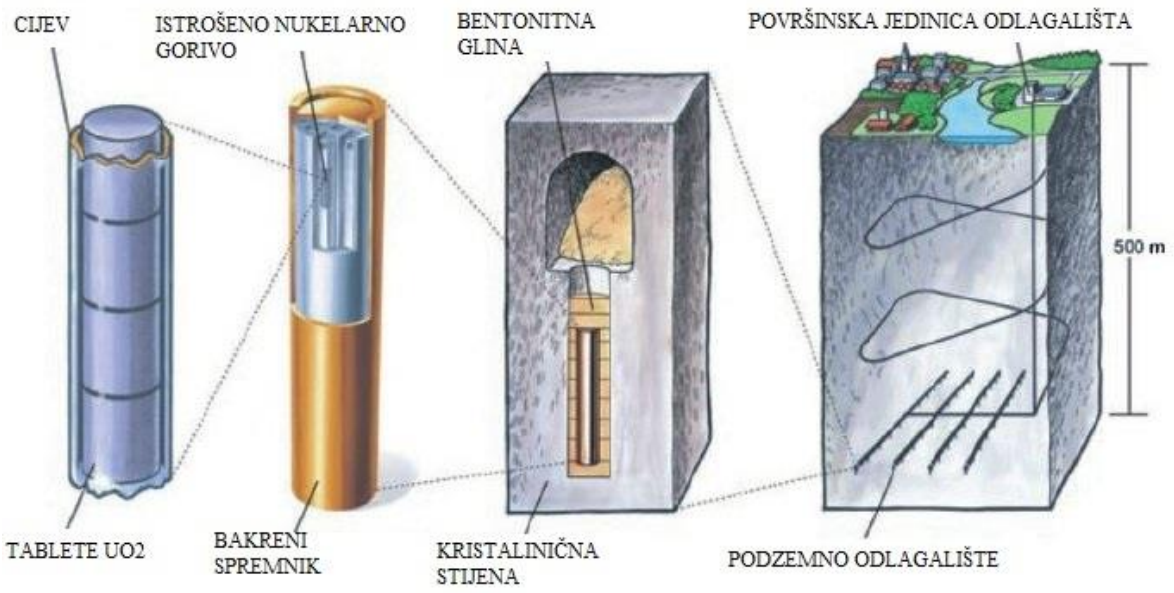
- *Solne formacije* ističu se niskom propusnošću radionuklida, toplinskom stabilnošću, niskom poroznosti te plastičnosti koja omogućuje samozacijeljivanje uslijed nastajanja pukotina. Problemi se mogu javljati nastajanjem dijapira puzanjem prema gore, gdje dolazi do opasnosti putovanja radionuklida blizu površine.
- *Granitne formacije* izrazito su čvrste. Karakterizira ih niska poroznost i niska permeabilnost. Kod granitnih formacija mogu se javljati pukotine putem kojih radionuklidi mogu doći do biosfere.
- *Gline* se ističu izrazito dobrim svojstvom samozacijeljivanja vlastitih pukotina, niskom hidrauličkom propusnošću te ujedno niskom propusnošću radioaktivnih elemenata. U nekim slučajevima u budućnosti može doći do smanjena svojstva samozacijeljivanja, gdje se pritom otvara put radionuklidima zbog javljanja pukotina. Na tom svojstvu vrše se daljnja istraživanja.

Uz karakteristike matične stijene u koju se odlaže otpad, uzimaju se u obzir i parametri o kojima ovisi odabir lokacije, odnosno geografske, hidrološke, geološke i seizmološke prilike lokacije u svrhu dodatne potvrde sigurnost odlagališta. Nakon odluke o lokaciji i tipu matične stijene, kreće faza ispitivanja matične stijene na lokaciji u podzemnom istraživačkom laboratoriju. Glavni ciljevi odlagališta u dubokoj geološkoj strukturi su (IAEA, 2011)

- izoliranje otpada na vremenski period od 100 000 do 1000 000 godina dok se stupanj radioaktivnosti ne smanji na prihvatljivu razinu

- odgađanje migracije radionuklida u biosferu do vremena u budućnosti kada će veliki dio radioaktivnosti biti zanemariv
- izolacija otpada od biosfere i smanjenje vjerojatnosti od nenamjernog upada ljudi

Države s aktivnim nuklearnim programom zasada aktivno rade na konceptu odlaganja u duboke geološke strukture gdje koncepti odlaganja variraju ovisno o geološkim i tehnološkim mogućnostima pojedine države. Zasada je samo Finska 12. studenog 2015. godine dobila građevinsku dozvolu za odlaganje ING-a u dubokoj geološkoj strukturi granita nedaleko od postrojenja Onkalo u Olkiluotu gdje će se koristiti Švedski KBS-3 koncepti prikazani na slici 3-2 (Posiva, 2017).



Slika 3—2 Grafički prikaz KBS-3 koncepta odlaganja u matičnoj stijeni granita (SKB, 2019)

KBS-3 koncepti dijele se na KBS-3V, odnosno odlaganje u vertikalne bušotine i KBS-H, odnosno odlaganje u horizontalne bušotine. Posiva se odlučila za KBS-3V koncept u odlagalištu Olkiluotu te kao tampon zonu između spremnika i stijene odlučili su koristiti kompaktirani bentonit, te će također bentonitom ispunjavati tunele odlagališta. Koncepti ostalih država još su u razvoju te, kako bi potvrdile zahtjeve sigurnosti matičnih stijena u kojima planiraju odlagalište, grade podzemne istraživačke laboratorije unutar odabranih struktura. Njemačka se odlučila za odlaganje u soli u mjestu Gorleben gdje bi se spremnici s otpadom slagali jedan na drugi unutar vertikalnih bušotina dubine do 300 m, a kao

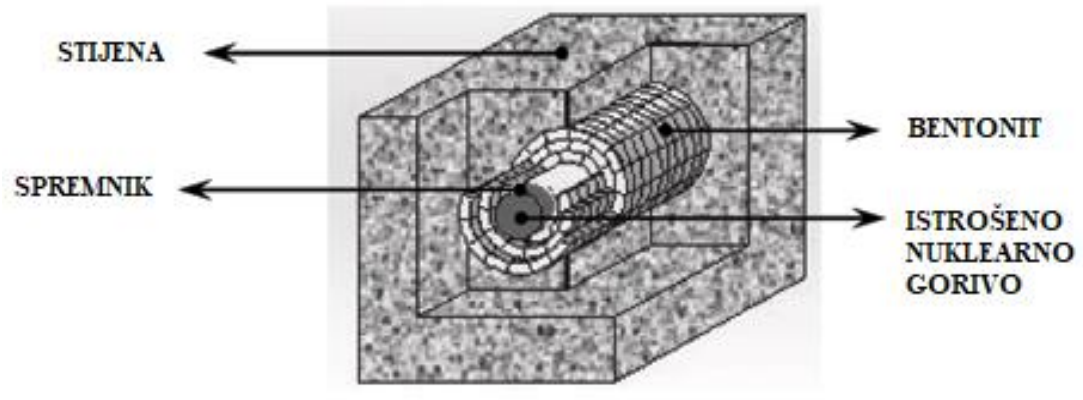
tampon zona koristila bi se sol. Francuska, Belgija i Nizozemska odlučile su se za odlaganje u glini u horizontalnim ili približno horizontalnim tunelima dužine 45 m te bi se na obje strane tunela nalazile horizontalne bušotine unutar kojih bi se odlagali spremnici s otpadom (Kujundžić i dr., 2012). Na slici 3-1 vidljivo je da se metoda dubokog geološkog odlagališta temelji na principu rudnika. Konstrukcija takvog tipa odlagališta sadrži okna ili spiralne niskope u kojima se nalaze strojevi dimenzionirani za manipulaciju (transport i odlaganje) teških spremnika otpada, te sadrži posebni sustav za vjetrenje uz filtraciju zraka. Prostorije za odlaganje otpada sastoje se od sustava hodnika podijeljene u odlagališna polja na dubinama od 450 m do 1 000 m. Zajednička točka svih koncepata odlaganja u duboke geološke strukture je da su bazirani na sustavu višestrukih barijera. Višestruke barijere su sustav spremnik-ispuna-matična stijena. Prva inženjerska barijera započinje stavljanjem istrošenog goriva u željezne ili bakrene spremnike posebno konstruirane kako bi izdržali toplinska naprezanja uzrokovana poluraspadom radionuklida iz otpada. Izdržljivost spremnika na duži period godina je bila tema dugotrajnih ispitivanja, također se pozivajući na prirodne analoge kako bi dokazali dugotrajnu stabilnost materijala. Na slici 3-3 prikazan je tip spremnika koji će se koristiti u Finskoj prilikom odlaganja istrošenog goriva. Unutarnji dio je načinjen od vermikularnog lijevanog željeza u koji se pažljivo postavljaju šipke istrošenog goriva, dok je vanjski dio bakreni (Posiva, 2009).



Slika 3—3 Primjer spremnika za istrošeno nuklearno gorivo (Carbonbrief, 2015)

Uz bakrene spremnike, kompanije zadužene za odlaganje odlučuju se i za željezne, čelične ili spremnike od titana. Nakon punjenja i zatvaranja spremnika slijedi njihovo postavljanje u bušotine izbušene u odlagalištu izgrađenom u dubokoj geološkoj strukturi koja je

prirodna barijera, te ispunjavanje bušotina i tunela bentonitnom ispunom koja je konačna inženjerska barijera. Primjer inženjerskih barijera prikazan je na slici 3-4.



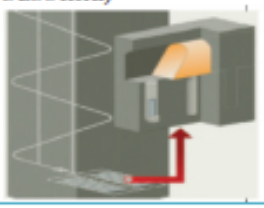
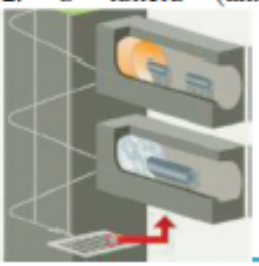
Slika 3—4 Grafički prikaz višestrukih barijera. (Sanchez i dr., 2009)

Odabir barijera ovisi o karakteristikama matične stijene kao i o hidrološkim prilikama gdje će se izbjegavati vršenje radova unutar glavnih diskontinuitetima kao i vodenih tijela. U budućnosti, u slučaju prodora vode do odlagališnih bušotina ispuna ima zadaću zaštititi spremnik od kontakta s vodom kako ne bi došlo do ubrzanja procesa korozije spremnika, stoga je bitno paziti kod odabira ispune da ima nisku hidrauličku propusnost (Miller i dr., 2000).

3.1. **Idejna rješenja**

Koncepti odlaganja istrošenog nuklearnog goriva i VRAO u dubokim geološkim odlagalištima ovise o geološkim i geomehaničkim karakteristikama matične stijene. Dva glavna koncepta koje države prilagođavaju ovisno o karakteristikama stijena su odlaganje u vertikalne i horizontalne bušotine. Prikazano u tabeli 3-1 opisana su dva primjera idejnih rješenja, odlaganje u vertikalne bušotine te odlaganje u horizontalne bušotine, odnosno aksijalno odlaganje. Također, prikazani primjeri u tablici prikazuju idejna rješenja odlaganja VRAO i ING-a u geološkoj strukturi granita.

Tabela 3—1 Koncepti dubokog odlaganja VRAO i ING-a (Kujundžić i dr.,2012)

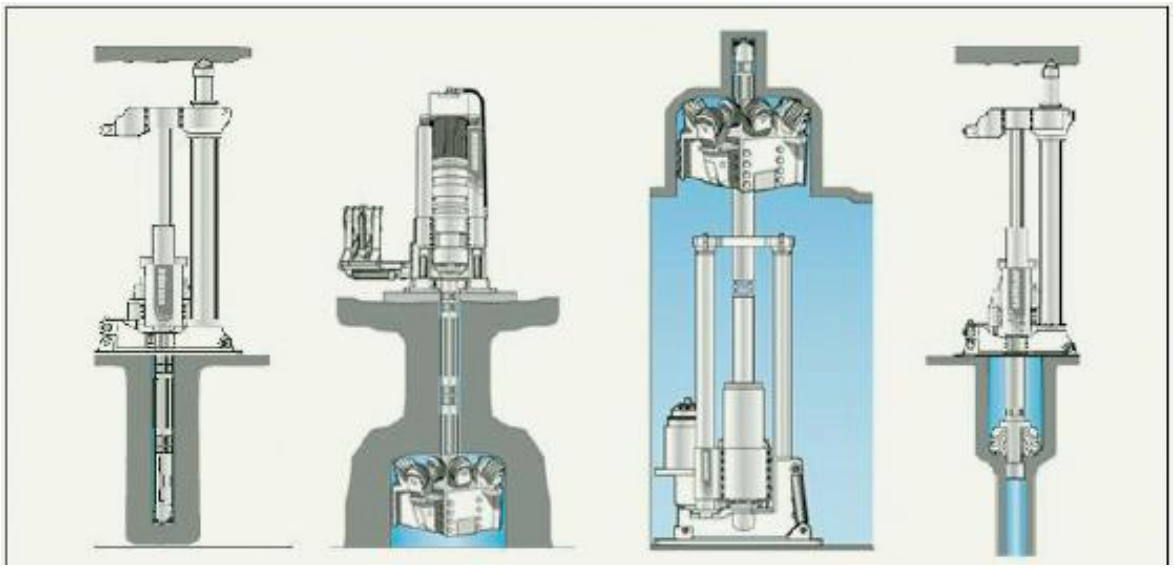
Ime i ilustracija koncepta (Baldwin et al. 2008).	Dimenzionalne karakteristike odlagališta	Razvoj koncepta
1. U tunelu (vertikalna bušotina) 	Sustav horizontalnih tunela na dubini od 400-700m. Tuneli oko 250m dugi i raspoređeni na udaljenosti od 40m. Na podu tunela, vertikalne bušotine u koje se odlaže 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

Usporedbom idejnih rješenja prikazanih u tablici 3-1 da se zaključiti da se radi o bušotinama s relativno velikim promjerom ~ 1.5 do 4 m za odlaganje spremnika VRAO i ING-a dubine do 8 m za vertikalne bušotine, te dubine do 800 m za horizontalne bušotine. S obzirom na hidrogeološke uvjete u geološkim sredinama, države nastoje projektirati odlagalište na način da se izbjegne prodiranje podzemne vode koja može na razne načine otežati proces izgradnje samog odlagališta, te kako ne bi ubrzala procese korozije unutar odlagališta. S obzirom na geološke uvjete ova rješenja su temeljena na dugotrajnom istraživanju te su oba zrela za provedbu (Kujundžić i dr., 2012).

Tehnologija bušenja bazira se na iskopavanju mehaničkim strojevima koji daju puni profil bušotine, dok se metoda iskopa bušenjem i miniranjem izbjegava budući da nije u skladu sa zahtjevima s obzirom na hrapavost stjenki te širinu poremećene zone uzrokovane iskopom. Iskop odlagališnih bušotina zahtijeva visoku preciznost u odnosu na ravninu bušenja, toleranciju na odstupanje kod promjera bušotine te glatkoću površine bušotine (Kujundžić i dr., 2012). Promjer bušotina ovisi o dimenzijama samog spremnika i materijala koji se koristi kao ispuna. Kompanije zadužene za odlaganje VRAO i ING provodile su brojna istraživanja za metode iskopa dubokih bušotina. U Olkiluotu koristit će se metoda uzlaznog bušenja. Uzlazno bušenje je kontinuirana, mehanička metoda vertikalnog, odnosno gotovo vertikalnog bušenja okna koje se koristi za ventilaciju, transport radnika ili za transport rude, odnosno jalovine. Promjeri bušotina kod te metode

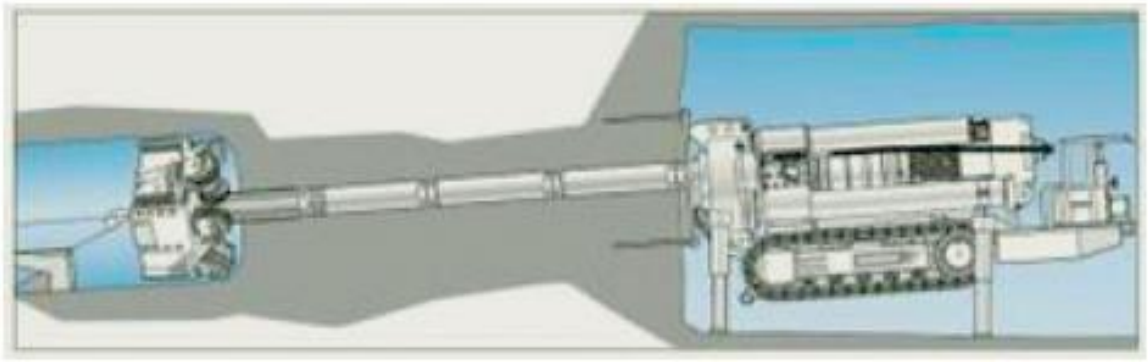
bušenja su otprilike od 0,6 m do 6 m te duljine do 1 000 m. Postoje tri tipa metode uzlaznog bušenja koja su prikazana na slici 3-5 (Kujundžić i dr., 2012):

- konvencionalno uzlazno bušenje je najčešće korišteni tip bušenja kod metode uzlaznog bušenja. Prvo se izbuši početna bušotina između gornje i donje razine. Nakon što se izbuši početna bušotina, uklanja se svrdlo te se na vrh stroja stavlja proširivač, koji rotira te se kreće vertikalno prema gore. Uslijed gravitacije materijal nastao bušenjem pada prema dolje, na nižu razinu.
- „slijepo“ bušenje je najzahtjevniji tip koji se koristi kada je ograničen pristup gornjoj razini, odnosno, kada nema pristupa gornjoj razini. Nakon što se stroj postavi kreće puni promjer bušenja prema gore gdje uslijed gravitacije, materijal nastao bušenjem pada prema dolje te se odbija od stroja i prikuplja na donjoj razini.
- bušenje s proširenjem prema dolje je tip uzlaznog bušenja kod kojeg se prvo izbuši početna bušotina vertikalno prema dolje sve dok se ne spoji s donjom razinom pristupa. Konačni promjer bušotine dobije se proširenjem od gornje razine prema donjoj, dok materijal nastao bušenjem pada prema dolje kroz početnu bušotinu. Korištenjem gornjih i donjih stabilizatora postižu se geometrijski zahtjevi bušotine.



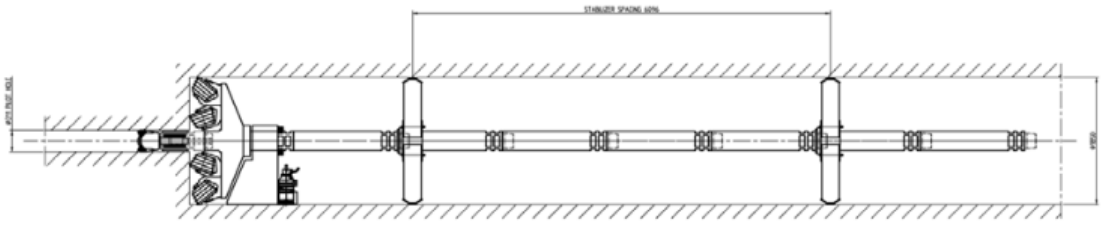
Slika 3—5 Grafički prikaz tipova uzlaznog bušenja (Kujundžić i dr., 2012)

Metoda horizontalnog bušenja koja se koristi prilikom bušenja horizontalnih bušotina je metoda horizontalnog proširivanja povlačenjem prikazano na slici 3-6. Ta metoda je slična uzlaznom vertikalnom bušenju te se strojevi korišteni kod vertikalnog uzlaznog bušenja mogu prilagoditi za horizontalno bušenje. Kod ove metode potrebna su dva horizontalna tunela. Nakon što se izbuši početna bušotina na vrh bušećeg stroja postavi se proširivač te kreće s povlačenjem prema nazad. Razlika između horizontalnog i vertikalnog bušenja je ta što kod horizontalnog bušenja gravitacija ne pomaže kod odstranjivanja materijala te je uz to potrebna znatna količina vode kako bi površina stijene koja se buši ostala čista (Kujundžić i dr., 2012).



Slika 3—6 Horizontalno proširivanje s povlačenjem (Kujundžić i dr., 2012)

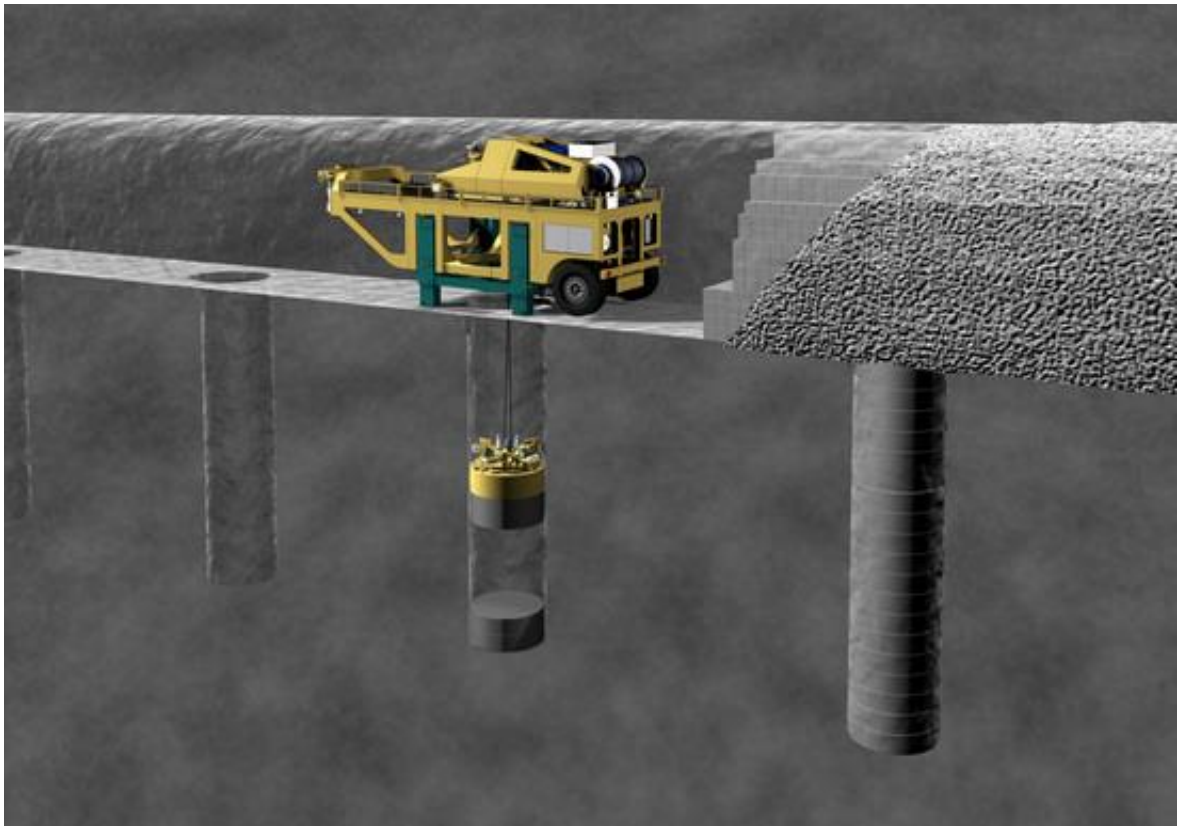
Kao bolja opcija javlja se metoda horizontalnog bušenja uz proširivanje potiskivanjem prikazana na slici 3-7. Prvi korak je bušenje pilot bušotine koja se proširi sa opremom za konvecnionalno uzlazno bušenje. Kako bi se izbjegla savijanja bušećih cijevi postavljaju se dva stabilizatora koja podupiru cijevi kako ne bi došlo do loma. Zbog stabilizatora cijevima nije potrebna vanjska zaštita od loma (Kujundžić, i dr., 2012).



Slika 3—7 Shematski prikaz horizontalnog bušenja uz proširivanje potiskivanjem (Posiva, 2018)

Nakon odlaganja spremnika u bušotinu kreće zapunjavanje bušotine s kompaktiranim bentonitom kako je prikazano na slici 3-8. Redoslijedom kako se bušotine zatvaraju puni se

hodnik kompaktiranim bentonitom u blokovima dok se praznine ispunjavaju prskanjem bentonita.

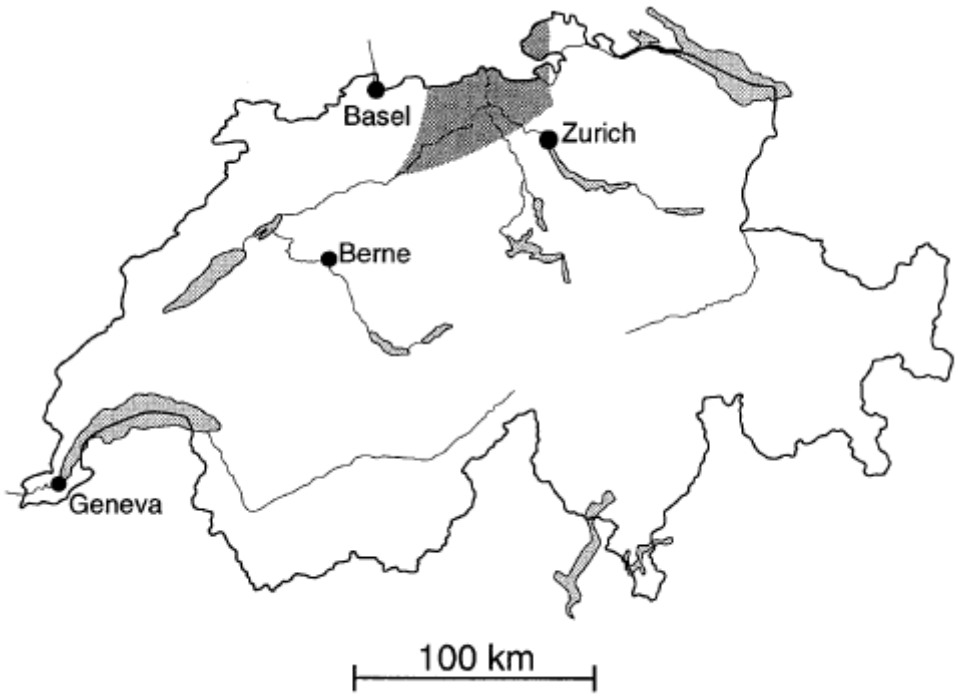


Slika 3—8 Grafički prikaz ispunjavanja bušotina i hodnika bentonitnom glinom (Posiva, 2019)

3.2. **Koncept NAGRA (aksijalno odlaganje)**

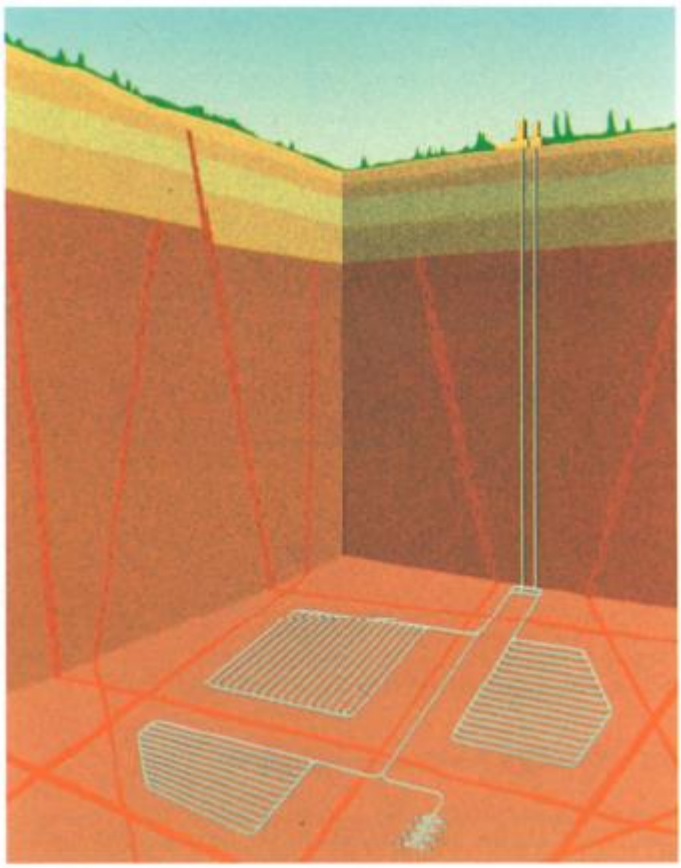
NAGRA (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste) je Švicarska organizacija koja se bavi istraživanjem i odlaganjem radioaktivnog otpada u duboka geološka odlagališta. NAGRA je predložila tri lokacije za odlaganje VRAO i ING-a u glini te jednu u granitu na sjeveru Švicarske. Sve lokacije su još u procesu detaljnih istraživanja.

Odlagalište u granitu nalazio bi se na sjeveru Švicarske, sjeverno od grada Zuricha, prikazano tamnijom površinom na slici 3-9.



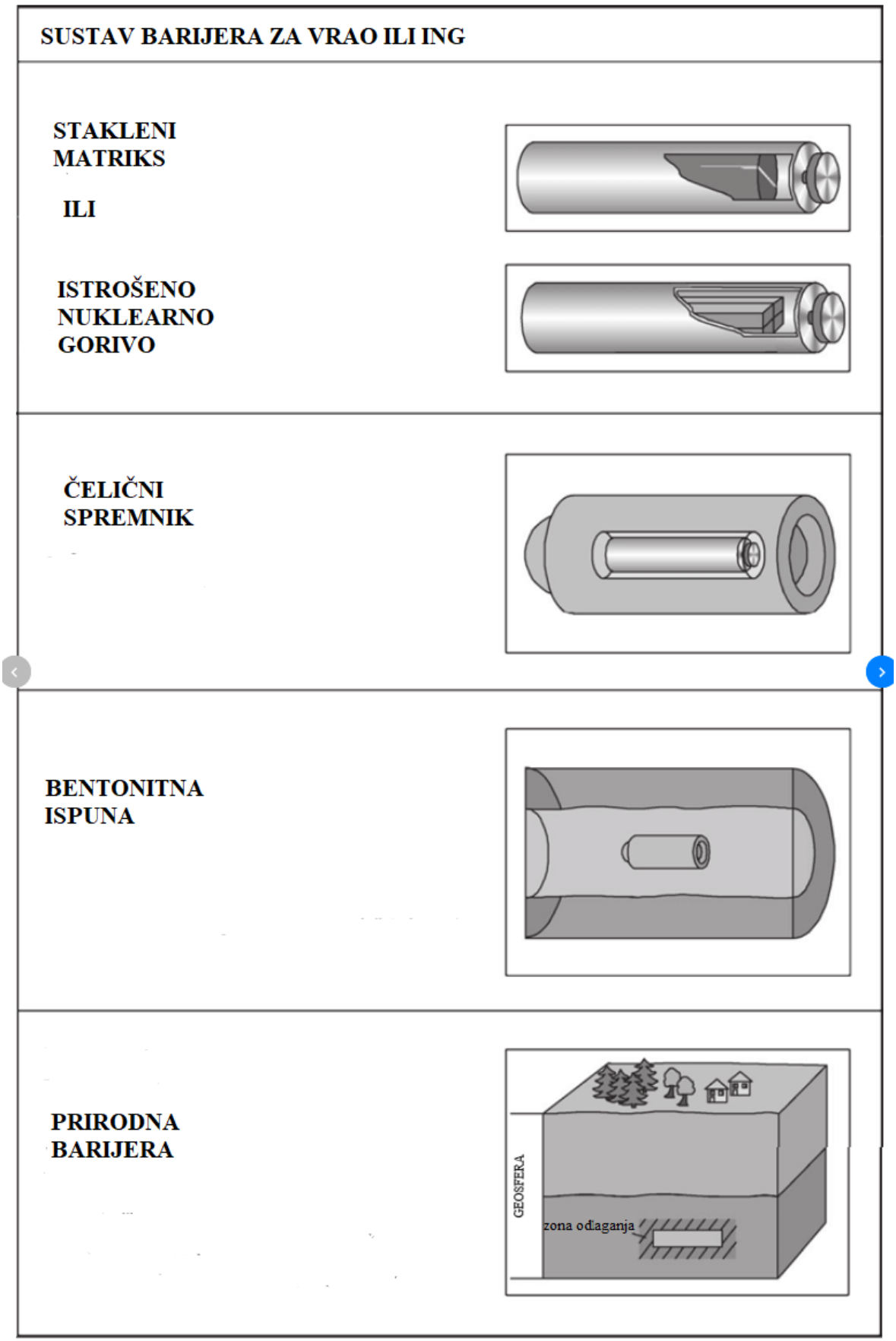
Slika 3—9 Lokacija potencijalnog dubokog geološkog odlagališta u strukturi granita (NAGRA, 1994)

Ta lokacija je trenutno stavljena u rezervu, te je unutar strukture granita u južnom djelu Alpa izgrađen podzemni laboratorij „Grimsel“ gdje se vrše razna in situ ispitivanja kako bi se dokazala optimalnost odlaganja u strukturi granita. Za potrebe diplomskog rada naglasak će biti na potencijalnom odlaganju u strukturi granita. Osnovni program odlaganja u strukture granita predstavljen je 1985. godine projektom Gewahr kojem je bio cilj dokazati optimalnost lokacije te je kasnije na njega nastavljen Kristallin-I projekt 1994. godine koji bi ga nadopunio novim saznanjima. Prema NAGRA-inom Kristallin-I tehničkom izvješću iz 1994. godine u odlagalištu na dubini od 900 do 1 200m (slika 3-10) odlagao bi se VRAO i dugoživući SRAO dok je odlaganje ING-a još u planu razmatranja, budući da se veći dio ING-a se reprocesira u Francuskom postrojenju La Hague. Odlagalište bi se baziralo na metodi rudnika na jednoj razini, no nije odbačena mogućnost izgradnje više razina za odlaganje unutar samog odlagališta. Unutar odlagališta, u ranije ispitanim blokovima granita gdje je dokazana niska propusnost nalazili bi se horizontalni tuneli gdje bi se odlagao VRAO i ING, dok bi se dugoživući SRAO odlagao u posebno izgrađenim silosima. Pristupna i vjetrena okna su vertikalna. Planirana količina otpada u trenutku sastavljanja programa je 2693 spremnika VRAO.



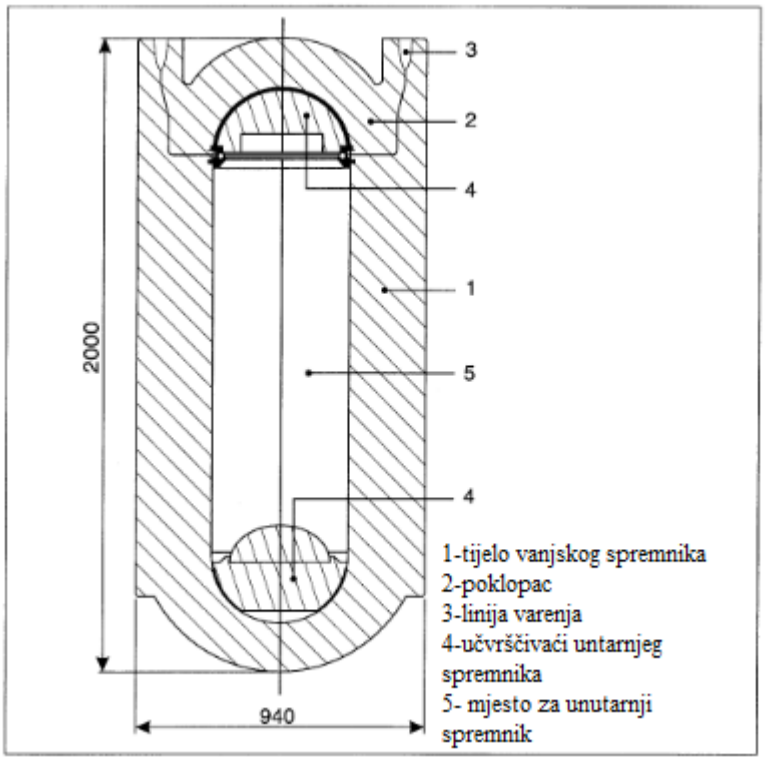
Slika 3—10 Idejni prikaz dubokog geološkog odlagališta u granitu (NAGRA, 1994)

Iz slike 3-8 vidljivo je da su odlagališne galerije podijeljene u blokove koje odvajaju pukotine. Pukotine stvaraju potencijalni problem, no također mogu stvarati preferencijalne vodene putove oko blokova s niskom hidrauličkom propusnošću, stoga odlučeno je da će se otpad odlagati u blokovima granita gdje je hidraulična propusnost 10^{-11} m/s (NAGRA, 1984). Kao dodatnu sigurnost, iz razloga postojanja pukotina koja može stvarati mogućnost pojave vodenih putova, planirana je izgradnja odlagališnih galerija na razmaku od 100m od pukotina (NAGRA, 1994). Koncept odlagališta uključuje sustav višestrukih barijera koja uključuje dvije inženjerske barijere i jednu prirodnu barijeru prikazani su na slici 3-11.



Slika 3—11 Grafički prikaz sustava barijera (NAGRA, 1994)

VRAO dolazi iz postrojenja za preradbu istrošenog nuklearnog goriva gdje se miješa sa bor-silikatnom smjesom u procesu vitrifikacije kako bi se postigla maksimalna inertnost postojećih radionuklida te predstavlja prvu inženjersku barijeru. Čelični spremnik je druga inženjerska barijera, a treća je bentonitna ispuna. Kao prirodna barijera služi okolna stijena granita. Spremnik s otpadom u vitrificiranom obliku polaže se u 25 cm debeli čelični spremnik zatim se spremnik postavi u horizontalni tunel kružnog oblika i promjera 3,7 m na blokove kompaktiranog bentonita gdje je razmak između svakog spremnika 5 m. U slučaju ING-a razmak između spremnika iznosio bi 10 m. Spremnici se okružuju kompaktiranim bentonitnim blokovima. Odlagališni tuneli nalazili bi se na udaljenosti 40 m jedan od drugog. Spremnici s otpadom nalazili bi se u sredini tunela. (NAGRA, 1984; 1994). Odlaganje se planira na milijun godina kada bi degradacijom materijala, ispuštena radioaktivnost bila dovoljno niska, odnosno na prihvatljivoj razini. Iz tog razloga NAGRA, poput svake kompanije koja se bavi takvim tipom odlaganja, izradom matematičkih modela kao i istraživanjem prirodnih analoga, predviđa degradaciju svakog pojedinog materijala inženjerske barijere te ponašanje matične stijene kroz vremenski period bitan za radioaktivnost. Tako se predviđa da će do potpune korozije staklenog matriksa doći nakon otprilike 150 000 godina, dok su zahtjevi otpornosti spremnika na koroziju minimalno 1 000 godina (NAGRA, 1994). NAGRA se za odlaganje VRAO u stijenu granita odlučila za čelični spremnik prikazan na slici 3-12. Prikazani spremnik sastoji se od cilindričnog tijela te polukružnih vrhova. Debljina tijela je 250 mm, dok su vrhovi debljine 150 mm. Vrhovi se sastoje od poklopca koji je zavaren na tijelo spremnika, odnosno bazom spremnika. Napunjeni spremnik s vitrificiranim otpadom iznosio bi 8,9 tona.



Slika 3—12 Shematski prikaz čeličnog spremnika (NAGRA, 1994)

Ovaj tip spremnika dizajniran je prema uputama Američkog društva za mehaničko inženjerstvo (ASME). Ispitivanja na spremniku rađena su prema ASME standardu te je spremnik ispitan na pretpostavljenu neravnomjernu koroziju spremnika manje debljine od 200 mm, te na vanjski izostatski tlak od 30 MPa. Rezultati su se pokazali zadovoljavajućim, odnosno iznad minimalnih potrebnih zahtjeva ASME standarda (NAGRA, 1994). Nakon ispitivanja otpornosti čeličnog spremnika odlučeno je dozvoljeno oštećenje spremnika korozijom unutar 1 000 godina od 50 mm. (NAGRA, 1994). Za istrošeno nuklearno gorivo koristili bi se bakreni spremnici Švedskog SKB dizajna prikazani na slici 3-13. Spremnik se sastoji od unutarnjeg dijela za primanje elemenata istrošenog goriva koji je načinjen od lijevanog željeza. Unutarnji dio podijeljen je u 4 odvojenih sekcija za primanje šipki istrošenog goriva iz lakovodnih tlačnih reaktora (12 u slučaju istrošenog goriva iz kipućih reaktora). Vanjski dio služi kao zaštita od korozije unutar odlagališta dok unutarnji dio spremnika pruža stabilnost uslijed vanjskih mehaničkih naprezanja. Vanjski dio napravljen je od bakra debljine 5 cm. Bakreni spremnik se također zatvara zavarivanjem poklopca. Masa spremnika s otpadom iznosila bi do 26 800 kg (SKB,2010).



Slika 3—13 Prikaz bakrenog spremnika dizajniranog od strane Švedskog SKB (SKB, 2010.)

Ispitivanja pojave korozije spremnika rađena su u Projektu Gewähr iz 1985. te su u Kristallin-I detaljnije razrađena i laboratorijski ispitana. Ispitivanja su rađena za tri mogućnosti pojave korozije te su dane pesimistične pretpostavke okružujuće atmosfere oko spremnika (gornja granica očekivane temperature spremnika i zasićenost) kako bi došlo do takvih tipova korozije (NAGRA, 1984; 1994):

- *Korozija uslijed kisika zarobljenog tokom zatvaranja bušotine* Ova pesimistična pretpostavka nalaže da zarobljeni kisik jedino reagira sa spremnikom te ignorira difuziju i otapanje u bentonitu kao i reakcije s potencijalnim podzemnim vodama koje mogu dospjeti u bentonit, odnosno gleda ga kao postojanog u porama zbijenog bentonita. Kemijska formula reakcije zarobljenog kisika sa spremnikom je $2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_2$. Ispitivanjem je zaključeno da bi korozija uzrokovana tim procesom unutar 1000 godina iznosila manje od 0,7 mm za čelični spremnik. U slučaju bakrenog spremnika za ING formula reakcije s kisikom glasi $4Cu + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Cu^+ + 4OH^-$ te se predviđa oštećenje spremnika od 1,3 mm.
- *Korozija uslijed reakcije sa sulfidima* Uslijed kontakta sulfata iz bentonita s podzemnom vodom dolazi do nastanka sulfata. Ova pretpostavka je pesimistična jer su sulfidi i sulfati u bentonitu čvrsto vezani unutar minerala pirita (FeS_2). Kemijska reakcija sa čelikom je $Fe + HS^- + H^+ \rightarrow FeS + H_2$ Unutar 1000 godina

očekuje se oštećenje spremnika od 3,8 mm. Kod bakrenih spremnika formula reakcije je $2Cu + H^+ + HS^- \rightarrow Cu_2S + H_2$. Očekivano oštećenje spremnika iznosi 6,7 mm.

- *Korozija uslijed reakcije sa zasićenim slanim podzemnim vodama* Za ispitivanje bakra uzet je primjer vode zasićen sa klorom te formula reakcije sa bakrenim spremnikom glasi $2Cu+ 2H^+ +4Cl^- \rightarrow 2CuCl_2 + H_2$. Ispitivanja su pokazala da je korozija uslijed reakcije s klorom pri prosječnoj temperaturi spremnika ING-a od 100 °C gotovo zanemariva. Kod čeličnog spremnika ispitivalo se u slanim podzemnim vodama i anaerobnoj sredini gdje formula glasi $3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$. Rezultati daju 20 mm korozije površine spremnika

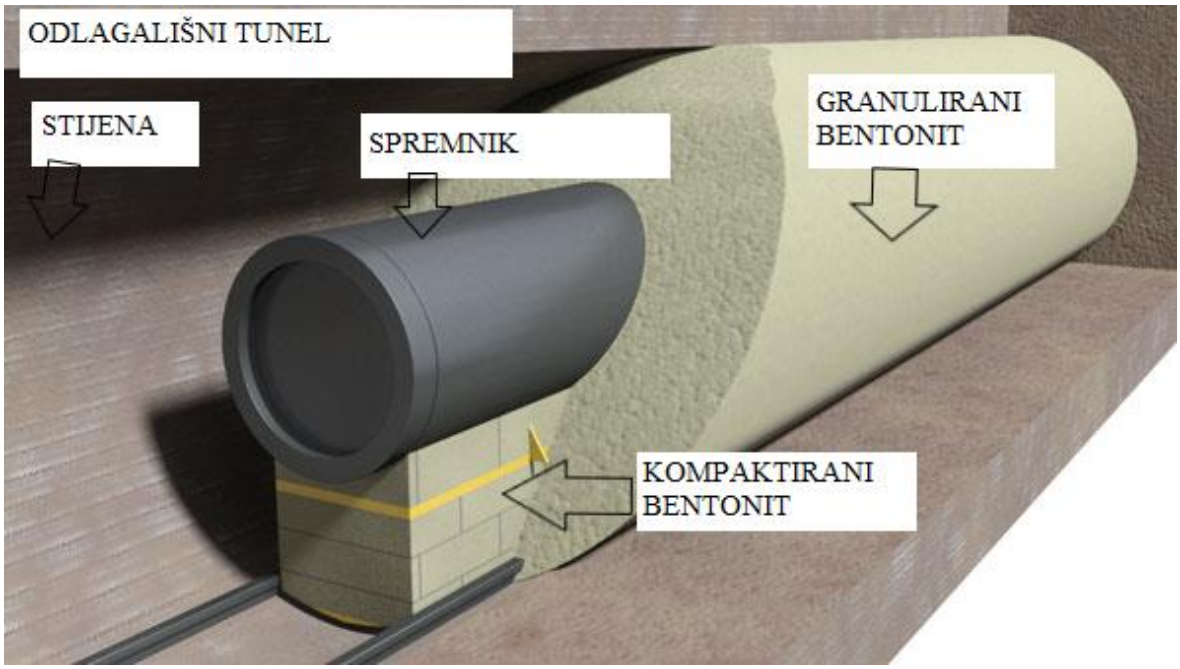
Uzevši u obzir rezultate ispitivanje spremnika u različitim atmosferama, može se zaključiti da će spremnici izdržati i više od 1 000 godina. Kod bakrenih spremnika korozija uslijed reakcije s otopinom zasićenom s kisikom iznosi 1,3 mm, uslijed reakcije sa sulfidima iznosi 6,7 mm te bi prosječno oštećenje iznosilo 8 mm unutar 1 000 godina. Kada bi se tom zbroju pridodao faktor maksimalne penetracije uzrokovane korozijom od 5, u 1 000 godina korozija bi iznosila 40 mm što zadovoljava zahtjeve. Švedski SKB je u svom tehničkom izvještaju o sigurnosti spremnika iz 2010. godine (*Fuel and canister process report for the safety assessment*, 2010.) ispitivanjima potvrdio da dokle god je debljina spremnika veća od 0 mm neće doći do ispuštanja radionuklida. Kod metalnih spremnika korozija uslijed reakcije s kisikom iznosila bi 0,7 mm, kod reakcije sa sulfidima iznosila bi 3,8 mm, dok u anaerobnim uvjetima 20 mm te bi prosječna nakon 1 000 godina iznosila manje od 30mm. Rezultati su zadovoljavajući budući da je maksimalno dozvoljeno oštećenje spremnika 50mm u prvih 1 000 godina, te je lako za pretpostaviti da će spremnici izdržati više od tog perioda (NAGRA, 1984).

Kako bi se osigurala ispravnost tampon zone između spremnika i okolne stijene te ispune hodnika ona mora ispunjavati sljedeće zahtjeve (NAGRA, 1986.):

- nisku hidrauličnu propusnost,
- visoku sposobnost zadržavanja radionuklida,
- kompatibilnost s ostalim strukturama odlagališta,
- mogućnost bubrenja i zatvaranja pukotina,

- plastičnost kako bi apsorbirala potencijalne pomake stijena i omogućila jednaku raspodjelu naprezanja stijene,
- otpornost na masu spremnika kako spremnik ne bi „potonuo“,
- stabilnost unutar perioda od milijun godina,
- ekonomsku isplativost.

Kako bi se ispunili ti zahtjevi odlučeno je kao ispunu i tampon zonu koristiti bentonitnu glinu zbog svojih svojstva bubrenja, niske hidrauličnе propusnosti i sposobnosti zadržavanjem radionuklida (Domitrović i dr, 2012). Glavni sastojak bentonita su smektiti od kojih je najzastupljeniji montmorilonit (Pusch, 2015). Smektiti imaju sićušne čestice slojevite strukture te imaju veliku bubrivost i malu hidrauličku propusnost ($k < 10^{-12}$ m/s). Ta navedena svojstva smektita utječu na ponašanje bentonita, pa njihov veći postotak znači i veću kvalitetu bentonita (Domitrović i dr., 2012). Osim montmorilonita može sadržavati kvarc, feldspat, biotit, kaolinit, kristobalit i pirit (Grim i Güven, 1978). Kvarc je svakako poželjan mineral u bentonitu jer on povećava toplinski kapacitet bentonita. U smislu industrijskih bentonita javljaju se Na bentonit i Ca bentonit koji svoja imena dobivaju po dominantnom kationu. Na bentonit ima izrazita svojstva bubrenja, absorpcije i suspenzije, dok su kod Ca bentonita ta svojstva manje izražena te za razliku od absorpcije kod Na bentonita, Ca bentonit adsorbira vodu (Kutlić i dr., 2012). Iz tog razloga se prije uporabe bentonita, on obogaćuje NaCl-om (natrijev klorid) kako bi se povećala koncentracija natrija, odnosno dovela do Na bentonita. Kao tampon zonu između spremnika i matične stijene koristi se kompaktirani bentonit visoke suhe gustoće, dok se praznine ispunjavaju nasipnim, odnosno granuliranim bentonitom manje gustoće. Kompaktirani bentonit uglavnom je mješavina krupnozrnatog materijala npr. pijeska i bentonita, gdje je mora postići veća suha gustoća kako bi se smanjio rizik erozije i nastanka pukotine (Pusch, 2015). Za potrebe NAGRA-inog „Kristallin-I“ projekta odlučeno je da će se koristiti kompaktirani MX-80 bentonit kao tampon zonu između spremnika i matične stijene granita. Sadrži preko 75 % monmorilonita, kvarca 15 % i feldspata 5 do 8 % (NAGRA, 1994). Uz postavljanje kompaktiranih blokova NAGRA uzima u obzir kao tampon zonu koristiti granulirani bentonit pneumatski injektiran kako je prikazano na slici 3-14 gdje bi se kao „postolje“ spremnika i dalje koristio kompaktirani bentonit.



Slika 3—14 Grafički prikaz zatvaranja bušotine granuliranim betnonitom. (Grimsel test site, 2019.)

Potrebna gustoća bentonita postiže se uslijed samog procesa pneumatskog ubacivanja (NAGRA, 2008).Nakon zatvaranja odlagališta predviđa se da će podzemna voda kroz sporije vrijeme doći do bentonita koji će nabubriti te pritom ispuniti mikroprostor između kompaktiranih bentonita te zatvoriti ispune čineći homogenu masu. i „fiskirati“ spremnik. Vrijeme potrebno da se bentonit saturira ovisi o hidrauličkim i termalnim karakteristikama okolne stijene i bentonita. Ispitivanja su pokazala da vrijeme potpune saturacije može doći za 100 godina ili čak nakon 1 000 godina. Uzevši u obzir karakteristike bentonita, vodena difuzija je očekivani način značajnog prolaska radionuklida kroz bentonit. Većina radionuklida će biti apsorbirana na minerale gline tokom prolaska, osiguravajući tako izrazito sporo propuštanje radionuklida u matičnu stijenu (NAGRA, 1994). Zadnja barijera je okolna stijena granita. Granit se ističe visokom mehaničkom čvrstoćom što osigurava stabilnost odlagališnih prostorija prilikom radova kao i nakon. Prednost mu je i niska hidraulička propusnost što će znatno usporiti prodor vode do odlagališta te će osigurati da kemijska i fizička svojstva bentonita se ne mijenjaju znatno kroz duži period godina. Niska hidraulička propusnost također će smanjiti mogućnost horizontalnog transporta radionuklida. Visoki toplinski kapacitet mu daje odlična izolacijska svojstva na širenje topline koja se generira iz spremnika ING-a (Borojević Šoštarić i Neubauer, 2012; NAGRA, 1994). U Švicarskom slučaju granitna struktura nalazi se na sjeveru Švicarske podno Alpi. Granitna struktura nalazi se ispod sedimentnog sloja debljine preko par stotina

metara. Nagra je pokrenula detaljna ispitivanja na stijenskoj masi granita početkom 80-tih godina prošlog stoljeća kako bi stvorila sliku o karakteristikama same stijene. Ispitivanja su krenula bušenjem 6 istražnih bušotina kako bi se mogle ispitati geološke, hidrogeološke, geofizičke i geokemijske karakteristike stijene. Ispitivanjima je došlo do saznanja da gornji dio granitne strukture u debljini od 350 do 650 m karakterizira visoka hidraulička propusnost, dok dublji dio granita karakterizira vrlo niska hidraulička propusnost. Stijenska masa sadrži veći udio većih vertikalnih pukotina kroz koje prolazi ili može prolaziti podzemna voda. Između pukotina nalaze se masivni stijenski blokovi izrazito niske hidrauličke propusnosti te je voda iz pukotina lokalizirana samo na pukotinske vodne putove. Iz razloga postojanja tih pukotina, odlagališne galerije se projektiraju na udaljenosti od 100 m od svake veće pukotine. Za očekivati je da će pukotine djelovati kao fokusi djelovanja budućih tektonskih pomaka, pritom neće pretjerano utjecati na nisko propusne blokove stijenske mase. Podzemna voda je niskog saliniteta, skoro pa neutralne pH vrijednosti te kemijski reduktivna. Kemijska reduktivnost i približno neutralni pH umanjuje dodatna razaranja strukture bentonita. Gornji dio granitne strukture koji ima veću hidrauličku propusnost nalazi se ispod plohe sedimenata koji u sebi sadrži veća vodena tijela značajno izoliraju nepropusni dio granita od vanjskih utjecaja uključujući ljudske aktivnosti, klimatske promjene kao i potencijalne pomake ledenjaka (NAGRA, 1994a i 1994b). Kako se radi o čvrstoj stijeni koja sadrži pukotine mora se pristupiti bušenju s metodama koje umanjuju rizik od nastanka novih pukotina prilikom iskopa odlagališnih tunela. Uz mogućnost pojave većih pukotina prilikom bušenja, također se pazi i na vrijeme potrebno za iskop, odnosno ekonomsku isplativost. Iz tog razloga koriste se metode bušenja sa bušećim strojevima jer oni rade manja naprezanja i oštećenja od miniranja. Prilikom bušenja horizontalnih ili približno horizontalnih bušotina koristite se prilagođeni strojevi, prikazani na slici 3-15, za uzlazno bušenje (Kujundžić i dr., 2012). Posiva se za metodu horizontalnog bušenja odlučila za horizontalno bušenje uz proširivanje potiskivanjem te je strojeve prilagodila toj metodi (Posiva, 2016). Komade stijena nastale kao rezultat bušenja odstranjivali su recirkulirajućom vodom s kojom su također ispirali stijenu. Prilikom ispitivanja naglasak je bio na nastajanje novih pukotina u prostoru zahvaćenom bušenjem. Primijećeno je da je mehaničkom metodom bušenja ostvaren minimalni broj novo nastalih pukotina te predviđaju da bi puno profilno bušenje također imalo malen utjecaj na nastajanje novih pukotina prilikom bušenja (Posiva, 2016). Isto se može primijetiti kod izrade tunela u Švicarskom podzemnom laboratoriju Grimsel gdje se

za bušenje tunela koristio mali puno profilni tuneler promjera 2.3 ili 3.5 m (NAGRA, 2019)



Slika 3—15 Bušeći stroj korišten u Onkalu (Posiva, 2019).

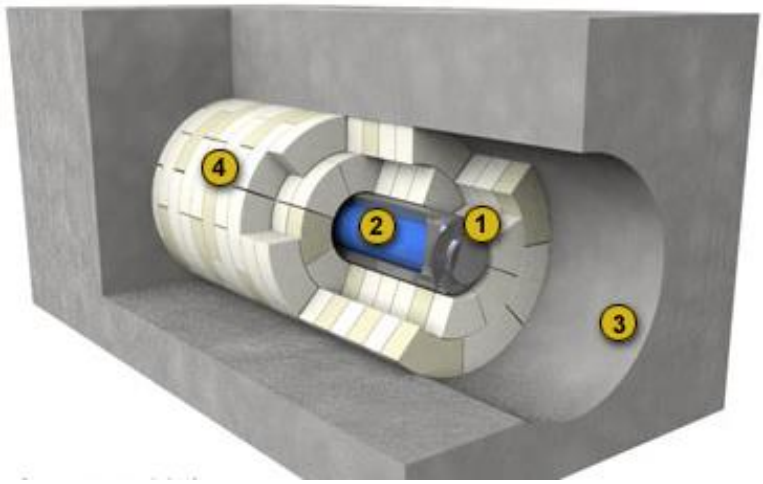
3.3. **Termo-hidro-mehanički efekti (THM efekti)**

Toplina generirana iz spremnika otpada bitan je faktor na koji se mora paziti prilikom projektiranja otpada. Spremnici sa istrošenim nuklearnim gorivom i VRAO generiraju značajne količine topline koje utječu na odabir i konstrukciju odabira materijala tampon zone te razmaka između odlagališnih tunela kao i na razmak spremnika unutar samog odlagališnog tunela (NAGRA, 1998). U pogledu tampon zone, u ovom slučaju bentonita, očekuje se da će unutar određenog vremena, podzemna voda proći kroz niskopropusnu stijenu granita do bentonita i uzrokovati njegovo bubrenje. Osim bubrenja, bentonit ima

zadaću usporiti širenje radionuklida nakon popuštanja stabilnosti spremnika. Sama toplina može promijeniti hidro-mehaničke karakteristike bentonita i umanjiti njegova pogodna svojstva. Osim utjecaja na bentonit, bitni su toplinski parametri matične stijene koja služi kao prirodna barijera koja mora imati mogućnost stabilnosti uslijed toplinskih naprezanja. Iz tog razloga, prije projektiranja odlagališta rade se razna ex situ, in situ ispitivanja i matematički modeli THM efekata kako bi se predvidjelo ponašanje inženjerskih barijera kroz duži period godina. Parametri materijala koji su bitni prilikom promatranja THM efekata su specifični toplinski kapacitet c_p *(J/kg·K),* toplinska propusnost λ *(W/m·K)* i koeficijent termalne ekspanzije α *(°C)* (Plötze i dr., 2007; Villar, 2004). Za potrebe diplomskog rada naglasak je stavljen na in situ ispitivanje unutar projekta FEBEX, Švicarskog podzemnog laboratorija Grimsel koji se nalazi unutar stijenske strukture granita. U sklopu FEBEX projekta rađena su dva veća ispitivanja, FEBEX I i FEBEX II. FEBEX I započet je 1997. godine s in situ ispitivanjima inženjerskih barijera gdje je prvi cilj bio ispitati stabilnost te izvedivosti njihovog sastavljanja koji su bazirani na španjolskom konceptu odlaganja iskorištenog goriva u kristaličnim stijenama. Drugi cilj je bio razvijanje metodologije i modela za procjenu termo-hidro-mehaničkih i termo-hidro-geokemijskih efekata inženjerskih barijera kod horizontalnog odlaganja spremnika u tunele.

Na slici 3-16 prikazani koncept odlaganja u sklopu FEBEX uključuje 1) čelični spremnik, unutar kojeg se nalazi VRAO ili ING, 2) horizontalno pozicioniran unutar tunela, 4) okružen glinenom barijerom u obliku blokova 4) glineni blokovi su napravljeni od kompaktiranog bentonita visoke gustoće. Projekt je započeo in situ (1:1) ispitivanjem koristeći sljedeće elemente:

- grijaći element koji bi predstavljao toplinu generiranu iz spremnika radioaktivnog otpada.
- bentonitne blokove
- preko 600 senzora koji konstantno očitavaju bitne parametre poput temperature, sadržaj vode u bentonitu, stupanj bubrenja i dr.



Slika 3—16 Koncept odlaganja VRAO ili ING-a unutar projekta FEBEX: 1) čelični spremnik, unutar kojeg se nalazi VRAO ili ING, 2) horizontalno pozicioniran unutar tunela, 4) okružen glinenom barijerom u obliku blokova 4) glineni blokovi su napravljeni od kompaktiranog bentonita visoke gustoće (Grimsel test site, 2019)

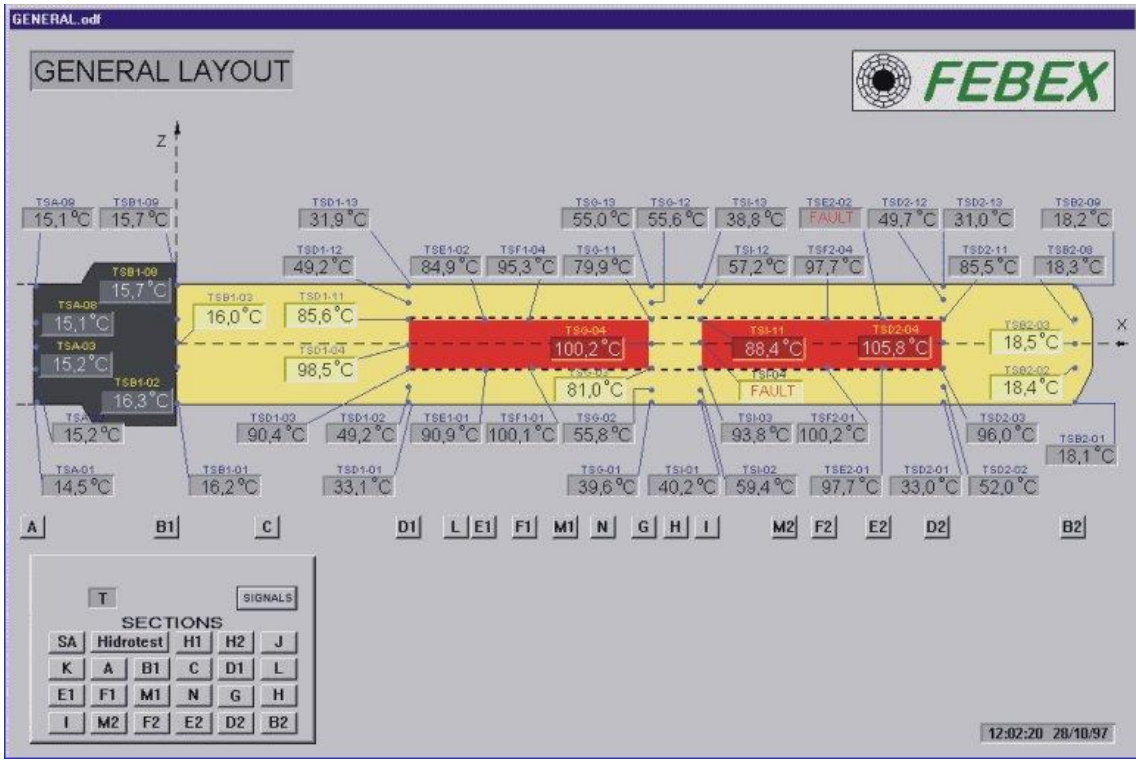
Paralelno s in situ ispitivanjem u Grimselu, rađen je „Mock-up“ test u Madridu (omjera ¼ u odnosu na Grimsel). Grijač je duljine 4,5 m, težine 12 t koji se polaže horizontalno u bušotinu promjera 2,28 m ispunjenu kompaktiranim bentonitom prikazano na slici 3-17. Na slici su također vidljivi kablovi za monitoring postavljeni sa obje strane grijača.



Slika 3—17 postavljanje grijača u bušotinu ispunjenu kompaktiranim bentonitom (Grimesl test site, 2019)

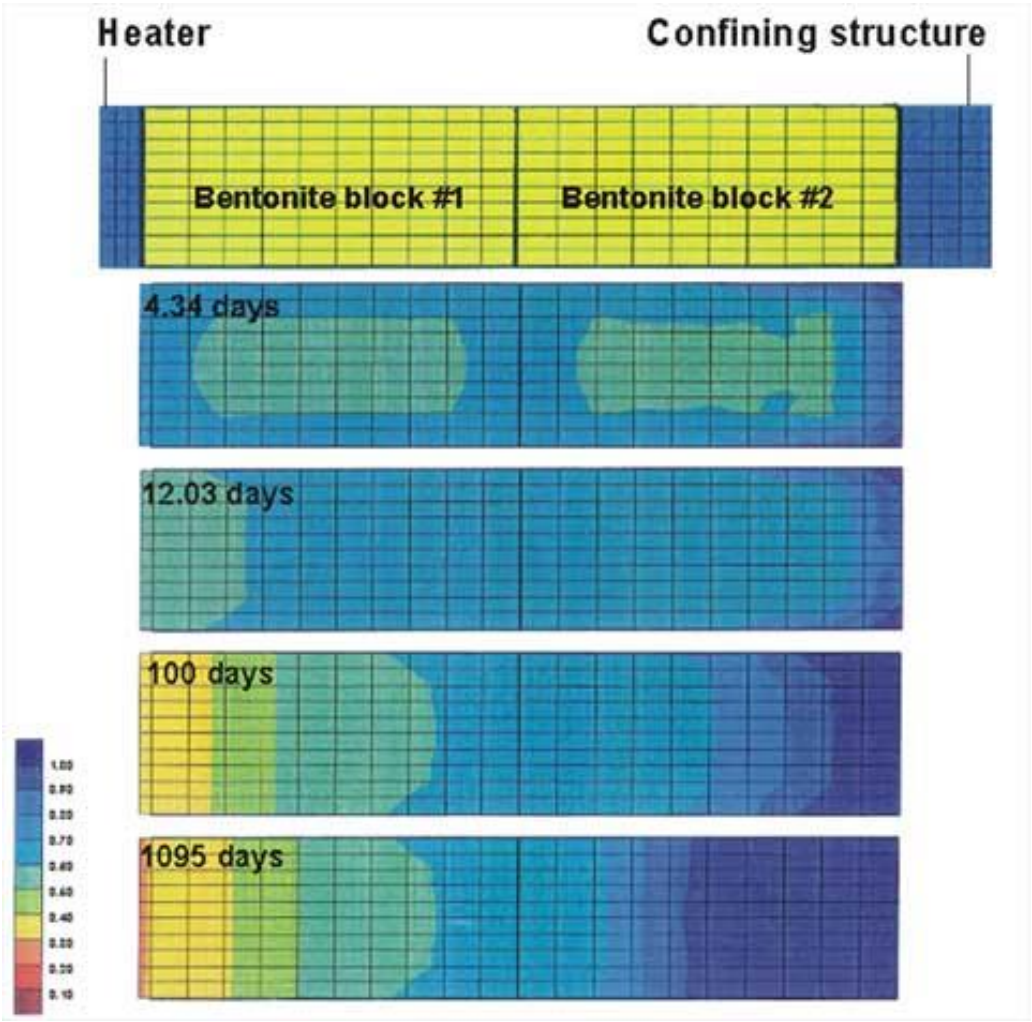
Prva faza zagrijavanja započela je u veljači 1997. godine te je kontinuirano trajala do 2002. godine. Grijači su održavali konstantnu temperaturu na 100 °C, dok se je bentonit polagano hidratizirao s vodom iz granita. Razvijanje topline, saturacija bentonita, relativna vlaga,

porni tlak te pomaci praćeni su putem 623 senzora postavljenih u bentonitu i stijeni. Na slici 3-16 prikazani su rezultati petogodišnjeg ispitivnja.



Slika 3—18 prikaz rezultata očitanja ispitivanja FEBEX I (Grimsel test site, 2019)

Uz in situ ispitivanje rađena su tri matematička modela u računalnom programu CODE-BRIGHT. Prvi je napravljen s malo realnih podataka te je bio usmjeren u razumijevanje THM procesa koji uključuju širenje topline. Drugi model je izrađen na kraju faze planiranja in situ ispitivanja kao slijepo predviđanje. Podaci korišteni u izgradnji modela su iz laboratorijskih ispitivanja karakteristika bentonita. Treći model je izrađen kako bi se bolje razumjele razlike između predviđenih i promatranih rezultata iz laboratorija. Modeli su sastavljeni od raznih parametara vezanih za fizičke reakcije unutar barijera. Rezultati modela prikazani su na slici 3-19 te su dali prihvatljiva predviđanja saturacije kao i simulacije bazičnih fizičkih procesa unutar inženjerskih barijera (NAGRA, 2016).



Slika 3—19 Modeliranje THM efekata u računalnom programu CODE-BRIGHT mock up testa-konture saturacije u različitim vremenima (Grimsel test site, 2019)

Na kraju cijelog ispitivanja doneseni su zaključci FEBEX I:

- Promjer odlagališnog tunela od 2,28 m je dosta ograničavajući te bi zahtijevao visoku točnost prilikom dizajna te oprezan transport opreme kao i manipulaciju njome.
- Utjecaj relativne vlage ima veliki utjecaj na mehaničku stabilnost bentonitnih blokova te je potrebno paziti na postotak vlage prilikom skladištenja, prijevoza i postavljanja bentonitnih blokova u odlagalište.
- kritični faktor tijekom postavljanja spremnika u odlagališni tunel je poravnavanje spremnika s osi tunela i transportnih tračnica.
- Matematički model korišten u programu CODE-BRIGHT potvrdio je da matematički modeli mogu izračunati slične rezultate kakvi su dobiveni u in situ ispitivanjima, sa popriličnom točnosti. Ipak to ne daje potvrdu rezultata

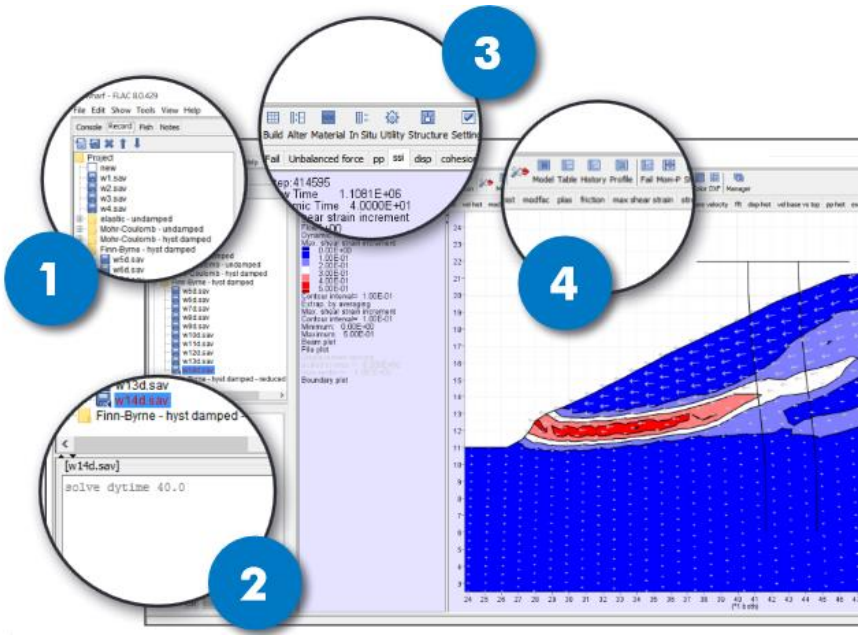
u praksi te su uz modeliranje potrebna dodatna ispitivanja kako bi se dobila konačna potvrda rezultata, Modeli su svakako dali dovoljno povjerenja prilikom predviđanja razvijanja THM efekata u odlagalištu.

4. MODELIRANJE

4.1. FLAC

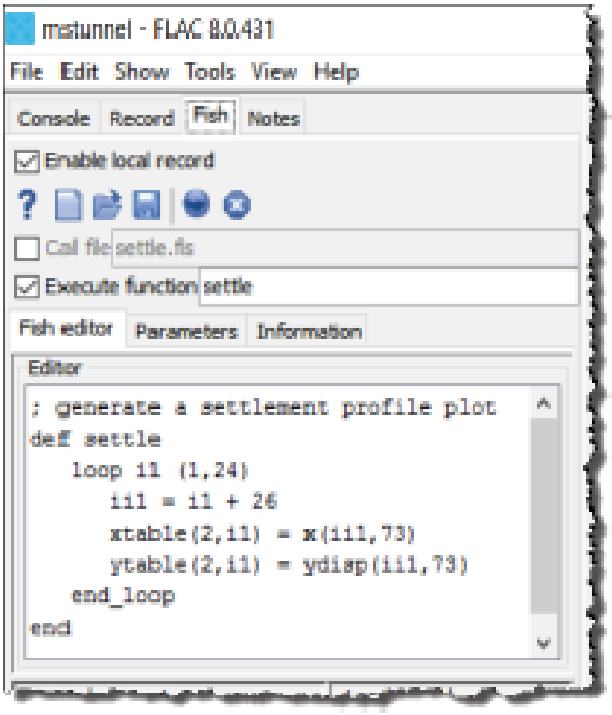
FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua). FLAC je numerički softver za modeliranje i naprednu geotehničku analizu tla, stijena, podzemnih voda i temelja u 2D dimenziji koji je korišten prilikom dizajniranja u građevini geotehnici i rudarstvu. Softver omogućuje simulaciju ponašanja zemljanih, stijenskih i sličnih materijala koje mogu biti podlegnute mehaničkim ili drugim naprezanjima kao i materijalima koje imaju izraženu plastičnost. Unutar softvera materijali su prikazani kao elementi ili zone koje grade mrežu koju korisnik može prilagoditi svojim potrebama. Svaki element mreže ponaša se u skladu s unešenim parametima te prati linearne ili ne linearne zakone naprezanja kao odgovor na aplicirane sile kroz određeno vrijeme. Uz mehaničke deformacije, FLAC ima mogućnost modelirati i modele sa temperaturnim utjecajima, utjecajima podzemne vode i dr. utjecaje na materijale. Razvila ga je Američka kompanija Itasca International group iz Minneapolisa. Na slici 4-1 prikazano je sučelje softvera sa opisom sučelja:

1. projekt i njegovi faze,
2. povijest unosa podataka,
3. alatna traka- komande faza modeliranja,
4. alatna traka- komande za praćenje rezultata.



Slika 4—1 Sučelje softvera FLAC (ITASCA, 2019)

Uz klasično „point and clik“ metodu korištenja softvera, FLAC ima integrirani programski jezik „FISH“ putem kojeg se može modelirati (slika 4-2).

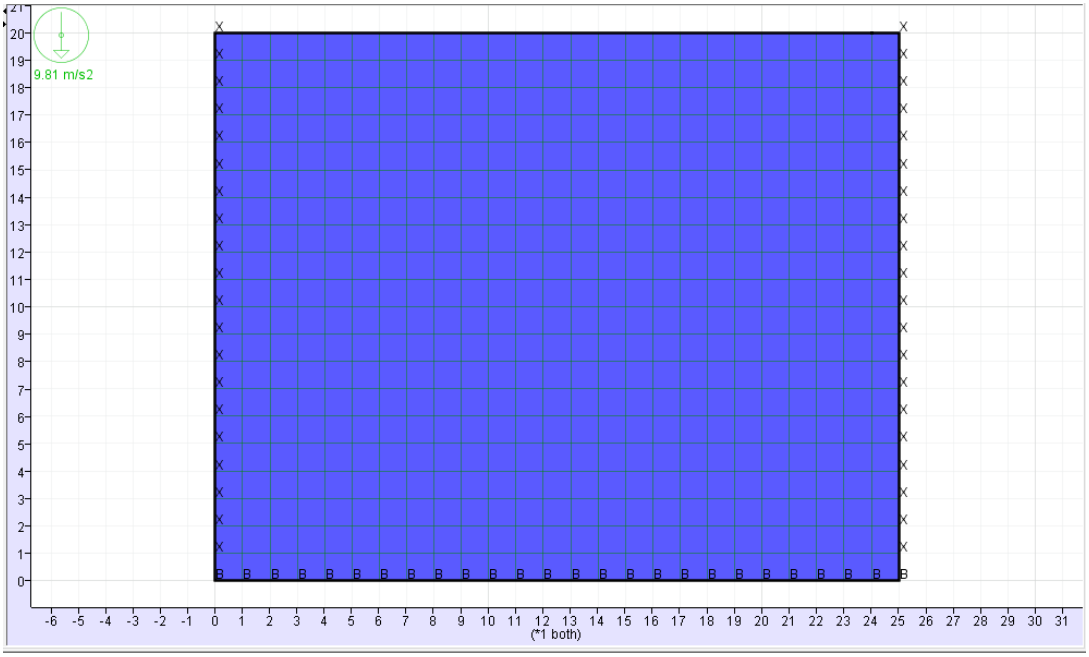


Slika 4—2 Primjer unosa podataka putem programskog jezika FISH (ITASCA, 2019)

4.2. **Dizajn modela i odabir parametara**

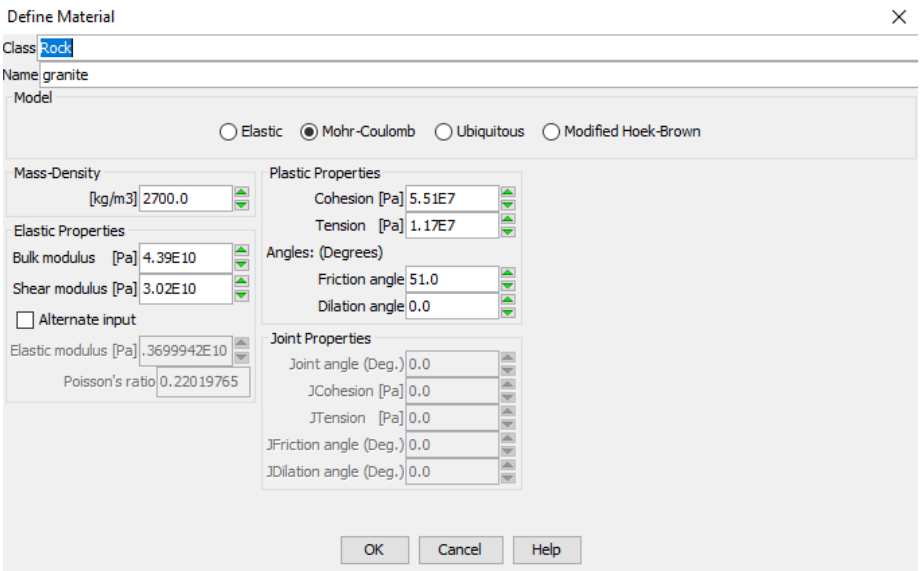
Model se dizajnira u programskom softveru FLAC, verziji 8.0 te predstavlja horizontalno postavljeni spremnik u bušotine unutar geološke strukture granita na dubini od 750 m. Unutar modela napravljena je simulacija širenja topline kroz inženjerske barijere generirane od strane ING-a unutar bakrenog spremnika u određenom vremenskom periodu. Uz širenje topline, model također simulira mehaničke deformacije u ne taknutoj strukturi granita, zatim mehaničke deformacije u praznoj bušotini te mehaničke deformacije nakon što se bušotina ispuni spremnikom i glinenom ispunom. Model je idejnog karaktera gdje su korišteni parametri raznih istraživanja, ne predstavlja konkretni slučaj već služi kako bi se bolje razumjela izdržljivost takvog sustava na zadržavanje topline i mehaničke deformacije. Model se sastoji od mreže 20 x 25 m koja predstavlja stijenu granita prikazano na slici 4-3. Radi usporedbe napravljena su 2 modela s različitim promjerima bušotine, jedan s promjerom bušotine 3.5 m po uzoru na NAGRA-in koncept te drugi s

promjerom bušotine gdje se uzimala proizvoljna vrijednost od 2.5 m između NAGRA-inog koncepta i KBS-3H koncepta. U modelu s promjerom 3.5 m debljina bentonitne ispune je 1.7 m, dok je kod modela s promjerom bušotine od 2.5 m debljina bentonitne ispune 1.0 m. U oba modela simuliran je različit sadržaj vode u glinenoj ispuni kako bi odgovarao 17 %, odnosno 26,7 % sadržaja vode te je toplina spremnika postavljena na 80 °C.



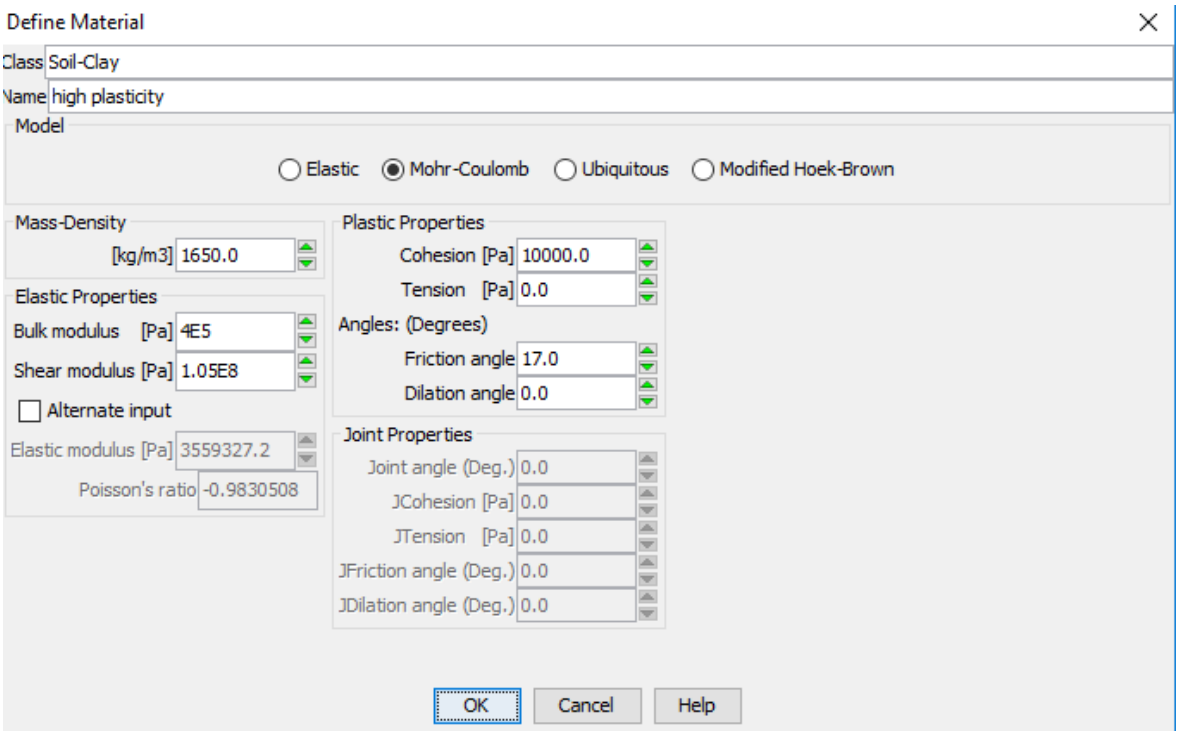
Slika 4—3 prikaz modela netaknute stijene granita

FLAC unutar sebe ima bazu parametara za određene stijenske i zemljane materijale te su gustoća i dinamički parametri za svaki materijal preuzeti iz baze podataka FLAC-a. Dinamički parametri kao i gustoća za stijenu granit prikazani su na slici 4-4.



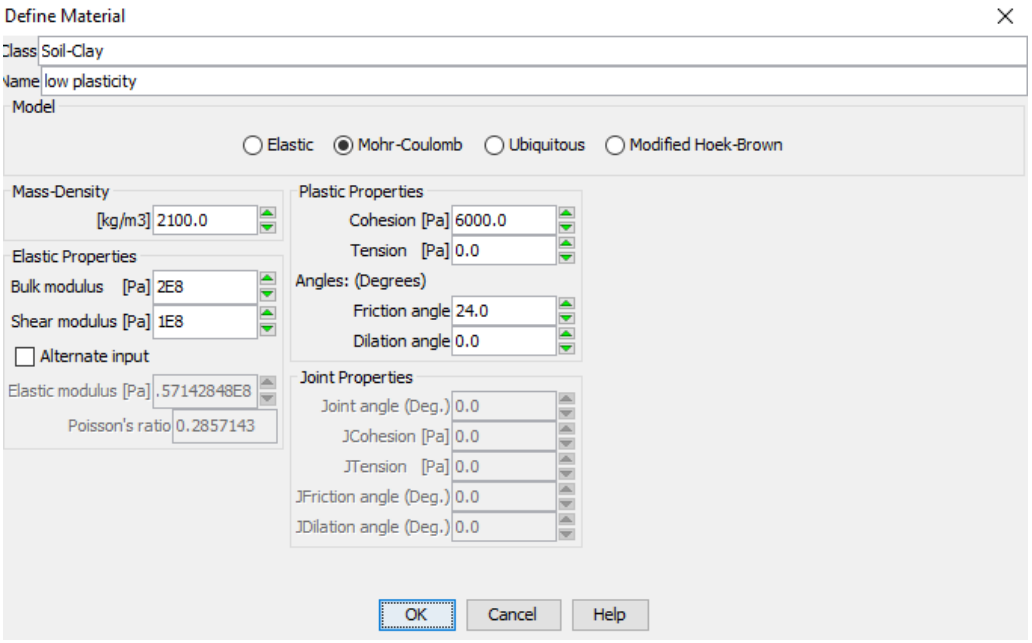
Slika 4—4 Prozor za odabir parametara stijene granita.

Na slici 4-4 *mass-Density* predstavlja gustoću materijala, *bulk modulus* predstavlja modul elastičnosti, *shear modulus* predstavlja modul posmika, *cohesion* je kohezija, *tension* je napetost, *friction angle* predstavlja unutarnji kut trenja, a *dilation angle* kut dilatacije. Parametri su uspoređeni s ispitivanjima (Pusch, 2015) i (Choi i dr., 2009) te je uzeta srednja vrijednost. Na slici 4-5 prikazani su odabrani parametri za glinu koja glumi „granulirani“ bentonit



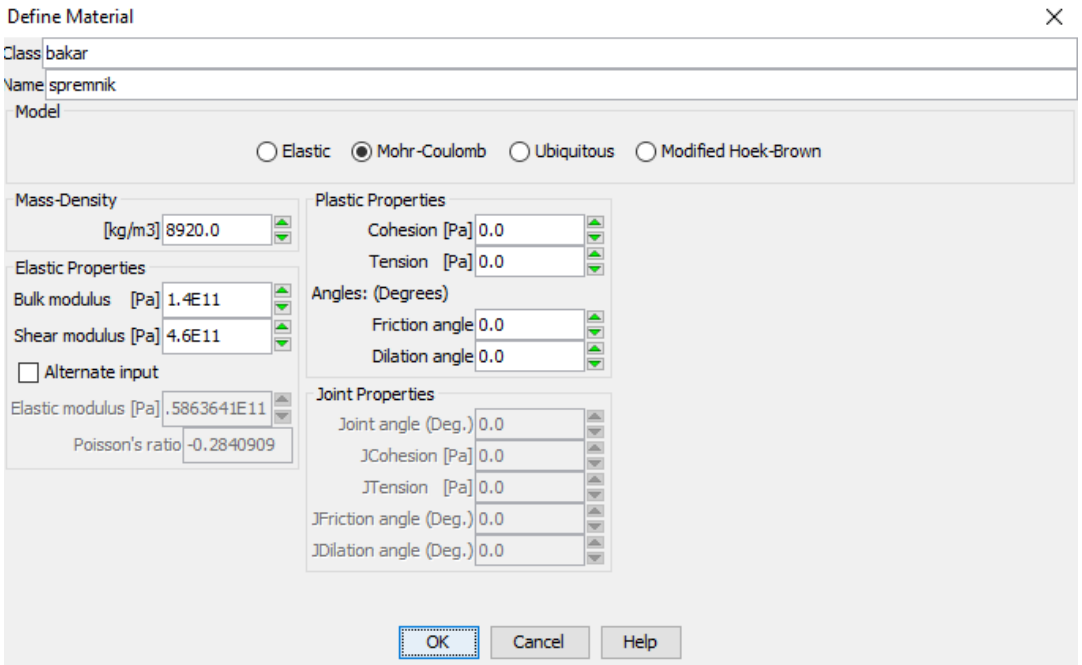
Slika 4—5 Prozor za odabir parametara granuliranog bentonita

Parametri granuliranog bentonita uspoređeni su s parametrima (Pusch i dr., 2019) te je u model postavljena srednja vrijednost. Na slici 4-6 prikazani su parametri kompaktiranog bentonita.



Slika 4—6 Prozor za odabir parametara kompaktiranog bentonita

Prilikom odabira parametara za kompaktirani bentonit parametri su uspoređeni s (Pusch, 2009) te su prepravljeni sa srednjom vrijednošću kako bi odgovarali parametrima kompaktiranog bentonita. Uz to, potrebno je napomenuti da plastičnost gline u njihovom nema veze sa simulacijom modela, već su ti tipovi gline odabrani jer im se parametri, u odnosu na druge glinene materijale u bazi podataka FLAC-a, najbliže podudaraju sa traženim materijalima. Parametri bakra prikazani su na slici 4-7.



Slika 4—7 Prozor za odabir parametara bakrenog spremnika

FLAC u bazi podataka nema parametre za metalne materijale stoga su parametri uzeti iz raznih izvora. Gustoća je preuzeta iz projekta *An Analysis of Heat Conduction with Phase Change duringthe Solidification of Copper* (Michalski, 2009), modul elastičnosti i modul posmika su preuzeti sa web stranice periodictable.com (Gray i dr., 2017). Ostali parametri bakra poput kohezije nisu potrebni prilikom izračuna. Odabrani parametri prikazani su u Tabeli 4-1.

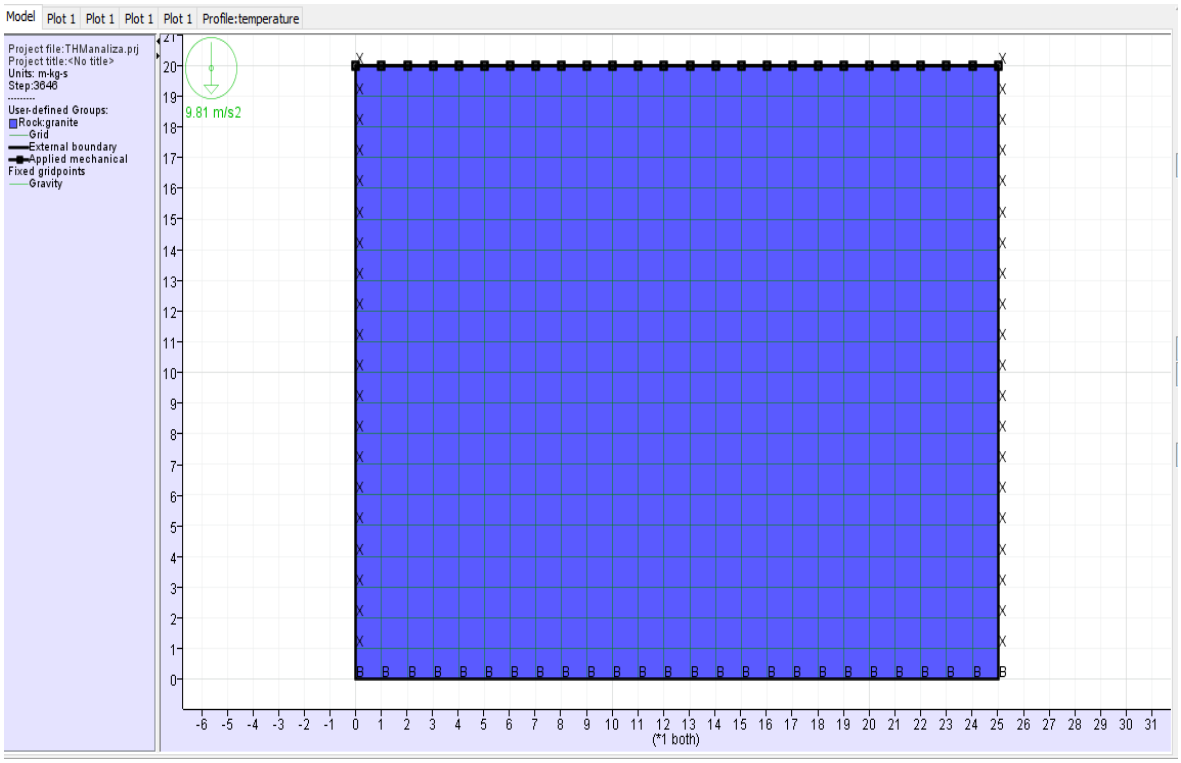
Tabela 4—1 Toplinski parametri

PARAMETAR	MATERIJAL	OZNAKA/MJERNA JEDINICA	VRIJEDNOST	IZVOR
Specifični toplinski kapacitet	Granit	$c_{p/}$ [J/kgK]	790	Engineering ToolBox, (2001)
	Bentonit (26,7 % sadržaja vode)		1200	(Plötze i dr. 2007)
	Bentonit (70 % sadržaja vode)		1200	(Plötze i dr. 2007)
	bakar		385	Engineering ToolBox, (2001)
Koeficijent termalne ekspanzije	Granit	α/[°C]	$8.1x10^{-6}$	(Hockman i Kessler,1950)
	Bentonit (26,7 % sadržaja vode)		$2x10^{-4}$	(Cui i dr., 2012)
	Bentonit (70 % sadržaja vode)		$2x10^{-4}$	(Cui i dr., 2012)
	bakar		$17x10^{-6}$	*Thermal expansion: Copper vs. aluminium (www.help.leonardo-energy.org)*
Toplinska provodljivost	Granit	λ/[W/mK]	3.1	(Cho i dr., 2009)
	Bentonit (26,7 % sadržaja vode)		1.51	(Cui i dr., 2012)
	Bentonit (70 % sadržaja vode)		0.90	(Pusch., 2009)
	bakar		401	Engineering ToolBox, (2001)

Usporedbom raznih vrijednosti iz raznih izvora odlučeno je uzeti iste vrijednosti, odnosno srednje vrijednosti parametara spomenutih izvora iz razloga što odgovaraju potrebama modeliranja. Bitno je za napomenuti kako se uslijed sadržaja vode najviše uočava promjena kod toplinske provodljivosti te je naglasak na tu razliku, dok je kod ostalih parametara razlika manje bitna (Pusch, 2015.).

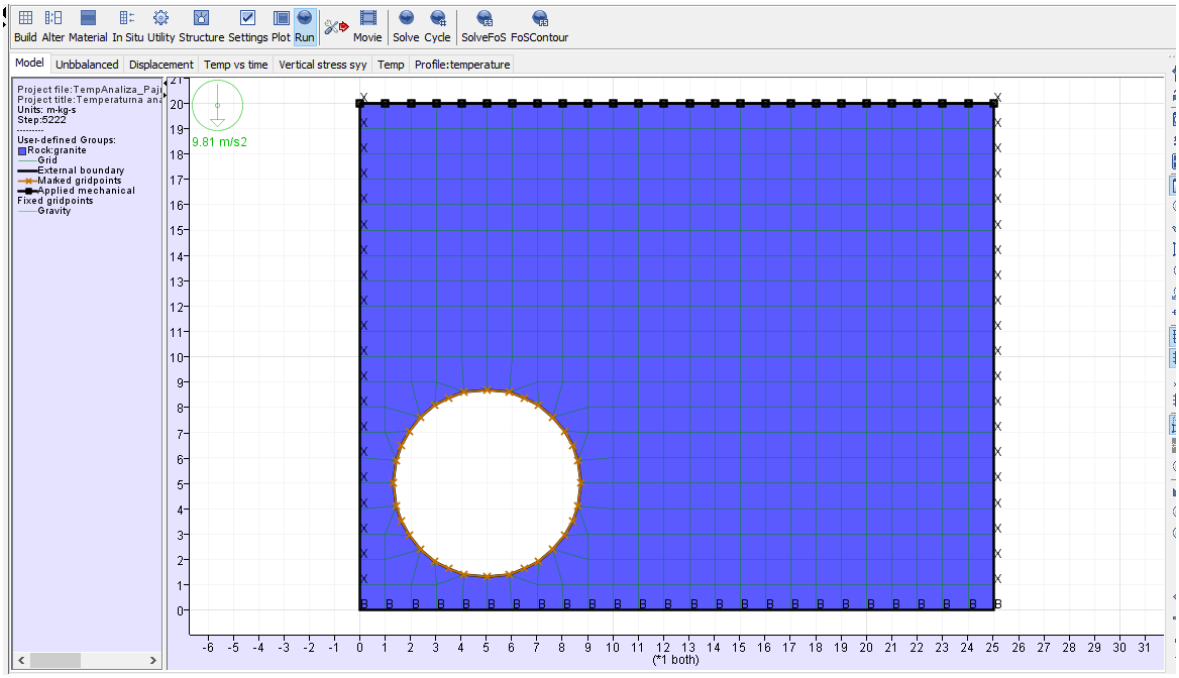
4.3. **Simulacije**

Kod modeliranja mehaničkih efekata prvo se simuliralo vertikalno naprezanje netaknute stijene uslijed vlastite mase. Uzevši valjane parametre i zamišljenu dubinu dobije se vertikalno naprezanje putem formule $\sigma_v=\gamma \cdot z$, gdje je $\sigma_v=1.9x10^7$ Pa. Na slici 4-8 uneseni parametri naprezanja u obliku linije s kockicama na vrhu modela.

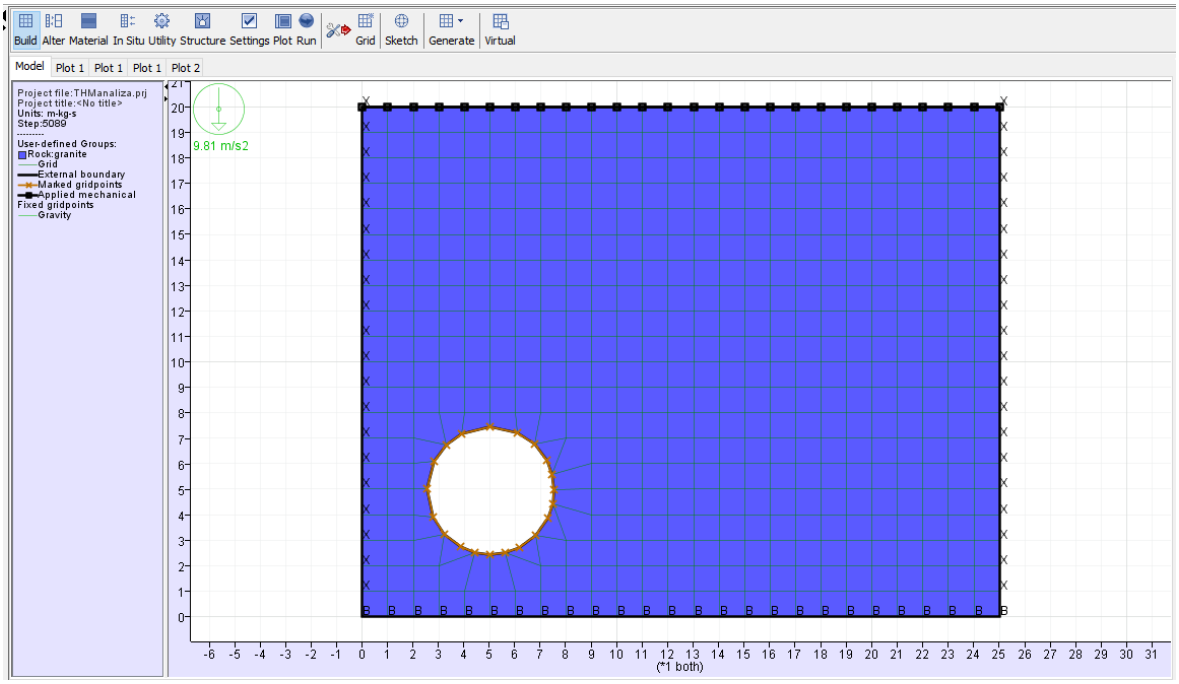


Slika 4—8 Model s nanesenim naprezanjima.

Radi izračuna vertikalnih pomaka koja se odvijaju u stijeni fiksirani su lijevi i desni krajevi modela kako ne bi došlo do pomaka po X-osi te je dno fiksirano po obje osi. Iduća faza simulacije prikazane su na slici 4-9 i 4-10 gdje se vidi iskop tunela. Promjer na prvoj slici je 3.5 m, a na drugoj je 2.5 m.

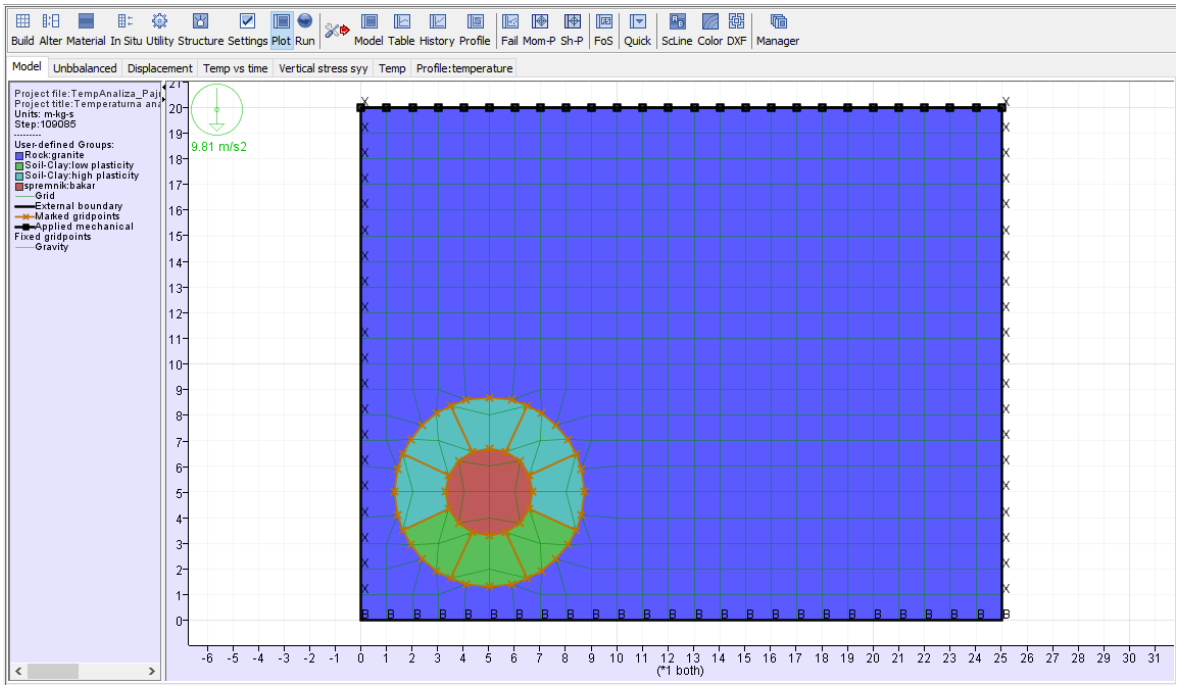


Slika 4—9 Bušotina unutar matične stijene granita promjera 3.5 m.

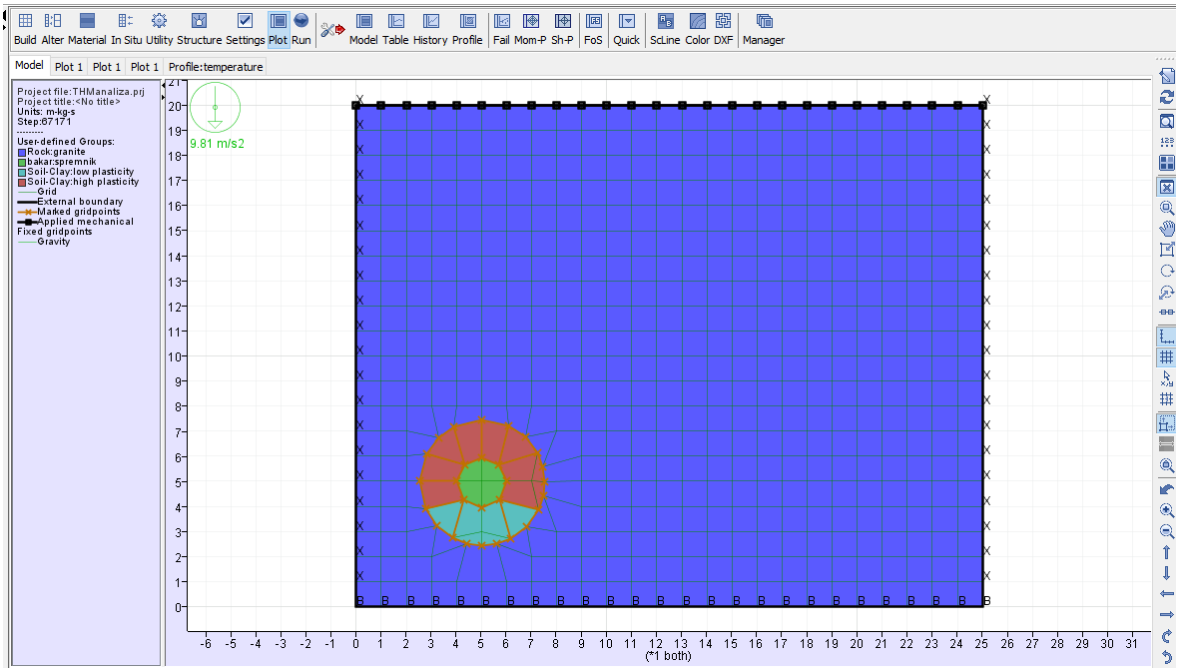


Slika 4—10 Bušotina unutar matične stijene granita promjera 2.5 m.

Za vrijeme iskopa cijelo vrijeme prate se vertikalna naprezanja te pomaci unutar stijene. Nakon što se odrede naprezanja i pomaci bušotine se ispunjavaju glinenom ispunom i bakrenim spremnikom što je i prikazano na slikama 4-11 i 4-12.



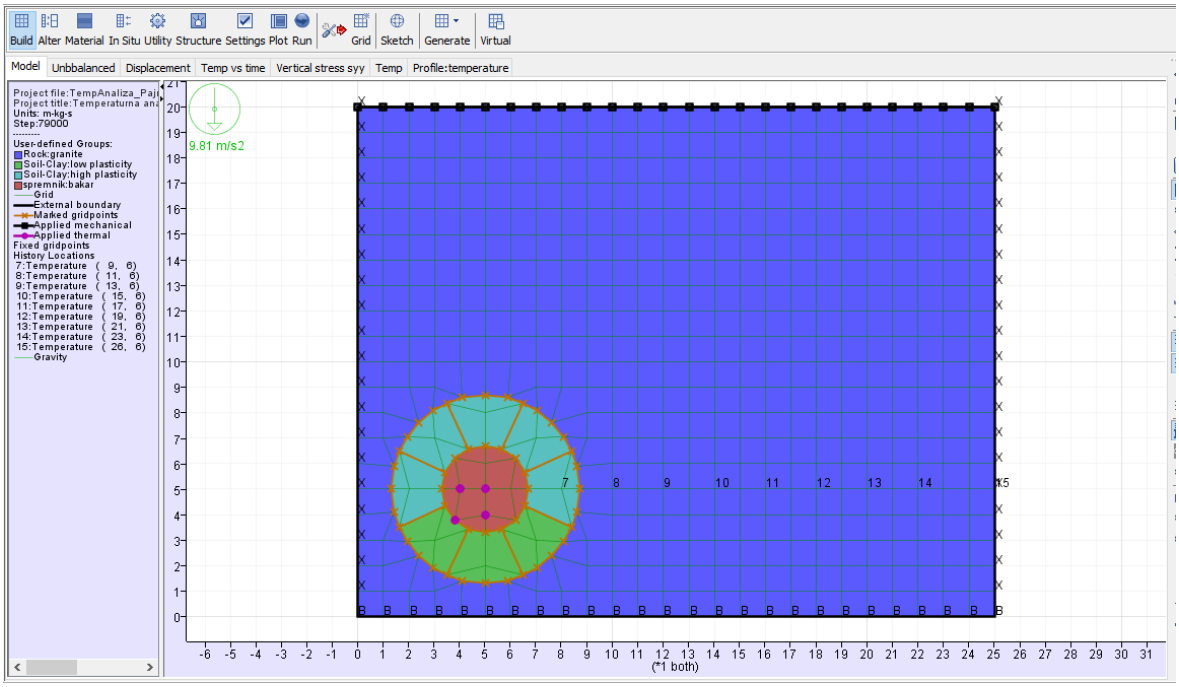
Slika 4—11 spremnik s glinenom ispunom unutar bušotine promjera 3.5 m.



Slika 4—12 spremnik s glinenom ispunom unutar bušotine promjera 2.5 m.

Kao postolje spremnika odabrana je glinena ispuna veće gustoće 2100 kg/m^3 koja „glumi“ kompaktirani bentonit, dok ostali, „gornji“ dio glinene ispune „glumi“ granulirani bentonit nešto manje gustoće 1650 kg/m^3. U ovoj fazi simulacije prate se mehanički pomaci unutar bušotine. Nakon što se odrede mehanički pomaci unutar bušotine kreće temperaturna

analiza. Prije same analize unose se temperaturni parametri stijene, bentonita i bakrenog spremnika gdje bakreni spremnik isijava početnom temperaturom od 80 °C. Za temperaturu stijena odlučeno je da će se temperatura na dubini od 750 m kretati oko 45 °C (Veinović, osobna komunikacija, 1. veljače, 2019). Prilikom ispitivanja toplinske provodljivosti bentonita primijećeno je da sadržaj vode ima veliki utjecaj (Pusch, 2009) Iz tog razloga rade se dvije analize za bentonit sa parametrima koja odgovara 70% sadržaja vode i bentonit koji odgovara 26,7% vode za obje bušotine. Temperatura bentonita kreće se od 35 °C do 65 °C (NAGRA, 1998). Za temperaturu bentonita uzeta je prosječna vrijednost i zaokružena na 45 °C radi jednostavnijeg unosa u sustav. Tu se želi vidjeti širenje temperature kondukcijom kroz sustav barijera (NAGRA, 1998) u periodu od 2 mj., zatim 6 mj. te nakon 12 mj. Unutar samog modela postavlja se niz kontrolnih točaka (history) koje su prikazane na slici 4-13. Kontrolne točke se postavljaju kako bi se grafički prikazalo koliko je vremena potrebno da toplina dođe do pojedine točke.



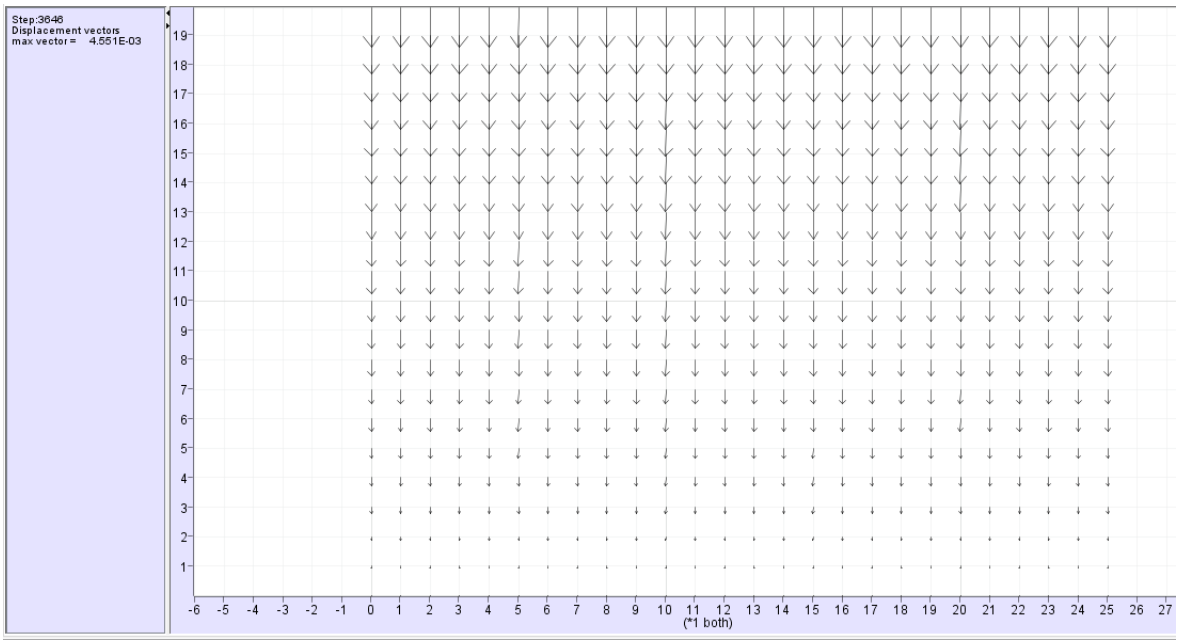
Slika 4—13 Kontrolne točke

Kada bi se u stvarnosti gradilo odlagalište u tim uvjetima, temperatura bi značajno otežavala radove. Iz tog razloga bi se prilikom projektiranja vjetrenog sustava trebalo uzeti u obzir sustav hlađenja odlagališta.(Veinović, osobna komunikacija, 1. veljače.2019)

4.4. **Rezultati i rasprava**

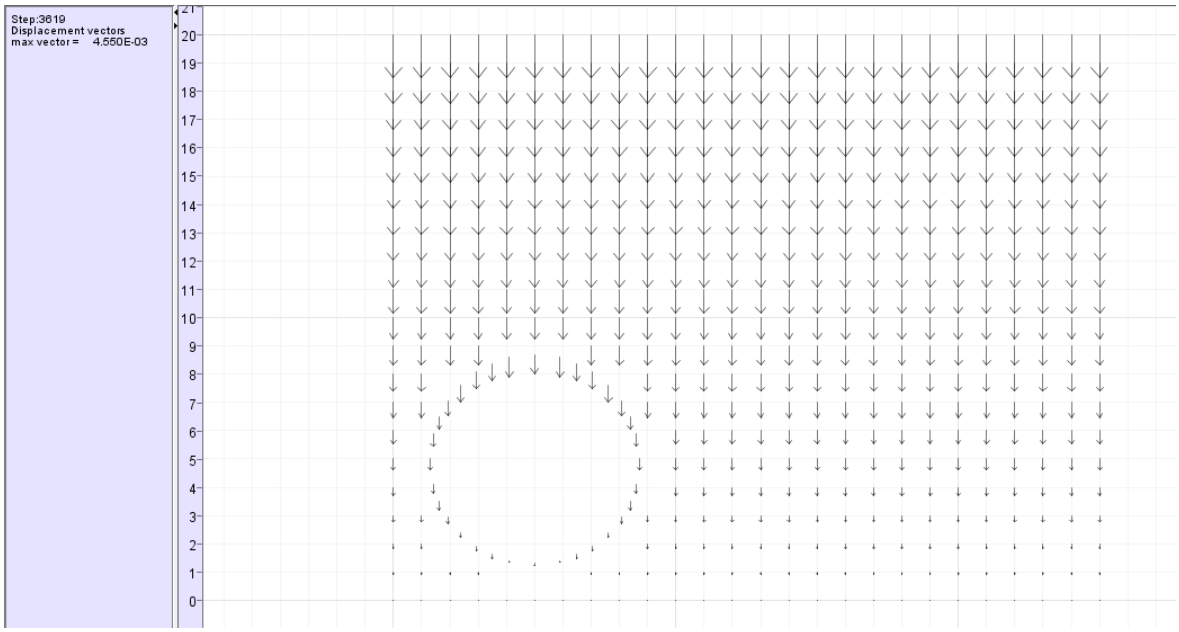
4.4.1. Rezultati simulacije mehaničkih efekata

Nakon odrađene prve simulacije vertikalnih naprezanja i vertikalnih pomaka netaknute stijene dobiveni su grafički rezultati. Rezultati se ne razlikuju između modela promjera 3.5 m i modela 2.5 m jer se radi o fazi gdje je stijena netaknuta. Rezultati vertikalnog pomaka prikazani su grafički na slici 4-14.



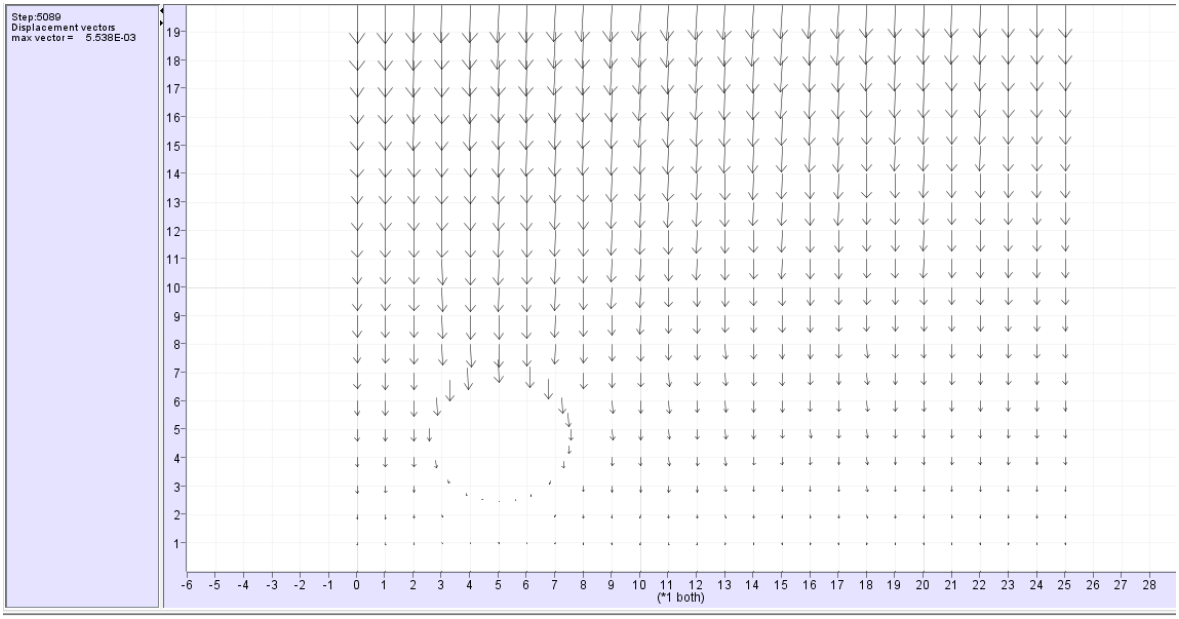
Slika 4—14 Vektori vertikalnog pomaka netaknute stijene

Iz grafičkih rezultata na slici vidi se da su pomaci dosta mali, odnosno maksimalni vektor vertikalnog pomaka iznosi 4,6 mm što govori da je model dobro postavljen. Prilikom iskopa bušotine promjera od 3.5 m i 2. 5 m također su mjereni vertikalni pomaci unutar stijene. Rezultati su grafički prikazani na slici 4-15 za bušotinu promjera 3.5 m, te na slici 4-16 za bušotinu promjera 2.5 m.



Slika 4—15 Vektori vertikalnog pomaka nakon izbušene bušotine promjera 3.5 m

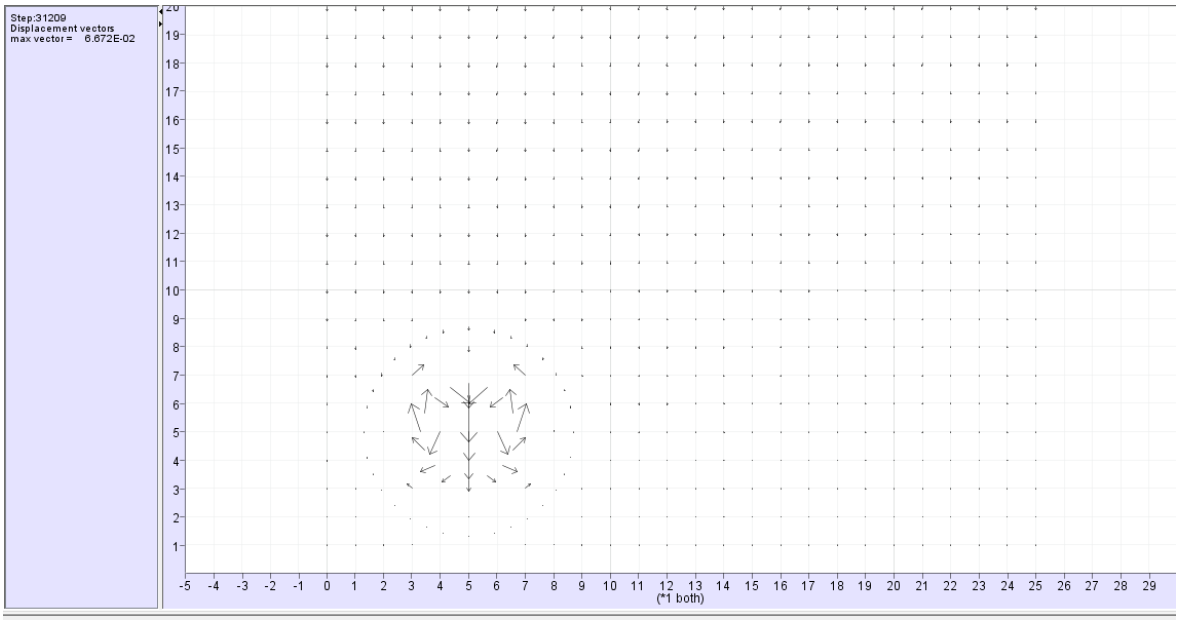
Vertikalni pomaci se nisu skoro uopće povećali, odnosno vektor vertikalnog pomaka te iznose 4.5 mm, što potvrđuje tvrdnju da se radi o čvrstoj stijeni.



Slika 4—16 Vektori vertikalnog pomaka nakon izbušene bušotine promjera 2.5 m

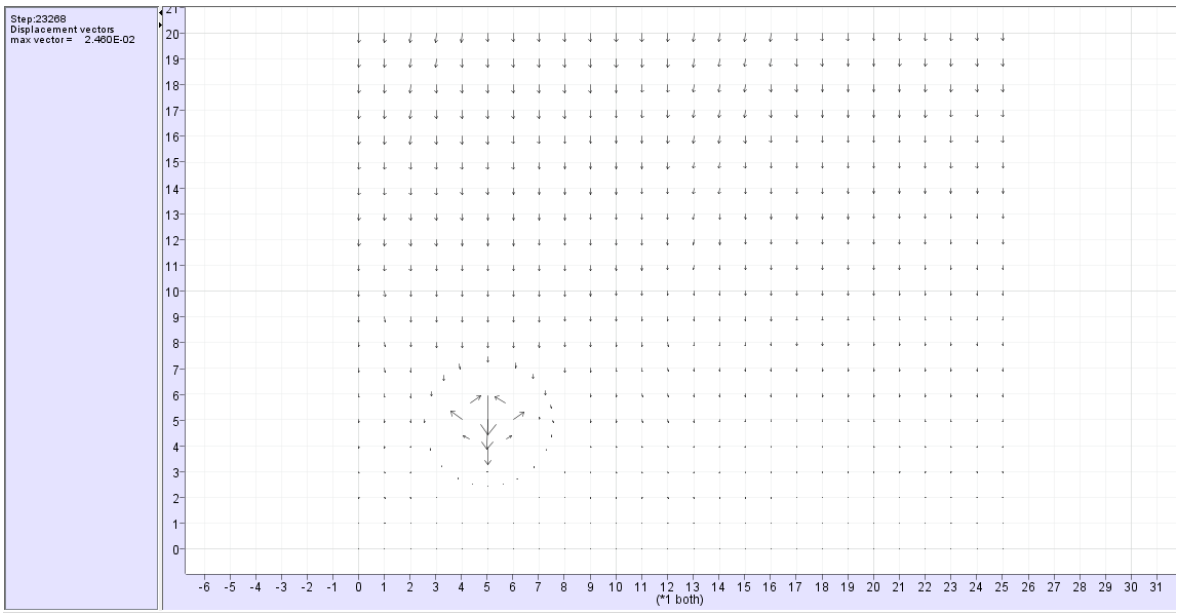
Prilikom izračuna vertikalnih pomaka u slučaju bušotine od 2.5 m vidi se povećanje vektora vertikalnog pomaka od 1 mm.

Sljedeća faza je proračun vertikalnih pomaka unutar same bušotine nakon što se postavi spremnik i bentonit. Rezultati su grafički prikazani preko vektora vertikalnih naprezanja te se u gornjem lijevom kutu može vidjeti njihov iznos. Na slici 4-17 prikazani su rezultati za bušotinu promjera 3.5 m.



Slika 4—17 Vektori pomaka unutar stijene promjera 3.5 m

Unutar bušotine vide relativno veliki pomaci u iznosu od 6.5 mm što nisu veliki s obzirom da se unutar bušotine nalazi težak spremnik s ispunom. Rezultati su zadovoljavajući te nam daju sigurnost u stabilnost „paketa“



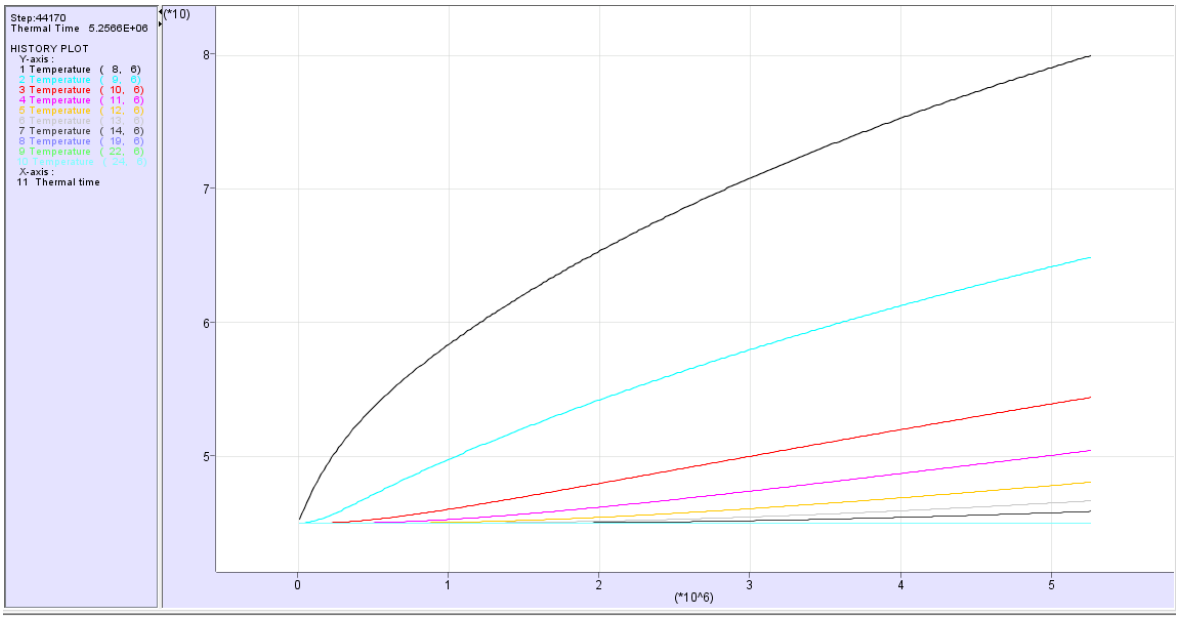
Slika 4—18 Vektori pomaka unutar bušotine promjera 2.5 m

Kod bušotine promjera 2.5 m pomaci su znatno manji, odnosno vektori pomaka iznose 2.5 mm što je svakako prihvatljivo te pokazuje na mehaničku stabilnost sustava. Razlika između pomaka unutar bušotine se može objasniti istim vrijednostima bentonita, ali s razlikama u masi gdje je očito da bušotina s većim promjerom koristi veće količine relativno deformabilne ispune.

4.4.2. Rezultati temperaturne analize za bušotinu promjera 2.5 m gdje bentonit ima 26.7% sadržaja vode

Konačna faza analize uključuje širenje topline kondukcijom kroz sustav barijera kroz 2 mj., 6 mj. te 12 mj. Rezultati će biti prikazani kao grafovi širenja temperature u ovisnosti o vremenu putem kontrolnih točaka, obojanih kontura u modelu gdje tamno plava boja predstavlja najtopliju boju, a tamno crvena boja predstavlja najhladniju te će biti prikazani profili ravnine u kojoj se nalazi spremnik. Rezultati će biti poredani po vremenu, od 2 mj. nakon zatvaranja bušotine do godine dana.

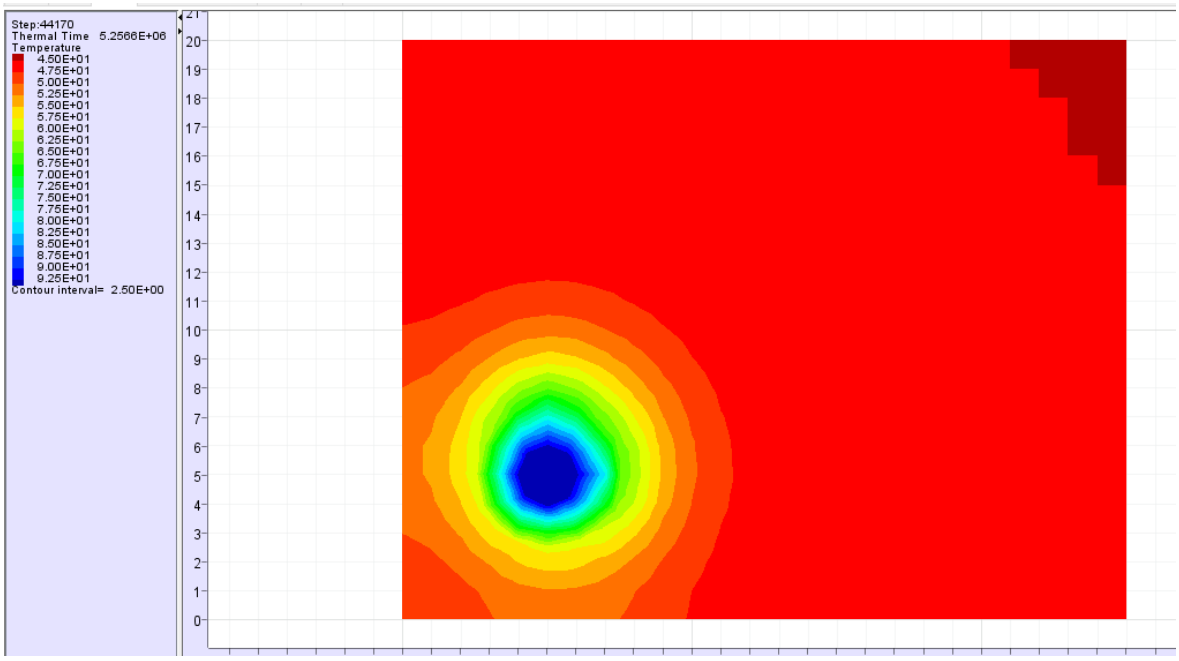
Na slici 4-19 prikazani su grafički rezultati za bušotinu promjera 2.5 m, debljine bentonita 1 m i sadržaja vode 26.7% u bentonitu u periodu prvih 2 mj. širenja topline. Rezultati su očitani putem kontrolnih točaka koje su postavljene u ravnini samog spremnika te se putem njih može primijetiti koliko je vremena potrebno da u tim točkama dođe do porasta temperature. Pozicija točaka prikazana je na slici 4-13. X-os predstavlja vrijeme, dok Y-os predstavlja temperaturu. X-os predstavlja vrijeme [s], dok Y-os predstavlja temperaturu [°C].



Slika 4—19 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za 2 mj.

U prvoj kontrolnoj točki koja je udaljena 1 m (crna linija) od stjenke primjećuje se porast temperature od 35 °C unutar prvih 2 mj. nakon zatvaranja bušotine. Iduća točka (plava linija) udaljena je 1.5 m od stjenke spremnika, odnosno na vanjskom rubu bentonita te se primjećuje porast temperature od 20°C. Treća točka (crvena linija) je udaljena 3 m od stjenke spremnika te se na njoj vidi porast temperature od skoro 10 °C. Iduća točka koja se uzima je peta točka koja se nalazi na 5 m od stjenke spremnika (žuta linija). Peta točka bilježi rast temperature od 3 °C. Uzevši zadnju točku u obzir koja je udaljena 18 m od stjenke spremnika vidi se porast od 1 °C. Sukladno rezultatima simulacije širenja topline unutar prvih 2 mj. nakon zatvaranja bušotine može se zaključiti da temperatura najviše raste unutar bentonitne ispune te nakon nje linearno s udaljenosti pada.

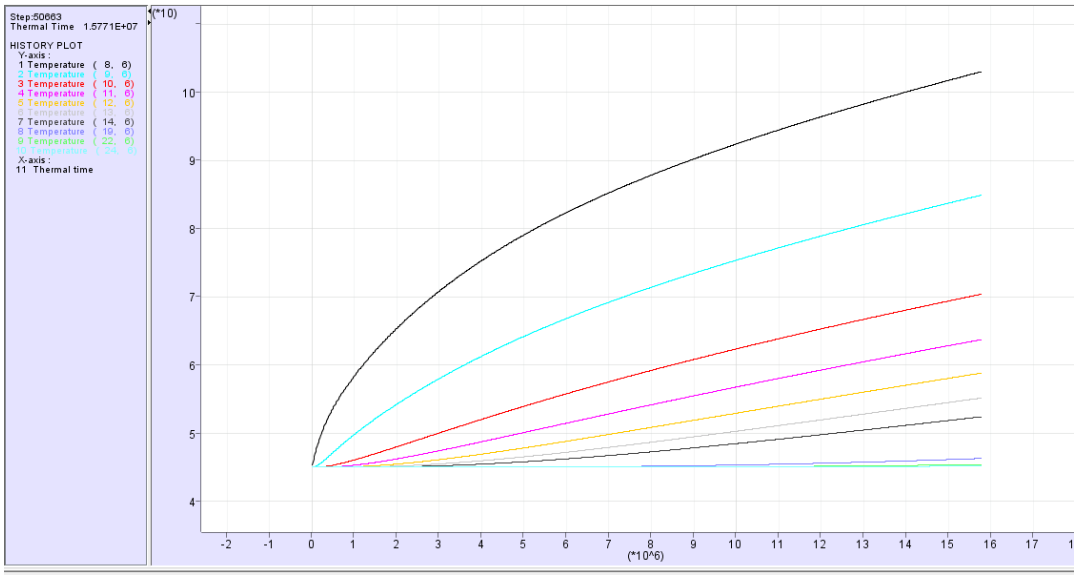
Na slici 4-20 prikazani su rezultati širenja topline putem kontura za bušotinu promjera 2.5 m gdje bentonitna ispuna ima 26.7% sadržaja vode.



Slika 4—20 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 2 mj za bušotinu.

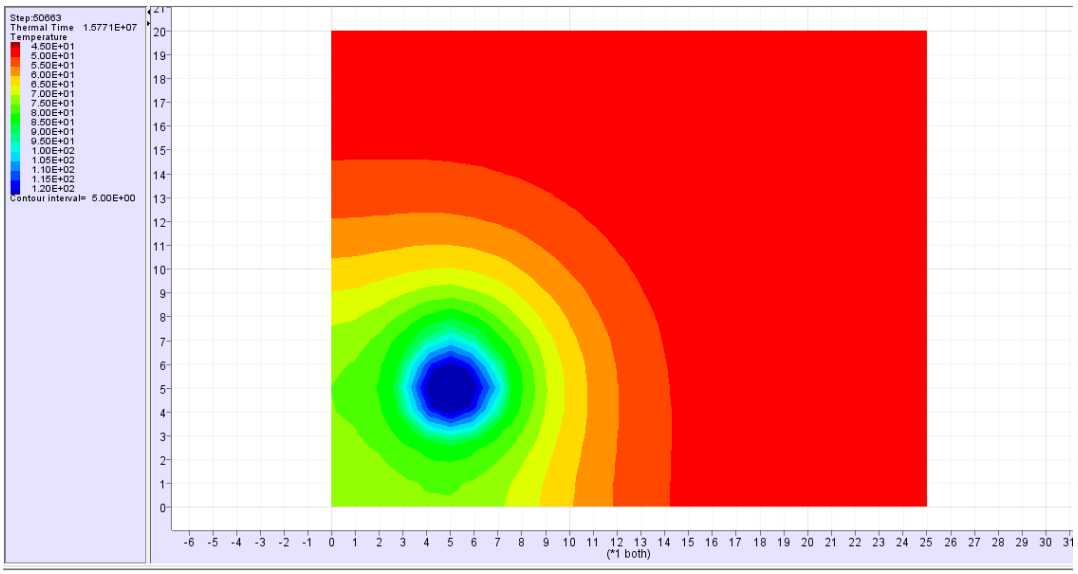
Na slici 4-20 temperatura se u bojama kreće od najtoplije (tamno plava) do najhladnije (tamno crvena). Na dodirnim točkama bentonit-spremnik također se uočava skok u temperaturi od 35 °C. Kroz bentonit porast temperature kreće se oko prosječnih 22.5 °C do 35 °C u odnosu na početnu temperaturu sustava od 45 °C. U samoj stijenskoj masi u blizini bentonita porast temperature je nešto manji, odnosno prosječnih 20 °C, dok je u ostatku stijenske mase primijećen porast od prosječnih 5 °C, a u kutu najudaljenijem od spremnika nema promjene temperature. Rezultati se podudaraju sa danim grafičkim prikazom putem kontrolnih točaka te se može isto zaključiti da se širenje topline odvija linearno u vremenu. Veći dio topline zadrži se u bentonitu unutar prvih 2 mj.

Na slici 4-21 prikazani su grafički rezultati širenja topline putem kontrolnih točaka za period od 6mj.



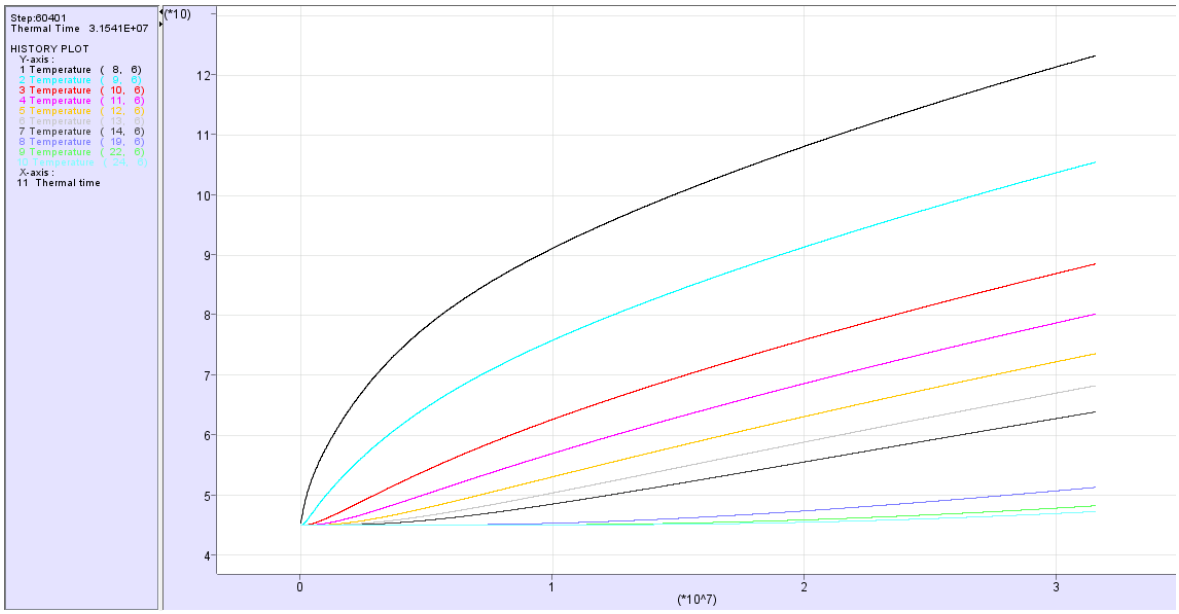
Slika 4—21 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za 6 mj.

Porast temperature u odnosu na prvu simulaciju bilježi rast od 22 °C u prvoj kontrolnoj točki (crna linija). U idućoj točka (plava linija) bilježi se porast temperature od 20°C u odnosu na prvu simulaciju. U trećoj točki (crvena linija) bilježi se porast temperature od skoro 16 °C u odnosu na prvu simulaciju. Iduća točka (žuta linija) bilježi rast temperature od 9 °C. Uzevši zadnju točku u obzir koja je udaljena 18 m od stjenke spremnika vidi se porast od 1 °C u odnosu na prvu simulaciju. Sukladno rezultatima vidi se skok u temperaturi unutar bentonita kao i u ostalim točkama. Razumljivo je da će temperatura rasti zbog generiranja topline poluraspadom aktivnih radionuklida koji su u tom periodu izuzetno aktivni. Također sukladno simulaciji vide se padanja rasta temperature kroz sustav barijera. Na slici 4-22 prikazani su rezultati širenja topline nakon prvih 6 mj. od zatvaranja bušotine.



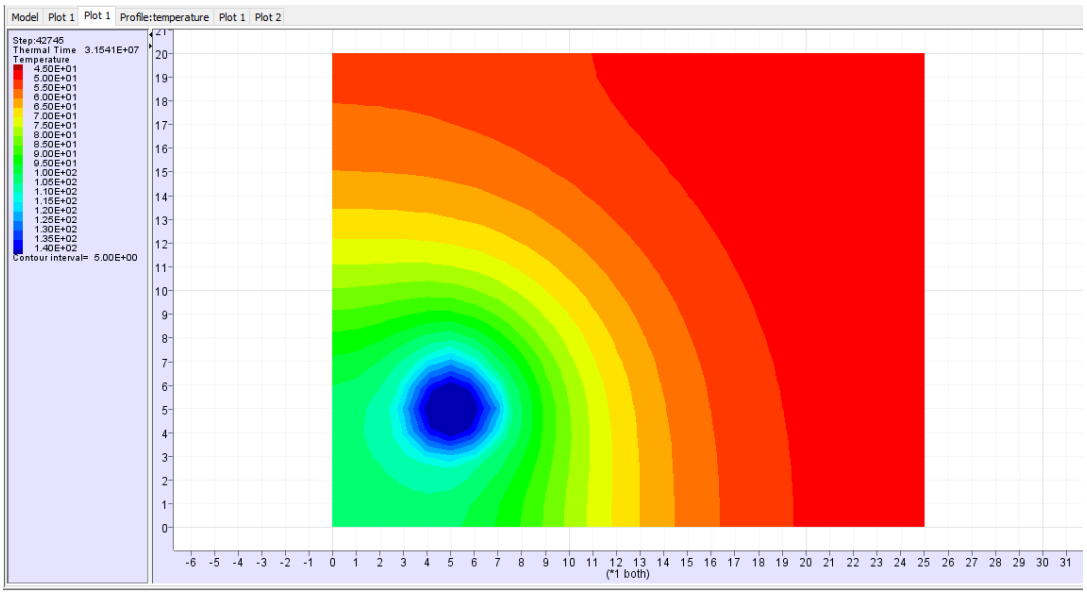
Slika 4—22 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 6 mj.

Unutar spremnika vidi se porast temperature od 27.5°C u odnosu na prethodnu simulaciju. Na dodirnim točkama bentonit-spremnik također se uočava skok u temperaturi od 22 °C u odnosu na prethodnu simulaciju. U samom bentonitu porast temperature kreće se oko prosječnih 20 °C u odnosu na prethodnu simulaciju. U stijenskoj masi promjena temperature u odnosu na prethodnu simulaciju se kreće od 0 °C za dijelove stijene najviše udaljene od spremnika do 15 °C u blizini bentonita. Rezultati se podudaraju sa danim grafičkim prikazom putem kontrolnih točaka te se može isto zaključiti da se intenzitet širenja topline nakon prolaska iz bentonita relativno smanjuje. Na slici 4-23 prikazani su rezultati simulacije širenja topline godinu dana nakon zatvaranja bušotine. putem kontrolnih točaka.



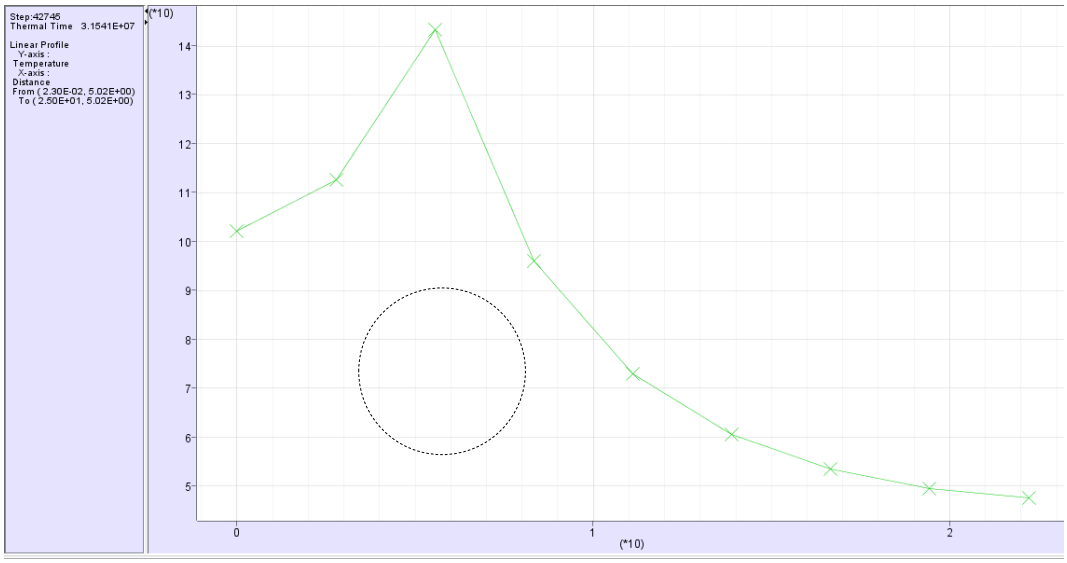
Slika 4—23 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka u periodu od godinu dana

Porast temperature u odnosu na drugu simulaciju bilježi rast od 20 °C u prvoj kontrolnoj točki (crna linija). U idućoj točka (plava linija) bilježi se porast temperature od 20°C u odnosu na drugu simulaciju. U trećoj točki (crvena linija) bilježi se porast temperature od skoro 20 °C u odnosu na prvu simulaciju. Iduća točka (žuta linija) bilježi rast temperature od 13 °C. Zadnja točka bilježi porast od 3 °C u odnosu na prvu i drugu simulaciju simulaciju. Uspoređujući sve tri simulacije za promjer bušotine od 2.5 m gdje je vlažnost bentonita 26.7% primjećuje se stalan porast temperature koji je za očekivati. Za pretpostaviti je da ubrzanom porastu temperature pridonosi i debljina bentonitne ispune od 1.0 m gdje će tu tvrdnju trebati potvrditi usporedbom sustava s bušotinom od 3.5m Na slici 4-24 prikazani su rezultati širenja topline nakon prvih godinu dana od zatvaranja bušotine.



Slika 4—24 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od godinu dana.

Unutar spremnika vidi se porast temperature od 20°C u odnosu na prethodnu simulaciju. Na dodirnim točkama bentonit-spremnik također se uočava skok u temperaturi od 20 °C u odnosu na prethodnu simulaciju. U samom bentonitu porast temperature kreće se oko prosječnih 15 °C u odnosu na prethodnu simulaciju. U stijenskoj masi promjena temperature u odnosu na prethodnu simulaciju se kreće od 0 °C za dijelove stijene najviše udaljene od spremnika do 10 °C u blizini bentonita. Rezultati se podudaraju sa danim grafičkim prikazom putem kontrolnih točaka te se može isto zaključiti da se intenzitet širenja topline nakon prolaska iz bentonita relativno smanjuje. Na slici 4-25 prikazan je profil u ravnini s bušotinom (krug na slici prikazuje poziciju bušotine) koji prikazuje skok temperature unutar modela.

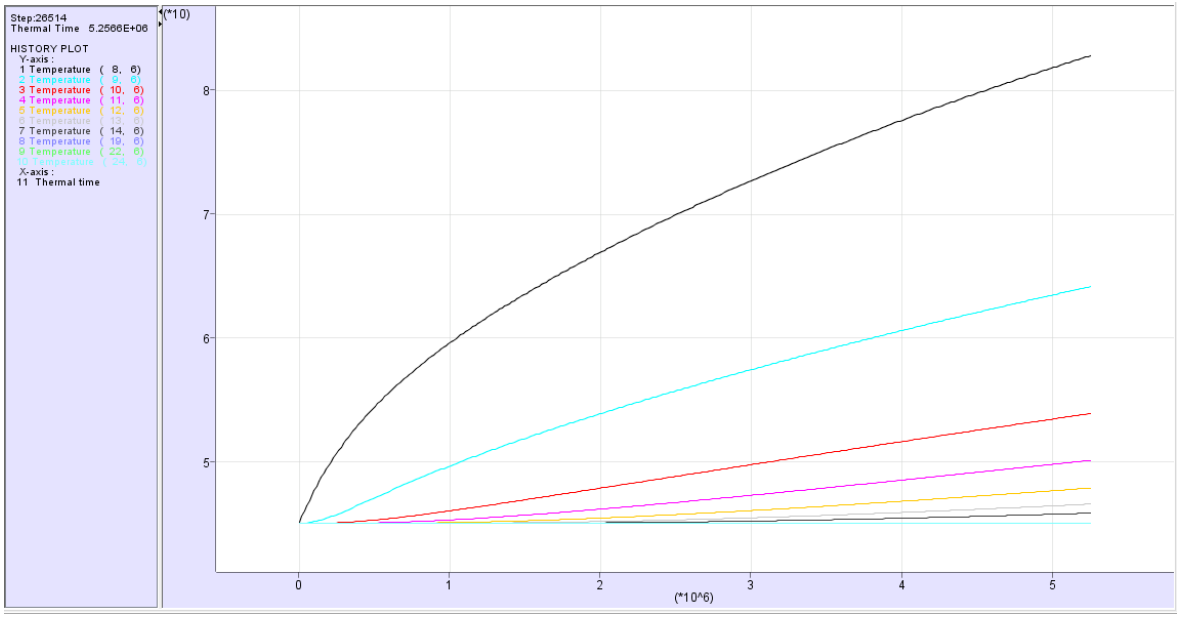


Slika 4—25 Profil širenja topline u ravnini bušotine u periodu od godinu dana.

Os X i Y na profilu su iskazane u metrima te predstavljaju dimenzije modela. Na mjestu najviše točke je pozicija bušotine gdje je i najveća linija. Kroz bentonit temperatura opada te kroz stijenu temperatura nastavlja lagano padati.

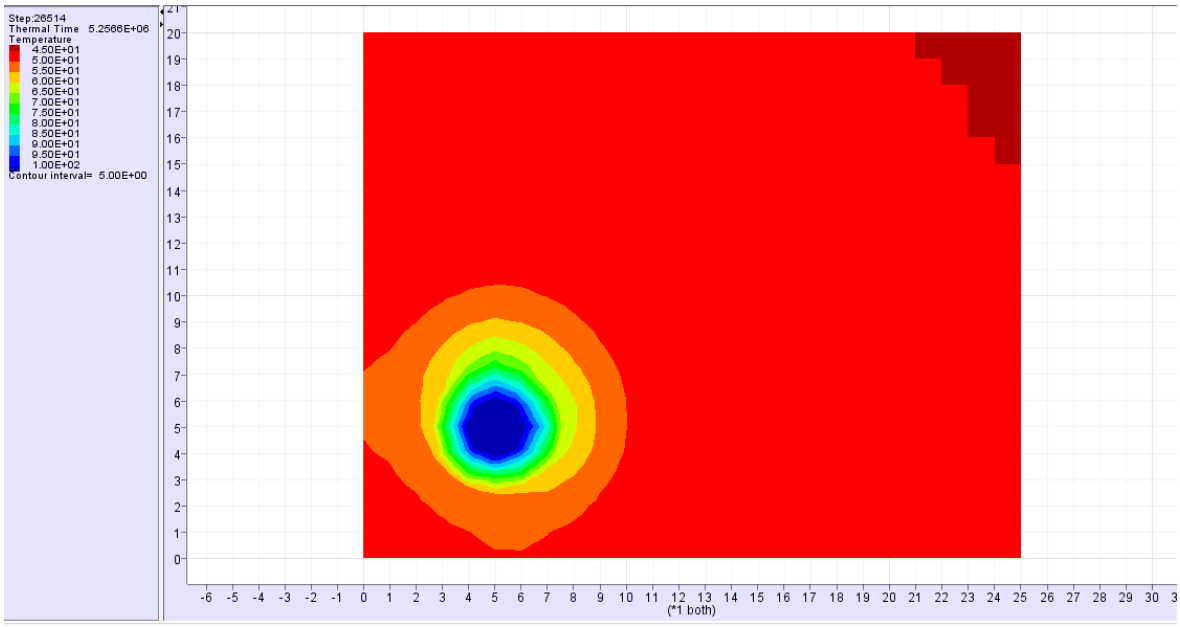
4.4.3. Rezultati temperaturne analize za bušotinu promjera 2.5 m gdje bentonit ima 70% sadržaja vode

Radi usporedbe toplinske provodljivosti bentonita s različitim sadržajem vode radi se nova analiza. Na slici 4-26 prikazan je grafički prikaz rezultata putem kontrolnih točaka za period od 2mj.



Slika 4—26 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka u periodu 2mj.

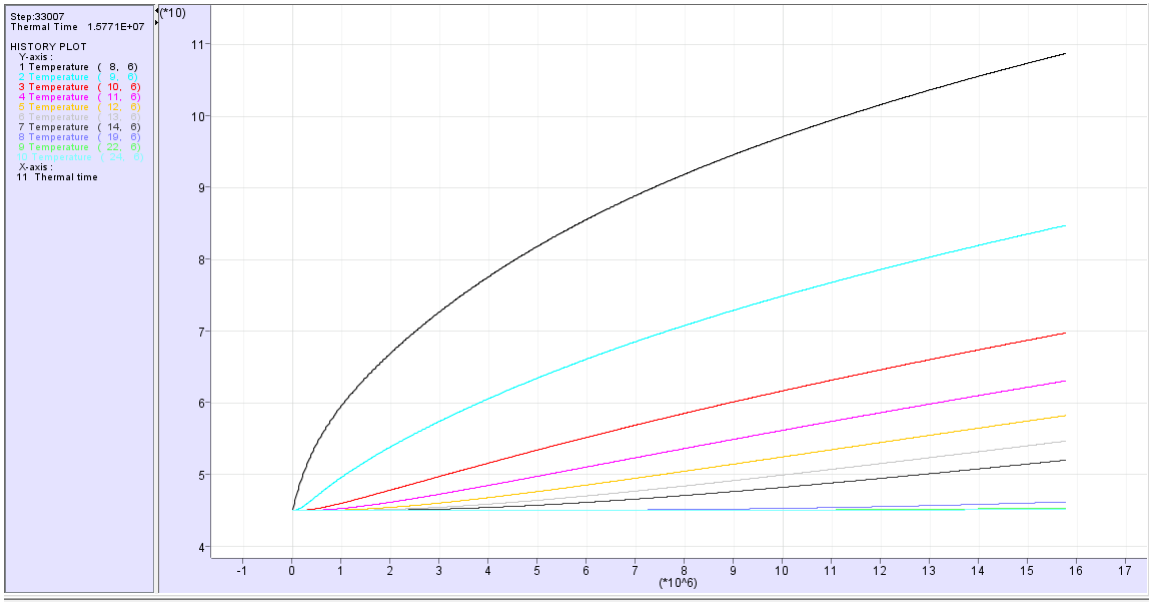
Porast temperature u prvoj kontrolnoj točki koja je udaljena 1 m (crna linija) od stjenke primjećuje se od 37 °C unutar prvih 2 mj. nakon zatvaranja bušotine. Iduća točka (plava linija) udaljena je 1.5 m od stjenke spremnika, odnosno na vanjskom rubu bentonita te se primjećuje porast temperature od 20°C. Treća točka (crvena linija) je udaljena 3 m od stjenke spremnika te se na njoj vidi porast temperature od skoro 10 °C. Iduća točka koja se uzima je peta točka koja se nalazi na 5 m od stjenke spremnika (žuta linija). Peta točka bilježi rast temperature od 3 °C. Uzevši zadnju točku u obzir koja je udaljena 18 m od stjenke spremnika vidi se porast od 1 °C. Usporedbom s bentonitom sa sadržajem vode od 26,7% vidi se porast temperature na kontaktu s bentonitom dok ostali dijelovi sustava imaju sličan tok temperature u vremenu. Na slici 4-27 prikazani su rezultati širenja topline nakon prvih 2 mj. od zatvaranja bušotine.



Slika 4—27 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 2 mj.

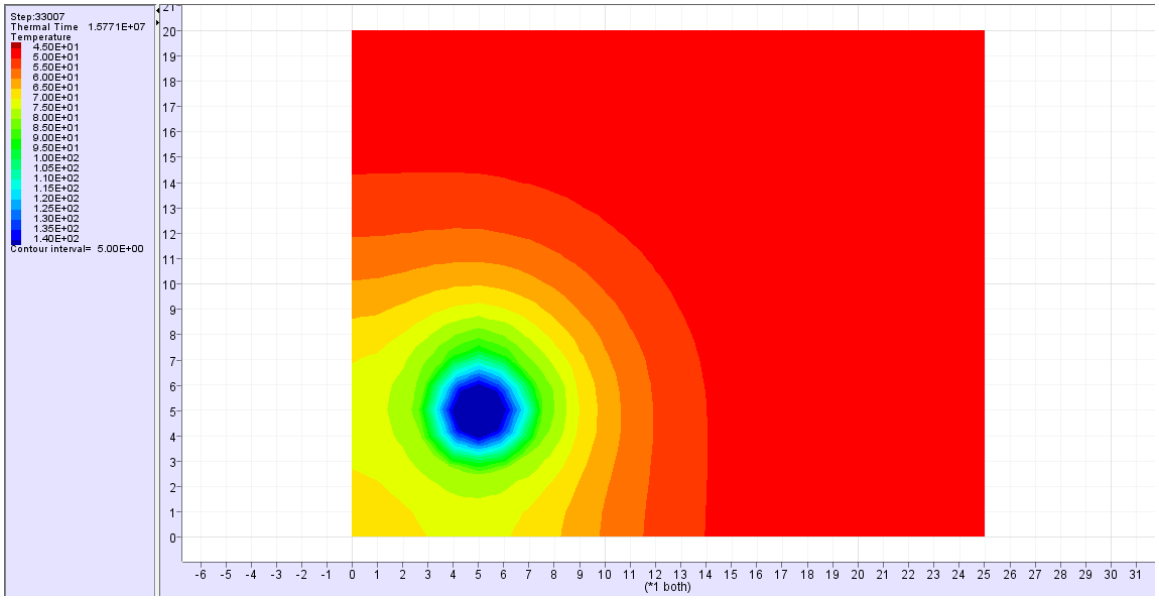
Na dodirnim točkama bentonit-spremnik također se uočava skok u temperaturi od 45 °C. Kroz bentonit porast temperature kreće se oko 20 °C do 45 °C u odnosu na početnu temperaturu sustava od 20 °C. U samoj stijenskoj masi kreće se porast temperature od 0°C u najdaljem djelu stijene pa do 40 °C u najbližem djelu do bentonita. Rezultati se podudaraju sa danim grafičkim prikazom putem kontrolnih točaka. Usporedbom rezultata kod bentonita s 26,7% sadržaja vode može se primijetiti porast u temperaturi sustava unutar prvih 2 mj. Na slici 4-30 prikazan je profil u ravnini s bušotinom koji prikazuje širenje topline po profilu.

Prikazano na slici 4-28 vidljivi su grafički rezultati putem kontrolnih točaka za period od 6 mj.



Slika 4—28 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka u periodu 6mj.

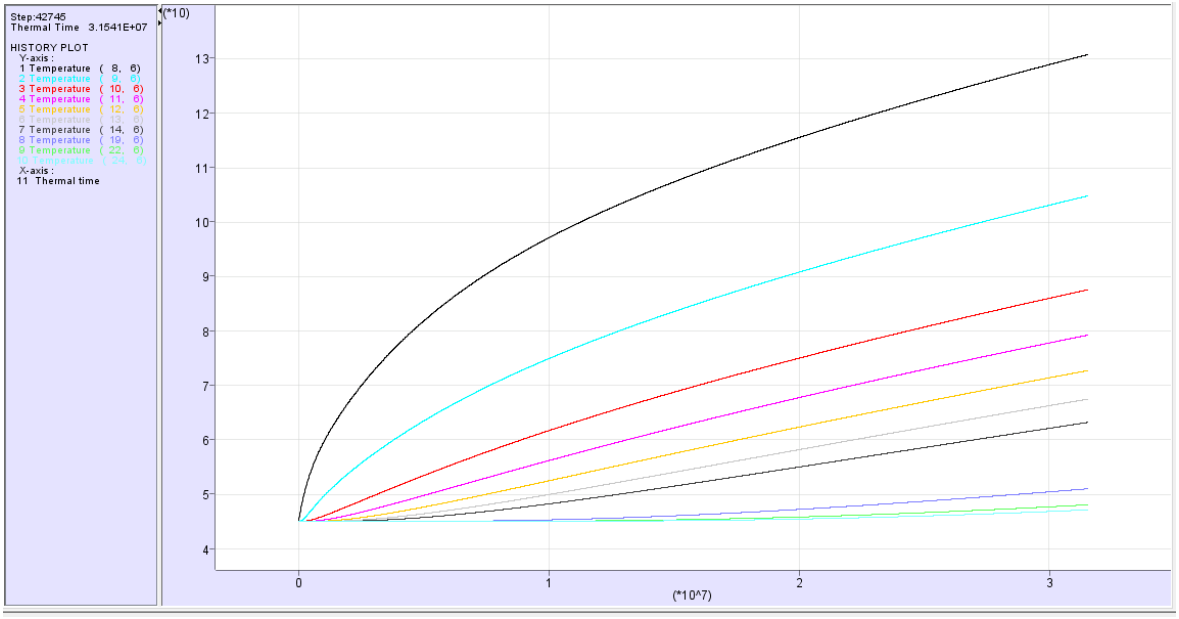
Porast temperature u prvoj kontrolnoj točki u odnosu na prethodnu simulaciju primjećuje se od 29 °C. Kod iduće točke (plava linija), primjećuje porast temperature od 20°C u odnosu na prethodnu simulaciju. Treća točka (crvena linija) prati porast temperature od skoro 18 °C. Kod promatranja pete točke (žuta linija) primijećen je rast temperature od 11 °C u odnosu na prethodnu simulaciju. U zadnjoj točki nije primijećen porast u odnosu na prethodnu simulaciju. Usporedbom s bentonitom sa sadržajem vode od 26,7% nakon 6 mj. mjeri se prosječnih porast temperature od 2 °C kod bentonita sa sadržajem vode od 70%. Na slici 4-29 prikazani su rezultati širenja topline nakon prvih 6 mj.



Slika 4—29 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 6 mj.

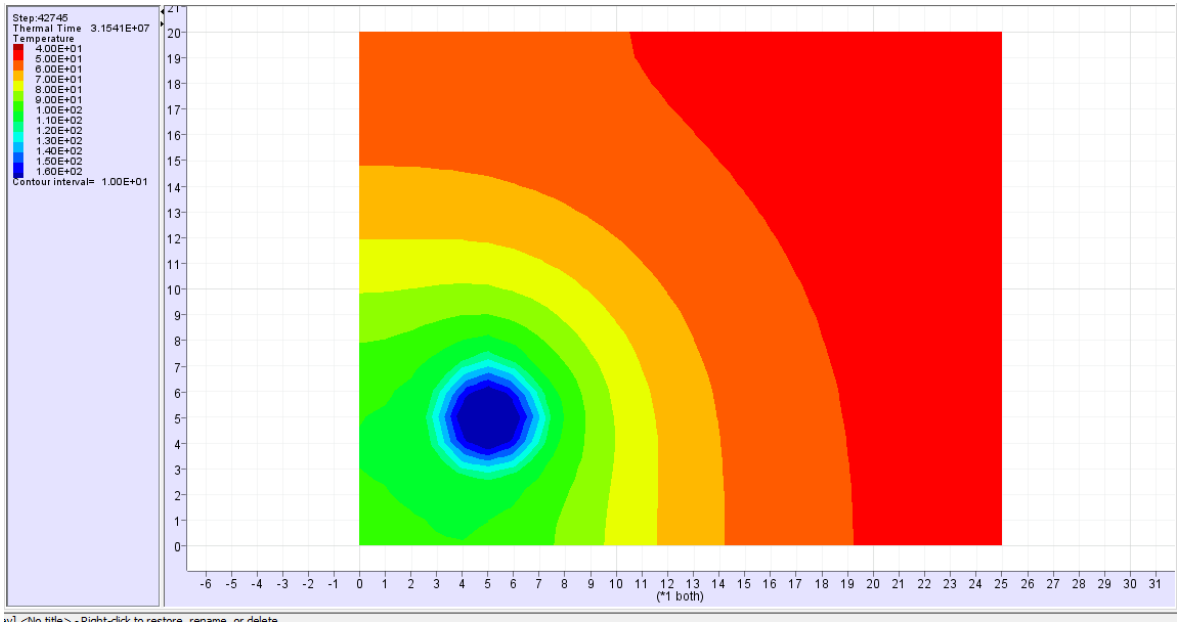
Na dodirnim točkama bentonit-spremnik se uočava skok u temperaturi od 55 °C. Kroz bentonit porast temperature kreće se od 35 °C do 55 °C u odnosu na prethodnu simulaciju. U samoj stijenskoj masi kreće se porast temperature od 5°C u najdaljem djelu stijene pa do prosječnih30 °C u najbližem djelu do bentonita u odnosu na prethodnu simulaciju. Rezultati se podudaraju sa danim grafičkim prikazom putem kontrolnih točaka.

Prikazano na slici 4-30 vidljivi su grafički rezultati putem kontrolnih točaka za period od godinu dana.



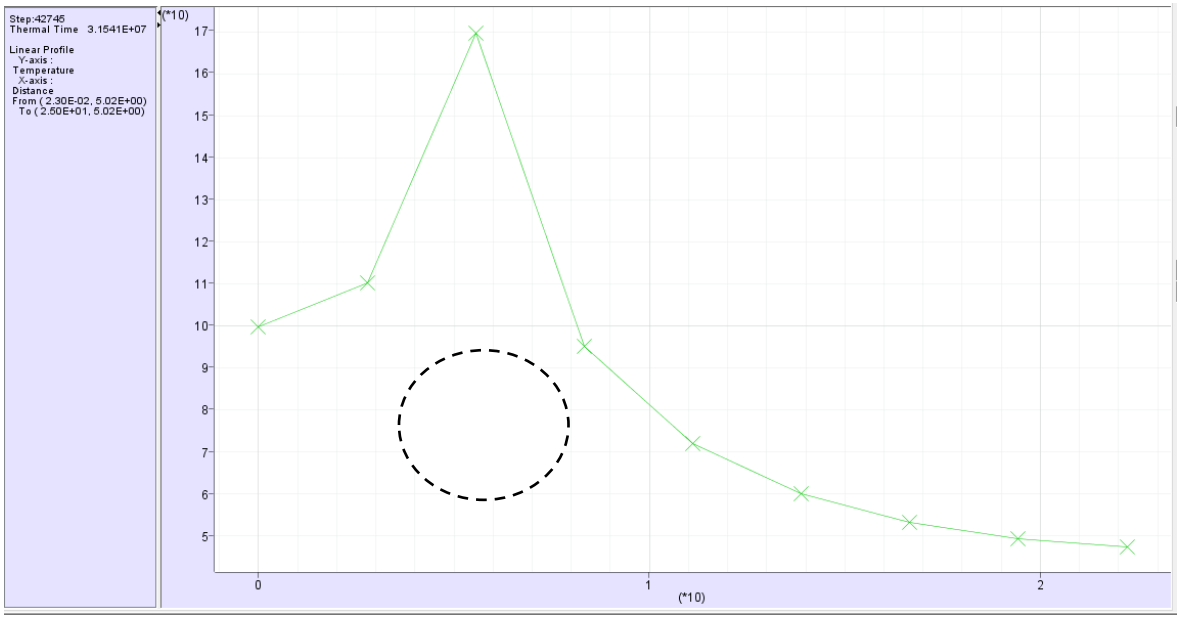
Slika 4—30 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka u periodu godine dana.

U odnosu na prethodnu simulaciju primjećuje se od 22°C u prvoj kontrolnoj točki. Kod iduće točke (plava linija), primjećuje porast temperature od 20°C u odnosu na prethodnu simulaciju. Treća točka (crvena linija) prati porast temperature od skoro 18 °C. Kod promatranja pete točke (žuta linija) primijećen je rast temperature od 13 °C u odnosu na prethodnu simulaciju. U zadnjoj točki primijećen porast u odnosu na prethodnu simulaciju od 4 °C. Usporedbom s prethodnom simulacijom primijećeno je linerano širenje topline. Na slici 4-31 prikazano je širenje topline preko kontura za period od godine dana.



Slika 4—31 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od godine dana.

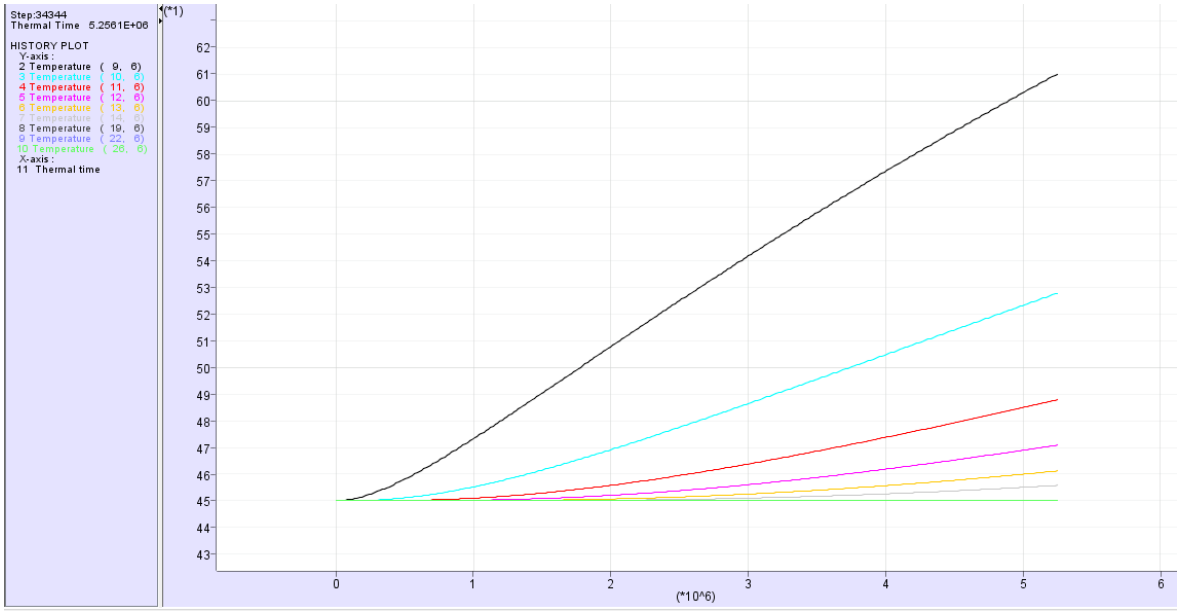
Na dodirnim točkama bentonit-spremnik se uočava skok u temperaturi od 75 °C od početne temperature sustava. Kroz bentonit porast temperature kreće se od 45 °C do 55 °C U samoj stijenskoj masi kreće se porast temperature od 5°C u najdaljem djelu stijene pa do prosječnih 45 °C u najbližem djelu do bentonita. Rezultati se podudaraju sa danim grafičkim prikazom putem kontrolnih točaka. Usporedbom rezultata u situaciji gdje je bentonit vlažnosti na 26.7% i rezultata gdje je bentonit na 70% vlažnosti da se potvrditi kako vlažnost uzorka ima utjecaj na toplinsku provodljivost, odnosno na sposobnost toplinske adsorpcije samog bentonita i pritom na brzinu širenja topline kroz sustav odlagališta. Kako bi se pobliže prikazao tok topline postavljen je profil na slici 4-32 u ravnini s bušotinom (krug na slici prikazuje poziciju bušotine) koji prikazuje širenje topline po profilu.



Slika 4—32 Profil širenja topline u ravnini bušotine u periodu od godine dana.

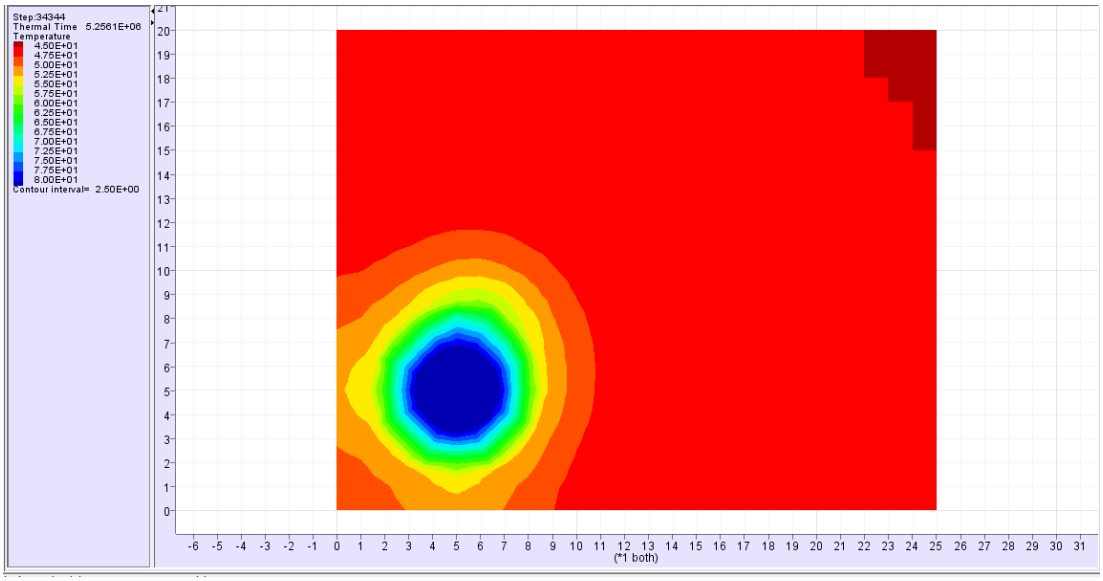
4.4.4. Rezultati temperaturne analize za bušotinu promjera 3.5 m gdje bentonit ima 26.7% sadržaja vode

Na slici 4-33 prikazani su grafički rezultati širenja topline kroz sustav barijera putem kontrolnih točaka.



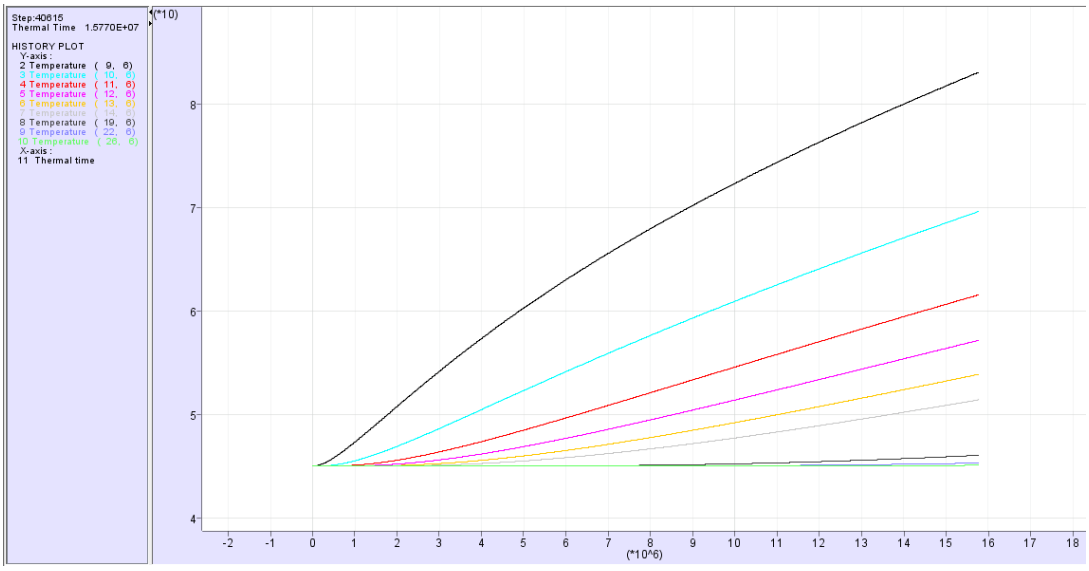
Slika 4—33 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za period od 2 mj.

U prvoj kontrolnoj točki zabilježen je porast od 16°C u odnosu na početnu temperaturu. U drugoj točki zabilježen je rast od 8 °C stupnja u odnosu na početnu temperaturu. U trećoj točki zabilježen je porast od 4 °C dok su porasti u 5 i zadnjoj točki ne znatni. Detaljnije se širenje temperature može vidjeti preko kontura širenja topline kroz model na slici 4-34.



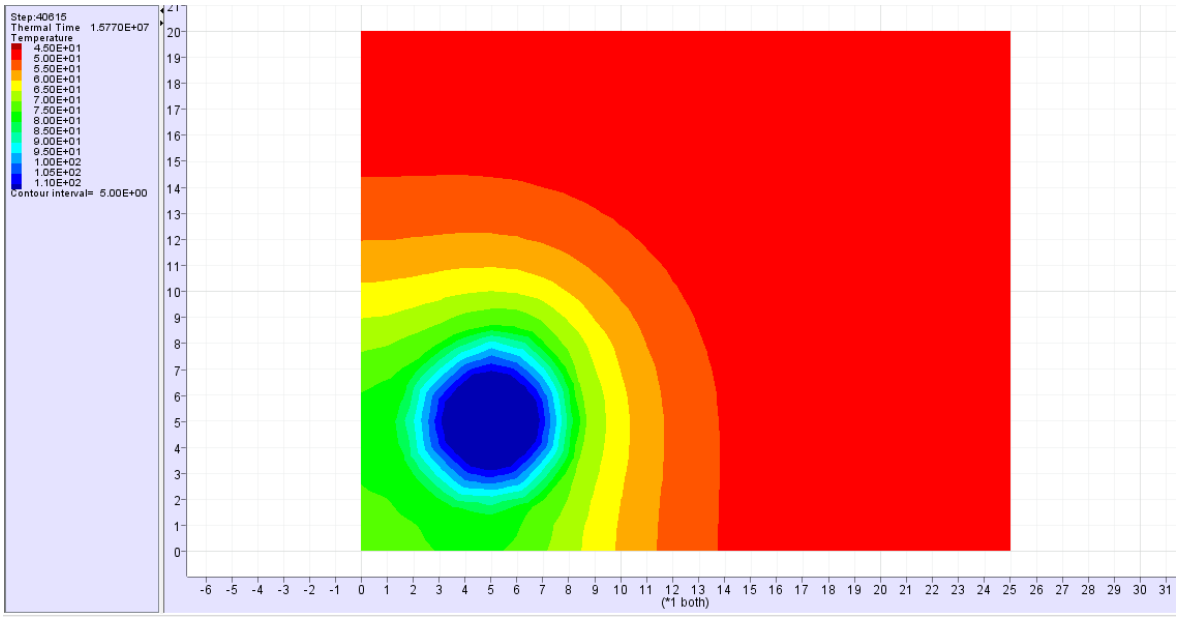
Slika 4—34 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu 2 mj.

Na slici 4-34 vidljivo je da se kroz stijenu ne podiže značajno temperatura, već je zabilježen rast od 2.5 °C u većem djelu stijene, dok se u bentonitu temperatura kreće od 7.5 °C do 12.5 °C. Na kontaktu bentonit-spremnik zabilježen je porast 15 °C u odnosu na početnu temperaturu sustava od 25 °C. Grafički prikaz rezultata za period od 6 mj. prikazan je na slici 4-35.



Slika 4—35 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za period od 6 mj.

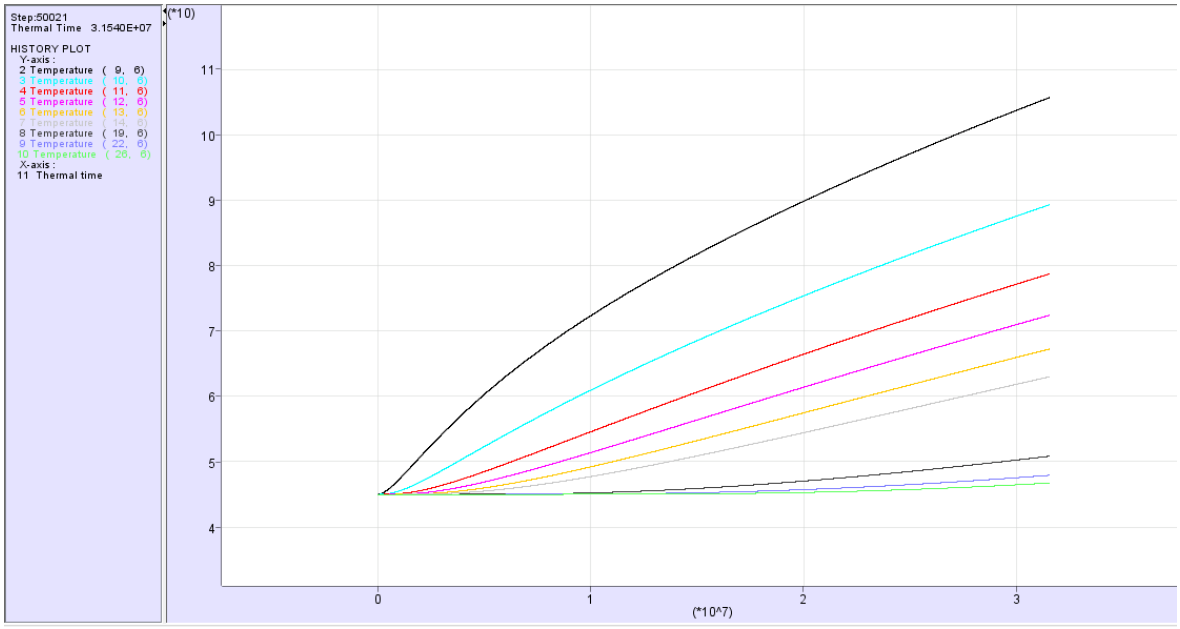
Na slici 4-35 vidljiv je rast temperature za 20 °C u kontrolnoj točki jedan u odnosu na točku iz prethodne simulacije. U drugoj točki rast temperature iznosi 17 °C u odnosu na istu točku iz prethodne simulacije. U točki broj tri zabilježen je rast od 12°C u odnosu na istu točku. U točki broj pet rast temperature bilježi se 6 °C dok u zadnjoj točki nema pomaka u temperaturi. Konture prijenosa topline za ovu simulaciju prikazane su na slici 4-36.



Slika 4—36 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu 6 mj.

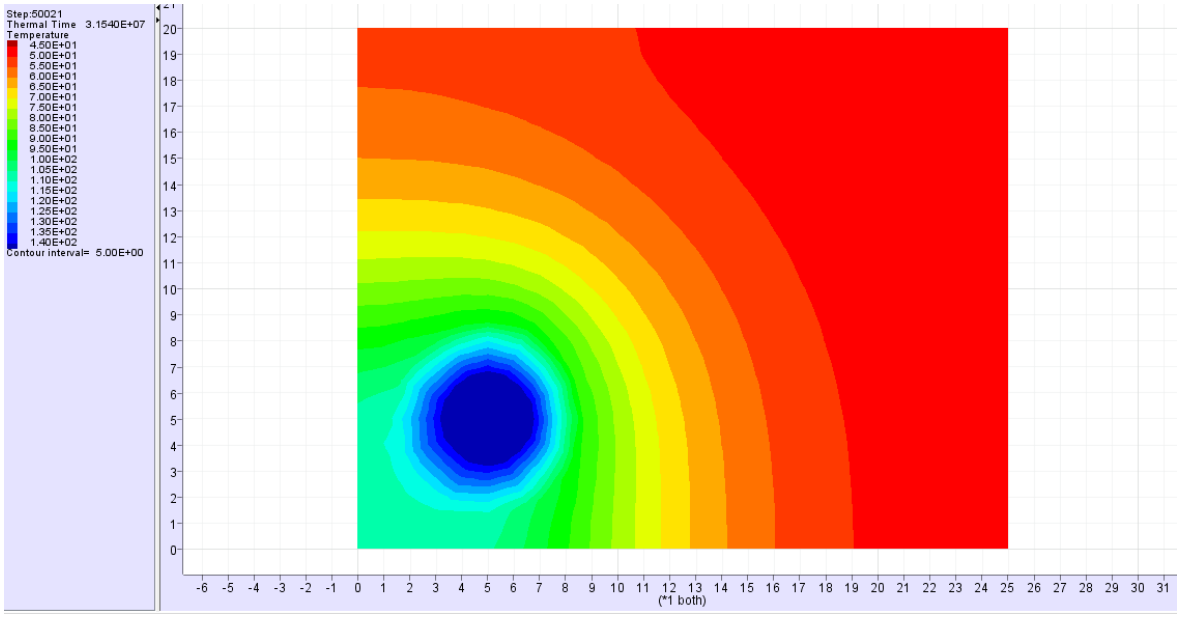
Na slici 4-36 vidljivo je da se kroz stijenu ne podiže značajno temperatura, već je zabilježen rast od 5 °C u većem djelu stijene, dok se u bentonitu temperatura kreće od 20 °C do 30 °C. Na kontaktu bentonit-spremnik zabilježen je porast 15 °C u odnosu na početnu temperaturu sustava od 45 °C.

Rezultati za period od godine dana prikazani su putem kontrolnih točaka na slici 4-37.



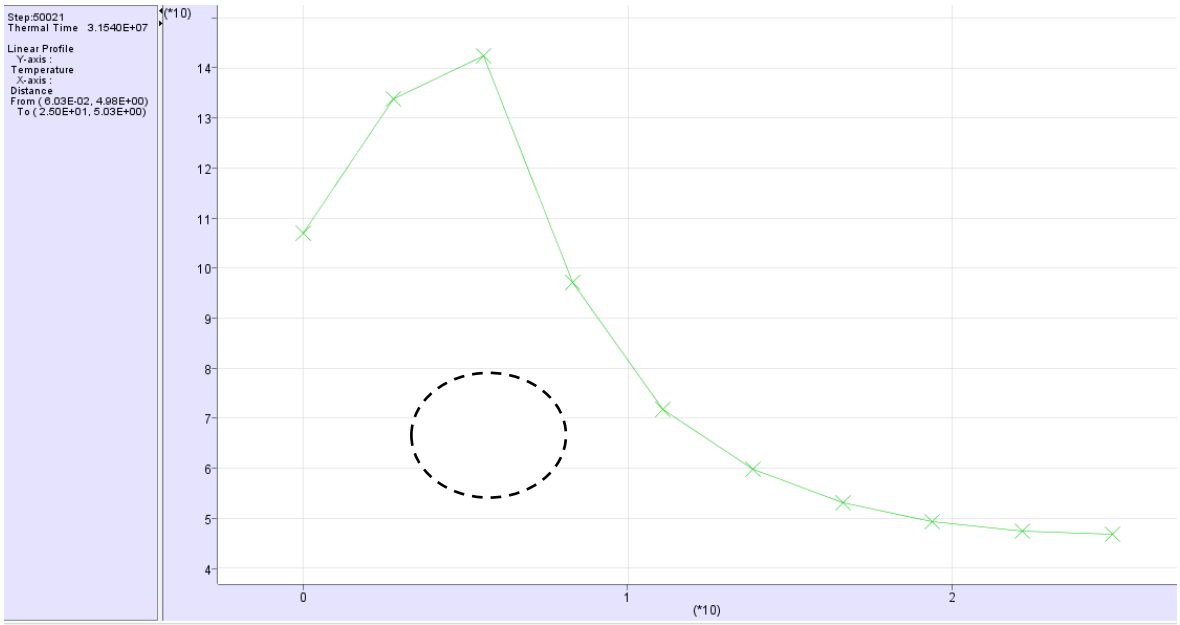
Slika 4—37 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za period od godine dana.

Iz slike 4-37 se u prvoj kontrolnoj točki vidi porast temperature od 23 ° u odnosu na istu točku iz prethodne simulacije. U drugoj točki porast se bilježi od 20 °C u odnosu na točku iz prethodne simulacije. U trećoj točki porast je 19 ° C u odnosu na istu točku iz prethodne simulacije. U petoj točki porast je 24°C u odnosu na prethodnu točku, dok je u zadnjoj točki porast u temperaturi neznatan. Na slici 4-38 prikazani su rezultati detaljnije putem kontura.



Slika 4—38 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu godine dana.

Na slici 4-38 vidljivo je da se kroz stijenu podiže temperatura nakon godinu dana. U stijeni je zabilježen rast od 5 °C do 30 °C u većem djelu stijene, dok se u bentonitu temperatura kreće od 30 °C do 45 °C. Na kontaktu bentonit-spremnik zabilježen je porast 50 °C u odnosu na početnu temperaturu sustava od 45 °C. Na slici 4-39 prikazan je profil u ravnini bušotine.

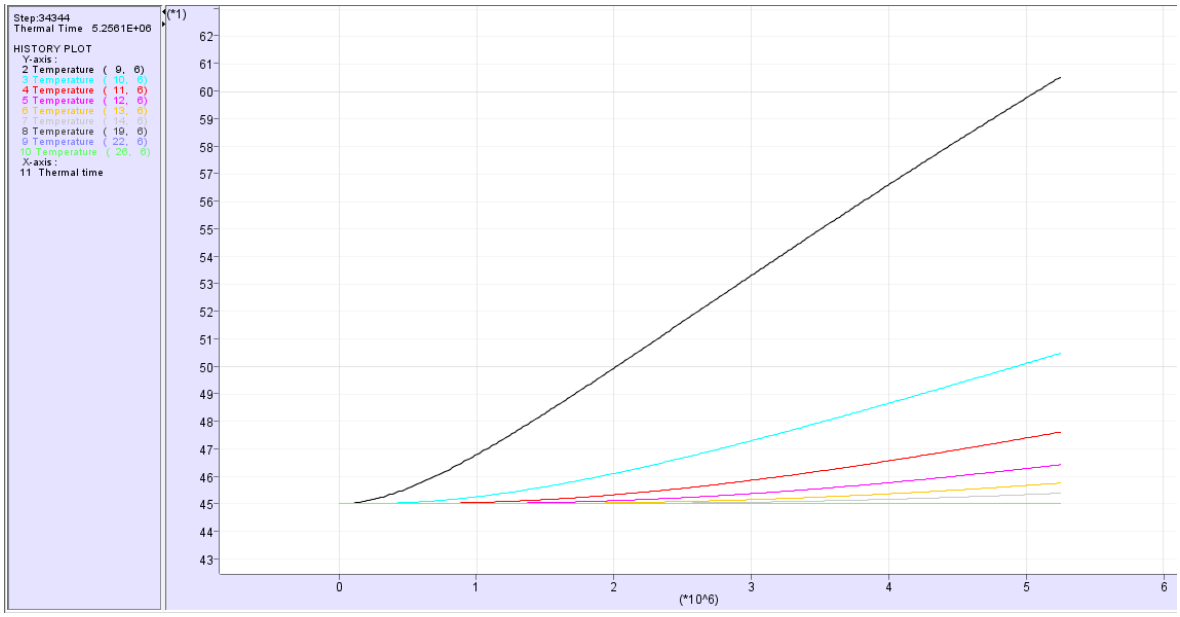


Slika 4—39 Profil širenja topline u ravnini bušotine u periodu od godine dana.

Usporedbom modela promjera bušotine 2.5 m i modela promjera bušotine 3.5, s jednakim sadržajem vode od 26.7% primijećena je bolja izolacija od približno 10 °C. Ta činjenica ukazuje na važnost odabira debljine bentonitne ispune kao važan parametar prilikom projektiranja odlagališta. Prema Posivinom izvještaju (2015) dozvoljeno povećanje temperature unutar bentonitne ispune do 100 °C. Prema rezultatima prikazanim putem profila unutar godinu dana rezultati su unutar granice dozvoljene temperature.

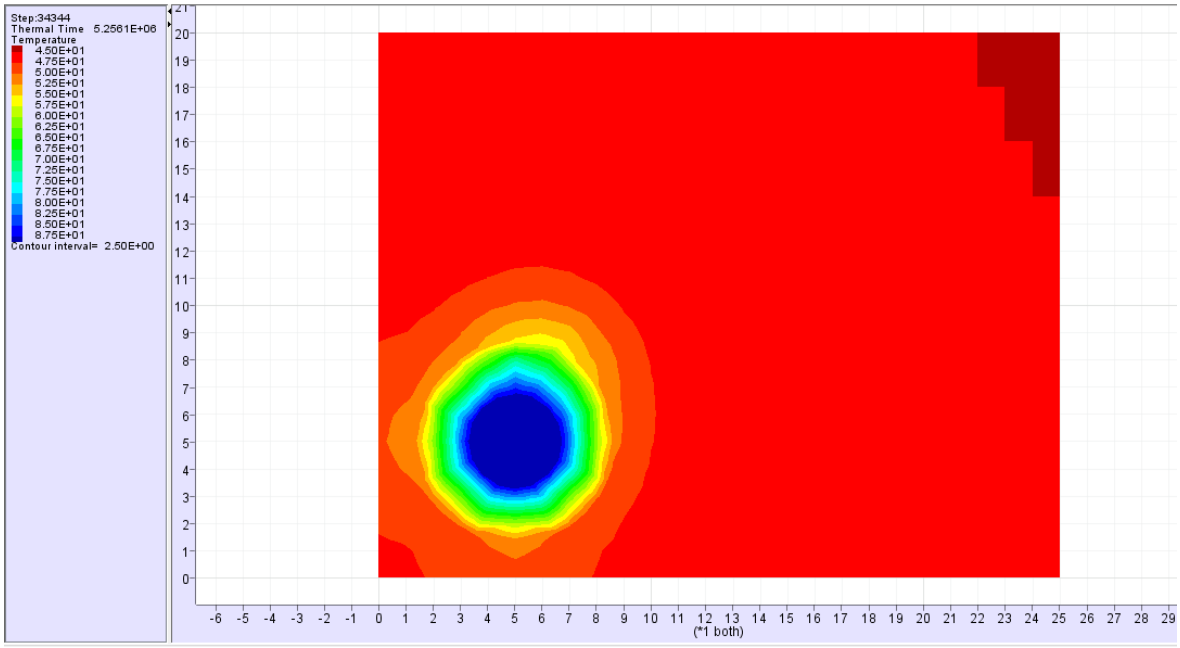
4.4.5. Rezultati temperaturne analize za bušotinu promjera 3.5 m gdje bentonit ima 70% sadržaja vode

U ovom modelu promjer bušotine iznosi 3.5 m, debljine bentonita 1.7 m i sadržaja vode u bentonitu 26.7% Na slici 4-40 prikazani su rezultati putem kontrolnih točaka za period od 2 mj.



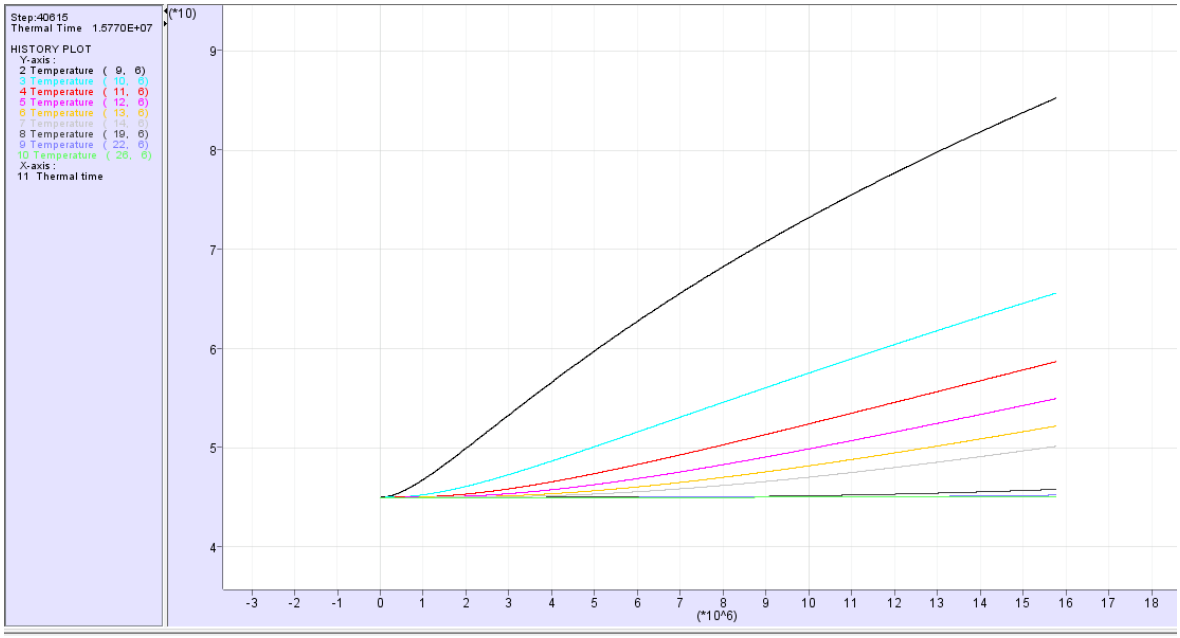
Slika 4—40 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za 2 mj.

U prvoj kontrolnoj točki koja je udaljena 1 m (crna linija) od stjenke primjećuje se porast temperature od manje od 16 °C unutar prvih 2 mj. nakon zatvaranja bušotine. Iduća točka (plava linija) udaljena je 5.5 m od stjenke spremnika, odnosno na vanjskom rubu bentonita te se primjećuje porast temperature od 5.5 °C. Treća točka (crvena linija) je udaljena 3 m od stjenke spremnika te se na njoj vidi porast temperature od 4 °C. Iduća točka koja se nalazi se na 5 m od stjenke spremnika (žuta linija) te se na njoj bilježi rast temperature od 1 °C. U zadnjoj točki koja je udaljena 18 m od stjenke spremnika nema porasta temperature. Uspoređujući rezultate modela promjera 2.5 m i debljine bentonitnog sloja 1.m u odnosu na ovaj model s promjerom bušotine 3.5m i .debljinom bentonitnog sloja 1.7 uočava se veći pad rasta temperature kod deblje postavljenog bentonitnog sloja. Na slici 4-41 su rezultati širenja topline kroz period od 2 mj. prikazani konturama gdje se detaljnije vidi širenje topline.



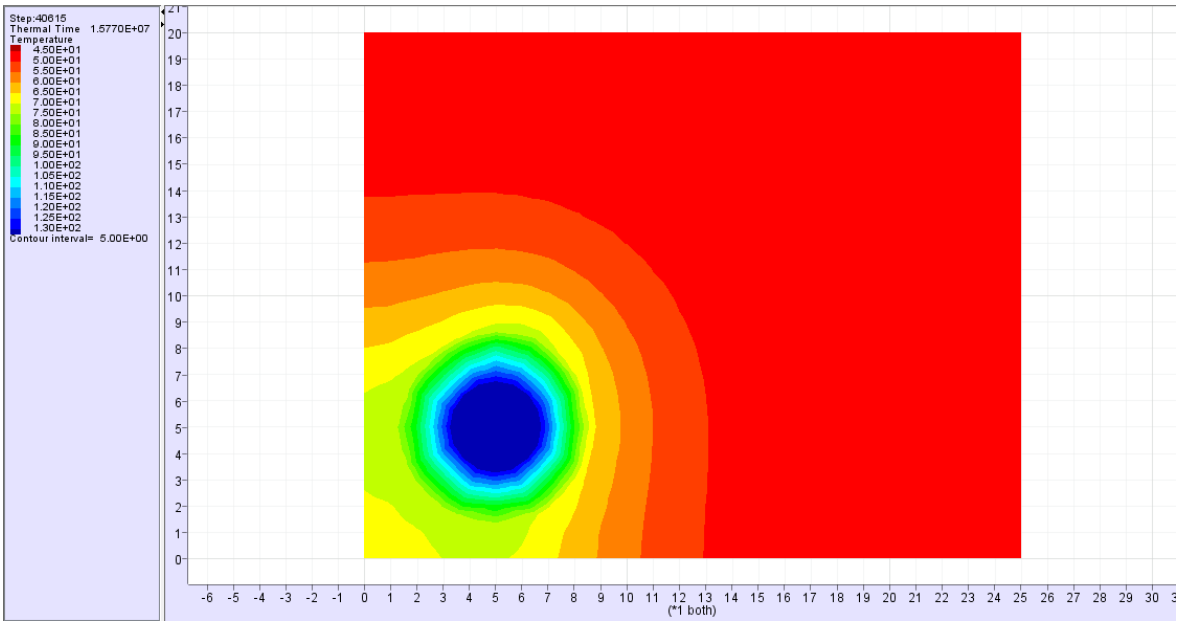
Slika 4—41 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 2 mj.

Uspoređujući rezultate iz grafa i rezultate prikazane konturama vidljivo je da se podudaraju. U većini stijene temperatura je porasla za 2.5 °C te se povećava prema spremniku sa temperaturom od 10 °C većom u bentonitu od početne temperature 45°C, a na kontaktu bentonit-spremnik zabilježena je temperatura od 35 °C. Na slici 4-42 prikazani su grafički rezultati putem kontrolnih točaka za period od 6 mj.



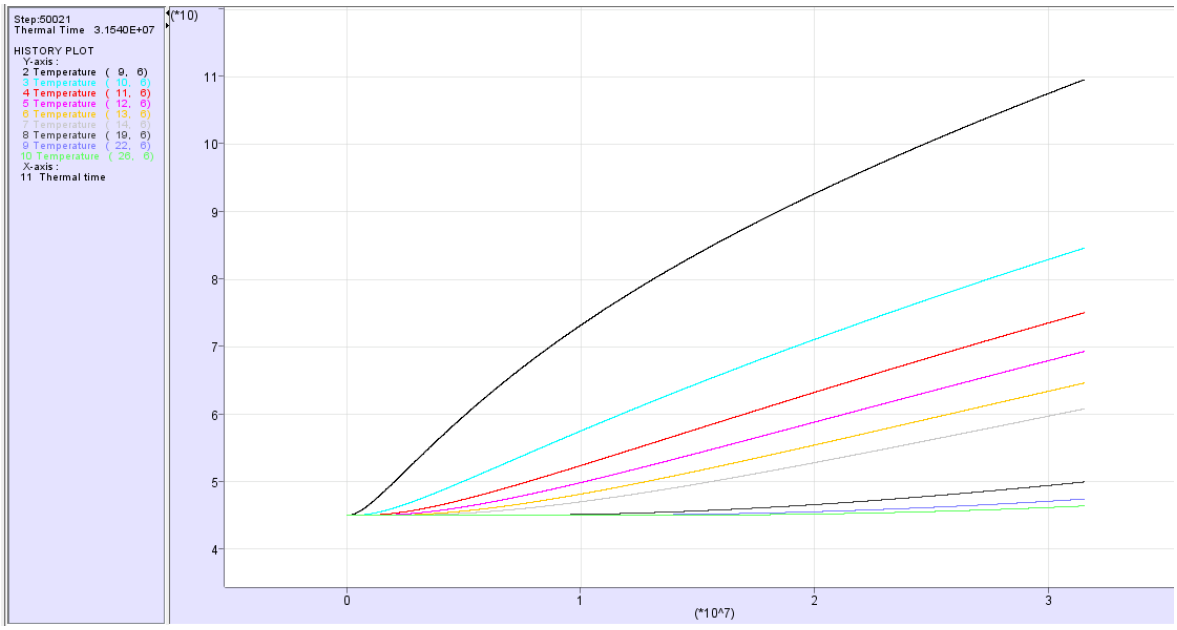
Slika 4—42 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za 6 mj.

U odnosu na period od 2 mj. u prvoj točki se vidi porast temperature od 24.5 °C na točku iz prethodne simulacije. U drugoj točki se također vidi porast od 14.5 °C u odnosu na točku iz prethodne simulacije. U trećoj točki temperatura se povećala za 12 °C u odnosu na prethodnu simulaciju. Peta točka porasla je za 4.5 °C, dok se u zadnjoj točki i dalje ne bilježi povećanje temperature. Usporedbom sa prethodnom simulacijom zaključeno je da se toplina širi linearno. Na slici 4-43 prikazani su rezultati konturama.



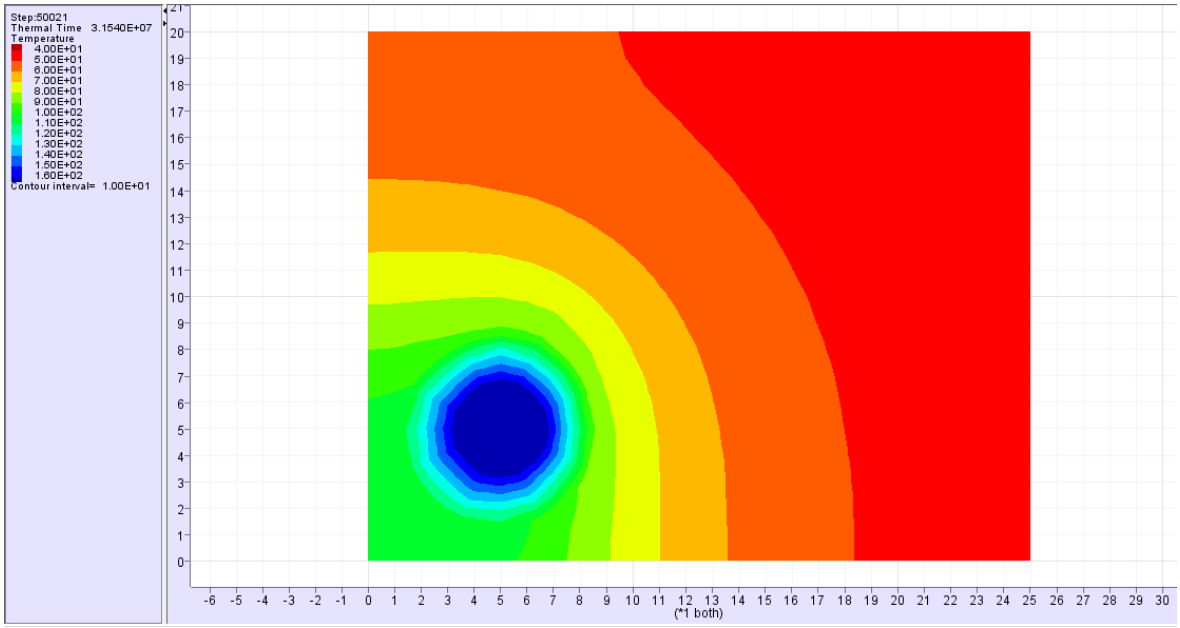
Slika 4—43 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od 6 mj.

Na slici 4-43 detaljnije je prikazano je širenje topline kroz sustav. Kroz stijenu je zabilježen porast temperature od 5° C do 35 °C od početne temperature od 45 °C. U bentonitu se vidi porast 50 °C, dok na kontaktu bentonit-spremnik zabilježen je skok od 70 °C u odnosu na početnu temperaturu. Za period od godine dana rezultati su grafički prikazani slikom 4-44 putem kontrolnih točaka.



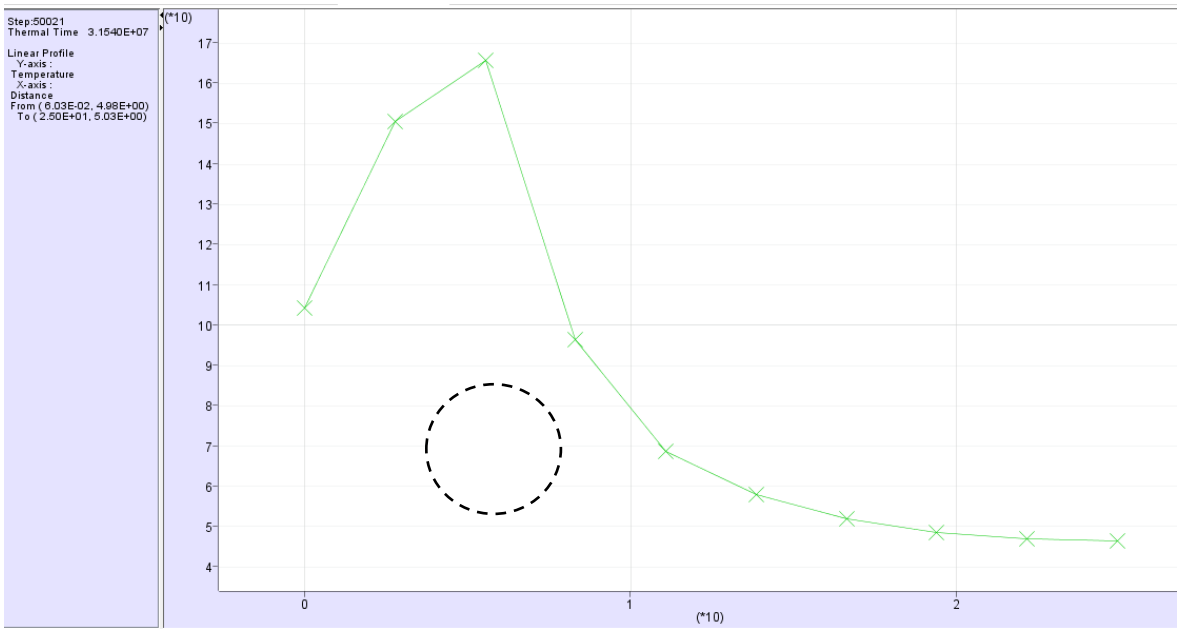
Slika 4—44 Grafički prikaz rezultata širenja topline prikazan putem kontrolnih točaka za period od godine dana

Na Slici je vidljiva razlika od 25 °C u prvoj kontrolnoj točki u odnosu na prethodnu simulaciju. U drugoj kontrolnoj točki porast temperature u odnosu na prethodnu simulaciju bilježi 20°C. Temperatura u trećoj točki poskočila je za 21 °C, dok je u petoj točki poskočila za 16 °C u odnosu na točke iz prethodne simulacije. U zadnjoj točki nije zabilježen značajan rast temperature. Na slici 4-45 mogu se vidjeti detaljnije širenje temperature.



Slika 4—45 Prikaz kretanja temperature putem kontura u periodu od godine dana.

U većem djelu stijene temperatura je porasla za 5 °C do 55 °C bliže spremniku, dok je na kontaktu spremnika-bentonit temperatura poskočila za 75 °C. Usporedbom prošlog modela s promjerom 2.5 m, debljinom bentonitnog sloja od 1m i jednakim sadržajem vode, može se zaključiti kako debljina tampon zone ima veliki utjecaj na izolaciju matične stijene i biosfere od širenja topline kondukcijom. Iz tog razloga bitno je uzeti taj parametar prilikom projektiranja odlagališta. Na slici 4-46 prikazani je profil po ravnini bušotine.



Slika 4—46 Profil širenja topline u ravnini bušotine u periodu od godine dana.

Iz rezultata oba modela sa sadržajem vode od 70% vidljivo je da maksimalne temperature bušotine prelaze dozvoljenu granicu sustava od 100 °C stoga su odbačeni. Ti rezultati ukazuju da uz debljinu bentonita prilikom projektiranja odlagališta treba uzeti u obzir i sadržaj vode. Bentonitne ispune s manjim sadržajem vode imaju veću sposobnost zadržavanja topline. Mehanički pomaci unutar stijene u oba slučaja pokazali su dobru izdržljivost, no kada se postavio spremnik koji generira toplinu moglo se primijetiti da se toplina i dalje širi kroz sustav odlagališta što je ne moguće izbjeći. Kako se ne može izbjeći potrebno je maksimalno smanjiti. Poravnavanjem parametara bi se to moglo postići.

5. ZAKLJUČAK

Prilikom Projektiranja dubokog geološkog odlagališta za VRAO i ING zahtjeva visoku preciznost kako bi se osigurala stabilnost samog sustava. Parametri poput odabira lokacije, matične stijene, metode odlaganja, načina ispunjavanja bušotine do materijala spremnika bitni su za stabilnost. Unutar veće dubine na koju se odlaže VRAO i ING očekuju se veća naprezanja i pomaci unutar stijene koje otežavaju izradu odlagališta te mogu ugroziti samo odlagalište. Osim pomaka, toplina generirana iz spremnika je parametar koji se neizbježno mora uračunati prilikom projektiranja odlagališta. Na tu temu rade se detaljna istraživanja THM efekata kako bi se osigurao što stabilniji sustav odlagališta. Iz tog razloga napravljen je matematički model u programu FLAC za više uvjeta kako bi pokazao važnost odabira ispravnih materijala za odlaganje ING-a. Prilikom izračuna bitno je raditi sa raznim parametrima kako bi se našla nova saznanja, odnosno potvrdila postojeća. Rezultati ovog modela pokazali su da je bitno:

- odabrati valjanu debljinu bentonitne ispune te testirati više debljina kako bi se dobila optimalna vrijednost
- koristiti bentonit sa što manjim sadržajem vode zbog boljih izolacijskih sposobnosti
- odabrati dovoljno čvrstu stijenu kako bi se osigurala izgradnja stabilnih bušotina
- odabrati dovoljno kompaktirani bentonit kako ne bi došlo do potonuća spremnika

Uz inženjerska pitanja bitno je prilikom planiranja odlaganja baviti se socio-ekonomskim pitanjima. Tako da se pravovremeno, transparentno i direktno upozna javnost s činjenicom da se RAO treba odlagati. U Republici Hrvatskoj trenutno je aktualna lokacija za odlaganje VRAO i ING iz NE Krško u Trgovskoj Gori u strukturi šejla.

6. POPIS LITERATURE

Cho, W., J., Kwon, J., W., Choi, J., W., 2009. *The thermal conductivity for granite with various water contents.* Engineering Geology, 107 str. 167-171.

Cui, Y., Tang, A., M., Qian, L., Ye, W., Chen, B., 2011. *Thermal-mechanical behavior Of compacted GMZ Bentonite.* Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, str.1065-1074. <hal-00655766>

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., Vučenović H., Kovačević Zelić, B., 2012. *Characterization of bentonite for engineered barrier systems in radioactivw waste disposal sites, Zagreb, str 19-27.*

Element Collection, Inc., 2017. Bulk modulus of the elements, URL: http://periodictable.com/Properties/A/BulkModulus.al.html (29.1.2019.)

Engineering ToolBox, 2001. Specific Heat of common Substances URL: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html (29.1.2019.)

Engineering ToolBox, 2001. Thermal Conductivity of common Materials and Gases URL: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html (29.1.2019.)

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.

Grimsel test site, 2019. Full-scale engineered barriers experiment (FEBEX) I. URL: http://grimsel.com/gts-phase-v/febex/febex-i-introduction- (25.1.2019.)

Grim, R.E., GÜven, N. 1978. *Developments in sedimentology 24*, New York: Elsevier scientific publishing company

Hockman, A., Kessler, D.W., 1950. *Thermal and Moisture Expansion Studies of Some Domestic Granites.* Vol 44. U. S. Department of Commerce National Bureau of Standards.

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, 2009. Classification of Radioactive Waste, Vienna: A Safety Guide, Safety Series No. GSG-1.

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

IAEA, 2012. IAEA safety standards: Storage of Spent Nuclear Fuel. Vienna, Austria: IAEA, Safety Requirements, No. SSG-15.

Itasca consulting group Inc., 2019 FLAC Version 8.0, Explicit Continuum Modeling of Non-linear material Behaviour in 2D. URL URL: https://www.itascacg.com/software/flac (27.1.2019.)

Itasca consulting group Inc., 2016. FLAC- Fast Langrangian Analysis of Continua user's guide. Mineapolis, SAD.

Kujundžić, T., Korman, T., Macenić, M., 2012. *State of the art of drilling large diameter boreholes for deposition of high level waste and spent nuclear fuel*. , Zagreb: Rudarsko-geološko- naftni fakultet, 24. str. 49-59.

Kutlić, A., Bedeković, G., Sobota, I. 2012. *Bentonite processing.* Zbornik Rudarsko-geološko-nafntnog fakulteta, 24. Zagreb, str 61-65.

Leonardo Energy, 2019. Thermal expansion: Copper vs. aluminium. URL: https://help.leonardo-energy.org (29.1.2019)

Manaktala, H., K. 1993. *Characteristics of spent nuclear fuel and cladding relevant to high-level waste source term*. Prepared for Nuclear Regulatory Commision Contract, NCR-02-88-005. San Antonio, Texas.

Michalski, J., L., 2009. *An Analysis of Heat Conduction with Phase Change during the Solidification of Copper*. Projekt. Hartford, SAD.

Miller, W., Aleksander, R., Chapman, N., McKinley, I., Smellie, J., A., T., 2000. *Geological Disposal of Radioactive Wastes and Natural Analogues vol 2 (Waste Management).* Amsterdam, Nizozemska: Pergamon.

Nagra, 1984. Technical report 84-32. An assessment of the corrosion resistance of the high-level waste containers proposed by Nagra. Švicarska.

Nagra, 1986. Technical report 86-12E. Bentonite as a backfill material in the high-level waste repository: chemical aspects. Würenlingen, Švicarska.

Nagra, 2008. Technical report 07-01. Borehole sealing. Grimsel test site investigation phase IV. Wettingen, Švicarska.

Nagra, 1998. Technical report 94-13. Kristalin-I: Repository layout study preliminary calculations of temperature distributions around an emplacement tulnnel. Wettingen, Švicarska.

Nagra, 1994. Technical report 93-23. Kristalin-I: Results in perspective. Wettingen, Švicarska.

Nagra, 1994. Technical report 93-22. Kristalin-I: Safety assesment report. Wettingen, Švicarska.

Nagra, 2016. Technical report 15-04. Main outcomes and rewiew of the FEBEX in situ test (GTS) and mock-up after 15 years of operation. Grimsel test site investigation phase VI. Wettingen, Švicarska.

NARODNE NOVINE br. 38/2018. *Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja. Zagreb, Narodne novine d.d.*

NARODNE NOVINE br. 12/2018. *Pravilnik o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora.* Zagreb, Narodne novine d.d.

NARODNE NOVINE br. 130/2017 . *Zakon o izmjenama i dopunama zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti.* Zagreb, Narodne novine d.d.

Plötze, M., Schärli, U., Koch, A., Weber, H. 2007. *Termophysical properties of bentointe.* Lille, Francuska, Clays in material & engineered barier for radioactive waste confinement. str. 580.

Posiva, 2018. KBS-3H Disposal facility description. Olkiluoto, Finska. ISBN: 978-951-652-262-6.

Posiva, 2009. Manufacture of disposal canisters. Olkiluoto, Finska. ISBN: 978-951-652-171-1.

Posiva, 2017. Safety case plan for the operating licence application. Olkiluoto, Finska. ISBN: 978-951-652-266-4.

Pusch, R. 2015.*Bentonite clay- Environmental properties and applications.* Boca Raton, SAD: CRC Press.

SKB 2010. Technical report TR-10-46. Fuel and canister process reportfor the safety assessment SR-Site. Stockholm, Švedska. ISSN: 1404-0344

Veinović, Ž., Perković, D., Mostečak, A., Sharma, I., Mihić Surić, M., Prlić, I. 2018. *Management of residues in the Republic of Croatia,* Zagreb: Rudarsko- geološko- naftni fakultet.