

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Galla Uroić

TERMIČKO-HIDRO-MEHANIČKI EFEKTI NA ODLAGALIŠTU ISTROŠENOG
NUKLEARNOG GORIVA

Zagreb, 2019.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za rudarstvo i geotehniku, Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta u Zagrebu, pod vodstvom doc.dr.sc. Želimira Veinovića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./19.

POPIS KRATICA

ARAO – *Agencija za radioaktivne odpadke*, slovenska agencija za zbrinjavanje radioaktivnog otpada

ASTM UNS – *American Society for Testing and Materials Unified Numbering System for Metals and Alloys*, sustav označavanja slitina međunarodne standardizacijske organizacije ASTM

BWR – *Boiling water reactor*, reaktor s ključajućom vodom

DZRNS – Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost

EN-GJS – *European Standards - Continuously Cast Spheroidal Graphite Iron*, europska norma za posebnu vrstu čelika

EW – *exempt waste*, izuzeti radioaktivni otpad

HLW – *high level waste*, visoko radioaktivni otpad

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

II – iskorišteni izvori

ILW – *intermediate level waste*, srednje radioaktivni otpad

IMI – Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada

ING – istrošeno nuklearno gorivo

IRAO – izuzeti radioaktivni otpad

IRB – Institut Ruđer Bošković

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

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

LLW – *low level waste*, niskoradioaktivni otpad

MKE – metoda konačnih elemenata

MOX – *Mixed OXide*, miješani oksid gorivo

NE – nuklearna elektrana

NEK – Nuklearna elektrana Krško

NIREX – *Nuclear Industry Radioactive Waste Executive*, implementatorsko tijelo Ujedinjenog Kraljevstva zaduženo za razvoj programa dubokih geoloških odlagališta radioaktivnog otpada

NN – Narodne novine

NRAO – niskoradioaktivni otpad

NSRAO – Nisko i srednje radioaktivni otpad

ORAO – otpušteni radioaktivni otpad

POSIVA – *Posiva Oy*, finska tvrtka (implementator) koja se bavi upravljanjem i odlaganjem radioaktivnog otpada

PWR – *Pressurized Water Reactor*, reaktor s vodom pod tlakom

RAO – radioaktivni otpad

RH – Republika Hrvatska

RS – Republika Slovenija

SKB – *Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag*, švedska tvrtka (implementator) koja se bavi upravljanjem i odlaganjem radioaktivnog otpada

SRAO – srednje radioaktivni otpad

TE – termoelektrana

THME – termičko-hidro-mehanički efekti

VKRAO – vrlo kratkoživi radioaktivni otpad

VLLW – *very low level waste*, vrlo niskoradioaktivni otpad

VNRAO – vrlo niskoradioaktivni otpad

VRAO – visoko radioaktivni otpad

VSLW – *very short lived waste*, vrlo kratkoživi radioaktivni otpad

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Značenje	Mjerna jedinica
γ	jedinična težina	N/m ³
δ	pomak	mm
ΔT	gradijent topline	-
λ	toplinska vodljivost	W/mK
μ	Poissonov koeficijent	-
ρ	gustoća	kg/m ³
ρ_d	suha gustoća	kg/m ³
σ	normalno naprezanje	Pa
τ	posmično naprezanje	Pa
φ	kut	°
Φ	toplinski tok	W
Φ	promjer	m
A	aktivnost radioaktivnoga izvora (radioaktivnost)	Bq
A	površina	m ²
c	kohezija	Pa
c	maseni toplinski kapacitet	J/kgK
c	volumetrijski toplinski kapacitet	J/m ³ K
d	dubina	m
E	Youngov modul elastičnosti	Pa
F	Sila	N
h	visina	m
i	gradijent	-
k	propusnost	m/s
l	pomak	m
m	masa	g
n	poroznost	-
q	jedinični tok	m/s
Q	protok	m ³ /s
RT	stupanj radiotoksičnosti	-
S	stupanj saturacije	m ³ /m ³
t	vrijeme	s

t	temperatura	°C
T	temperatura	°K
u	porni tlak	Pa
v	brzina	m/s
v	brzina toka	m/s
V	zapremina	m ³
w	vlačnost	%
W	toplinska snaga	W

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Bazen za istrošeno gorivo (ZBRINJAVANJE RAO, 2019)	6
Slika 3-1 Shema klasifikacije radioaktivnog otpada (IAEA, 2009a)	8
Slika 3-2 Shematski prikaz gorivnog elementa, šipke i peleta s uranijevim oksidom (gorivom)	12
Slika 3-3 Borosilikatno staklo za vitrifikaciju VRAO-a	14
Slika 3-4 Spremnik za vitrificirani VRAO (NIREX, 2005).	14
Slika 4-1 Pad radiotoksičnosti kao rezultat radioaktivnog raspada prikazan kao funkcija vremena za ING i VRAO (Baldwin i dr., 2008).....	15
Slika 4-2 Konceptualno rješenje za odlaganje VRAO i/ili ING (Veinović i dr., 2015).	16
Slika 4-3 Tip odlagališta s obzirom na položaj spremnika u hodniku: horizontalni (narančasto) ili vertikalni (plavo) (Končić, 2013).....	17
Slika 4-4 Švedski koncepti odlaganja istrošenog nuklearnog goriva: KBS-3V (lijevo) i KBS-3H (desno) (Savage, 2012).....	18
Slika 4-5 Prikaz izrade hodnika za odlaganje (Saanio i dr., 2013).	19
Slika 4-6 Uzdužni presjek kroz hodnik za odlaganje (prema: ARAO, 2019).	20
Slika 4-7 Poprečni presjek kroz hodnik i bušotinu za odlaganje (lijevo) i detalj – poprečni presjek kroz bušotinu i spremnik (prema: ARAO, 2019).....	21
Slika 4-8 Standardni dizajn spremnika za ING (lijevo) i VRAO (desno) (NIREX, 2005).	22
Slika 4-9 Spremnik za odlaganje ING-a, finski koncept (POSIVA), insert – unutrašnja struktura od lijevanog željeza (lijevo) i vanjska obloga od bakra (desno) s poklopcima (izvor: prof.dr.sc. Ivan Vrkljan, privatna zbirka).....	23
Slika 4-10 Insert – unutrašnja struktura od lijevanog željeza, s jednim ubačenim gorivnim elementom, finski koncept (POSIVA), (izvor: prof.dr.sc. Ivan Vrkljan, privatna zbirka).....	24
Slika 4-11 Zapunjavanje hodnika blokovima prešanog bentonita i bentonitnim peletima (Keto i dr., 2012).....	27
Slika 4-12 Zapunjavanje hodnika i bušotina bentonitom (Keto i dr., 2012).....	28
Slika 4-13 Priprema prstenova od bentonita kao materijala zapunjavanja prostora između spremnika i stijene (Bennett, 2012).	28
Slika 4-14 Pojednostavljena geološka karta Republike Slovenije (Jemec Auflič i dr., 2015).....	31

Slika 4-15 Pojednostavljena geološka karta Hrvatske (Dunda i Kujundžić, 2000).....	31
Slika 5-1 Unos točaka modela.....	34
Slika 5-2 Definiranje regija.....	35
Slika 5-3 Definiranje mreže konačnih elemenata.	35
Slika 5-4 Zadavanje parametara materijala.....	36
Slika 5-5 Zadavanje graničnih uvjeta.....	36
Slika 5-6 Sučelje za unos parametara materijala u program SIGMA/W.	39
Slika 5-7 Osnovni model s mrežom konačnih elemenata za proračun	41
Slika 5-8 Model naprezanja u stijeni za poprečni presjek po bušotini za odlaganje, prema fazama.....	42
Slika 5-9 Mohrove kružnice za točke s maksimalnim naprezanjima (naznačene strelicama).	43
Slika 5-10 Model pomaka u stijeni za poprečni presjek, prema fazama:	44
Slika 5-11 Model pomaka u stijeni za poprečni presjek po bušotini za odlaganje.....	45
Slika 5-12 Naprezanja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi iskopa.	46
Slika 5-13 Naprezanja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi ugradnje spremnika.	46
Slika 5-14 Naprezanja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi zapunjenih odlagališnih tunela.....	47
Slika 5-15 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi iskopa.	47
Slika 5-16 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi ugradnje spremnika.....	48
Slika 5-17 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi zapunjenih odlagališnih tunela.....	48
Slika 5-18 Osnovni model, s postavljenim regijama materijala i graničnim uvjetima (tok s desna na lijevo i nepropusna podloga).	50
Slika 5-19 Rezultat analize prve faze: slabije frakturirana oštećena zona – porni tlakovi.	51
Slika 5-20 Rezultat analize prve faze: slabije frakturirana oštećena zona – brzine toka.	51
Slika 5-21 Rezultat analize druge faze: jače frakturirana oštećena zona – porni tlakovi.	52

Slika 5-22 Rezultat analize druge faze: jače frakturirana oštećena zona – brzine toka.	52
Slika 5-23 Promjena toplinske snage s vremenom (PWR - <i>Pressurized Water Reactor</i> , reaktor s vodom pod tlakom, kao u NEK; BWR - <i>Boiling water reactor</i> , reaktor s ključajućom vodom) (Ikonen, 2003).	54
Slika 5-24 Toplinska vodljivost bentonita kao funkcija stupnja saturacije (Ikonen, 2003 prema Kukkonen, 2000).....	55
Slika 5-25 Odnos promjene temperature na površini pojedinog spremnika i stijenci bušotine kroz vrijeme (Ikonen, 2003).	56
Slika 5-26 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu.	57
Slika 5-27 Model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu.	57
Slika 5-28 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje.....	58
Slika 5-29 Profil (horizontalni s početkom na SREDINI spremnika	58
Slika 5-30 Promjene temperatura po profilu (slika 5-24), kroz vrijeme.	59
Slika 5-31 Postavljen osnovni model za simulaciju širenja topline kroz odlagališne tunele, lijevo i desno u odnosu na transportni tunel.....	61
Slika 5-32 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu.	61
Slika 5-33 Model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu.	62
Slika 5-34 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje.....	62
Slika 5-35 Promjene temperatura po profilu za fazu 25 godina (dolje) za naznačeni povučeni profil kroz jednu granu odlagališnog hodnika (gore).....	63
Slika 5-36 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura dva susjedna panela odlagališnih tunela nakon 21 godine (po odlaganju) – tlocrt, simulacija za Olkiluoto (Ikonen, 2003).	64
Slika 5-37 Eksperimentalna mjerenja provedena na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu: rezultat mjerenja promjene temperature pri zagrijavanju magmatske stijene električnim grijačem (Nogolica, 2015).....	65
Slika 5-38 Skica eksperimenta sa zagrijavanjem magmatske stijene (simulacija odlaganja spremnika s ING-om) električnim grijačem (Nogolica, 2015).....	66

POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Procjena postojećeg institucionalnog RAO i II u RH (NN 125/2014).....	4
Tablica 2-2 Sumarni pregled inventara RAO iz NeK (NN 125/2014).....	5
Tablica 2-3 Sumarni pregled inventara ING-a u NEK (NN 125/2014)	5
Tablica 3-1 Klasifikacija RAO-a (NN 12/2018)	11
Tablica 4-1 Dimenzije spremnika za ING (NIREX, 2005, ARAO, 2019).....	24
Tablica 4-3 Tipični parametri ING-a za pojedinačni spremnik (NIREX, 2005).	25
Tablica 4-3 Količine plinova koje se mogu osloboditi iz ING-a (NIREX, 2005).....	26
Tablica 4-4 Traženi parametri za bentonit u svim oblicima (Keto i dr., 2012; Juvankoski, 2010).	29
Tablica 4-5 Pojednostavljeni kriteriji za odabir lokacije dubokog geološkog odlagališta s gledišta sigurnosti i tehničke izvedivosti (SFOE, 2008).....	30
Tablica 5-1 Parametri potrebni za simulaciju u programu SIGMA/W.....	40
Tablica 5-2 Granični uvjeti za proračun stanja naprezanja i pomaka u programu SIGMA/W.	40
Tablica 5-3 Maksimalni pomaci (u kaloti transportnog tunela) prema radnim fazama.	45

POJMOVNIK

α emiteri – atomi koji emitiraju alfa-čestice.

α zračenje – (alfa raspad) je pretvaranje jedne atomske jezgre u drugu uz emitiranje alfa-čestica (jezgra helija).

Aktivnost – dozimetrijska fizikalna veličina kojom se opisuje brzina raspadanja radioaktivne tvari, količnik je broja radioaktivnih raspada radionuklida u jedinici vremena.

β zračenje – vrsta radioaktivnog raspada atomskih jezgara izazvana utjecajem slabe nuklearne sile, pri kojem atomska jezgra zrači elektron ili pozitron.

Borirana voda – otopina borne kiseline u vodi bazena za hlađenje istrošenog nuklearnog goriva.

Borosilikatno staklo – staklo koje sadrži nekoliko postotaka borova oksida.

Dekomisijski otpad – (radioaktivni) otpad nastao razgradnjom (dekomisijom) nuklearnih elektrana.

Dugoživi radionuklidi – radionuklidi sa vremenom poluraspada reda veličine 30 godina i više.

Fisija – lančana reakcija diobe atomske jezgre pogođene neutronom na dva dijela podjednake mase, praćena emisijom neutrona, gama-zračenja i oslobađanjem velikih količina energije.

Fisijski produkti – jezgre koje su nastale fisijama.

γ zračenje – dio elektromagnetskog zračenja s jako kratkim valovima (manje od 0,5 nm).

Gorivni element – sklop gorivnih šipki (štapova) koji služi kao gorivo u reaktorima nuklearnih elektrana.

Hidro-termo-mehanički efekti – efekti na materijal koji se odnose na utjecaj (podzemne) vode, topline i mehaničkih naprezanja.

Iskorišteni izvori – izvori koji se više ne koriste ili se ne namjeravaju koristiti za djelatnost za koju je bilo izdano odobrenje.

Kratkoživi radionuklidi – radionuklidi sa vremenom poluraspada manje od 30 godina.

MOX (*Mixed OXide*) miješani oksid gorivo – vrsta nuklearnog goriva koje se sastoji od uranijeovog oksida i plutonijeovog oksida s tim da je plutonijev oksid glavni fisijski materijal.

Neutronska uhvat – proces u kojem atomska jezgra uhvati neutron pri čemu se često otpušta γ zračenje.

Pogonski otpad – (radioaktivni) otpad nastao pogonom (radom) nuklearnih elektrana.

Poluživot – (vrijeme poluraspada) je vrijeme potrebno da se raspadne polovica uzorka nestabilnih atomskih jezgara ili elementarnih čestica.

Prirodno radioaktivni materijali – materijali koji u prirodnom stanju sadrže radionuklide (prirodne, ne antropogene).

Radioaktivno zračenje – (ionizirajuće zračenje) pojava prijenosa energije u obliku fotona (kvanti elektromagnetskog zračenja) ili masenih čestica, a koje ima dovoljno energije da u međudjelovanju s kemijskom tvari ionizira tu tvar.

Radioaktivnost – spontano emitiranje alfa-česticâ i beta-česticâ iz tvari, često praćeno i emisijom gama elektromagnetskih valova, pri čemu kemijski elementi prelaze iz jednih u druge te se oslobađa energija u obliku kinetičke energije emitiranih čestica ili energije elektromagnetskih valova.

Radionuklidi – (radioizotopi) nuklidi kod kojih postoji višak mase ili energije, pa stabilnost postižu radioaktivnim raspadom: alfa raspad, beta raspad (beta minus i beta plus), gama zračenje, elektronski uhvat i drugi.

Radiotoksičnost – otrovnost uzrokovana radioaktivnošću.

Rezidui – jest materijal koji ostaje nakon industrijskog procesa a koji se sastoji od ili koji je onečišćen prirodnim radionuklidima i nastaje u industrijskim sektorima.

Solna doma – (dijapira) nastaje kada su naslage bogate različitim solima nestabilne jer su manje gustoće od naslaga koje ih okružuju, solne naslage prodiru prema površini te uzdižu, a katkad i probijaju pokrovne slojeve.

Transuranijski elementi – (transurani) kemijski elementi kojima je atomski broj veći od 92, tj. veći od atomskoga broja uranija.

Vitifikacija – (postakljivanje) zalijevanje materijala u staklenu matricu, solidifikacija staklom.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. RADIOAKTIVNI OTPAD U REPUBLICI HRVATSKOJ	3
2.1. Institucionalni radioaktivni otpad i iskorišteni izvori	3
2.2. Prirodno radioaktivni materijali	4
2.3. Radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo iz NE Krško	5
3. ISTROŠENO NUKLEARNO GORIVO I VISOKO RADIOAKTIVNI OTPAD	8
3.1. IAEA klasifikacija radioaktivnog otpada	8
3.2. Hrvatska klasifikacija radioaktivnog otpada	10
3.3. Istrošeno nuklearno gorivo	12
3.4. Visoko radioaktivni otpad	13
4. DUBOKA GEOLOŠKA ODLAGALIŠTA	15
4.1. Koncepti i tehnologije zbrinjavanja VRAO i ING	16
4.2. Spremnici za odlaganje	21
4.3. Bentonitna ispuna	26
4.4. Stijenski materijal	29
5. NUMERIČKI MODEL TERMIČKO-HIDRO-MEHANIČKIH EFEKATA	32
5.1. Metoda konačnih elemenata	32
5.2. Postupak modeliranja u programu Geostudio	34
5.3. Odabrani materijali i osnovne pretpostavke	37
5.4. Proračun u programu „SIGMA/W“	38
5.5. Proračun u programu „SEEP/W“	49
5.6. Proračun u programu „TEMP/W“	53
6. RASPRAVA I ZAKLJUČAK	67
7. ZAHVALE	69
8. POPIS LITERATURE	70
SAŽETAK	74
SUMMARY	75
ŽIVOTOPIS	76

1. UVOD

U svjetlu odluke Vlade Republike Hrvatske (124. sjednica 9.11.2018., NN 100/2018) o donošenju Nacionalnog programa provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva (Program za razdoblje do 2025. godine s pogledom do 2060. godine) (RH, 2018) i vjerojatnom ratificiranju zajedničkog generičkog projekta zbrinjavanja istrošenog nuklearnog goriva od strane Republike Slovenije (RS) i Republike Hrvatske (RH), problem zbrinjavanja radioaktivnog otpada u Hrvatskoj ponovno postaje aktualan. Hrvatski program za zbrinjavanje nisko i srednje radioaktivnog otpada sveo se na jednu lokaciju (Trgovska Gora, lokacija Čerkezovac) koja je odobrena od strane Vlade Republike Hrvatske, ali još nije potvrđena kao prihvatljiva u cijelosti. S druge strane, problem zbrinjavanja istrošenog goriva iz Nuklearne elektrane Krško prolongiran je za otprilike 30 godina i trenutno se planira suho skladištenje istrošenih gorivnih elemenata u blizini Nuklearne elektrane Krško (NEK) do trenutka kad će se pronaći potencijalna lokacija za odlaganje i dokazati njena funkcionalnost.

Specifičan problem suvlasništva NEK od strane RS i RH odnosi se, kako na kupovinu električne energije, tako i na vlasništvo otpada nastalog radom elektrane. Pola nisko i srednje radioaktivnog goriva (NISRAO) i polovina istrošenog nuklearnog goriva (ING) pripada Hrvatskoj, a druga polovina Sloveniji. Slovenija je odabrala lokaciju za svoj dio NISRAO, dok ni jedna ni druga država još uvijek nemaju rješenje za trajno zbrinjavanje (odlaganje) ING-a.

U ovom trenutku, sve istrošeno nuklearno gorivo i visoko radioaktivni otpad, u cijelom svijetu, čuvaju se u bazenima pri nuklearnim elektranama ili suhim skladištima. Jedina država koja ima građevinsku dozvolu za izgradnju dubokog geološkog odlagališta istrošenog nuklearnog goriva je Finska koja s odlaganjem vjerojatno neće započeti još 3 godine ili više. Švedska i Francuska su blizu ishoda građevinskih dozvola, ali u velikom zaostatku u odnosu na finski program. Ostale države svijeta su u najmanju ruku 10 do 20 godina daleko od izgradnje odlagališta istrošenog nuklearnog goriva i/ili visoko radioaktivnog otpada (VRAO).

Poradi specifičnosti ovih materijala, ING i VRAO se trebaju odlagati u duboka geološka odlagališta, na dubinama od 450-1 000 m, u čvrstu magmatsku ili sedimentnu stijenu, što će jamčiti sigurnost odlagališta u traženom periodu od barem 100 000 ili 1 000 000 godina, dok se količina ionizirajućeg zračenja svih komponenti ovih materijala (pojedinih radionuklida) ne svede na onu koju ima ruda urana. Postoje različiti koncepti za odlaganje ING-a i VRAO-

a, zavisno o tipu stijene i državi koje su ih razvijale, ali sve uključuju inženjerske barijere (spremnike i izolacijske materijale) i određeni tip podzemnih prostorija koji se projektiraju na dugi vijek trajanja. Jedan od najvažnijih čimbenika koji će uvjetovati uspješnost koncepta odlaganja i odlagališta, osim litostratigrafskih i drugih geoloških karakteristika stijene na lokaciji, svakako su hidro-termo-mehanički efekti istrošenog nuklearnog goriva na stijenu.

Premda RH i RS još nemaju odabranu lokaciju za odlaganje ING-a, nužno je znati postoji li mogućnost za izradu takvog odlagališta u Hrvatskoj i pod kojim uvjetima. Jedno od logičnih potencijalnih rješenja je odlaganje u granitne ili slične stijene (npr. granodiorit) kojih u Hrvatskoj i Sloveniji ima.

Cilj rada je provesti analizu funkcionalnosti dijela mogućeg generičkog modela odlagališta ING-a u Hrvatskoj ili Sloveniji, na isto tako generičkoj lokaciji. **Hipoteze rada** su: (1.) u Hrvatskoj ili Sloveniji se može pronaći lokacija sa stijenama koje imaju odgovarajuće karakteristike za izgradnju dubokog geološkog odlagališta istrošenog nuklearnog goriva, (2.) generički projekt je dobro dizajniran i odgovara traženim pravilima struke i (3) moguće je izraditi model hidro-termo-mehaničkih efekata istrošenog nuklearnog goriva na stijenu u Hrvatskoj ili Sloveniji kojim bi se dokazala podobnost odabrane stijenske mase u ovu svrhu. Ovim radom će se, osim **izrade kvalitativnog modela ponašanja potencijalne stijene i funkcionalnosti odabranog koncepta odlaganja ING-a**, dokazati kako **u Hrvatskoj postoje kapaciteti za izradu projekata i studija funkcionalnosti i sigurnosti budućeg odlagališta ING-a**.

2. RADIOAKTIVNI OTPAD U REPUBLICI HRVATSKOJ

Prema Strategiji zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva (NN 125/2014) Republika Hrvatska dužna je na tehnološki siguran, ekološki prihvatljiv i organizacijski učinkovit način zbrinuti sljedeći inventar:

- 1) Naslijeđeni institucionalni radioaktivni otpad i iskorištene izvore porijeklom iz medicine, industrije, znanosti te vojne i javne upotrebe
- 2) Institucionalni radioaktivni otpad i iskorištene izvore porijeklom iz medicine, industrije, znanosti te vojne i javne upotrebe koji će nastati u budućnosti
- 3) Lokacije na kojima se nalazi prirodno radioaktivni otpad
- 4) Radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo iz Nuklearne elektrane Krško sukladno obvezama iz Bilateralnog ugovora.

Misija strategije je definiranje smjernica i ciljeva zbrinjavanja te definiranje smjernica i ciljeva za saniranje lokacija s prirodno radioaktivnim materijalima. Smjernice i ciljevi moraju biti definirani tako da bude osigurana zaštita pojedinca, društva i okoliša od štetnih učinaka ionizirajućeg zračenja, u sadašnjosti i budućnosti (NN 125/2014).

2.1. Institucionalni radioaktivni otpad i iskorišteni izvori

Institucionalni radioaktivni otpad i iskorišteni izvori nastali su dugogodišnjom primjenom izvora ionizirajućeg zračenja u medicini, industriji, znanosti, vojsci, te u sklopu uređaja koji su se koristili u javnoj upotrebi (gromobrani, dojavljivači dima). Zbrinjavanje institucionalnog radioaktivnog otpada (RAO) i iskorištenih izvora (II) sastojala se od privremenog pohranjivanja u dva skladišta, skladište Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI) te Instituta Ruđer Bošković (IRB), smještenih u Zagrebu (NN 125/2014). Skladište IMI-ja je korišteno u periodu od 1959. do 2000. godine u svrhu prihvata institucionalnog RAO-a i II-ja. Skladište je zatvoreno, te se procjenjuje da je pohranjeno oko 1,5 m³ institucionalnog RAO-a i II-ja, od čega oko 0,5 m³ zauzimaju paketi s kratkoživućim, dok 1 m³ zauzimaju paketi s dugoživućim radionuklidima (NN 125/2014).

Skladište IRB-a izgrađeno je 1967. godine s namjenom pohranjivanja RAO-a i II-ja proizvedenog u Institutu. 1987. godine skladište se proširuje zbog dopremanja institucionalnog RAO-a i II-a generiranog izvan Instituta. Skladište je bilo ovlašteno za sakupljanje, obradu i skladištenje svih vrsta krutih i tekućih II-ja i institucionalnog RAO-a

u Republici Hrvatskoj. Zbog neprimjerenog skladištenja, skladište je zapečaćeno. Prema procjeni, trenutno se u skladištu nalazi 6 m³ institucionalnog RAO-a i II-ja, od čega je 5 m³ paketa s kratkoživućim radionuklidima, te 1 m³ paketa s dugoživućim radionuklidima (NN 125/2014). U tablici 2-1 prikazan je pregled postojećeg inventara institucionalnog RAO-a i II-ja u skladištima IMI-ja i IRB-a. Procjenjuje se da je u skladištima pohranjeno 7,5 m³ institucionalnog RAO-a i II-ja, aktivnosti 1,6x10¹³ Bq.

Tablica 2-1 Procjena postojećeg institucionalnog RAO i II u RH (NN 125/2014)

Vrsta RAO	Skladište IMI, 2006.		Skladište IRB, 2011.		UKUPNO	
	Volumen (m ³)	Aktivnost (Bq)	Volumen (m ³)	Aktivnost (Bq)	Volumen (m ³)	Aktivnost (Bq)
Kratkoživući	0,5	6,0 x10 ¹¹	5,0	1,3x10 ¹³	5,5	1,4x10 ¹³
Dugoživući	1,0	9,1 x10 ¹¹	1,0	4,9x10 ¹¹	2,0	1,5x10 ¹²
UKUPNO	1,5	1,5 x10¹²	6,0	1,4x10¹³	7,5	1,6x10¹³

2.2. Prirodno radioaktivni materijali

Premda se prirodno radioaktivni materijali i rezidui ne smatraju, u užem smislu riječi, radioaktivnim otpadom, upravljanje njima je također regulirano istom regulativom (npr. Strategijom zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva (NN 125/2014). U Republici Hrvatskoj postoje 3 službeno navedene lokacije na kojim se nalaze prirodno radioaktivni materijali: odlagalište pepela i šljake termoelektrane Plomin, odlagališta pepela i šljake termoelektrane bivše tvornice Jugovinil u Kaštelama i odlagalište fosfogipsa Petrokemije d.d., Kutina.

Na lokaciji termoelektrane Plomin nalazi se odlagalište pepela i šljake nastalih sagorijevanjem ugljena u TE Plomin 1 i TE Plomin 2. Procijenjeno je da se na odlagalištu nalazi oko 900 000 m³ pepela i šljake nastalih radom TE Plomin 1, u periodu od 1970. do 2001. godine kada je termoelektrana koristila lokalne ugljene s visokom koncentracijom radija i uranija. 2000. godine odlagalište je uređeno te je maksimalno smanjen radiološki utjecaj odloženog materijala na ljude i okoliš. Od početka rada TE Plomin 2 koristi se uvozni ugljen niske koncentracije prirodnih radionuklida u obje elektrane (NN 125/2014).

Na lokaciji Kaštel Sućurac, na području bivše tvornice Jugovinil nalaze se 2 odlagališta pepela i šljake koji su produkt sagorijevanja ugljena u tvorničkoj termoelektrani, a dijelom

se nalazi materijal dopremljen iz termoelektrana bivše države. Sanirano odlagalište sadrži oko 38 000 m³ pepela i šljake, dok se na lokaciji velike taložnice nalazi oko 180 000 m³ pepela i šljake (NN 125/2014).

Na lokaciji Kutina nalazi se fosfogips, koji je nastao preradom fosfatne rude u mineralno gnojivo, u kojem je povišena koncentracija radija, nastalog raspadom uranija. Odlagalište fosfogipsa nalazi se na udaljenosti od 5 km od tvornice Petrokemija, te se odlaže od 1983. godine. Odlagalište čine 4 kasete ukupne površine 1,6 km². Volumen kasete na nivou zemljanih brana iznosi oko 7x10⁶ m³. Trenutačno se na odlagalištu nalazi više od 5x10⁹ kg fosfogipsa i oko 2x10⁶ m³ vode (NN 125/2014).

2.3. Radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo iz NE Krško

U tablicama 2-2 i 2-3 prikazan je sumarni pregled inventara radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva iz Nuklearne elektrane Krško koji će se generirati do 2023. godine, tj. kraja redovitog pogonskog vijeka elektrane te 2043. godine, tj. produljenja pogonskog vijeka elektrane za 20 godina (NN 125/2014).

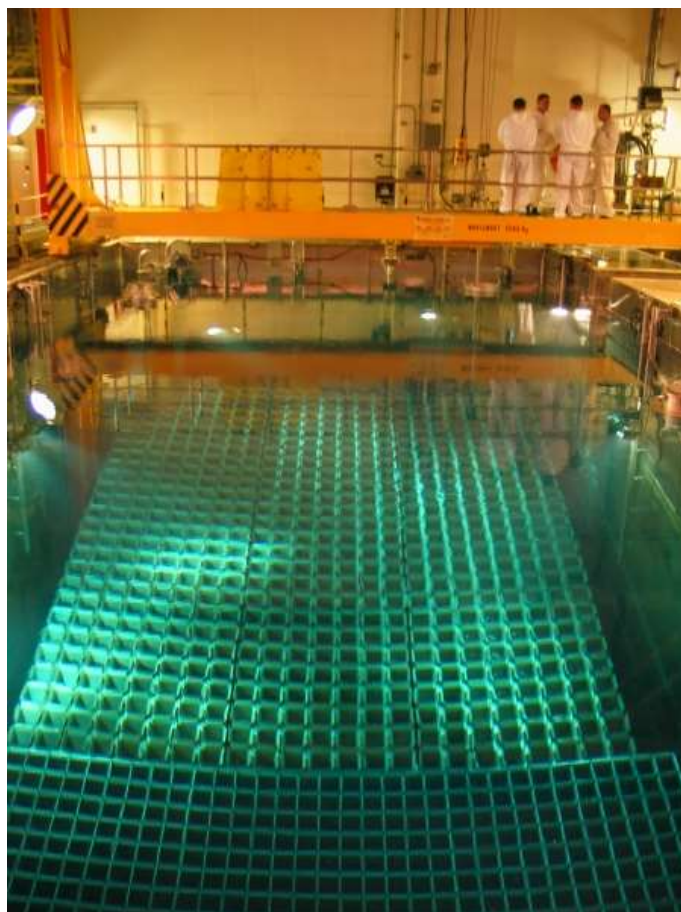
Tablica 2-2 Sumarni pregled inventara RAO iz NeK (NN 125/2014)

Vrsta RAO	Karakteristike	2023.	2043.
Pogonski	Masa (t)	3 953	4 903
	Aktivnost (Bq)	2,35x10 ¹³	2,92x10 ¹³
Dekomisijski	Masa (t)	4 998	5 307
	Aktivnost (Bq)	1,0x10 ¹³	1,1x10 ¹³
UKUPNO	Masa (t)	8.951	10 210
	Aktivnost (Bq)	4,25x10 ¹³	5,42x10 ¹³

Tablica 2-3 Sumarni pregled inventara ING-a u NEK (NN 125/2014)

Karakteristike	2023.	2043.
Broj istrošenih gorivnih elemenata	1 498	2 282
Masa (t)	870	1 330
Aktivnost (Bq)	5,4x10 ²⁰	8,2x10 ²⁰

Podjela radioaktivnog otpada iz NEK dijeli se na dvije glavne skupine, prema vremenu nastanka. To su pogonski i dekomisijski RAO, koji će nastati za vrijeme razgradnje elektrane. Pogonski RAO iz NE Krško u cijelosti spada u kategoriju kratkoživućeg RAO-a niske i srednje aktivnosti (NN 125/2014). Trenutno se skladišti na lokaciji NE Krško, u skladištu za kruti radioaktivni otpad (SRSF skladište), te NE Krško ima obvezu skladištiti ga na lokaciji do 2023. godine, kada se predviđa odvoz pogonskog RAO-a s lokacije NE Krško (RH, 2018). Dekomisijski RAO manjim dijelom spada u kategoriju RAO-a visoke aktivnosti, dok preostali dekomisijski RAO spada u kategoriju kratkoživućeg RAO-a niske i srednje aktivnosti (NN 125/2014). Dekomisijski RAO uključuje stare generatore, staru reaktorsku posudu i drugu kontaminiranu opremu i materijale (RH, 2018).
istrošeno nuklearno gorivo (ING) u cijelosti spada u kategoriju dugoživućeg RAO-a visoke aktivnosti (NN 125/2014). Nakon iskorištenja u reaktoru, gorivni elementi izvlače se iz jezgre reaktora te odlažu u bazen za istrošeno gorivo (Slika 2-1).



Slika 2-1 Bazen za istrošeno gorivo (ZBRINJAVANJE RAO, 2019)

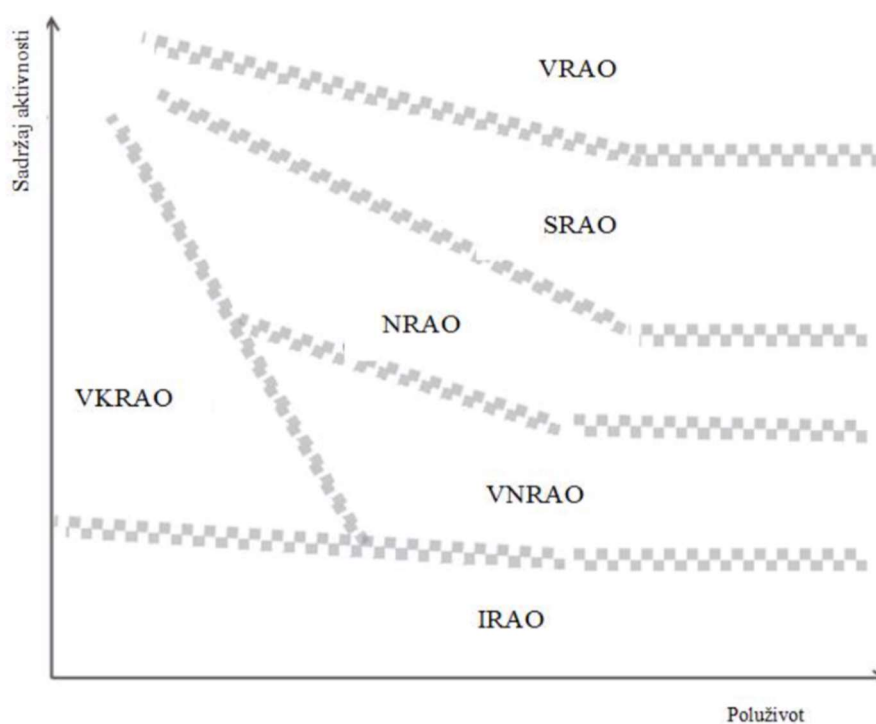
Bazen je sastavni dio sustava za zamjenu, rukovanje, skladištenje i hlađenje istrošenih gorivnih elemenata, te je smješten u zgradi za istrošeno nuklearno gorivo. Borirana voda koja se nalazi u bazenu ima dvostruku funkciju, te služi kao zaštita od intenzivnog radioaktivnog zračenja te kao rashladno sredstvo (RH, 2018).

3. ISTROŠENO NUKLEARNO GORIVO I VISOKO RADIOAKTIVNI OTPAD

3.1. IAEA klasifikacija radioaktivnog otpada

Prema definiciji Međunarodne agencije za atomsku energiju (*International Atomic Energy Agency – IAEA*) (IAEA, 2009a) radioaktivni otpad je bilo koji materijal koji sadrži ili je onečišćen radionuklidima u koncentracijama da je nivo radioaktivnosti veći od minimalne dozvoljene od strane nadležnih tijela, te za koji ne postoji nikakva predviđena uporaba.

Prema klasifikaciji IAEA-e (slika 3-1.) postoji 6 osnovnih vrsta radioaktivnog otpada (IAEA, 2009a).



Slika 3-1 Shema klasifikacije radioaktivnog otpada (IAEA, 2009a): IRAO - izuzeti radioaktivni otpad (EW – *exempt waste*); VKRAO - vrlo kratkoživi radioaktivni otpad (VSLW – *very short lived waste*); VNRAO - vrlo niskoradioaktivni otpad (VLLW – *very low level waste*); NRAO - niskoradioaktivni otpad (LLW – *low level waste*); SRAO - srednje radioaktivni otpad - (ILW – *intermediate level waste*); VRAO - visoko radioaktivni otpad - (HLW – *high level waste*).

IRAO - izuzeti radioaktivni otpad (EW – *exempt waste*) je otpad koji ispunjava kriterije za izuzimanje ili otpuštanje iz regulatorne kontrole zaštite od zračenja.

VKRAO - vrlo kratkoživi radioaktivni otpad (VSLW – *very short lived waste*) je otpad koji se može skladištiti tijekom ograničenog razdoblja (do nekoliko godina) tijekom raspada radionuklida i nakon toga se otpušta iz regulatorne kontrole u skladu s odlukom regulatornog tijela, za odlaganje u odlagališta neopasnog otpada, korištenje (u neku svrhu) ili ispuštanje; ova kategorija uključuje otpad koji sadrži primarno radionuklide s vrlo kratkim poluzivotima (vremenom poluraspada) koji se često koriste u znanstvene i medicinske svrhe.

VNRAO - vrlo niskoradioaktivni otpad (VLLW – *very low level waste*) je otpad koji ne ispunjava nužno kriterije VKRAO-a, ali koji ne zahtijeva visoku razinu izolacije te je stoga prikladan za odlaganje u objektima tipa pripovršinskih odlagališta s ograničenom regulatornom kontrolom. Takva odlagališta mogu također sadržavati i druge opasne otpade. Tipični otpad u ovoj klasi uključuje tlo i građevinski otpad (npr. nakon dekomisije i razgradnje nuklearne elektrane) s niskom razinom koncentracije aktivnosti. Koncentracije duže živućih radionuklida u VNRAO su općenito vrlo ograničene.

NRAO - niskoradioaktivni otpad (LLW – *low level waste*) je otpad koji je iznad razine izuzimanja, ali s ograničenim količinama dugoživućih radionuklida. Takav otpad zahtijeva robusnu izolaciju i zbrinjavanja u razdoblju do nekoliko stotina godina i prikladan je za odlaganje u pripovršinskim odlagalištima. Ova klasa pokriva vrlo širok raspon otpada. NRAO može uključivati kratkoživuće radionuklide viših razina aktivnosti, kao i dugovječne radionuklide, ali samo relativno niskih razina aktivnosti.

SRAO - srednje radioaktivni otpad - (ILW – *intermediate level waste*) je otpad koji zbog svog sadržaja, osobito dugoživućih radionuklida, zahtijeva veći stupanj kontrole i izolacije od onog koji je osiguran odlaganjem u pripovršinskim odlagalištima. Međutim, SRAO ne treba sustav, ili samo ograničeni sustav, za odvođenje topline tijekom skladištenja i odlaganja. SRAO može sadržavati dugovječne radionuklide, posebice radionuklide koji emitiraju alfa čestice, koji se neće raspasti do razine koncentracije aktivnosti koja je prihvatljiva za odlaganje u pripovršinskim odlagalištima tijekom vremena na koje se može osloniti institucionalna kontrola. Dakle, otpad u ovoj klasi zahtijeva odlaganje na većim dubinama, reda desetaka metara do nekoliko stotina metara (plitka odlagališta).

VRAO - visoko radioaktivni otpad - (HLW – *high level waste*) je otpad s razinom koncentracije aktivnosti koja je dovoljno visoka da generira značajne količine topline mehanizmom radioaktivnog raspadanja ili otpad s velikim količinama dugoživućih radionuklida koje treba uzeti u obzir pri projektiranju odlagališta za takav otpad. Odlaganje

u duboke, stabilne geološke formacije obično nekoliko stotina metara ili više ispod površine je općepriznata opcija za odlaganje VRAO-a.

3.2. Hrvatska klasifikacija radioaktivnog otpada

S obzirom da svaka država članica IAEA-e Međunarodna agencija za atomsku energiju, engl.: *International Atomic Energy Agency*) može uvesti svoju podjelu otpada, nužno je prikazati i hrvatsku klasifikaciju definiranu Zakonom o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 141/2013, 39/2015, 130/2017 i 118/2018).

Prema Zakonu o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 141/2013, 39/2015, 130/2017 i 118/2018) radioaktivni otpad jest otpadna tvar u plinovitom, tekućem ili krutom stanju za koju nije predviđena daljnja uporaba, koja sadržava radioaktivne tvari čija je aktivnost ili koncentracija aktivnosti iznad granične vrijednosti za otpuštanje iz nadzora koju pravilnikom propisuje ministar.

Klasifikacija RAO-a u Republici Hrvatskoj temelji se na klasifikaciji RAO-a IAEA-e iz 2009. godine, koja za glavni kriterij klasifikacije uzima referentna tehnička rješenja za odlaganje RAO-a (RH, 2018). S obzirom na fizikalno-kemijska svojstva, RAO se dijeli na kruti, tekući i plinoviti, a s obzirom na toksičnosti, na toksični i netoksični. S obzirom na ukupnu aktivnost te vrijeme poluraspada zastupljenih nuklida, RAO se, prema Pravilniku o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora (NN 12/2018) svrstava u 6 kategorija (tablica 3-1). Razlika između IAEA-ine podjele i one koja se smatra zakonskom u RH je minimalna te se može smatrati kako se u Hrvatskoj koristi međunarodno predložena klasifikacija otpada, prema kojoj je rađena većina IAEA-inih dokumenata (prijedlozi i preporuke), što znači da ih je moguće koristiti praktički bez prilagodbe. To uvelike olakšava kako pisanje legislative, tako i inženjerski zadatak projektiranja skladišta i odlagališta RAO.

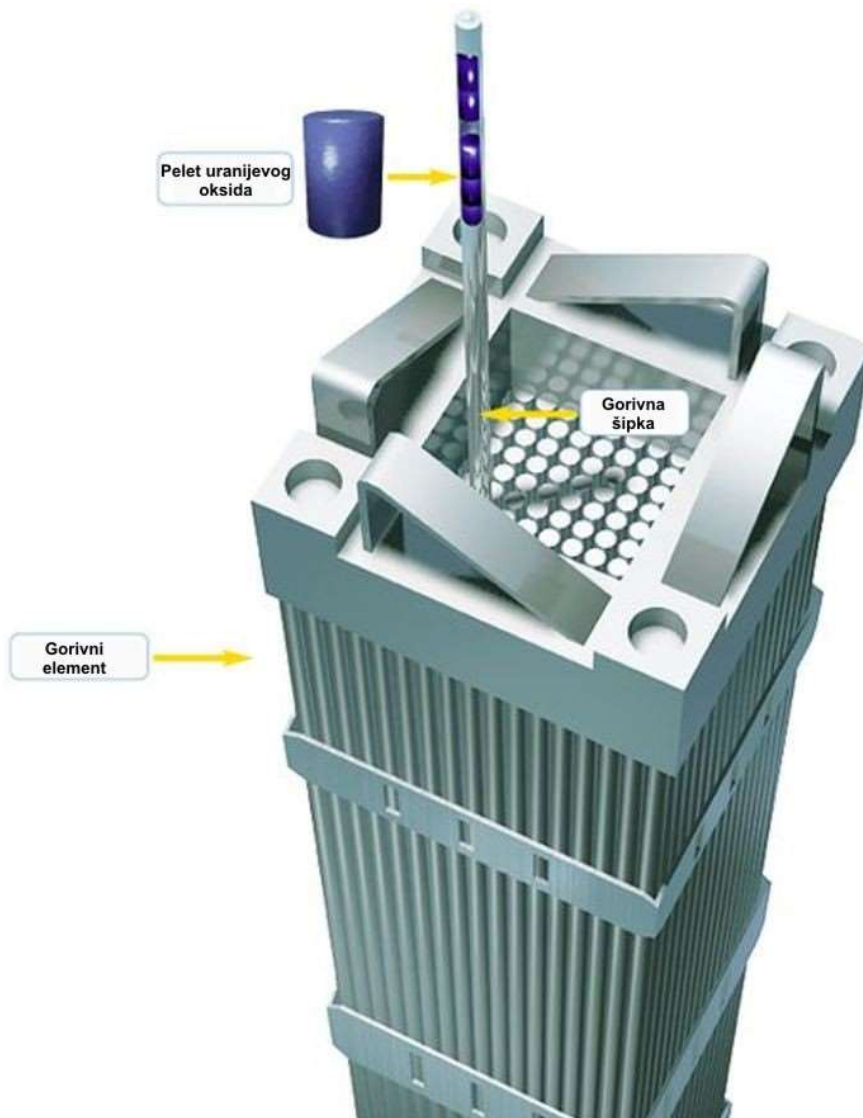
Ono što se mora primijetiti je da **Hrvatska legislativa istrošeno nuklearno gorivo ne klasificira kao otpad!** Razlog za to je mogućnost prerade ING-a, što je većini država poslužilo kao obrazloženje za istu odluku. Premda se ING tretira slično kao VRAO i u većini slučajeva ne namjerava prerađivati, ipak se vodi kao zasebna kategorija materijala.

Tablica 3-1 Klasifikacija RAO-a (NN 12/2018)

Kategorija RAO	Tipična svojstva	Načini zbrinjavanja
Otpušteni radioaktivni otpad (ORAO)	Radioaktivni otpad koji udovoljava uvjetima za otpuštanje iz regulatornog nadzora.	Otpuštanje iz regulatornog nadzora. Jednom otpušten iz nadzora ovaj se materijal više ne smatra radioaktivnim otpadom.
Vrlo kratkoživi radioaktivni otpad (VKRAO)	Sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 100 dana.	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom otpuštanje iz regulatornog nadzora. Ovom radioaktivnom otpadu će se skladištenjem kroz nekoliko godina koncentracija aktivnosti smanjiti na ili ispod vrijednosti propisanih u Prilogu 1 ovog Pravilnika (NN 12/2018).
Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNIRAO)	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 (NN 12/2018).
Nisko radioaktivni otpad (NRAO)	Radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 30 godina i ograničene koncentracije aktivnosti dugoživućih radionuklida (4 000 Bq/g u pojedinom pakiranju, odnosno 400 Bq/g za kompletnu masu radioaktivnog otpada). Proizvodnja topline u ovom otpadu niža je od 2 kW/m ³ .	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/m ³ .	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u podzemnom odlagalištu smještenom u stabilnoj geološkoj formaciji na dubini od nekoliko stotina metara ispod površine.

3.3. Istrošeno nuklearno gorivo

Istrošeno nuklearno gorivo (ING) nastaje radom nuklearnih reaktora svih vrsta i njime treba sigurno upravljati nakon uklanjanja iz jezgre reaktora. ING predstavljaju gorivni elementi (slika 3-2) uklonjeni iz reaktora nakon što im se smanji korisnost u smislu da više ne mogu održavati spontanu nuklearnu reakciju (IAEA, 2012).



Slika 3-2 Shematski prikaz gorivnog elementa, šipke i peleta s uranijevim oksidom (gorivom) (DUKE ENERGY, 2019).

Struktura materijala u gorivnom elementu je nakon iradijacije u reaktoru bitno drukčija, s obzirom na nastale fisijske produkte, količina korisnog goriva (U-235) se smanjila, a gorivni element ostaje vruć. Bez obzira što je fisija prekinuta, beta raspad fisijskih produkata će i dalje proizvoditi toplinu, u početku u iznosu od oko 7 %, a nakon sat vremena oko 1,5

% od radne snage reaktora (Graland i Saunders, 1998). ING se u nekim slučajevima smatra otpadom, a u nekim okolnostima potencijalnim budućim energetske resursom te stoga opcije upravljanja ING-om mogu uključivati izravno odlaganje (kao dio onoga što je općenito poznato kao "jednom kroz gorivni ciklus") ili reprocesiranje/prerada (kao dio onoga što je općenito poznato kao "zatvoreni gorivi ciklus") (IAEA, 2012). Obje opcije podrazumijevaju skladištenje u bazenima u sklopu nuklearnih elektrana i kasnije (ne nužno) u suhim skladištima u periodu od nekoliko mjeseci do nekoliko desetljeća. Službenog stava o tome hoće li se ING prerađivati ili neće nema. Vjerojatna odluka da se ING iz NEK neće prerađivati vezana je uz nisko obogaćenje goriva i visoke troškove prerade, a u prilog tome govori podatak iz Nacionalnog programa (RH, 2018) u kojem jasno stoji kako se planira jedino suho skladištenje ING-a iz NEK-a prije odlaganja.

3.4. Visoko radioaktivni otpad

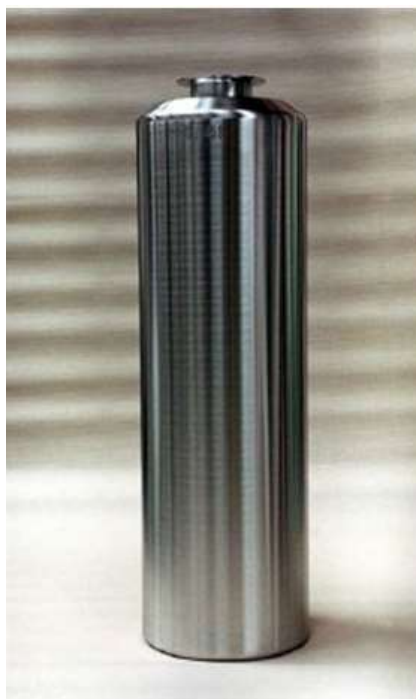
Visoko radioaktivni otpad (VRAO) definiran je (IAEA, 2009a) kao otpad koji sadrži visoke koncentracije kratko i dugoživućih radionuklida koji, u odnosu na SRAO, zahtijevaju višu razinu izolacije u smislu postizanja više razine sigurnosti. Takav stupanj izolacije postiže se odlaganjem u duboka geološka odlagališta s inženjerskim barijerama. VRAO generira, jednako kao i ING, značajne količine topline poradi raspada fisijских produkata, budući da velika većina VRAO-a predstavlja upravo koncentrirane fisijske produkte raspadanja koncentrirane preradom ING-a (Ojovan i Lee, 2005). U zatvorenom nuklearnom gorivnom ciklusu (jednom kroz ciklus), gorivo se prerađuje kako bi se iz njega izdvojio korisni uranij U-235 i plutonij Pu-239 koji se mogu koristiti kao miješani oksid, tzv MOX (*Mixed Oxide*) gorivo. Obrada uključuje uklanjanje metalne obloge i otapanje ostatnog materijala u dušičnoj kiselini. Nakon toga se otopljeni uranij i plutonij uklanjaju iz otopine, a ostatak, VRAO, će sadržavati otopljene fisijske produkte, nečistoće iz obloge, neaktivne kemikalije iz procesa, transuranijske elemente nastale neutronske uхватom i tragove neuklonjenog plutonija.

ING se obično vitrificira borosilikatnim staklom (slika 3-3) i pohranjuje u spremnike koji se skladište u suhim skladištima do trenutka odlaganja u duboka geološka odlagališta.



Slika 3-3 Borosilikatno staklo za vitrifikaciju VRAO-a (BENJI JEREW, 2019).

Premda se spremnici (slika 3-4) razlikuju od države do države, odnosno od tehnologije do tehnologije, obično se rade od nehrđajućeg čelika debljine oko 5 mm, a dimenzije su im oko 400 mm promjer i oko 1300 mm visina. Masa punog spremnika je oko 550 kg (NIREX, 2005).



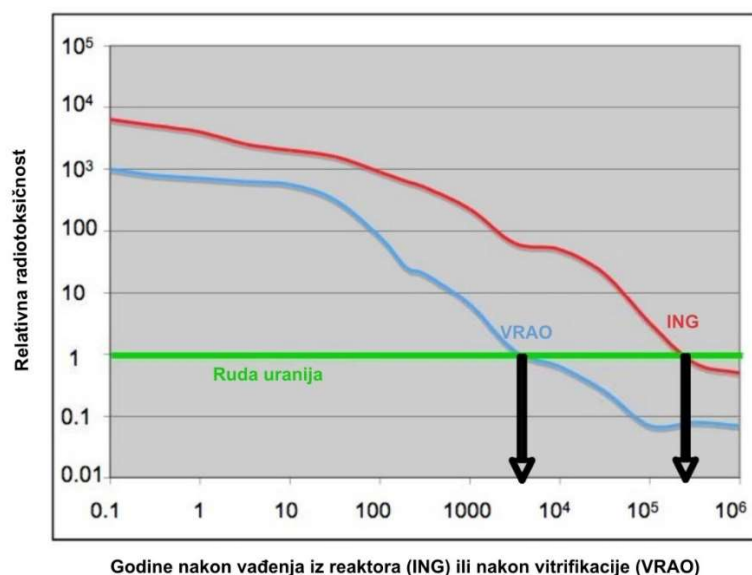
Slika 3-4 Spremnik za vitrificirani VRAO (NIREX, 2005).

4. DUBOKA GEOLOŠKA ODLAGALIŠTA

Odlaganje VRAO-a i ING-a u duboka geološka odlagališta se smatra najboljim načinom zbrinjavanja ovih materijala iz nekoliko razloga (Veinović i dr., 2015):

- **Predviđena dubina odlaganja** (400-1 000 m) podrazumijeva dugi put za radionuklide koji će doći do površine, odnosno do razine pitke podzemne vode, jednako kao i smanjenu mogućnost ljudske intruzije;
- **Dobro odabrana geološka sredina** (slabopropusne magmatske, sedimentne ili metamorfne stijene) značit će manju brzinu transporta radionuklida prema površini;
- **Inženjerske barijere** (spremnik i materijal ispune između stijene i spremnika) predstavljaju dodatnu barijeru koja će sama po sebi usporiti transport radionuklida.

S obzirom da se odlagalište VRAIO i ING, odnosno trajnost sustava odlaganja, projektira na period od 100 000 do 1 000 000 godina (Veinović i dr., 2015), gore navedeni razlozi za izbor dubokih geoloških odlagališta također idu u prilog trajnosti odlagališta. Očekivani pad aktivnosti VRAO-a i ING-a na razinu uranijeve rude, što se smatra prihvatljivim iznosom u trenutku dolaska radionuklida iz odlagališta na površinu, bit će već nakon 10 000 godina za VRAO i na oko 100 000 godina za ING (slika 4-1), ali u oba slučaja odlagališta se projektiraju na 100 000 do 1 000 000 godina.



Slika 4-1 Pad radiotoksičnosti kao rezultat radioaktivnog raspada prikazan kao funkcija vremena za ING i VRAO (Baldwin i dr., 2008).

Premda takvi vremenski periodi predstavljaju više geološko nego povijesno vrijeme, s obzirom da se moderni čovjek kao vrsta izdiferencirao od predaka prije oko 50 000 godina (McBrearty i Brooks, 2000), inženjerska praksa daje razloga vjerovati kako je izgradnja takvih trajnih objekata moguća već današnjom tehnologijom.

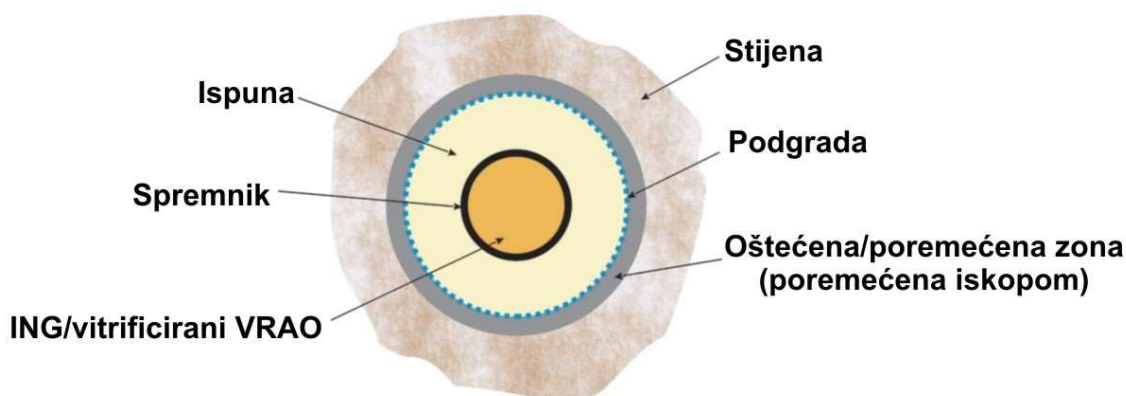
Alternativni načini zbrinjavanja, poput lansiranja otpada van Zemljine orbite, bacanja na dno oceana, utiskivanje ili ukapanje u Zemljinu koru ispod oceana ili odlaganje u polarne kape, pokazali su se pre nesigurnim ili ekonomski neopravdanim i od njih se odustalo.

Trenutno u svijetu postoji samo jedno odlagalište ING-a (i ni jedno VRAO-a), koje je dobilo građevinsku i uporabnu dozvolu, i u kojem bi odlaganje trebalo početi tek 2023.: Onkalo u Finskoj (World nuclear news, 2015).

Hrvatska i Slovenija, s obzirom na mali program, sigurno neće raditi zasebna odlagališta ING-a. Pregovori o zajedničkom rješenju su u tijeku, a ideja je pronaći jednu lokaciju, uzimajući u obzir područja obje države, i na toj lokaciji izgraditi odlagalište, ukoliko se do 2053. ne pronađe alternativno rješenje. Naime, prema Referentnom scenariju za geološko odlagalište u čvrstoj stijeni (ARAO, 2019), ukoliko ga Republika Hrvatska i Republika Slovenija ratificiraju, početak poslova na geološkom odlagalištu predviđen je za 2053. godinu.

4.1. Koncepti i tehnologije zbrinjavanja VRAO i ING

Koncept odlaganja u duboka geološka odlagališta može se, pojednostavljeno, predstaviti kao na slici 4-2.



Slika 4-2 Konceptualno rješenje za odlaganje VRAO i/ili ING (Veinović i dr., 2015).

Stijena – se bira po principu stabilnosti (mehaničke i kemijske), kao i postojanosti u geološkom smislu (stare stijene, dugo vremena ne promijenjenih svojstava). Također, zahtijeva se da stijena bude slabopropusna (reda veličine 1×10^{-8} - 1×10^{-12} m/s) kako bi se minimizirala mogućnost transporta radionuklida. U tu svrhu se odabir stijena u kojima bi se odlagalo obično svodi na monolitne, slabo raspucale, magmatske stijene (npr. graniti i granodioriti), dobro konsolidirane sedimentne stijene (stare gline, sol u solnim domama...) ili kvalitetne, slabo raspucale i stabilne metamorfne stijene (muljnjaci, glinjaci, tufovi i dr.) (Veinović i dr., 2015).

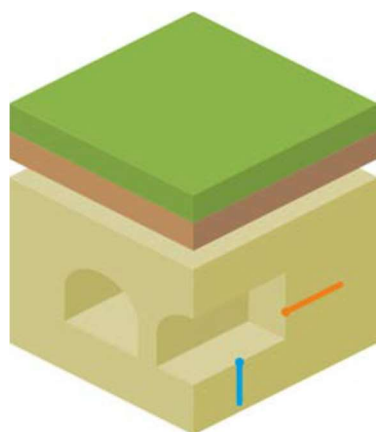
Oštećena zona – u stijena je nastala iskopom i obično je širine oko 30 cm, u slučaju iskopa bušenjem i miniranjem, odnosno oko 3 cm, u slučaju iskopa punoprofilnim tunelerom (Veinović i dr., 2015).

Podgrada – se pokušava izbjeći, ukoliko to stijena dopušta, s obzirom da predstavlja strani materijal čije se ponašanje i utjecaj na ostale materijale tijekom dugog vremenskog perioda može samo pretpostaviti, a svakako znači oslabljenje rješenja (Veinović i dr., 2015).

Ispuna – predstavlja materijal koji će popuniti iskopani prostor između stijene i spremnika. Zavisno od tipa stijene, obično se predviđa uporaba bentonitne gline (montmorilonit), osim u slučaju odlaganja u solne dome, kad bi ispuna trebala biti usitnjena sol (Veinović i dr., 2015).

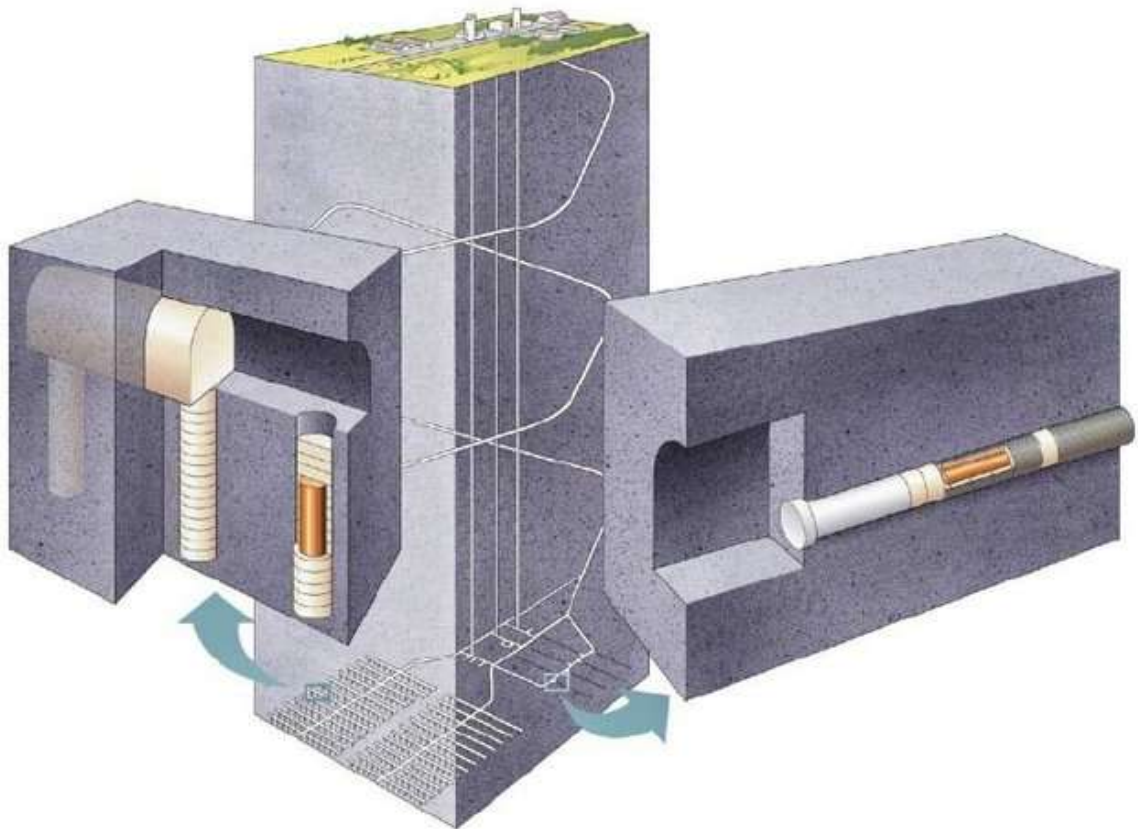
Spremnik – zavisno od odabranog koncepta, može biti od čelika, bakra ili titanija, a obično se radi o relativno tankostijenom spremniku, s obzirom da debele stjenke ne bi toliko značile dodatnu sigurnost, koliko veliki trošak (Veinović i dr., 2015).

S obzirom kako će se spremnici postavljati u odnosu na tunele za odlaganje, generalno moguće je odabrati horizontalni ili vertikalni položaj (slika 4-3).



Slika 4-3 Tip odlagališta s obzirom na položaj spremnika u hodniku: horizontalni (narančasto) ili vertikalni (plavo) (Končić, 2013)

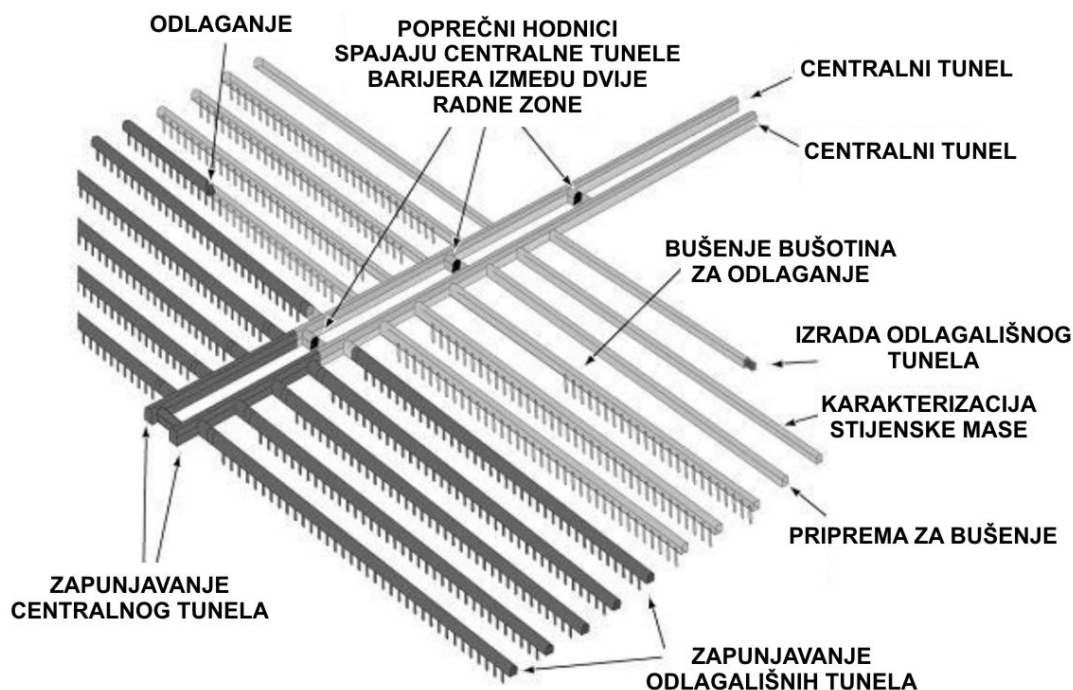
Premda postoji cijeli niz koncepata razvijenih za odlaganje VRAO i ING u duboka geološka odlagališta, koji se do određene mjere razlikuju, ova dva principa: odlaganje u plitke bušotine iz tunela ili odlaganje aksijalno u tunelu, su tehnološki najmanje zahtjevna (Veinović i dr., 2015). Na slici 4-4 su prikazana oba koncepta, razvijena od strane švedske tvrtke za upravljanjem nuklearnim gorivom i otpadom – SKB.



Slika 4-4 Švedski koncepti odlaganja istrošenog nuklearnog goriva: KBS-3V (lijevo) i KBS-3H (desno) (Savage, 2012).

S obzirom da je slovenskim Referentnim scenarijem za geološko odlagalište u čvrstoj stijeni (ARAO, 2019) predviđena primjena jednog od ova dva koncepta, te s obzirom da neki od drugih koncepata nisu primjenjivi u naše dvije države. Primjera radi, odlaganje u duboke vertikalne bušotine iz tunela, „njemački koncept“, podrazumijeva rad u solnoj domi, kojih u Hrvatskoj i Sloveniji nema, dok „francuski koncept“ dugih horizontalnih bušotina podrazumijeva rad u izdašnim slojevima gline ili glinjaka, kojih u Hrvatskoj i Sloveniji također nema. Za izradu numeričkog modela u ovom radu korišten je koncept KBS-3V.

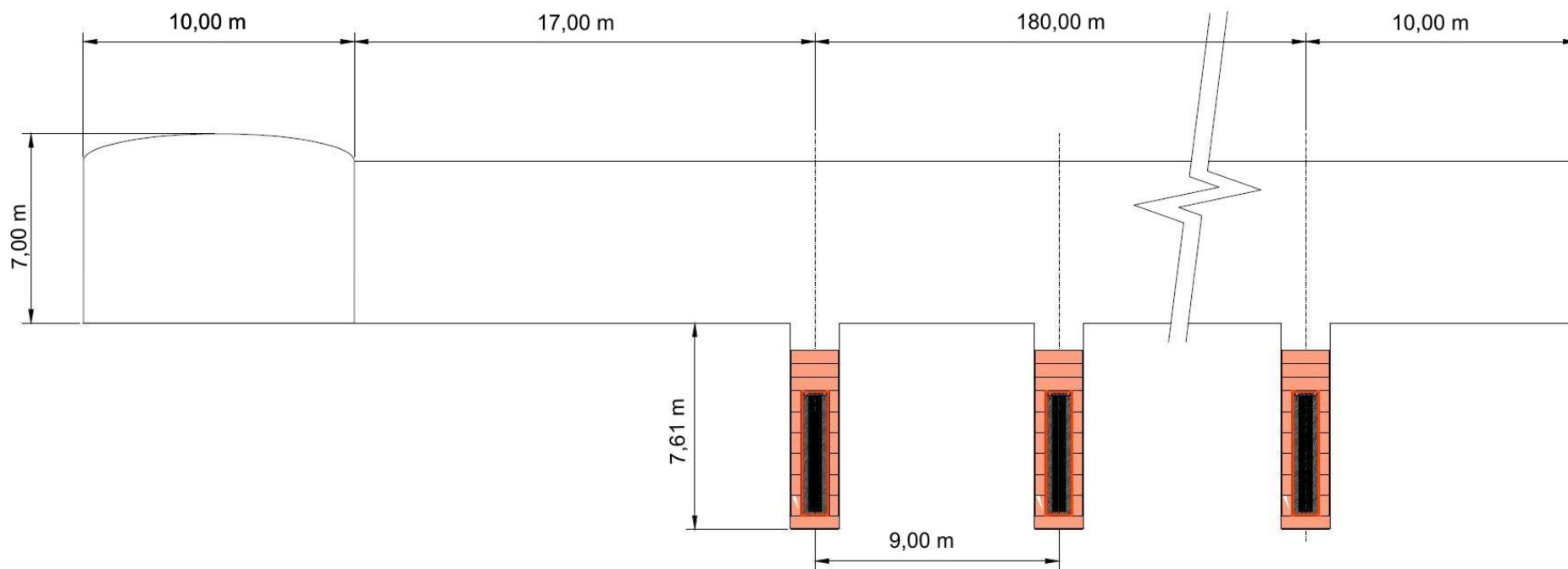
Koncept KBS-3V je prihvaćen u Finskoj i Ujedinjenom Kraljevstvu i pojednostavljeno podrazumijeva izradu odlagališnih hodnika na dubini od 400 (500) do 1 000 m otprilike kao na slici 4-5, s tim da će broj hodnika za odlaganje zavisiti o količini potrebnih spremnika za ING, odnosno VRAO.



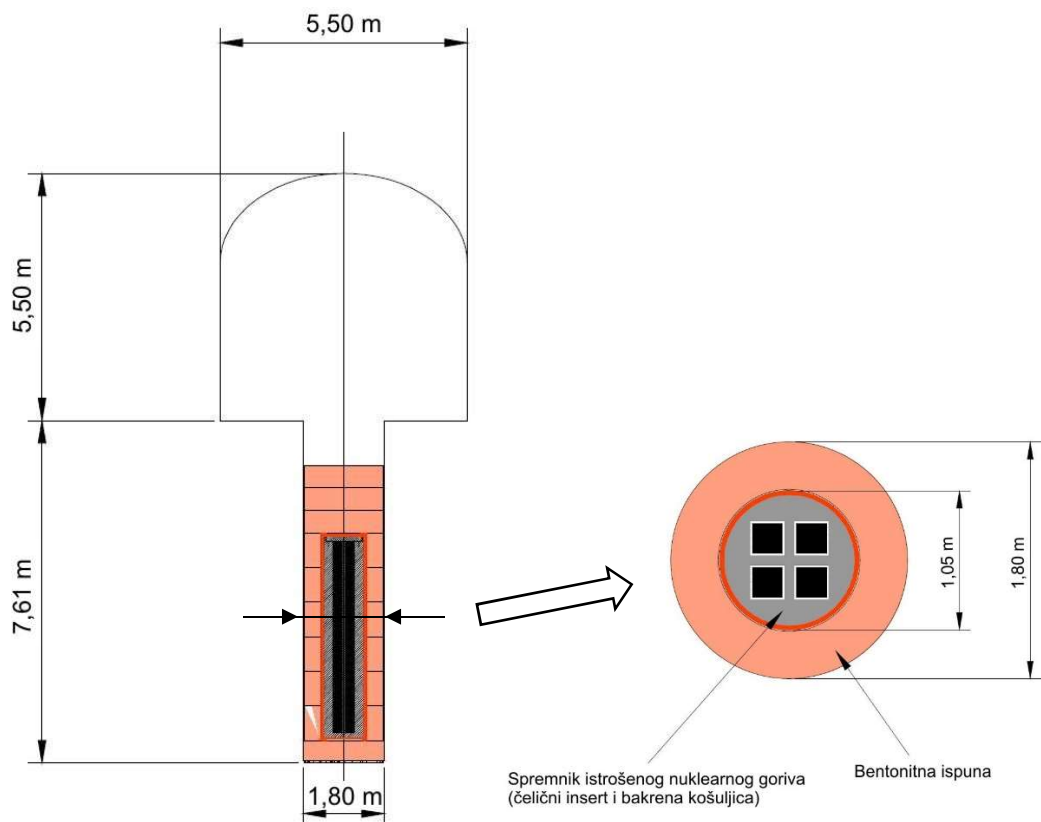
Slika 4-5 Prikaz izrade hodnika za odlaganje (Saanio i dr., 2013).

Uzdužni presjek kroz hodnik prikazan je na slici 4-6, a poprečni (kroz jedno od bušotina za odlaganje) na slici 4-7. Pretpostavlja se da će u većini slučajeva izrada podzemnih prostorija biti metodom bušenja i miniranja (vjerojatno Novom austrijskom metodom), dok bi se odlagališni hodnici bušiti punoprofilnim tunelerom ili također metodom bušenja i miniranja (Baldwin i dr., 2008; Saanio i dr., 2013; ARAO, 2019). Razlog tome je što se želi smanjiti oštećena zona koja bi u konačnici predstavljala put procjeđivanja podzemne vode, a time i radionuklida. Bušenje kratkih vertikalnih bušotina za odlaganje spremnika provoditi će se vjerojatno metodom bušenja slijepog okna (Autio & Kirkkomäki, 1996).

Podređivanje u podzemnim prostorijama se želi svesti na minimum, s obzirom da strani materijal (beton, čelik i sl.) može smanjiti traženu kvalitetu i trajnost objekta, budući da će s vremenom degradirati, a time postati vjerojatni put za transport radionuklida podzemnom vodom (Saanio i dr., 2013).



Slika 4-6 Uzdužni presjek kroz hodnik za odlaganje (prema: ARAO, 2019).

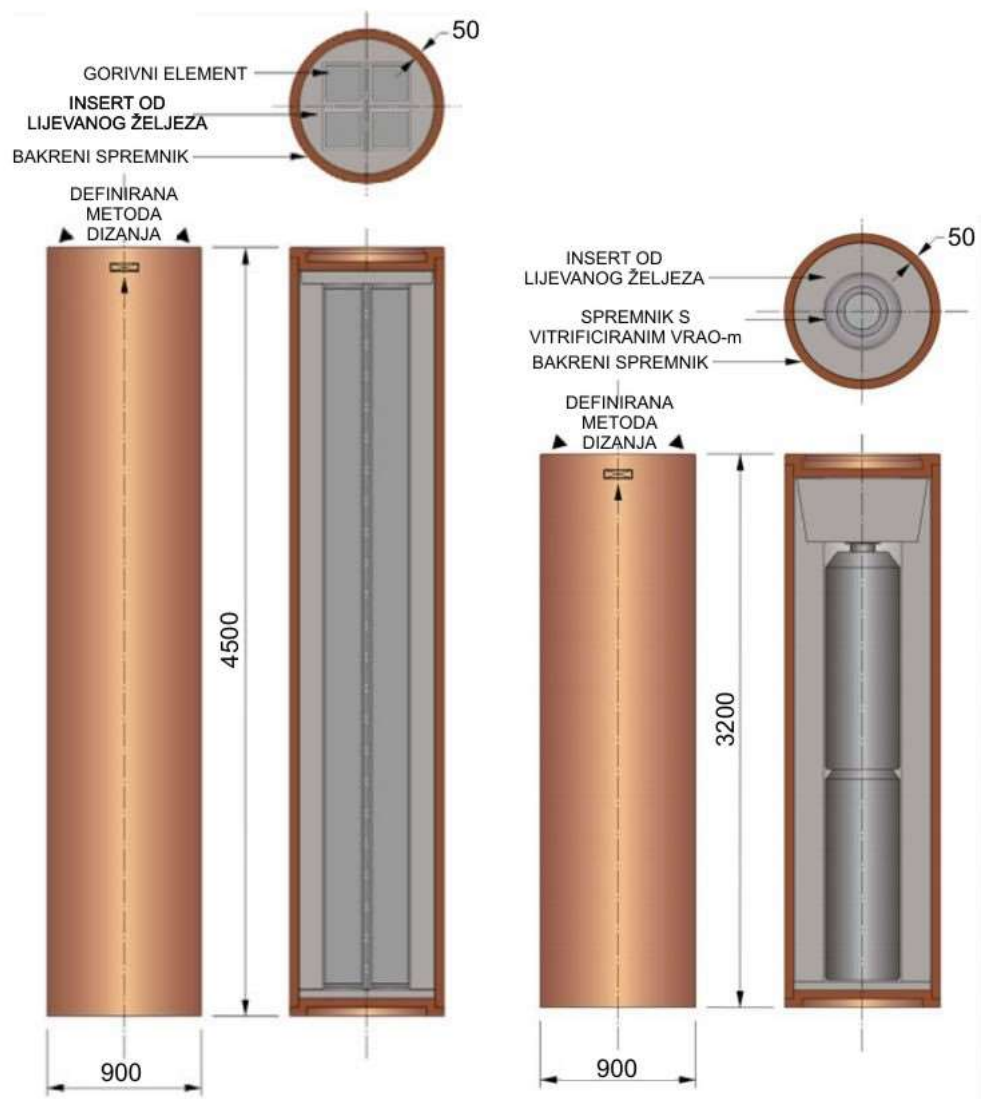


Slika 4-7 Poprečni presjek kroz hodnik i bušotinu za odlaganje (lijevo) i detalj – poprečni presjek kroz bušotinu i spremnik (prema: ARAO, 2019).

Alternativni koncept, KBS-3H, podrazumijeva odlaganje spremnika aksijalno u tunelu, na posteljici od prešanog bentonita. S obzirom na potpuno drukčiju razradu modela i višestruko uvećanje posla, a i iz razloga što će koncept KBS-3V gotovo sigurno biti korišten u finskom, vjerojatno švedskom i slovensko-hrvatskom programu (ARAO, 2019) u radu su provedene analize samo za koncept KBS-3V.

4.2. Spremnici za odlaganje

U većini programa (Švedska, Finska, Ujedinjeno Kraljevstvo, Slovenija...) prihvaćen je koncept spremnika (NIREX, 2005; Raiko i Salo, 1996) za odlaganje koji se sastoji od vanjske izolacijske barijere od bakra s unutrašnjom strukturom od lijevanog željeza koja će služiti za slaganje istrošenih gorivnih elemenata, odnosno spremnika s vitrificiranim VRAO-m i dati spremniku mehaničku čvrstoću (slika 4-8).

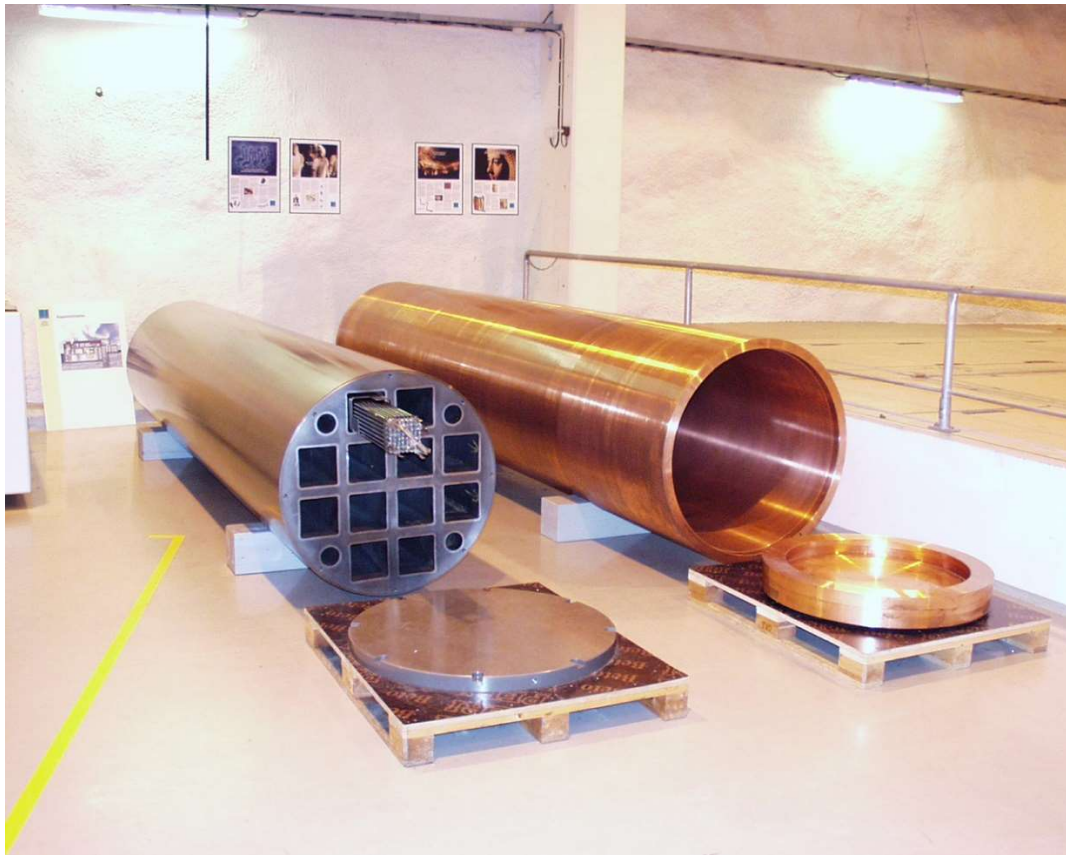


Sve mjere su u milimetrima

Slika 4-8 Standardni dizajn spremnika za ING (lijevo) i VRAO (desno) (NIREX, 2005).

Dimenzije spremnika za ING mogu se razlikovati u dimenzijama i obliku presjeka unutrašnje strukture zavisno od tipa reaktora i gorivnih elemenata, kao i u broju gorivnih elemenata.

Spremnici za odlaganje ING-a (slika 4-9), zanimljivi za ovaj rad, s obzirom da će se ING iz NEK odlagati neprerađen, predstavljaju prvu inženjersku barijeru koja je projektirana da zadrži radionuklide (izdrži koroziju u uvjetima dubokog geološkog odlagališta) u periodu od 10 000 godina (Raiko i Salo, 1996).



Slika 4-9 Spremnik za odlaganje ING-a, finski koncept (POSIVA), insert – unutrašnja struktura od lijevanog željeza (lijevo) i vanjska obloga od bakra (desno) s poklopcima (izvor: prof.dr.sc. Ivan Vrkljan, privatna zbirka).

Primarna zadaća zapečaćenog (varenjem poklopca) vanjskog spremnika je osigurati dugotrajnu izolaciju radionuklida, istovremeno služeći kao štit u smislu smanjenja razine vanjske radioaktivnosti (γ zračenje). Insert – unutrašnja struktura od lijevanog željeza, pridržava (razmiče) gorivne elemente, daje mehaničku čvrstoću spremniku i služi kao medij za širenje topline unutar spremnika. Na slici 4-10 prikazan je detalj inserta s jednim gorivnim elementom ubačenim u nj. Finski koncept, za razliku od onog koji je predviđen za razvoj u Ujedinjenom Kraljevstvu (UK), podrazumijeva korištenje spremnika s dvanaest (12) gorivnih elemenata, dok UK koncept (tvrtnice NIREX) podrazumijeva pakovanje po 4 gorivna elementa u spremnik, što će dati ukupnu masu punog spremnika od oko 18 t (ne više od 20) (NIREX, 2005).



Slika 4-10 Insert – unutrašnja struktura od lijevanog željeza, s jednim ubačenim gorivnim elementom, finski koncept (POSIVA), (izvor: prof.dr.sc. Ivan Vrkljan, privatna zbirka).

S obzirom da vjerojatni koncept koji će biti preuzet i prihvaćen od strane RH i RS za zbrinjavanje ING-a iz NEK uključuje pakovanje po četiri (4) gorivna elementa u spremnik, dalje u radu govorit će se isključivo o tom tipu spremnika. Dimenzije spremnika dane su u tablici 4-1.

Tablica 4-1 Dimenzije spremnika za ING (NIREX, 2005, ARAO, 2019)

Dimenzija	NIREX	ARAO
	Iznos [mm]	
Ukupna visina	4500±1	4610
Vanjski promjer	900 + 0,3/-0	1050
Minimalna debljina stijenki	50	50

Bakrena obloga spremnika ((NIREX, 2005)) bit će od čistog bakra, bez sadržaja kisika, tipa ASTM UNS C10100 (Cu-OFE), EN133/63: 1994 Cu-OF1. Sastav materijala identičan je onome u švedskom i finskom konceptu.

Insert od lijevanog željeza bit će lijevan prema zahtjevima norme EN 1563 / EN-GJS-400-15U. Sastav materijala je također identičan onome u švedskom i finskom konceptu.

Predviđa se da je trajnost spremnika 10 000 godina, s ogradom da mu trajnost mora biti barem do kraja perioda visokih toplinskih emisija: 1 000 godina (NIREX, 2005).

Količina topline koju generira ING je znatna i spremnik mora biti projektiran na način da ne dođe do njegove degradacije i gubitka integriteta. Podaci o aktivnosti materijala, sadržaju uranija i toplinskoj emisiji dani su u tablici 4-2.

Tablica 4-3 Tipični parametri ING-a za pojedinačni spremnik (NIREX, 2005).

Parametar	Pakovanje gorivnih elemenata u jednom spremniku
Masa [t]	17,9
Aktivnost [TBq]	$1,3 \times 10^4$
Toplinska snaga [W]	1016
Masa uranija [kg]	2060
Sadržaj fisibilnih materijala [kg] (U-233, U-235, Pu-239, Pu-241)	32

Ukupna emisija topline sa spremnika ne smije prijeći iznos koji bi rezultirao ubrzanim smanjenjem kvalitete spremnika ili njegovog sadržaja, tako da je maksimalna temperatura koja se smije pojaviti na vanjskoj stijenci spremnika 100° C (u bilo kojem trenutku nakon odlaganja), a maksimalna oslobođena toplinska snaga 1160 W (za razliku od predviđene, normalne od 1016 W) (NIREX, 2005).

S vremenom će svakako doći do nastanka niza plinova koji ne smiju umanjiti integritet spremnika. Proces koji uključuju nastanak plinova su (NIREX, 2005):

- Kemijski (npr. korozija)
- Mikrobiološko raspadanje organske tvari
- Radioliza vode i organskih tvari
- Produkti radioaktivnog raspadanja (npr. radon raspadanjem radija i helij djelovanjem α emitera)
- Oslobođanje plinova zadržanih u otpadu (plemeniti plinovi plus tricij i klor).

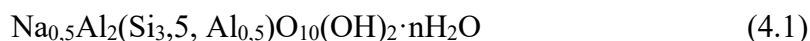
Količine plinova koje se mogu osloboditi iz ING-a predstavljene su u tablici 4-3.

Tablica 4-3 Količine plinova koje se mogu osloboditi iz ING-a (NIREX, 2005)

Plin	Izvor	Vrijednosti za gorivni element
Radon [m ³ /a] ¹	Radioaktivni raspad radija	5x10 ⁻¹⁴
Helij [m ³ /a]	Od α emitera	1x10 ⁻³
Tricij [m ³ ukupno]	Zadržan u otpadu	5x10 ⁻⁴
Cl-36 [m ³ ukupno]	Zadržan u otpadu	1x10 ⁻⁴
CO/CO ₂ /CH ₄ [m ³ ukupno]	C-14 zadržan u otpadu	3x10 ⁻⁴

4.3. Bentonitna ispuna

U većini koncepata za odlaganje ING-a i VRAO-a se kao materijal za ispunu hodnika nakon odlaganja te kao materijal za ispunu prostora između spremnika i stijene planira koristiti bentonitna glina, osim u slučajevima odlaganja u slone dome kada se kao ispuna koristi usitnjena sol (Veinović i dr., 2015). Bentonitna glina je komercijalni naziv za smektitnu (montmorilonitnu) grupu minerala glina koje nastaju uglavnom kao rezultat alteracije kiselih tufova i vulkanskog stakla (Halдар i Tišljар, 2014). Kemijska formula montmorilonita je:



Bentonit karakterizira velika moć upijanja vode (osobito u slučaju natrijskog bentonita) kao i vrlo slaba propusnost. Razlog tome je struktura minerala o obliku tri sloja. Jedan sloj predstavlja aluminijev oktaedar smješten između dva sloja SiO₄ tetraedara. Molekule vode se postavljaju između troslojnih iona Al, Mg i Fe. Takvo „pakovanje“ se može proširiti ili suziti što se manifestira promjenom volumena ili jakim bubrenjem. Smektit kristalizira u monoklinskom sustavu u obliku malih ploča (slojeva).

Upravo poradi ovih karakteristika, bentonit je odabran kao materijal ispune između spremnika s ING-om, odnosno VRAO-m i stijene, kao i za zatvaranje iskopanih hodnika budućeg odlagališta. Koeficijent propusnosti bentonitne gline je oko 1x10⁻¹² m/s što ga čini

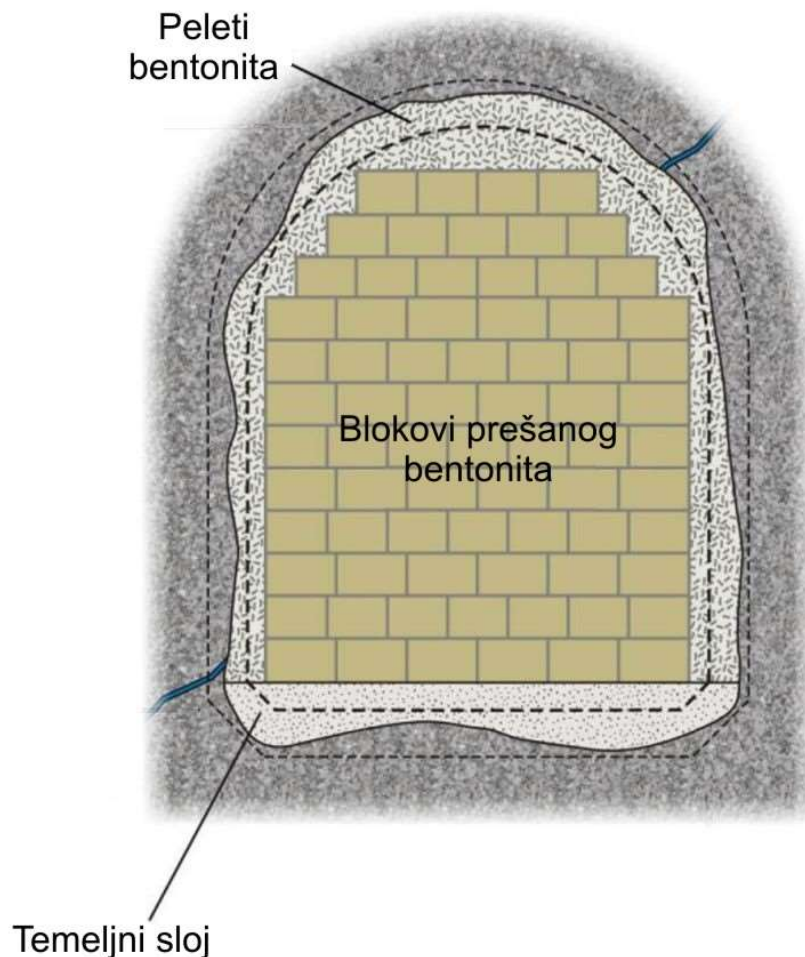
¹ a – *anum* (godina)

idealnim materijalom ispune. S obzirom da je postojan te da je u većini slučajeva slabo osjetljiv na vanjske utjecaje (u kemijskom smislu), redovito se bira kao idealan materijal ispune (Juvankoski, 2010).

Bentonit će se koristiti na dva mjesta:

- Materijal za ispunu prostora između spremnika i stijene (prešani bentonit u obliku prstenova i diskova)
- Materijal za ispunu hodnika (ili kao blokovi prešanog bentonita i peleti bentonita za popunjavanje prostora ili kao smjesa bentonita i drobljene stijene u kojoj se odlaže).

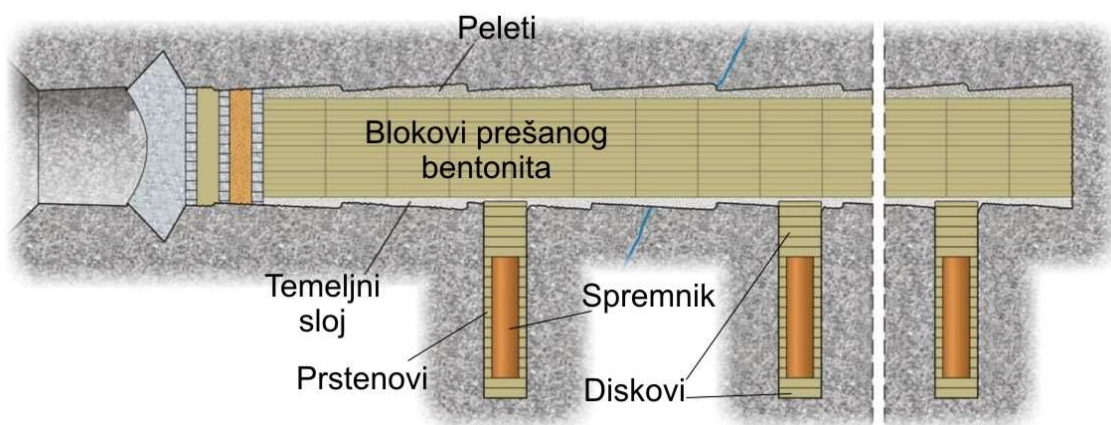
Na slici 4-11 prikazan je način zapunjavanja hodnika bentonitnim blokovima i peletima bentonita.



Slika 4-11 Zapunjavanje hodnika blokovima prešanog bentonita i bentonitnim peletima (Keto i dr., 2012)

Alternativa blokovima kao materijal za zapunjavanje hodnika može se koristiti i smjesa drobljene stijene u kojoj se gradi odlagalište, ukoliko to stijenski materijal dozvoljava, s obzirmo na njegove karakteristike i bentonita u prahu ili peletima.

S druge strane, kao materijal za ispunu prostora između stijene i spremnika koristit će se strogo prešani bentonit u obliku prstenova, odnosno diskova (slika 4-12).



Slika 4-12 Zapunjavanje hodnika i bušotina bentonitom (Keto i dr., 2012)

Kako bi se postigla željena čvrstoća prstenova i diskova od bentonita, priprema se provodi prešanjem (slika 4-13).



Slika 4-13 Priprema prstenova od bentonita kao materijala zapunjavanja prostora između spremnika i stijene (Bennett, 2012).

Traženi parametri za bentonit dani su u tablici 4-4.

Tablica 4-4 Traženi parametri za bentonit u svim oblicima (Keto i dr., 2012; Juvankoski, 2010).

Parametar	Blokovi	Peleti	Prstenovi i diskovi
Dimenzije	550 x 470 x 330 mm	6,5 mm promjer 5-20 mm duljine	400 mm visina 1050 mm unutrašnji promjer 1700 mm vanjski promjer
Masa	183-196 kg	-	1907 kg disk 1151 kg prsten
Sadržaj bentonita	30-38 %	75-90 %	75 %
Suha gustoća	1990-2070 kg/m ³	900-1100 kg/m ³ (2.07 g/cm ³ za pojedini pelet)	2100 kg/m ³
Postotak vlage pri ugradnji	17,5-37,5 %	8,5-9,5 %	Oko 16 %

Podaci o dimenzijama prstenova i diskova mogu se razlikovati, ali uvjet je da pri ugradnji razmak između njih i stijene bude oko 25 mm, dok razmak između prstenova i spremnika treba biti 10 mm (Juvankoski, 2010).

4.4. Stijenski materijal

Geološko odlaganje temelji se na izolaciji otpada u geosferi na lokacijama za koje se očekuje da budu stabilne kroz dugi vremenski period. Koncepti odlagališta i potencijalne stijene za odlaganje razlikuju se od države do države, ali tipovi stijena obično uključuju: magmatske intruzivne i ekstruzivne stijene, sedimentne stijene (visoki sadržaj minerala glina) i sol (solne dome). Izbor stijene za odlaganje većinom ovisi o raspoloživim geološkim formacijama odgovarajuće debljine i stanja (IAEA, 2009b).

Gledano s inženjerske strane, osim u izrazito propusnim i slabim stijenama (loših mehaničkih karakteristika) te u područjima povećane vjerojatnosti pojave potresa, moguće je pronaći stijenu koja bi, zavisno od primijenjenog koncepta odlaganja, mogla poslužiti za izgradnju odlagališta. Pojedini koncepti su upravo prilagođeni primjeni u relativno „lošim geološkim sredinama“, no svakako cijeloj stvari više ide u korist u koliko se odabere lokacija s monolitnom stijenom dobrih geomehaničkih karakteristika, u mirnom geološkom okolišu koji kroz duži vremenski period nije bio izložen osobito značajnim morfološkim i drugim promjenama.

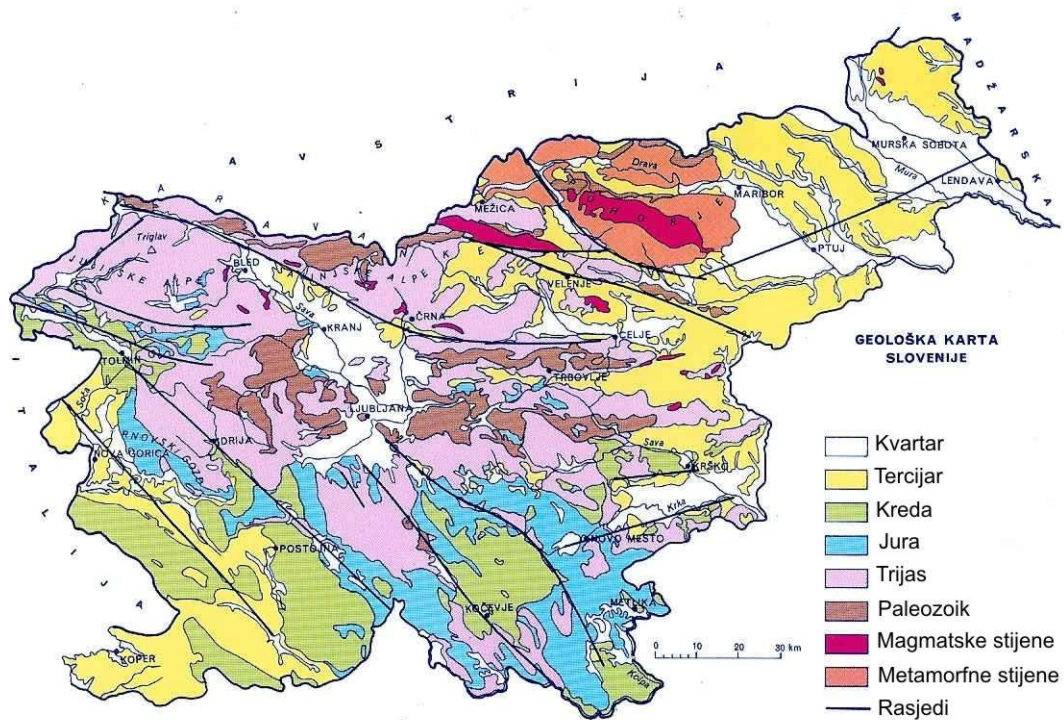
Pojednostavljeni kriteriji za odabir lokacije, dobrim dijelom u svezi karakteristika stijene u kojoj će se odlagati, dani su u tablici 4-5.

Tablica 4-5 Pojednostavljeni kriteriji za odabir lokacije dubokog geološkog odlagališta s gledišta sigurnosti i tehničke izvedivosti (SFOE, 2008).

Skupina kriterija	Čimbenici
1. Svojstva stijene za odlaganje i efektivne zone zadržavanja (izolacije)	1.1 Prostorni opseg 1.2 Efekt hidrauličkih barijera 1.3 Geokemijski uvjeti 1.4 Putevi širenja (radionuklida)
2. Dugotrajna stabilnost	2.1 Stabilnost lokacije i svojstva stijene 2.2 Erozija 2.3 Utjecaji izazvani odlagalištem 2.4 Sukob uporabe
3. Pouzdanost geoloških istraživanja	3.1 Jednostavnost karakterizacije stijene 3.2 Istraživost prostornih uvjeta 3.3 Predvidivost promjena kroz duge vremenske periode
4. Inženjerska podobnost	4.1 Svojstva i uvjeti u svezi mehanike stijena 4.2 Pristup u podzemlje i drenaža

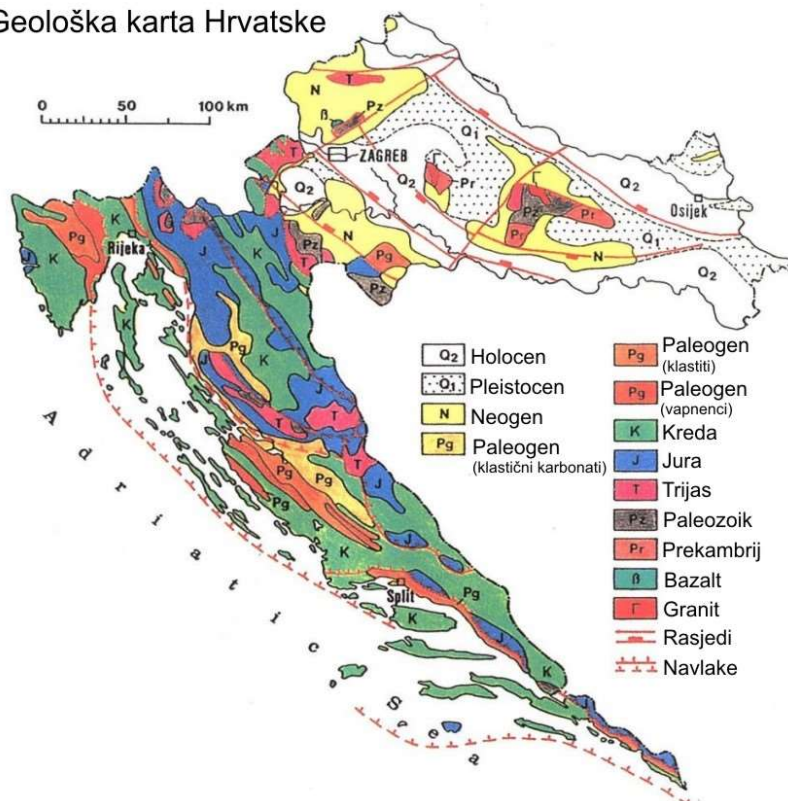
S obzirom na geologiju Republike Hrvatske i Republike Slovenije, nije izgledno da će buduće odlagalište biti izgrađeno u glini, glinjaku, muljnjaku, solnoj domi i sličnim materijalima. Najvjerojatniji stijenski materijal u kojem bi se gradilo odlagalište su eruptivne stijene ili, u slučaju pronalaska kvalitetne stijenske mase, u metamorfnim stijenama. S obzirom da do sada nisu službeno provedena istraživanja u svrhu odabira lokacije za odlagalište ING-a u Hrvatskoj i Sloveniji te da jedini znanstveni rad koji se bavi tom tematikom (Borojević Šoštarić i Neubauer, 2012) primarno govori o lokacijama s magmatskim stijenama u Hrvatskoj i, konačno, slovensko generičko rješenje govori o mogućem odlaganju u kristaliničnoj (magmačkoj) stijeni, **za potrebe izrade rada model je postavljen u magmačkoj stijeni te je i konceptualno rješenje prilagođeno tome.**

Pojednostavljene geološke karte Republike Hrvatske i Republike Slovenije dane su na slikama 4-14 i 4-15.



Slika 4-14 Pojednostavljena geološka karta Republike Slovenije (Jemec Auflič i dr., 2015)

Geološka karta Hrvatske



Slika 4-15 Pojednostavljena geološka karta Hrvatske (Dunda i Kujundžić, 2000).

5. NUMERIČKI MODEL TERMIČKO-HIDRO-MEHANIČKIH EFEKATA

Numeričko modeliranje termičko-hidro-mehaničkih efekata (THME) se za potrebe projektiranja odlagališta ING-a ili VRAO-a obično provodi programima Abaqus (Åkesson i dr., 2010) i Code_Bright (Åkesson i dr., 2010, Toprak i dr., 2012; Toprak i dr., 2013) s obzirom da oni imaju niz prednosti. CODE-BRIGHT ima mogućnost 3D modeliranja i unosa dinamičkih promjena u sustav, kao i jednostavnu mogućnost modeliranja uz unos funkcijskih promjena parametara tijekom vremena. S obzirom da nije postojala mogućnost rada u ovim programima, a da je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu na raspolaganju programski paket GeoStudio, izrada numeričkih modela i simulacije su provedene u njemu.

GeoStudio je programski paket koji uključuje niz programa za modeliranje:

- SLOPE/W – program za analizu pokosa od tla i stijene
- SEEP/W – program za analize toka podzemne vode u saturiranim i nesaturiranim uvjetima u poroznoj sredini
- SIGMA/W program za analizu naprezanja i deformacija tla i strukturnih materijala
- QUAKE/W – program za analizu likvefakcije uzrokovane potresima i dinamičkog opterećenja
- TEMP/W – program za analizu prijenosa topline i faznih promjena u poroznoj sredini
- CTRAN/W – program za analizu transporta tekućina i plinova u poroznoj sredini
- AIR/W – program za analizu cirkulacije zraka u poroznim medijima.

Geostudio omogućuje paralelno korištenje modela u više programa čime je olakšano simuliranje kompliciranih uvjeta u geološkoj sredini. Jedan od ključnih problema je mogućnost izrade samo 2D modela.

5.1. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata (MKE) je metoda numeričke analize pomoću koje se kontinuirani sustav zamjenjuje diskretnim. Pri tome formira se sustav algebarskih jednadžbi kojima se aproksimira određeni problem. Bit aproksimacije kontinuuma diskretiziranim sustavom jest u (Brnić, 1996):

- 1) Podjeli kontinuuma pomoću linija, površina ili volumena u odgovarajući broj poddomena konačnih dimenzija, koje nazivamo konačnim elementima.
- 2) Pretpostavci da su konačni elementi međusobno spojeni u konačnom broju čvorova, a zajednički skup takvih konačnih elemenata pomoću kojih je kontinuirani sustav pretvoren u diskretizirani sustav nazivamo mrežom elemenata. Zamišljamo da se preko čvorova mreže prenose naprezanja i pomaci s jednog elementa na drugi.
- 3) Opisivanju stanja u svakom konačnom elementu pomoću interpolacijskih funkcija (polje pomaka, polje naprezanja).

Tijekom modeliranja problema potrebno je voditi računa omogućava li odabrana mreža konačnih elemenata opisivanje očekivanog deformiranog problema. Točnost samog proračuna ovisiti će o gustoći mreže konačnih elemenata te o samom izboru konačnih elemenata. Odabir vrste konačnih elemenata ovisi o vrsti i konfiguraciji problema. Kada se govori o vrsti konačnih elemenata, misli se na broj stupnjeva slobode po čvoru elementa (Brnić, 1996).

Iz zadanog opterećenja i nekih poznatih čvornih pomaka, te na osnovi pretpostavljene funkcije pomaka u polju konačnih elemenata može se odrediti raspored naprezanja i deformacija u elementu. Veličine naprezanja i deformacija određuju se jednadžbama elastomehanike. Kao osnovne nepoznate veličine mogu se uzeti komponente tenzora naprezanja, kada se radi o metodi sila ili komponente tenzora deformacija, kada se radi o metodi pomaka. U oba slučaja potrebno je zadovoljiti uvjete ravnoteže za svaki element i zadanu konstrukciju, te uvjet kompatibilnosti (Brnić, 1996).

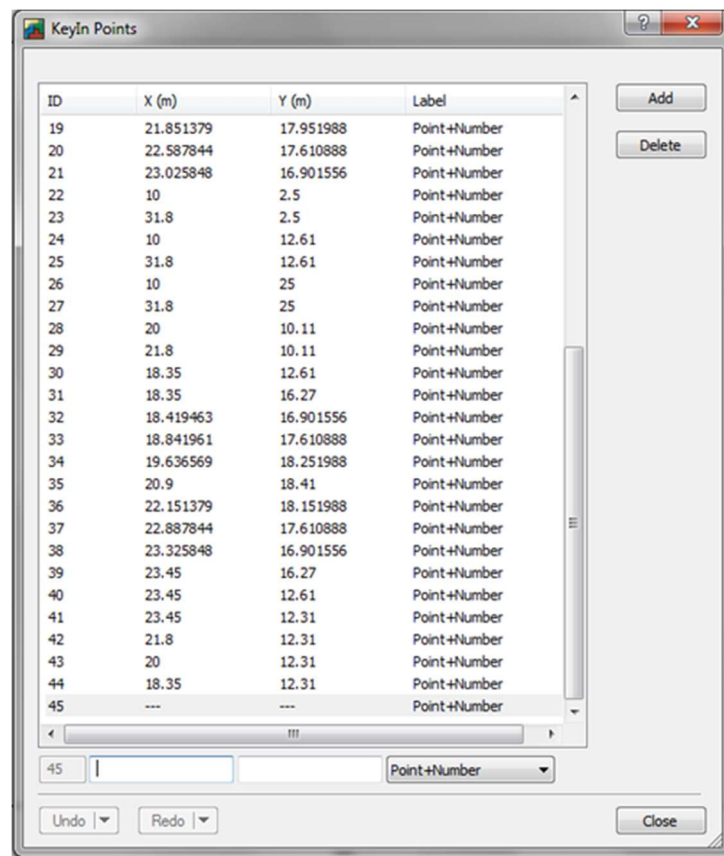
Kriterij kompatibilnosti glasi: za konvergenciju rješenja po MKE potrebno je da su elementi konformni, tj. kompatibilni, što znači da varijable i njihove derivacije do $m-1$ stupnja, u kojem je m stupanj najviše derivacije funkcionala, moraju biti kontinuirane na svim granicama između elemenata (Brnić, 1996).

Uvjeti ravnoteže za pojedinačni element zadovoljeni su primjenom principa virtualnih pomaka (varijacijska metoda). Za vanjske sile uvjeti ravnoteže postavljaju se u klasičnom obliku. Uvjeti kompatibilnosti u čvorovima konačnih elemenata zadovoljeni su zbog istih komponenti pomaka za sve elemente koji se sastaju u jednom čvoru. Uvjeti kompatibilnosti za točke u polju elemenata zadovoljavaju se izborom kontinuirane funkcije za pomake. Uvjeti duž stranica konačnih elemenata većinom nisu ispunjeni, što se korigira uvođenjem čvorova duž stranica (Brnić, 1996).

5.2. Postupak modeliranja u programu Geostudio

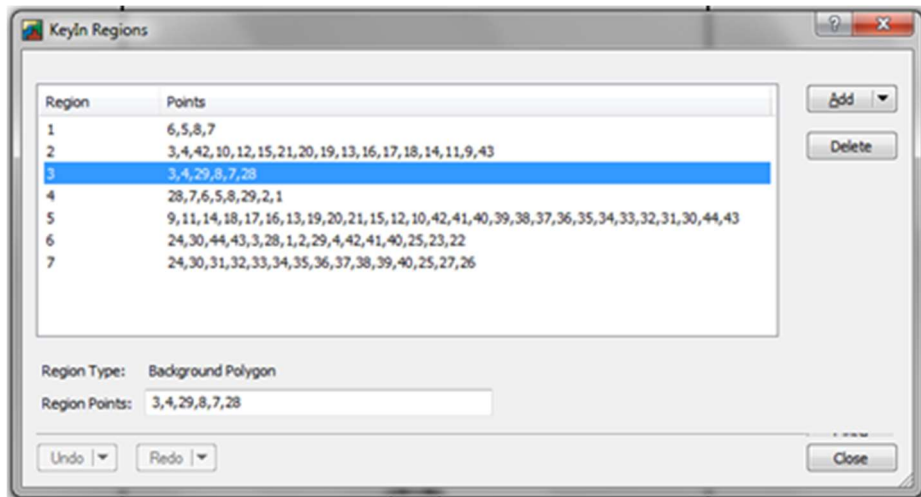
Numeričko modeliranje u potprogramima programa Geostudio svodi se na 3 faze. Prva faza uključuje postavljanje geometrije modela, druga faza je provođenje samog proračuna te u trećoj fazi slijedi prikaz podataka.

Geometrija modela definirana je pomoću točaka. U programu postoje dvije opcije zadavanja točaka, ručnim iscrtavanjem ili zadavanjem pomoću koordinata. U sklopu ovog rada svi modeli definirani su koordinatama prema generičkom projektu odlagališta (Arao, 2019). Na slici 5-1 prikazano je sučelje za definiranje točaka modela.



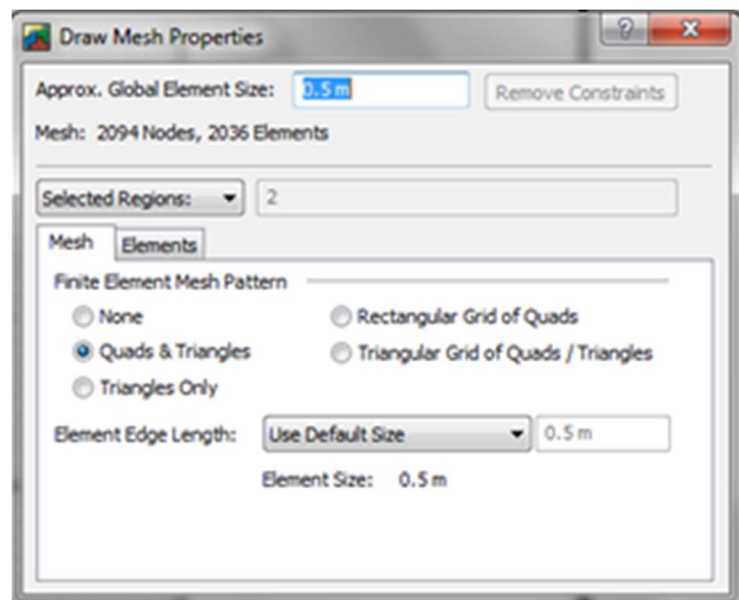
Slika 5-1 Unos točaka modela.

Nakon definiranja točaka, slijedi povezivanje u regije. Regije se mogu stvarati „ručno“ ili ispisivanjem niza točaka, koje program automatski spaja. Primjer unosa niza točaka koje su uključene u regiju prikazan je na slici 5-2.



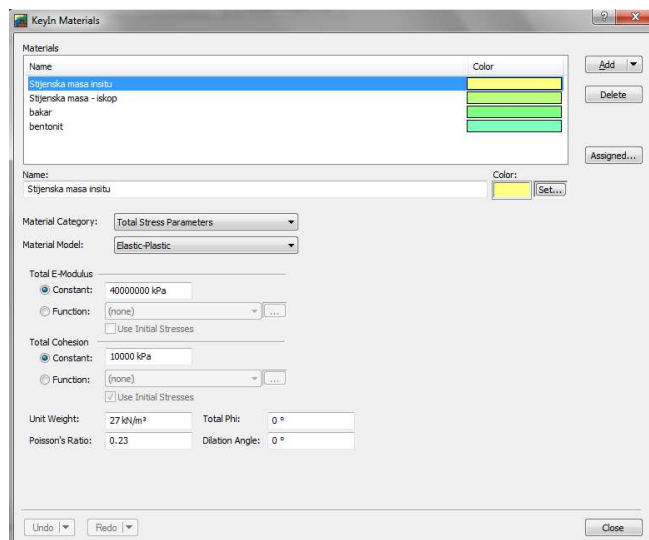
Slika 5-2 Definiranje regija.

Nakon što su stvorene sve regije koje čine model, slijedi diskretizacija modela. Diskretizacija modela predstavlja podjelu modela na određeni, konačni broj elemenata jednostavnih geometrija. U sklopu programa postoji mogućnost odabira vrste mreže i oblika konačnih elemenata, te određivanje gustoće mreže elemenata. Mreža elemenata može biti strukturirana, s konačnim elementima u obliku četverokuta, trapeza ili trokuta, te nestrukturirana, s elementima oblika četverokuta i trokuta. Prikaz odabira vrste elemenata mreže te gustoće nalazi se na slici 5-3.



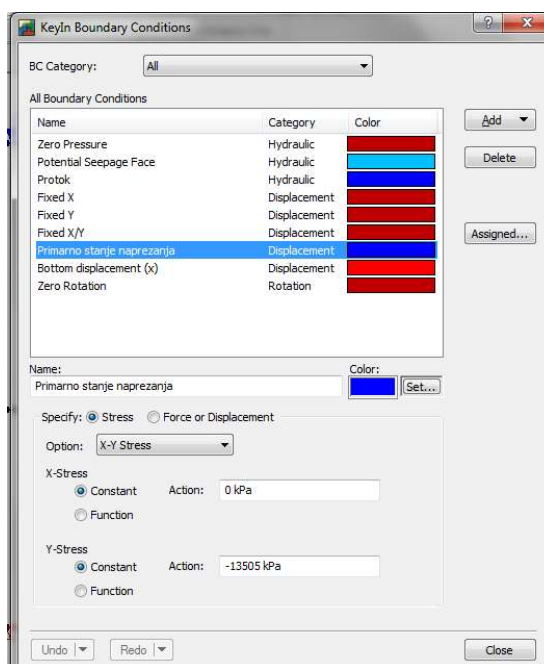
Slika 5-3 Definiranje mreže konačnih elemenata.

Slijedi zadavanje parametara materijala te definiranje graničnih uvjeta. Vrsta parametara materijala ovisit će o potprogramu koji se koristi te modelu, te je na slici 5-4 prikazan primjer zadavanja parametara iz potprograma SIGMA/W.



Slika 5-4 Zadavanje parametara materijala.

Zadnji korak prije provođenja verifikacije podataka je zadavanje graničnih uvjeta. Granični uvjeti uključuju pomake, sile, naprezanja, tlak vode, protok i drugo. Vrsta graničnih uvjeta koji se koriste ovisi o potprogramu i samom modelu, a na slici 5-5 prikazano je zadavanje graničnih uvjeta iz potprograma SIGMA/W.



Slika 5-5 Zadavanje graničnih uvjeta.

Nakon verifikacije podataka, slijedi proračun i prikazivanje podataka. Provođenje proračuna je u potpunosti automatizirano, te pri završetku svih faza dobivaju se rezultati u obliku grafičkog prikaza. GeoStudio omogućuje samostalnu izradu grafičkih prikaza rješenja za određene veličine (npr. grafički prikaz raspodjele naprezanja), automatski iscrtava Mohrove kružnice naprezanja za zadane točke, itd. U tekstu koji slijedi biti će prikazani osnovni modeli koji su se koristili u numeričkoj analizi te grafički prikazi rješenja dobiveni na temelju proračuna.

5.3. Odabrani materijali i osnovne pretpostavke

Za potrebe izrade numeričkih modela trebalo je definirati materijale i njihove karakteristike, koncept odlaganja i druge parametre. Tako su u obzir uzeti i odabrani slijedeći čimbenici i parametri:

1. **Koncept odlaganja** – odabran je švedski koncept SKB-3V, gdje se spremnici odlažu u kratke vertikalne bušotine izrađene iz odlagališnih tunela. Detaljni podaci (dimenzije) su dani ranije u tekstu (slika 4-6 i 4-7).
2. **Materijal ispune** – odabran je natrijski bentonit, generičkih svojstava poput Wyoming bentonita.
3. **Spremnik** – odabran je spremnik predložen u generičkom rješenju Republike Slovenije (ARAO, 2019) s vanjskom košuljicom od bakra s po 4 istrošena gorivna elementa (slika 4-7).
4. **Stijena** – odabrana je magmatska stijena (granodiorit), generičkih svojstava, nalik na one u Hrvatskoj i Sloveniji.
5. **Pojednostavljenja** – su odabrana po logici da ne umanje kvalitetu modela i simulacija, ali da olakšaju njihovu izradu:
 - a. 2D modeli
 - b. Izostanak podgrade, pretpostavka je da se radi o nosivoj stijeni prve kategorije
 - c. Bentonit je uzet kao istovrsni materijal (parametri su identični za ispunu prostora spremnik-stijena i ispunu tunela
 - d. Profil odlagališnog tunela sa samo četiri bušotine
 - e. Vremensko ograničenje simulacija – 25 godina.

6. **Oštećena zona** – je uzeta u obzir u smislu izrade tunela metodom bušenja i miniranja.

7. **Dubina izrade objekta** – je pretpostavljena na 500 m.

Ostali parametri bitni za izradu modela bit će dani uz svaki pojedini model.

5.4. Proračun u programu „SIGMA/W“

Program SIGMA/W je korišten za simulaciju naprezanja i pomaka tijekom izrade podzemnih prostorija odlagališta. Model je ograničen na dva presjeka: (1) odlagališni tunel (skraćena verzija s transportnim tunelom u sredini i dva odlagališna sa strana s po 4 bušotine, kako bi bilo razlučivije) i (2) poprečni profil kroz odlagališni tunel i jednu bušotinu.

Jednadžbama 5.1-5.3 prikazan je način kojim se izračunavaju pomaci, maksimalna naprezanja i maksimalne sile. Izraz za izračunavanje pomaka u točki (XY pomak) (GEO-SLOPE, 2013):

$$\delta_{xy} = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} \quad (5.1)$$

gdje su:

δ_{xy} – ukupni pomak,

δ_x – pomak u smjeru x ,

δ_y – pomak u smjeru y .

Izraz za izračunavanje vrijednosti sile u Gaussovoj točki (XY sila):

$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (5.2)$$

gdje su:

F_{xy} – ukupna (rezultantna) sila,

F_x – sila u smjeru x ,

F_y – sila u smjeru y .

Izraz za izračunavanje maksimalnih naprezanja u Gaussovoj točki:

$$\sigma_{max} = \frac{(\sigma_y + \sigma_x)}{2} + \sqrt{\left[\frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (5.3)$$

gdje su:

σ_{max} –maksimalno normalno naprezanje,

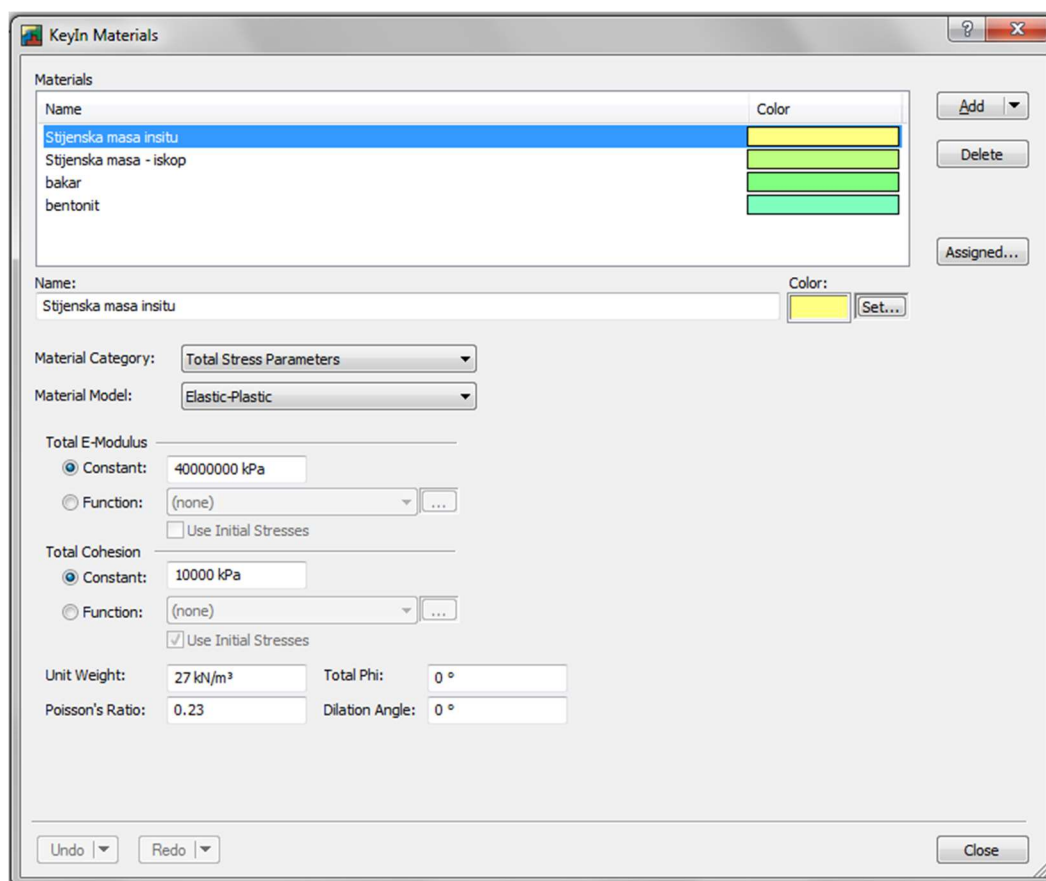
σ_y – naprezanje u smjeru y ,

σ_x – naprezanje u smjeru x ,

τ_{xy} – posmično naprezanje.

Maksimalna naprezanja i sile računaju se kao vrijednosti na elementima Gaussovih točaka (MKE). Te vrijednosti se projiciraju u čvorove, kako bi se dobile vrijednosti u čvorovima koji služe za grafički prikaz rješenja. (SIGMA/W, 2007).

Na slici 5-6 dan je primjer sučelja za unos parametara materijala, konkretno za neporemećenu stijensku masu, a parametri odabrani za izradu modela su dani u tablici 5-1.



Slika 5-6 Sučelje za unos parametara materijala u program SIGMA/W.

Tablica 5-1 Parametri potrebni za simulaciju u programu SIGMA/W.

Materijal	Kategorija materijala	Model materijala	Youngov modul elastičnosti E [kPa]	Kohezija c [kPa]	Jedinična težina γ [kN/m ³]	Poissonov koeficijent μ
Granodiorit in situ	Ukupni parametri naprezanja	Elasto-plastični	40000000	10000	27	0,23
Granodiorit poremećen			2000000	6000	26	0,28
Bentonit			10000000	20	20,59	0,3
Bakar		Linearno elastični	1,17x10 ⁸	-	87,573	0,36

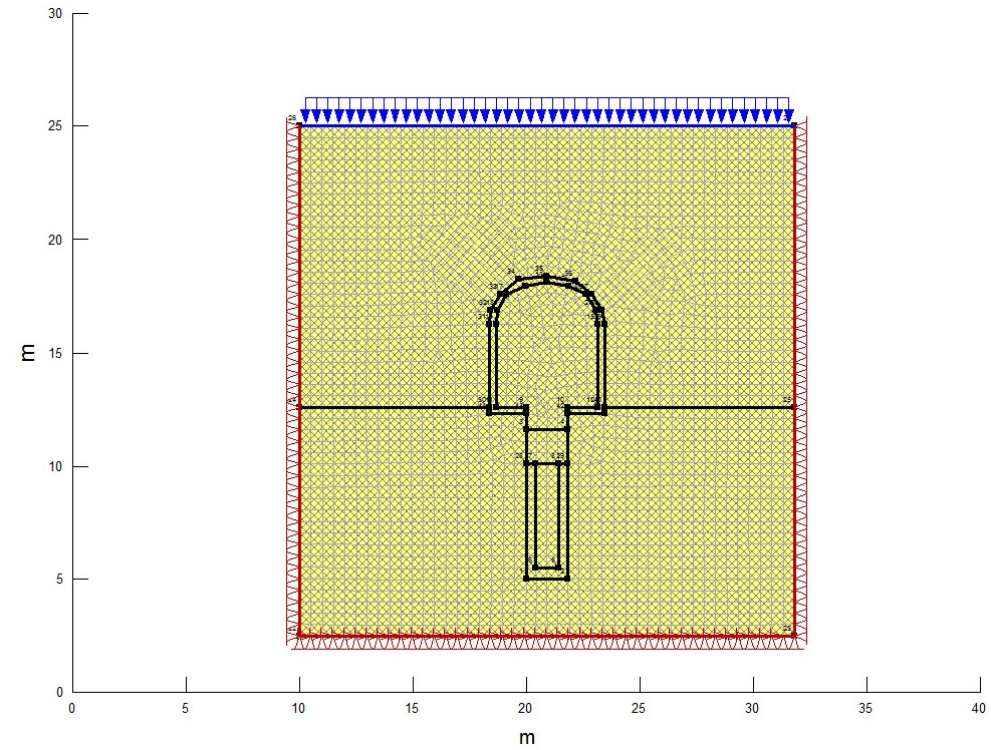
Granični uvjeti koje je trebalo zadati za proračun stanja naprezanja i pomaka dani su u tablici 5-2.

Tablica 5-2 Granični uvjeti za proračun stanja naprezanja i pomaka u programu SIGMA/W.

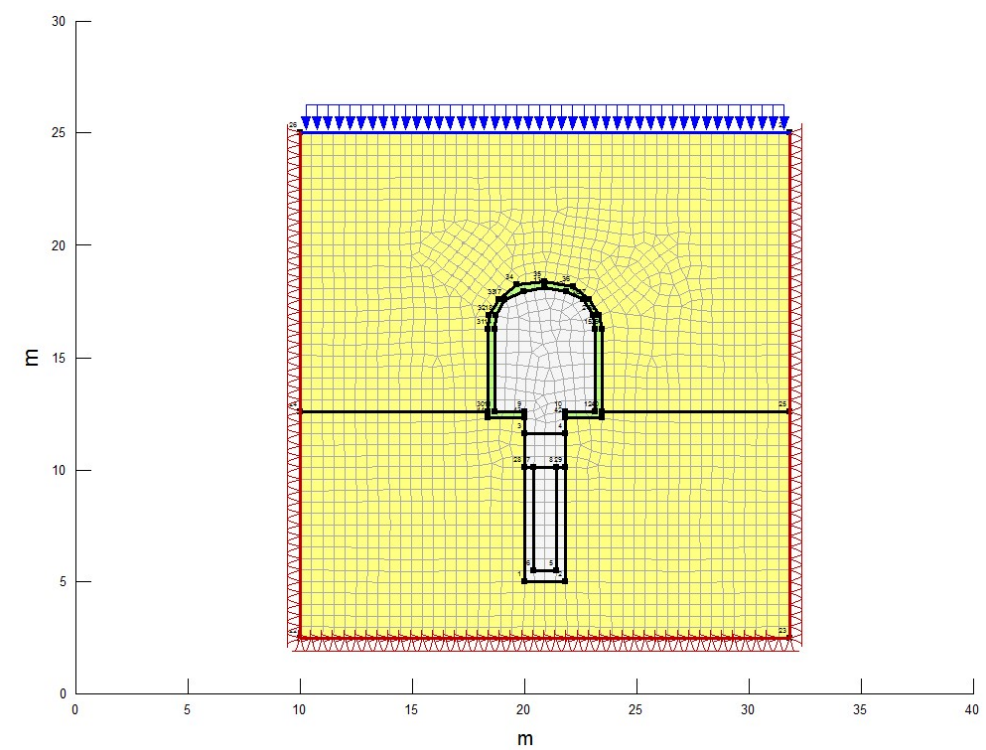
Granični uvjet	Kategorija	Tip	Iznos
Protok	Hidraulički	Jedinični tok	$1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
Fixed x	Pomaci	x - pomak	0 m
Fixed x/y	Pomaci	x – pomak	0 m
		y - pomak	0 m
Prirodno stanje naprezanja	Naprezanje	x naprezanje	0 kPa
		y naprezanje	13505 kPa

Osnovni model s mrežom konačnih elemenata, po fazama, prikazan je na slici 5-7. Definirane su slijedeće „regije“ materijala: intaktna stijena, zona poremećene stijenske mase oko tunela (debljine 30 cm), bakreni spremnik i bentonitna ispuna.

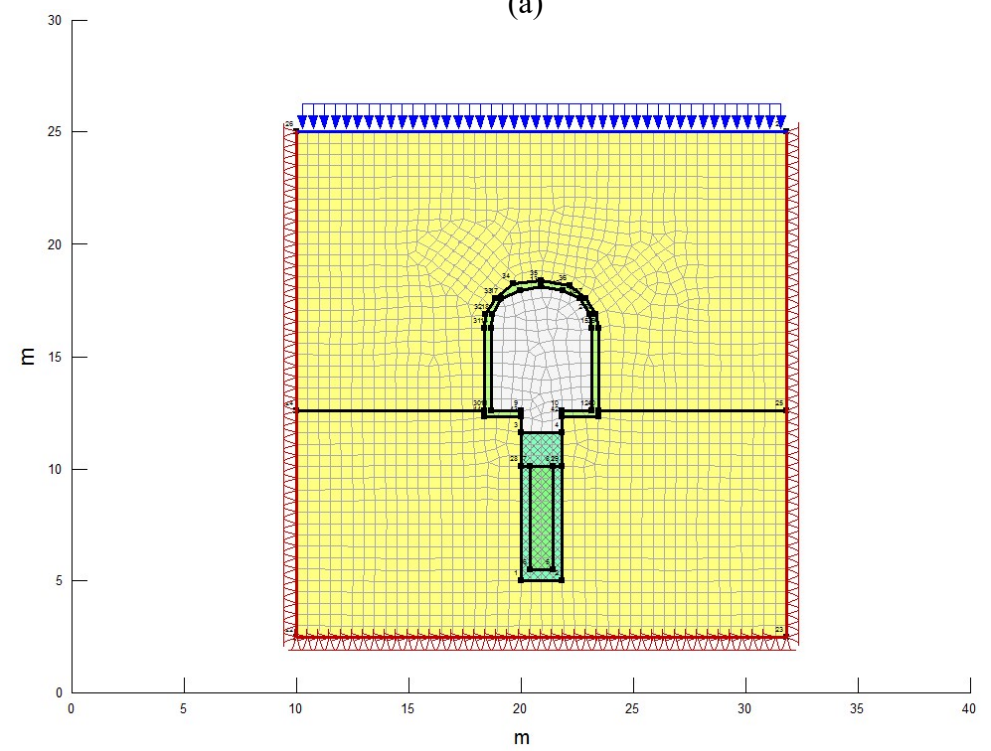
Model naprezanja u stijeni također je dan po fazama: stanje in situ (prije iskopa, s označenim „regijama“ različitih materijala koji će se primijeniti), stanje nakon iskopa tunela i izrade bušotine, stanje nakon ugradnje spremnika i materijala ispune (bentonita) i stanje nakon zapunjavanja odlagališnog tunela, a prikazan je na slici 5-8.



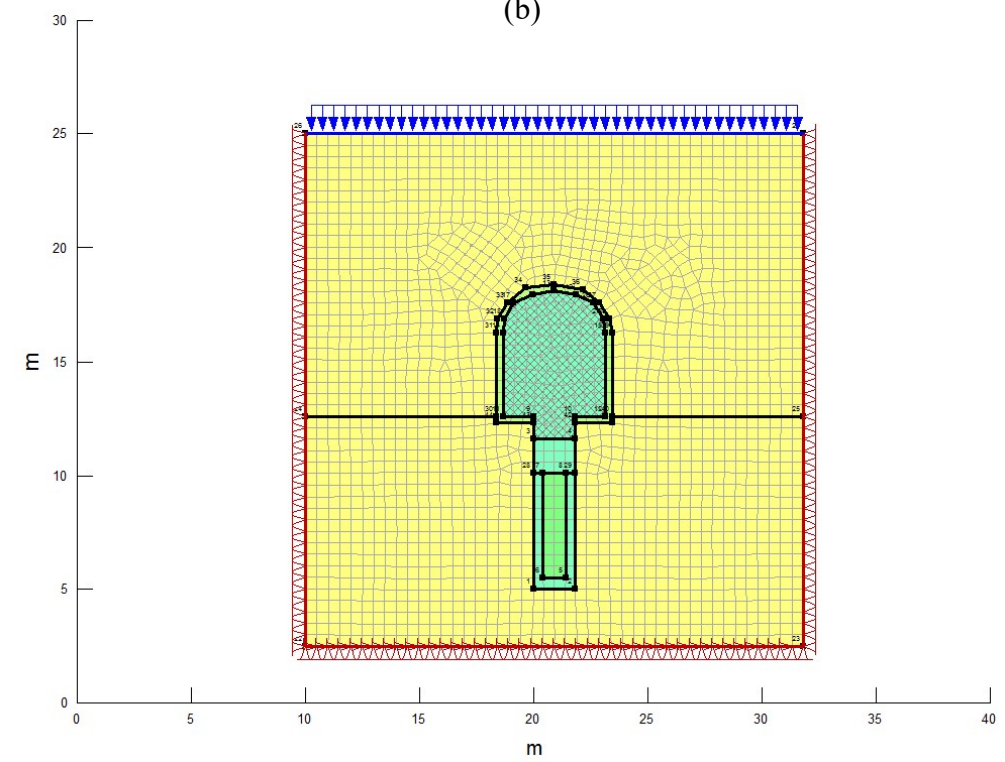
(a)



(b)

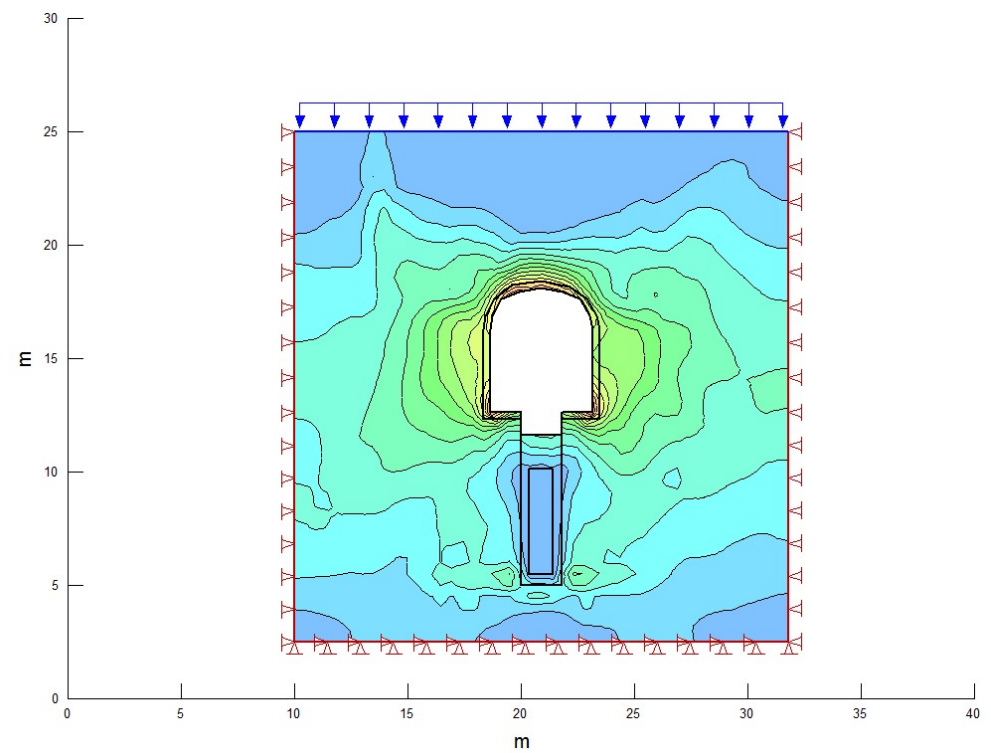
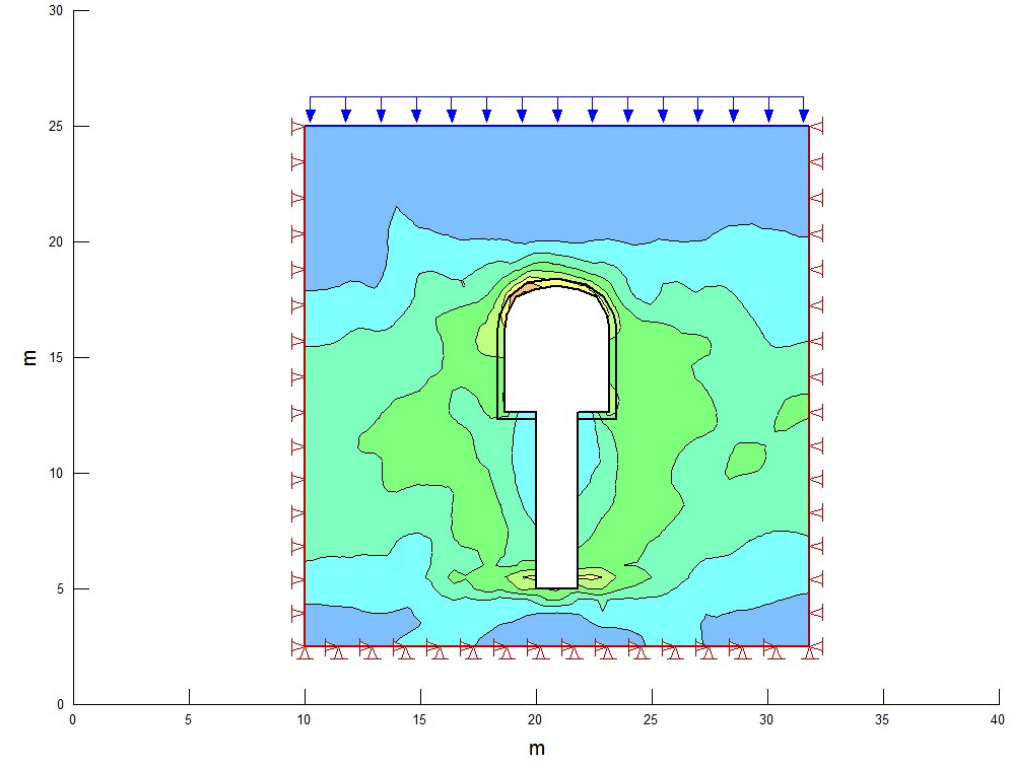
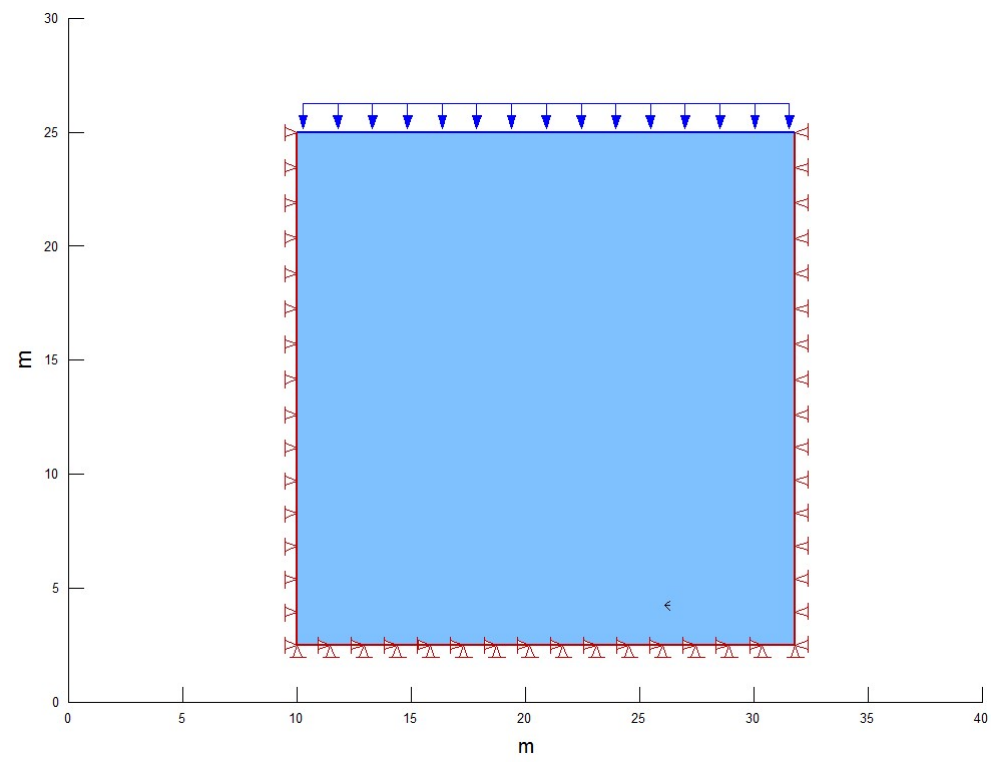


(c)

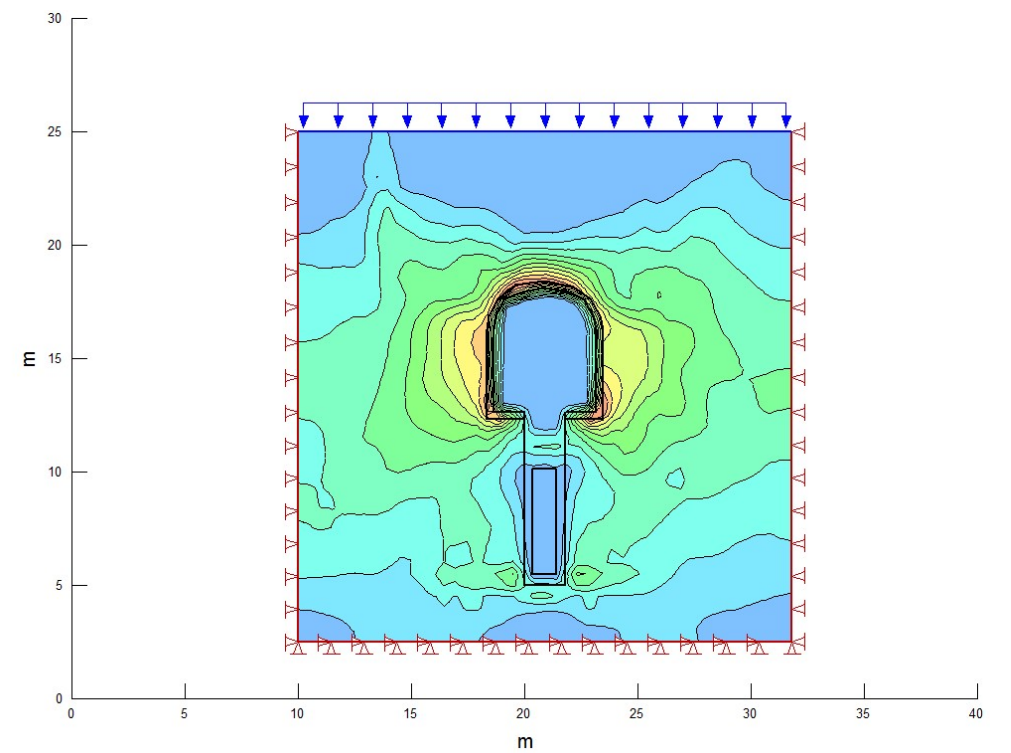


(d)

Slika 5-7 Osnovni model s mrežom konačnih elemenata za proračun: (a) stanje in situ (prije iskopa, s označenim „regijama“ različitih materijala koji će se primijeniti), (b) stanje nakon iskopa tunela i izrade bušotine, (c) stanje nakon ugradnje spremnika i materijala ispune (bentonita), (d) stanje nakon zapunjavanja odlagališnog tunela.



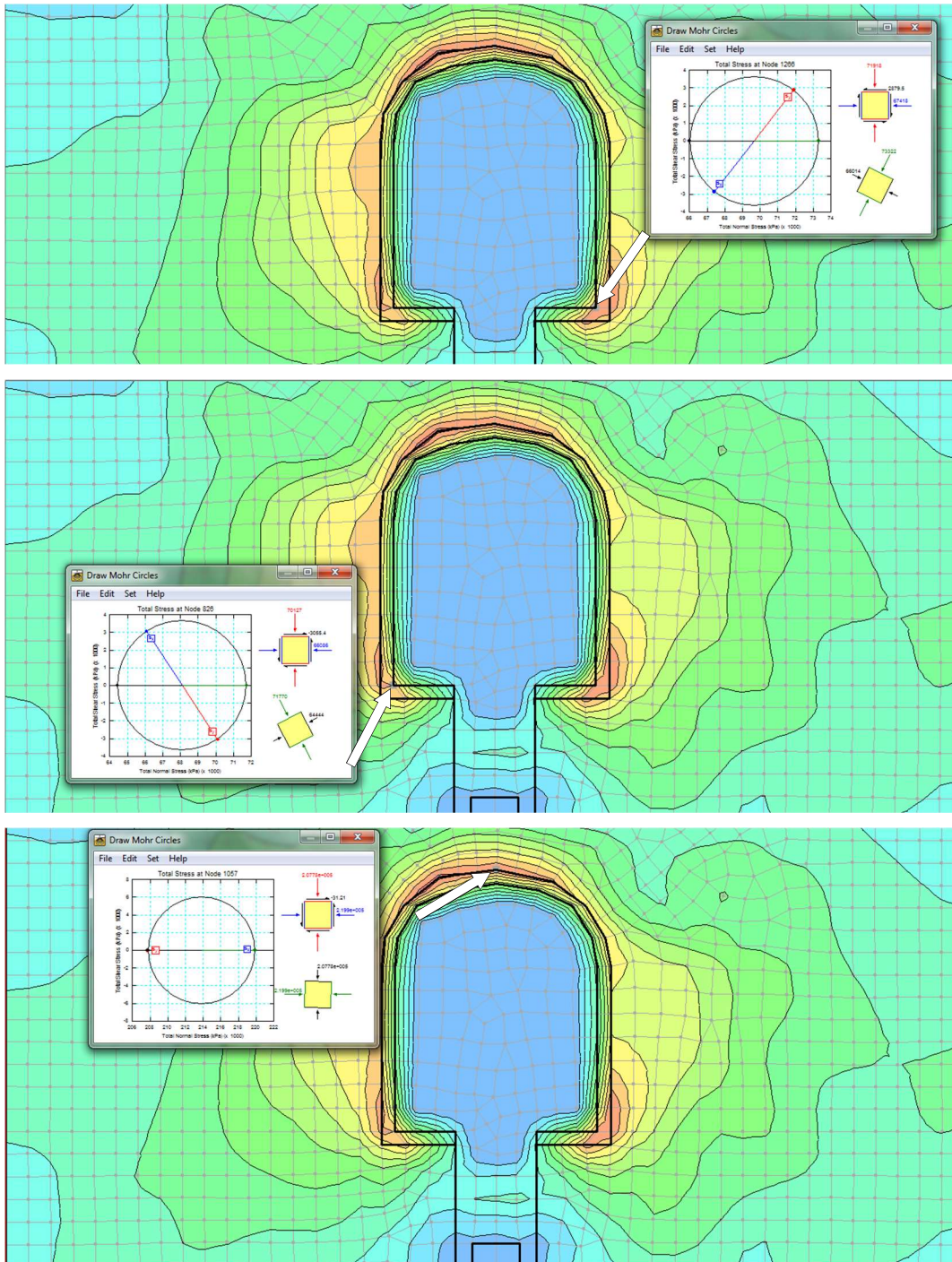
(c)



(d)

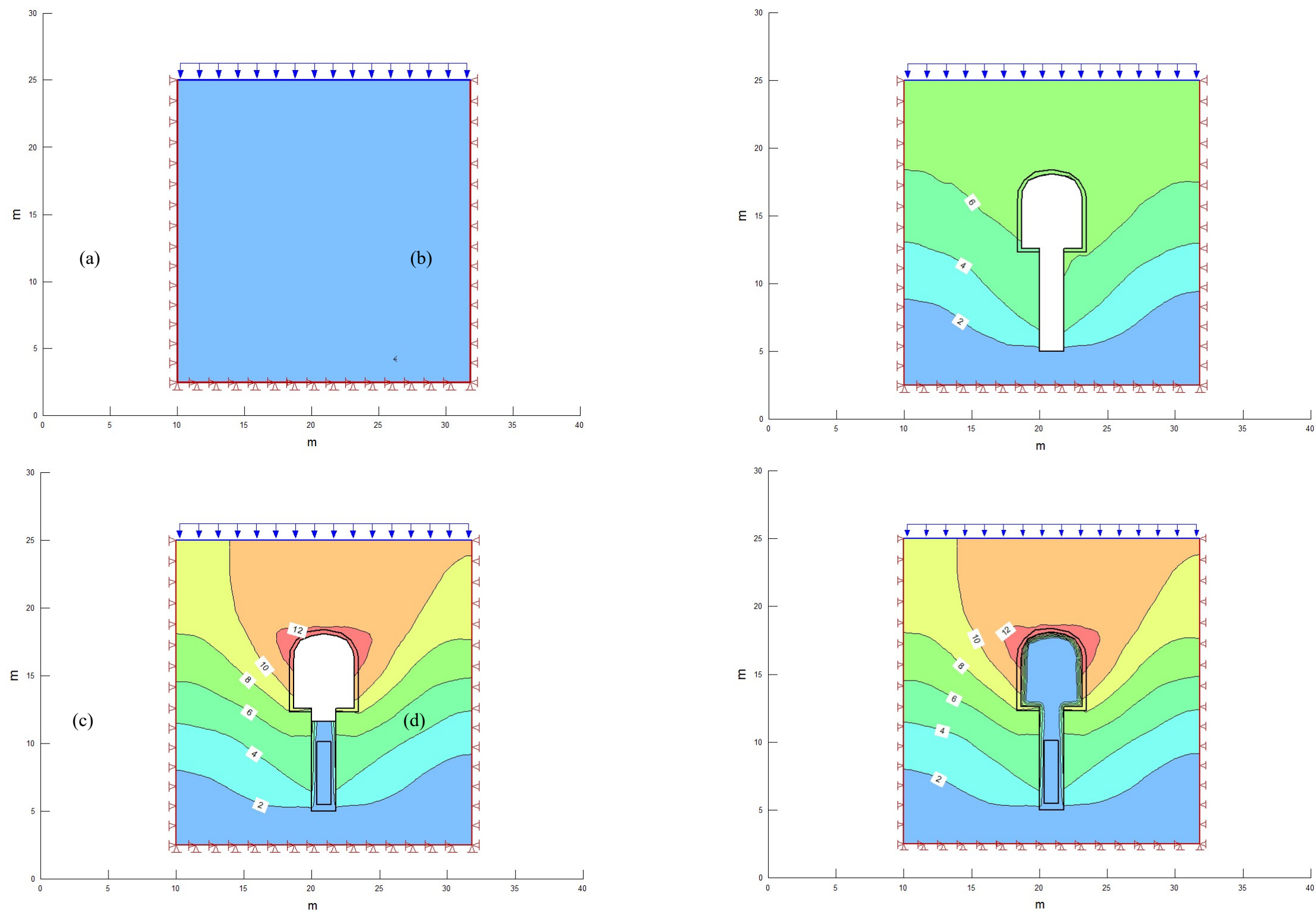
Slika 5-8 Model naprezanja u stijeni za poprečni presjek po bušotini za odlaganje, prema fazama: (a) stanje in situ (prije iskopa), (b) stanje nakon iskopa tunela i izrade bušotine, (c) stanje nakon ugradnje spremnika i materijala ispune (bentonita), (d) stanje nakon zapunjavanja odlagališnog tunela.

Kako je i za očekivati, **model je kao područja s kritičnim naprezanjima izdvojio kalotu odlagališnog tunela te rubove dna tunela.** U fazi iskopa, kritična naprezanja pojavljuju se i u dnu bušotine. Mohrove kružnice dane su za točke s maksimalnim naprezanjima (naznačene strelicama) i prikazane su na slici 5-9.



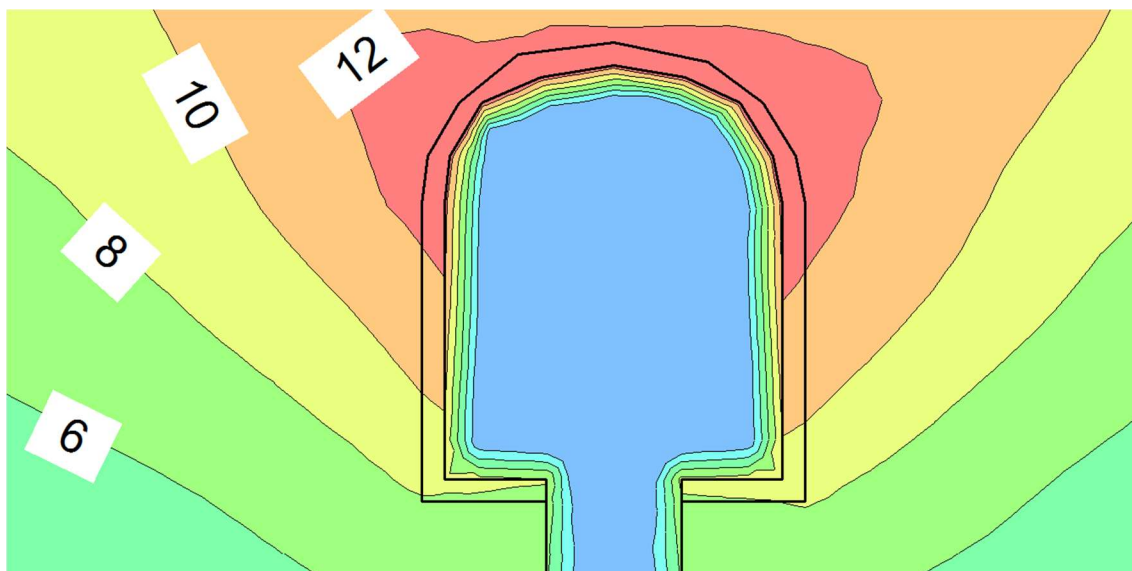
Slika 5-9 Mohrove kružnice za točke s maksimalnim naprezanjima (naznačene strelicama).

Modeli pomaka, prema fazama, dani su na slici 5-10.



Slika 5-10 Model pomaka u stijeni za poprečni presjek, prema fazama: (a) stanje in situ (prije iskopa), (b) stanje nakon iskopa tunela i izrade bušotine, (c) stanje nakon ugradnje spremnika i materijala ispune (bentonita), (d) stanje nakon zapunjavanja odlagališnog tunela.

Maksimalni pomaci iznose 12 mm (kalota tunela) što je unutar parametara sigurnosti. Detalj slike 5-10 d, prikazan je na slici 5-11, gdje se jasnije vide iznosi pomaka.



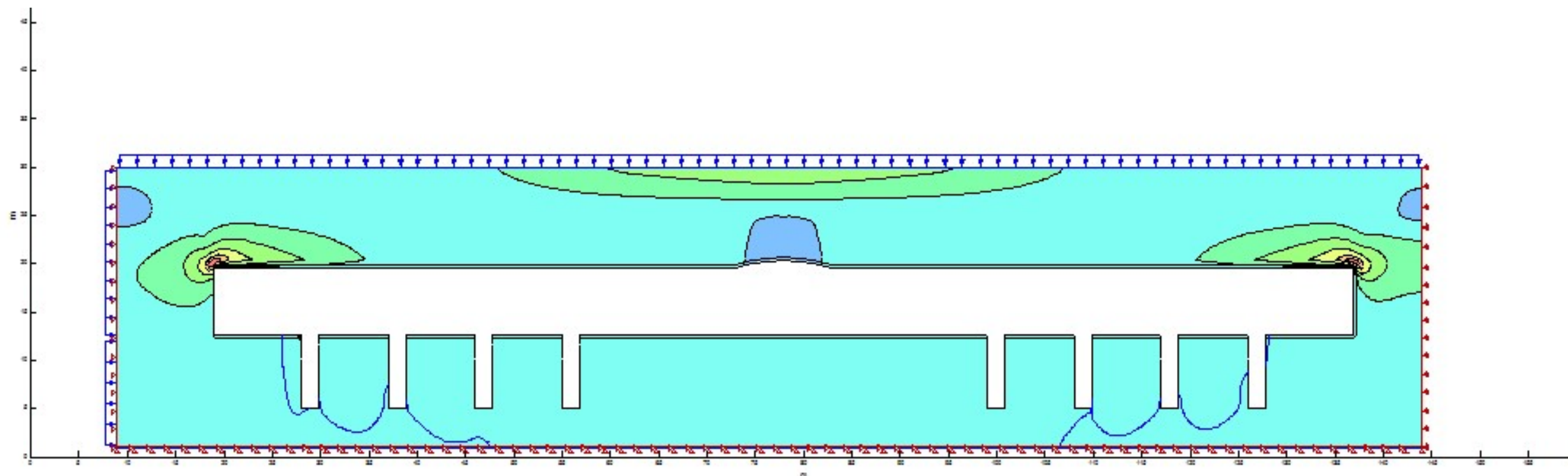
Slika 5-11 Model pomaka u stijeni za poprečni presjek po bušotini za odlaganje.

Maksimalni pomaci se, za model duž presjeka odlagališnog tunela, očekivano nalaze u kaloti transportnog tunela i dani su u tablici 5-3.

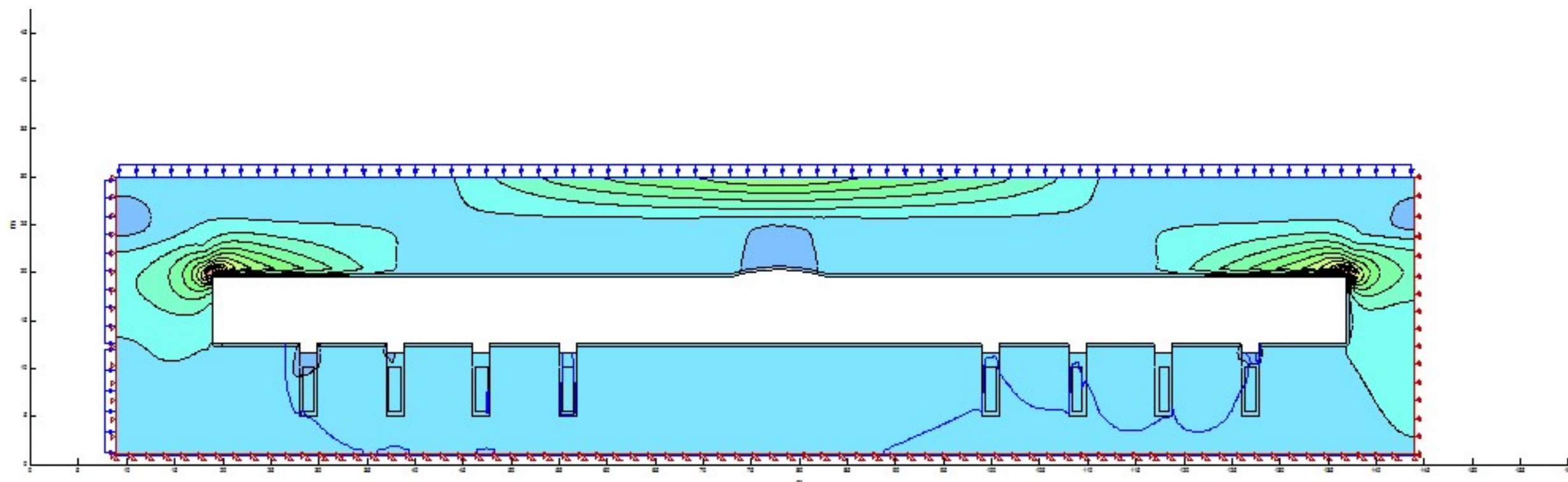
Tablica 5-3 Maksimalni pomaci (u kaloti transportnog tunela) prema radnim fazama.

Radna faza	Iznos maksimalnog pomaka [mm]
Iskop	28,24
Ugradnja spremnika	56,42
Zapunjeni odlagališni tuneli	56,57

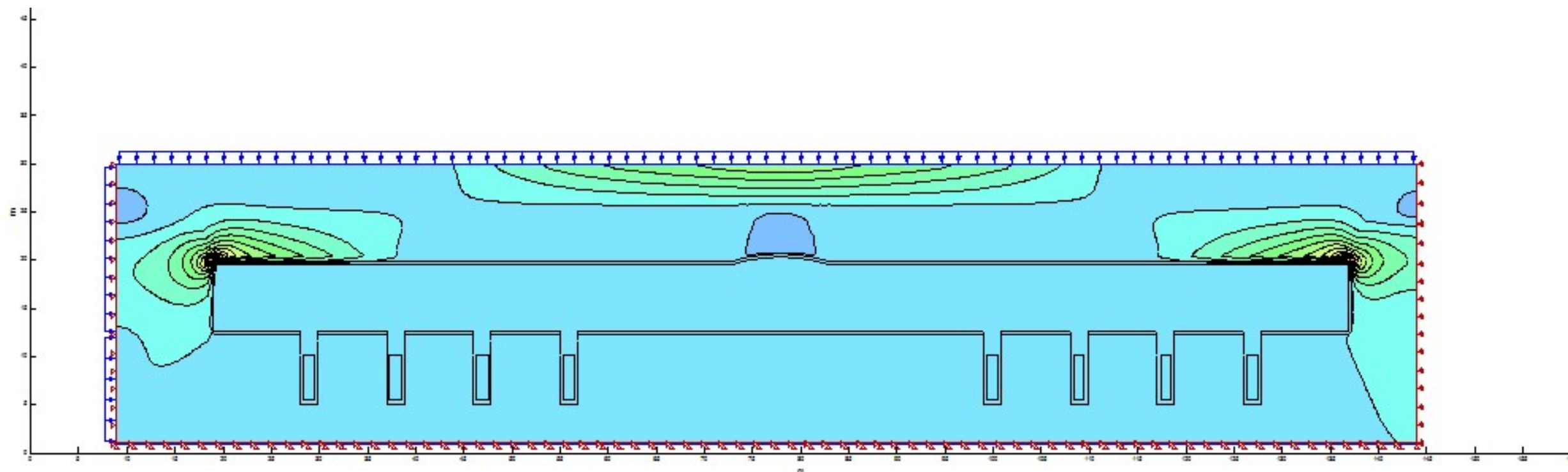
Model napravljen kroz presjek uzduž odlagališnog tunela prikazan je slikama naprezanja: 5-12 u fazi iskopa, 5-13 u fazi ugradnje spremnika, 5-14 u fazi zapunjenih odlagališnih tunela te pomaka: 5-15 u fazi iskopa, 5-16 u fazi ugradnje spremnika, 5-17 u fazi zapunjenih odlagališnih tunela



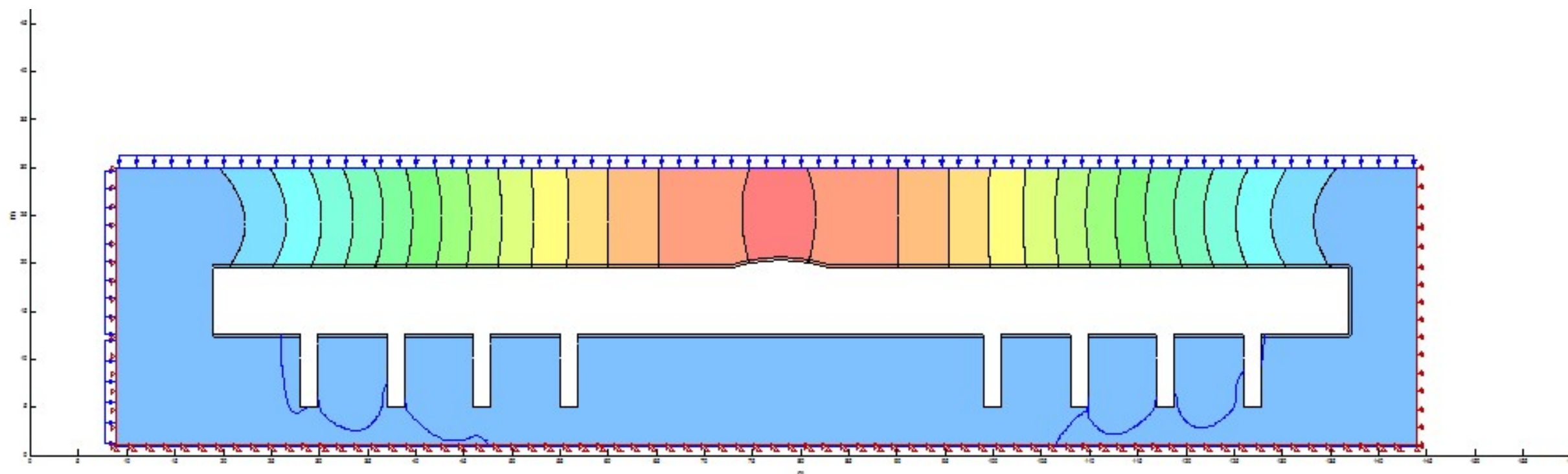
Slika 5-12 Naprezanja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi iskopa.



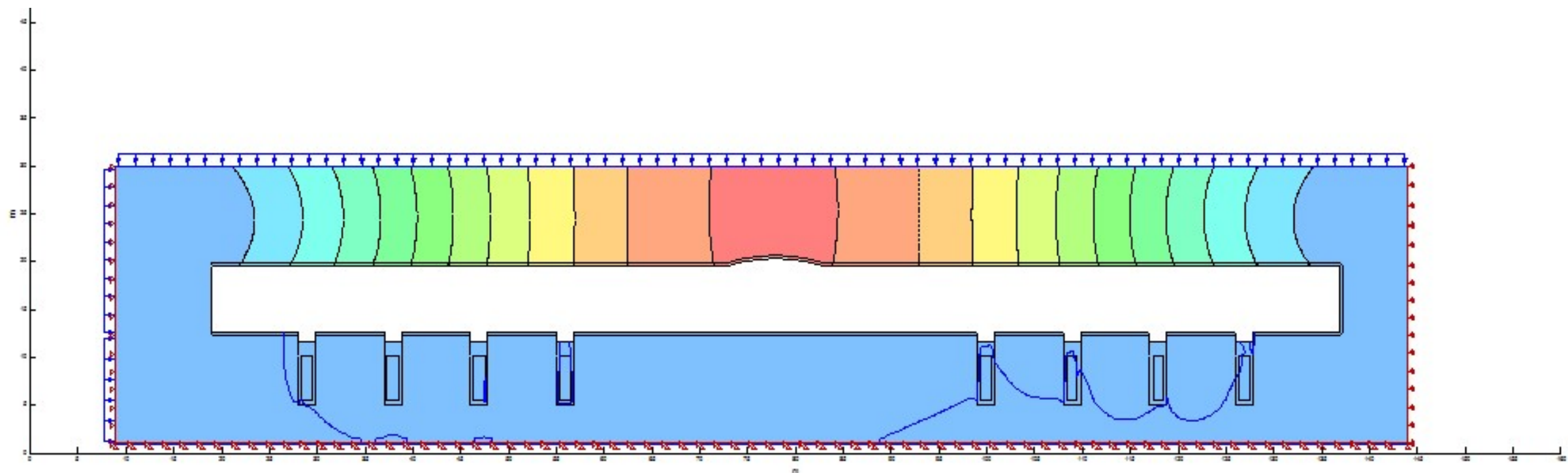
Slika 5-13 Naprezanja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi ugradnje spremnika.



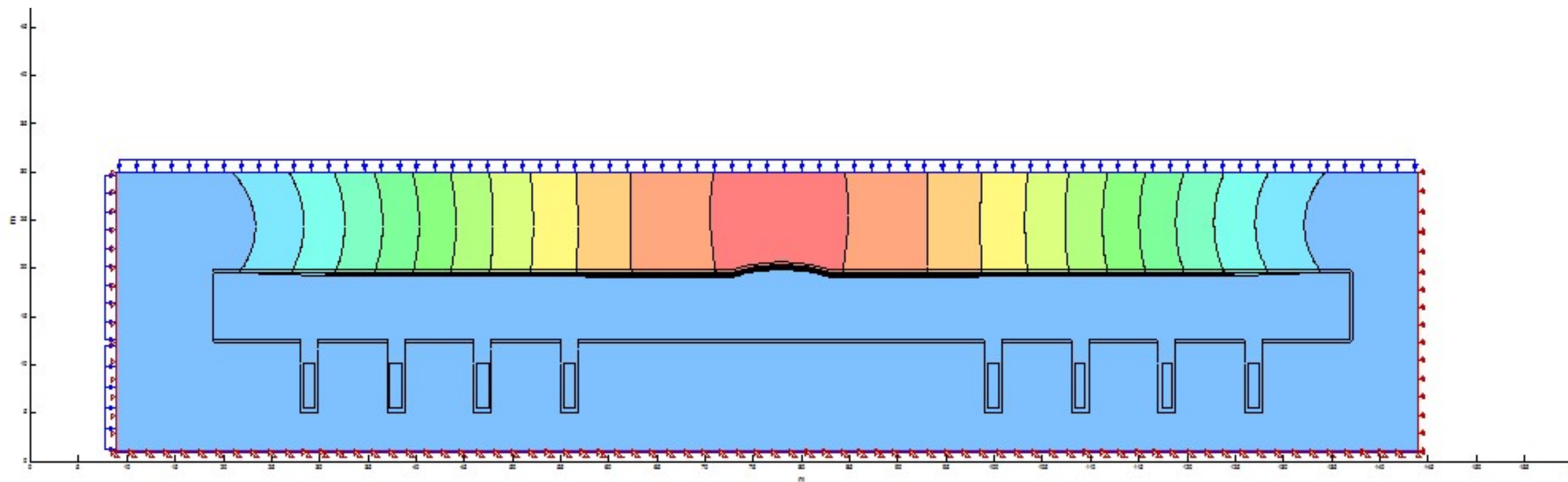
Slika 5-14 Naprezanja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi zapunjenih odlagališnih tunela.



Slika 5-15 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi iskopa.



Slika 5-16 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi ugradnje spremnika.



Slika 5-17 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi zapunjenih odlagališnih tunela.

5.5. Proračun u programu „SEEP/W“

Prema podacima preuzetim iz postojeće dokumentacije (ARAO, 2019), propusnost slabo raspucale magmatske stijene (granit, granodiorit) u Sloveniji i Hrvatskoj pretpostavlja se u rasponu 1×10^{-8} - 1×10^{-12} m/s. Propusnost miniranjem oštećene zone pretpostavljena je u rasponu 1×10^{-6} - 1×10^{-8} m/s. Za potrebe izrade modela u ovom radu odabrane su vrijednosti: 1×10^{-8} m/s za intaktnu stijensku masu, odnosno i 1×10^{-6} m/s za raspucalu oštećenu zonu.

SEEP/W je formuliran na temelju toga da protok vode kroz zasićeno i nezasićeno tlo slijedi Darcyjev zakon dan izrazom (GEO-SLOPE, 2015):

$$v = ki \quad (5.4)$$

gdje su:

k – koeficijent propusnosti,

i – hidraulički gradijent,

v – Darcy-jeva (fiktivna) brzina, koja daje vrijednost stvarne ili efektivne brzine (v_s) podijeljena s relativnim porozitetom tla (n):

$$v_s = \frac{v}{n} \quad (5.5)$$

SEEP/W izračunava hidrauličke gradijente i Darcianove brzine protoka na svakoj od integracijskih točaka unutar svakog elementa. Gradijent na svakoj Gaussovoj ili integracijskoj točki izračunava se iz jednadžbe:

$$\begin{Bmatrix} i_x \\ i_y \end{Bmatrix} = [B]\{H\} \quad (5.6)$$

gdje su:

i_x – gradijent u smjeru x ,

i_y – gradijent u smjeru y ,

$[B]$ – matrica gradijenata,

$\{H\}$ – vektor ukupnog tlaka u točki mreže konačnih elemenata.

Darcyjeve brzine na svakoj Gaussovoj točki izračunate su iz jednadžbe:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = [C][B]\{H\} \quad (5.7)$$

gdje su:

v_x – brzina u smjeru x ,

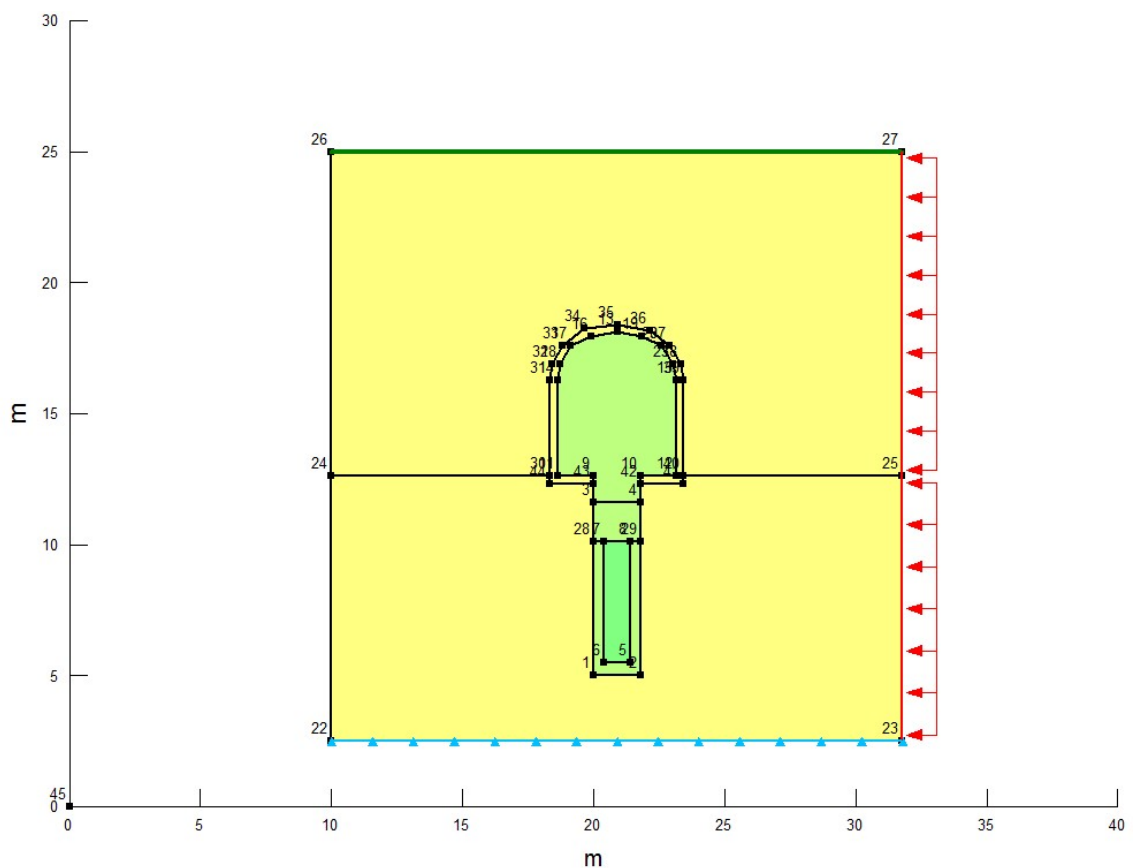
v_y – brzina u smjeru y ,

$[C]$ – matrica gradijenata,

$[B]$ – matrica gradijenata,

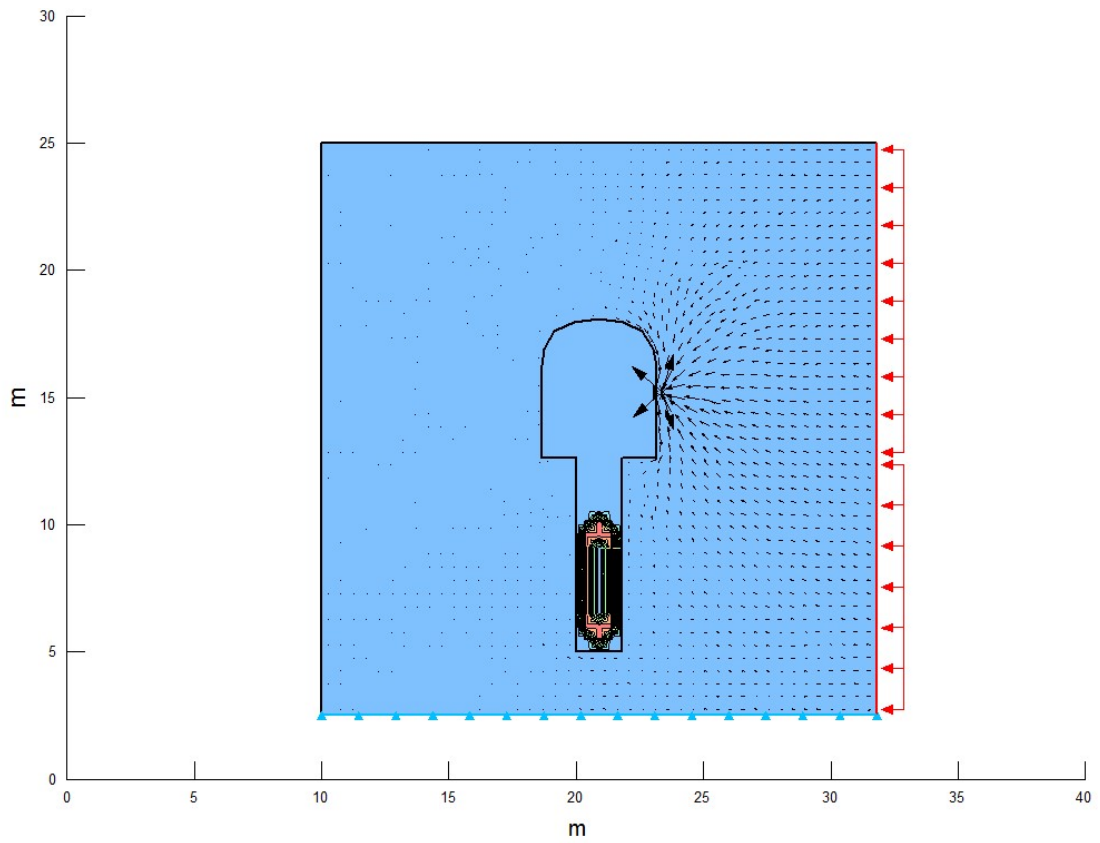
$\{H\}$ – vektor ukupnog tlaka u točki mreže konačnih elemenata.

Osnovni model, s postavljenim regijama materijala (intaktna stijena i oštećena zona, bentonitna ispuna i spremnik) te graničnim uvjetima (tok s desna na lijevo i nepropusna podloga), dan je na slici 5-18.

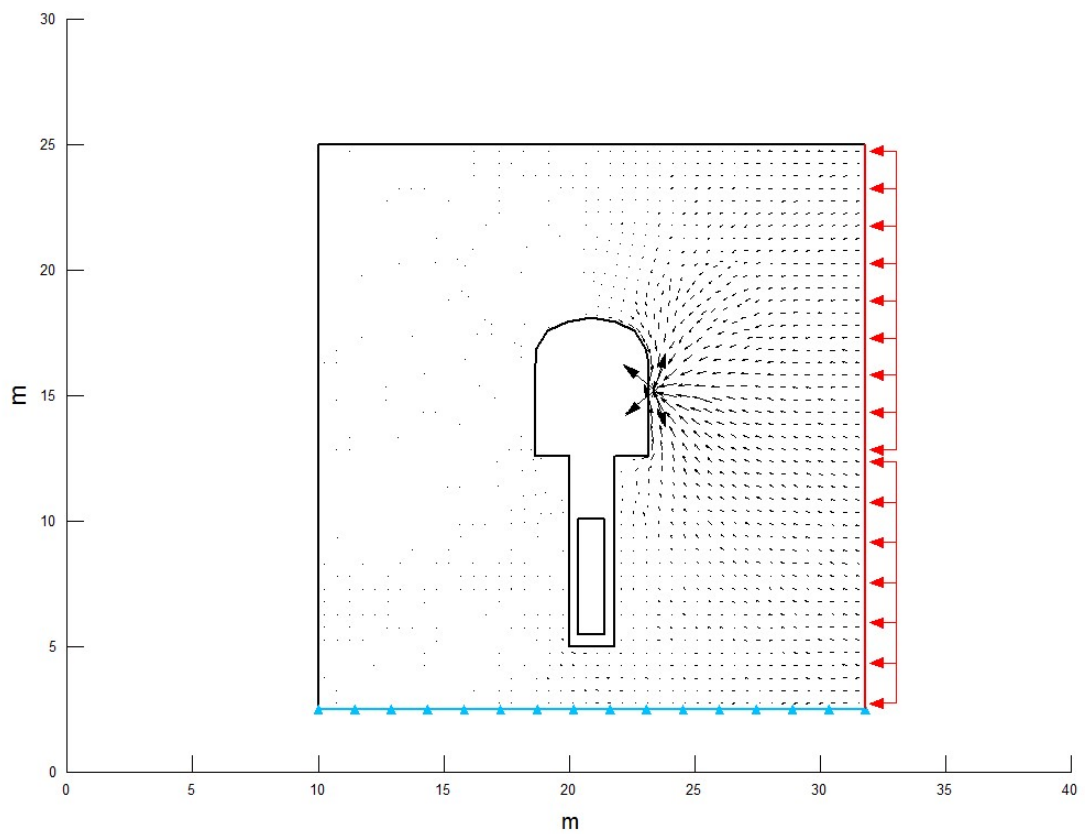


Slika 5-18 Osnovni model, s postavljenim regijama materijala i graničnim uvjetima (tok s desna na lijevo i nepropusna podloga).

Simulacija u SEEP/W programu je za dani model kao rezultat dala dvije skupine rezultata u dvije faze. Prva faza, tok sa slabije frakturiranom oštećenom zonom, prikazana je na slici 5-19 s rezultatnim pornim tlakovima i na slici 5-20 s brzinama toka.

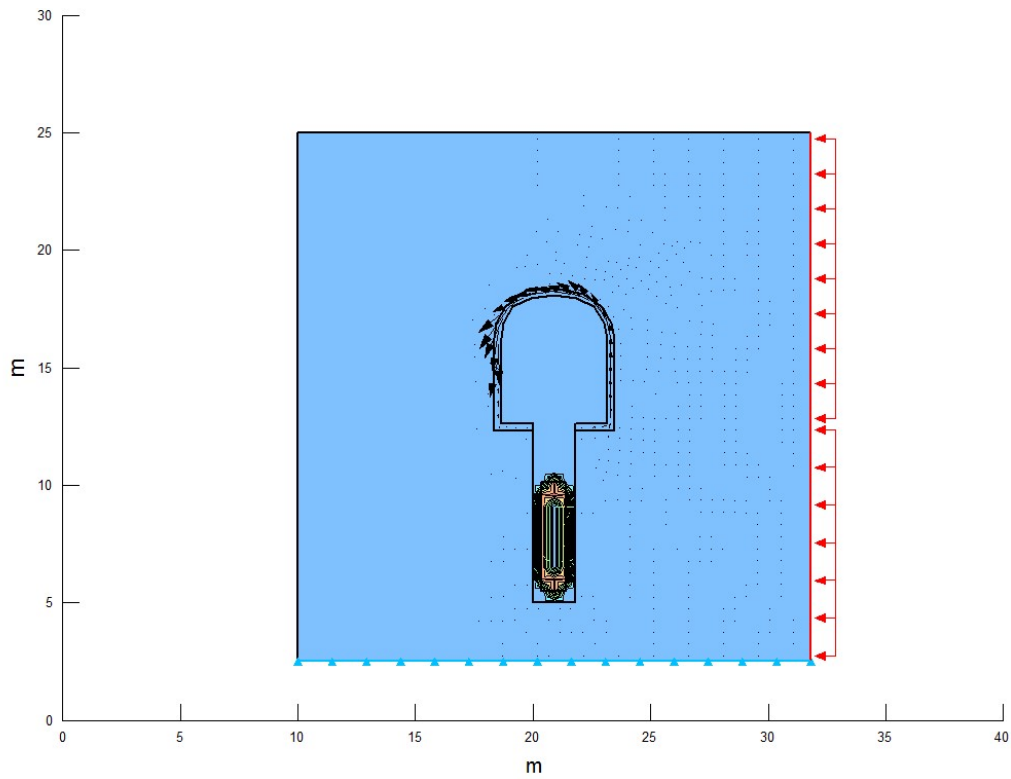


Slika 5-19 Rezultat analize prve faze: slabije frakturirana oštećena zona – porni tlakovi.

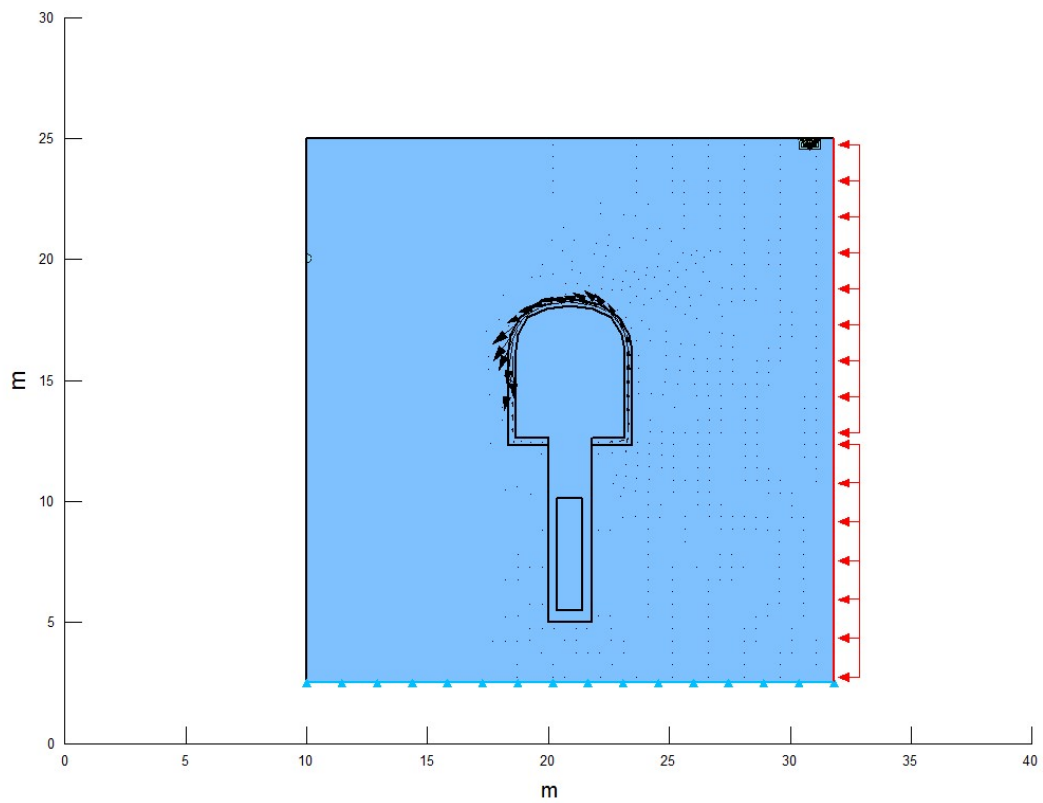


Slika 5-20 Rezultat analize prve faze: slabije frakturirana oštećena zona – brzine toka.

Druga faza, tok sa jače frakturiranom oštećenom zonom, prikazana je na slici 5-21 s rezultatnim pornim tlakovima i na slici 5-22 s brzinama toka.



Slika 5-21 Rezultat analize druge faze: jače frakturirana oštećena zona – porni tlakovi.



Slika 5-22 Rezultat analize druge faze: jače frakturirana oštećena zona – brzine toka.

Rezultati pokazuju da je dominantan tok kroz oštećenu zonu, budući je ona propusnija od ostatka stijene. Brzine tečenja vode su izrazito male, tako da, osim u slučaju pojave jačih pukotina koje bi osigurale izdašniji protok vode, nije za očekivati veću pojavu vode u podzemnim prostorijama odlagališta.

Rezultati za model izrađen uzduž tunela za odlaganje su slični gore navedenima, ali su slabije razlučivosti, tako da nisu uključeni u rad.

5.6. Proračun u programu „TEMP/W“

TEMP/W je dio programskog paketa GeoStudio koji koristi metodu konačnih elemenata za modeliranje termalnih promjena u tlu uslijed promjena u okolišu ili antropogenog utjecaja (GEO-SLOPE, 2014).

TEMP/W izračunava toplinske gradijente i brzine protoka topline na svakoj od integracijskih točaka unutar svakog (konačnog) elementa. Gradijent na svakoj Gaussovoj ili integracijskoj točki izračunava se iz jednadžbe (GEO-SLOPE, 2014):

$$\begin{Bmatrix} i_x \\ i_y \end{Bmatrix} = [B]\{T\} \quad (5.8)$$

gdje su:

i_x – gradijent u smjeru x ,

i_y – gradijent u smjeru y ,

$[B]$ – matrica gradijenata,

$\{T\}$ – vektor temperature u čvoru mreže konačnih elemenata.

Brzine protoka topline na svakoj Gaussovoj točki izračunate su iz jednadžbe:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = [C][B]\{T\} \quad (5.9)$$

gdje su:

v_x – brzina u smjeru x ,

v_y – brzina u smjeru y ,

$[C]$ – matrica termalne kondukcije,

$[B]$ – matrica gradijenata,

$\{T\}$ – vektor temperature u čvoru mreže konačnih elemenata.

TEMP/W u nizu pohranjuje toplinsku vodljivost na svakoj Gaussovoj točki koja se koristi u formulaciji jednadžbi konačnih elemenata. Iste vrijednosti toplinske vodljivosti kasnije se koriste za izračunavanje brzina.

TEMP / W pretpostavlja da raspodjela temperature unutar elementa slijedi usvojene interpolacijske funkcije. To znači da je raspodjela temperature linearna kada nedostaju sekundarni čvorovi, a raspodjela temperature je nelinearna kada su prisutni sekundarni čvorovi. Jednadžba za model raspodjele temperature je:

$$t = \langle N \rangle \{T\} \quad (5.10)$$

gdje su:

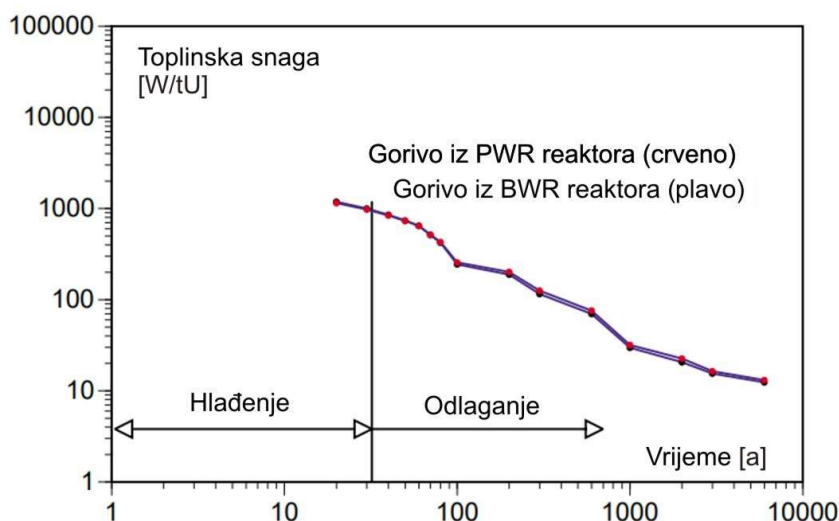
t – temperatura u bilo kojoj koordinati modela,

$\langle N \rangle$ – vektor interpolacijske funkcije,

$\{T\}$ – vektor temperature u čvoru mreže konačnih elemenata.

Nužno je navesti kako je inicijalno stanje: trenutak odlaganja, problematičan, s obzirom da je sadržaj vode (saturacija) najmanji, što znači da je termička vodljivost (konduktivnost) niska i temperature visoke. Na višim temperaturama termička vodljivost ima veću vrijednost, rastući za oko 0,1 % po °C (Ikonen, 2003).

Osim stupnja saturacije, vremenom se mijenja i oslobođena energija, odnosno toplinska snaga gorivnog elementa, što je prikazano na slici 5-23.



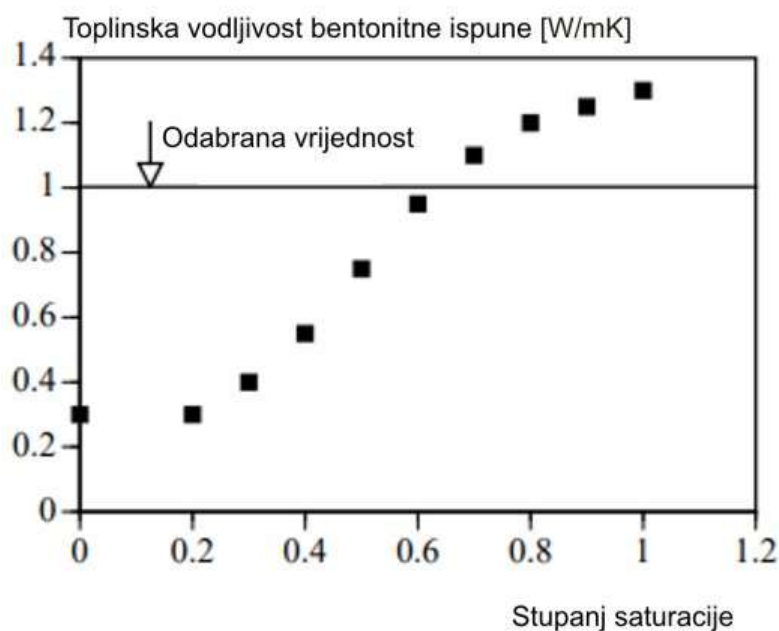
Slika 5-23 Promjena toplinske snage s vremenom (PWR - *Pressurized Water Reactor*, reaktor s vodom pod tlakom, kao u NEK; BWR - *Boiling water reactor*, reaktor s ključajućom vodom) (Ikonen, 2003).

S obzirom na pretpostavljenu dubinu izgradnje podzemnog odlagališta, prema termičkom gradijentu u magmatskim stijenama Hrvatske i Slovenije, procijenjena je temperatura stijene (in situ) na 25 °C (ARAO, 2019).

Simulacija rađena za finski Olkiluoto (Ikonen, 2003), koja je poslužila kao orijentacijski model za izradu ovog rada, uključila je podatke za vodljivost (konduktivnost) i toplinski kapacitet iz laboratorijskih istraživanja provedenih na jezgrama uzetih iz bušotina (Kukkonen, 2000). Procjena i mjerenja na slovenskim i hrvatskim stijenama dala su podatke u rasponu: 2,5-3,4 W/mK (ARAO, 2019). Bitno je primijetiti kako vodljivost stijene pomalo opada kao funkcija temperature. Za potrebe izrade modela u ovom radu odabrana je vrijednost 3 W/mK (prema: ARAO, 2019; Ikonen, 2003; Kukkonen, 2000).

Maseni toplinski kapacitet stijene također lagano raste kao funkcija temperature, a za potrebe izrade modela odabrana je vrijednost 784 J/kgK (prema: ARAO, 2019; Ikonen, 2003; Kukkonen, 2000). Za gustoću stijene odabrana je vrijednost od 2 700 kg/m³ pa je prema tome volumetrijski toplinski kapacitet stijene pretpostavljen u iznosu od 2,15 MJ/m³K. Odabrana vrijednost difuznosti stijene je 1,21x10⁻⁶ m²/s. Stupanj saturacije stijene je parametar koji je procijenjen prema postojećim istraživanjima te je za granodiorit odabrana vrijednost 0,5% (0,005 m³/m³) (ARAO, 2019).

Vrijednost vodljivosti bentonitne ispune ovisit će o stupnju saturacije (slika 5-24), a za potrebe izrade modela odabrana je vrijednost 1,0 W/mK.

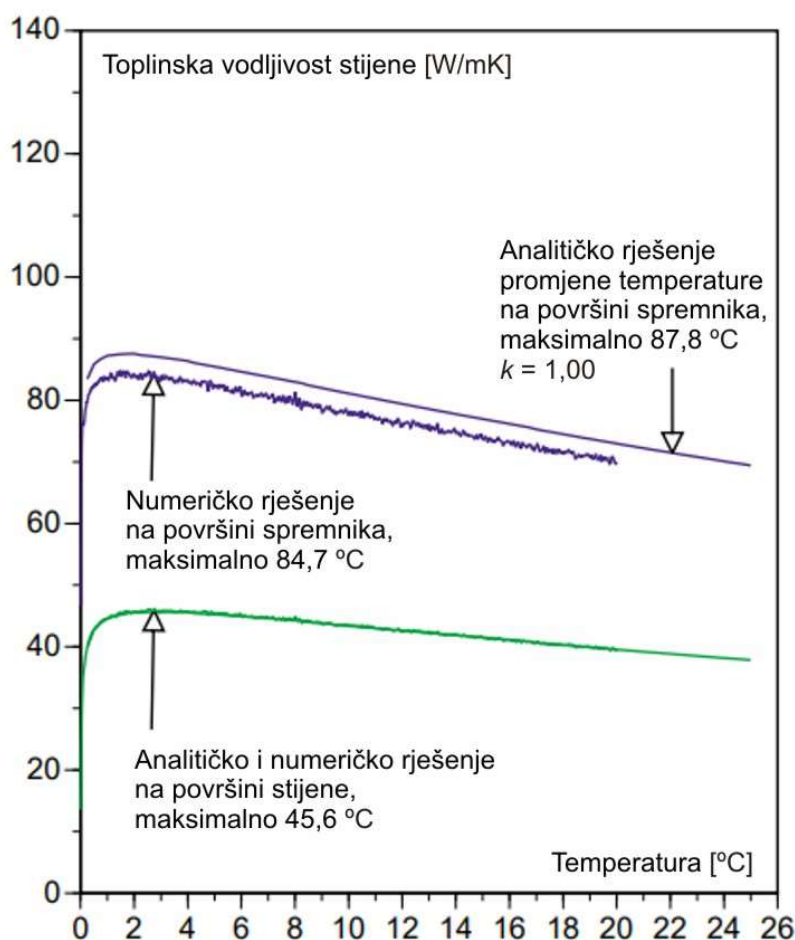


Slika 5-24 Toplinska vodljivost bentonita kao funkcija stupnja saturacije (Ikonen, 2003 prema Kukkonen, 2000).

Volumetrijski toplinski kapacitet za saturirani bentonit ukupne gustoće 2,0 - 2,1 t/m može se proračunati na $3,10 \times 10^6$ - $3,40 \times 10^6$ J/m³K (Knutsson, 1983) te je za potrebe rada kao konzervativnija procjena odabran $3,40 \times 10^6$ J/m³K.

Postotak vlage u bentonitu je, prema tablici 4-4, odabran u iznosu 0,16 m³/m³ (16%).

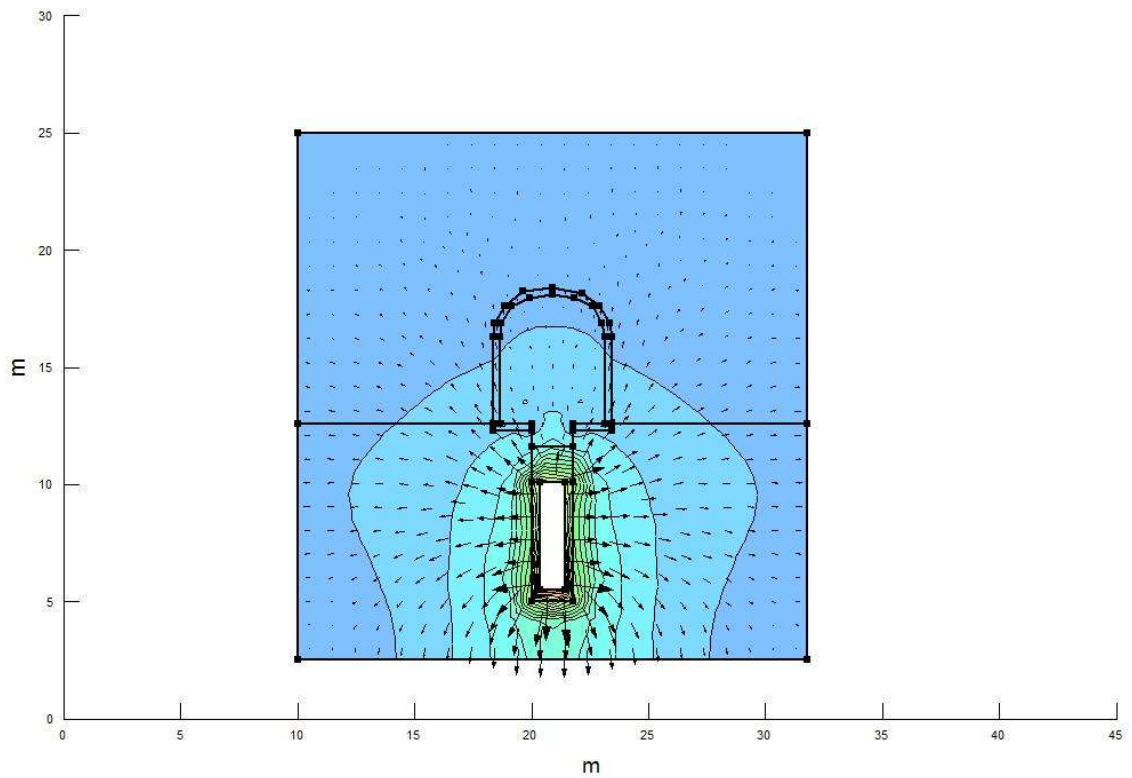
Na slici 5-25 prikazan je odnos promjene temperature na površini pojedinog spremnika i stijenci bušotine kroz vrijeme. Taj odnos poslužio je za izradu funkcije promjene temperature kroz vrijeme, parametra korištenog za izradu modela u radu.



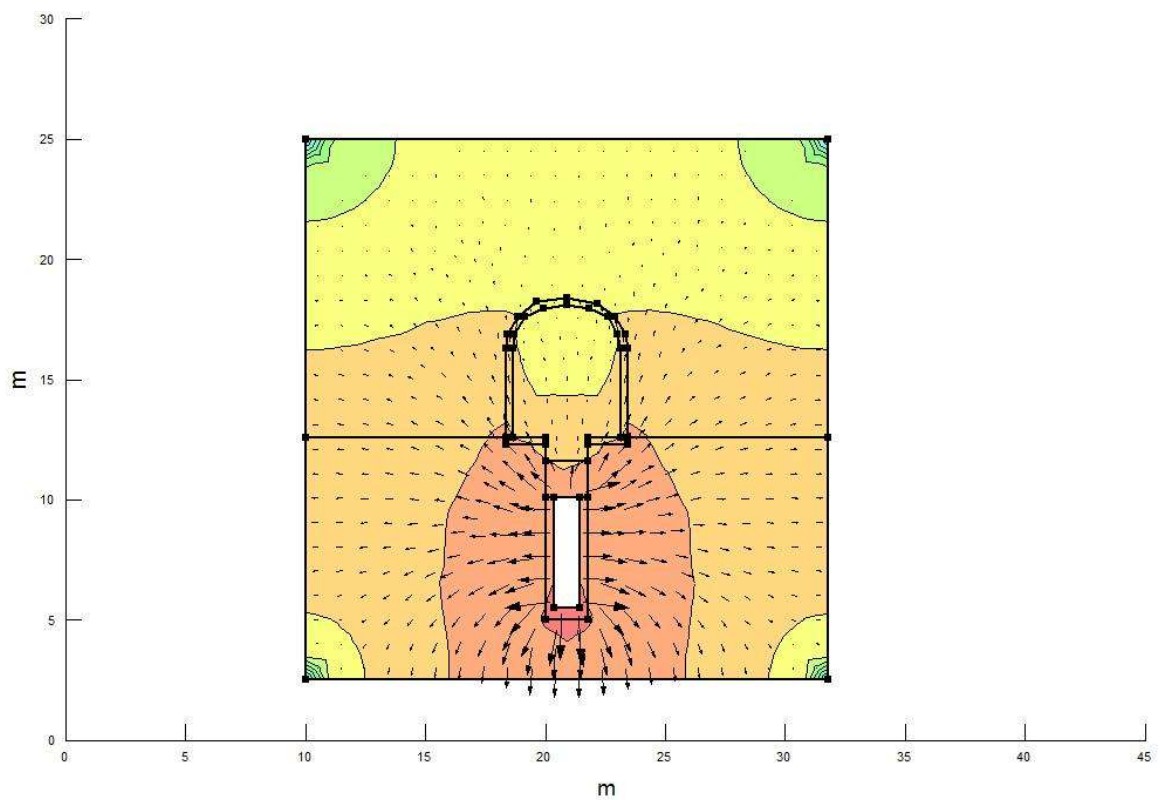
Slika 5-25 Odnos promjene temperature na površini pojedinog spremnika i stijenci bušotine kroz vrijeme (Ikonen, 2003).

Prema odabranim parametrima i s graničnim uvjetom: spremnik je izvor topline, preuzet je osnovni model s mrežom konačnih elemenata, po fazama, pripremljen za analizu u programu SIGMA/W, prikazan na slici 5-7. Definirane su identične „regije“ materijala: intaktna stijena, zona poremećene stijenske mase oko tunela (debljine 30 cm), bakreni spremnik i bentonitna ispuna.

Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu prikazan je na slici 5-26, a na slici 5-27 prikazan je model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu).

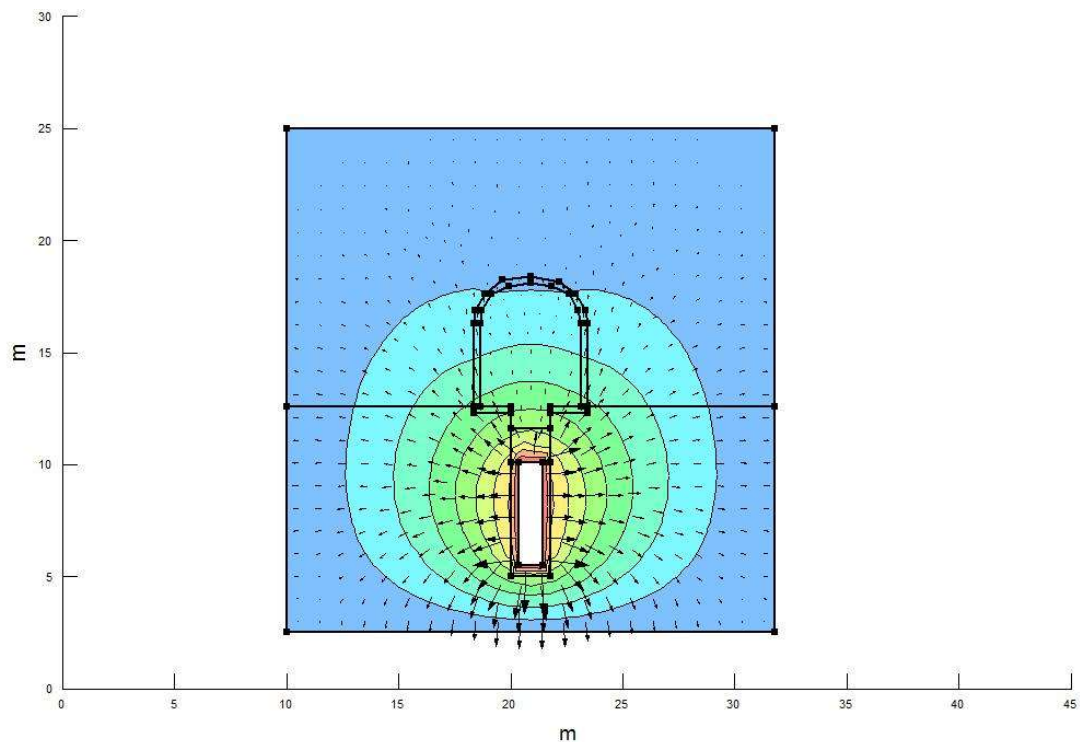


Slika 5-26 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu.

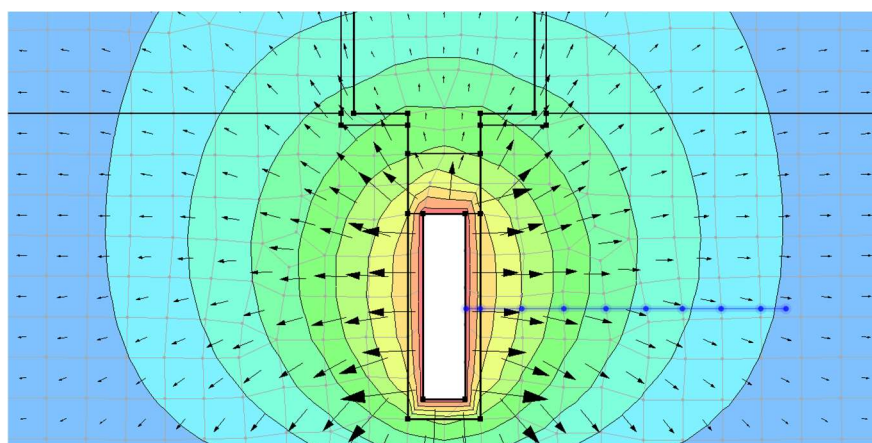


Slika 5-27 Model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu.

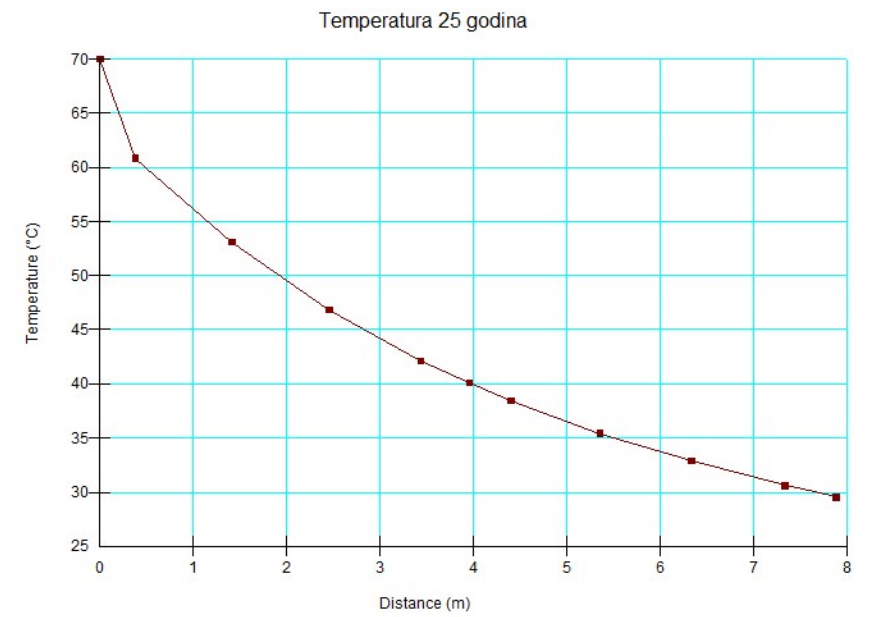
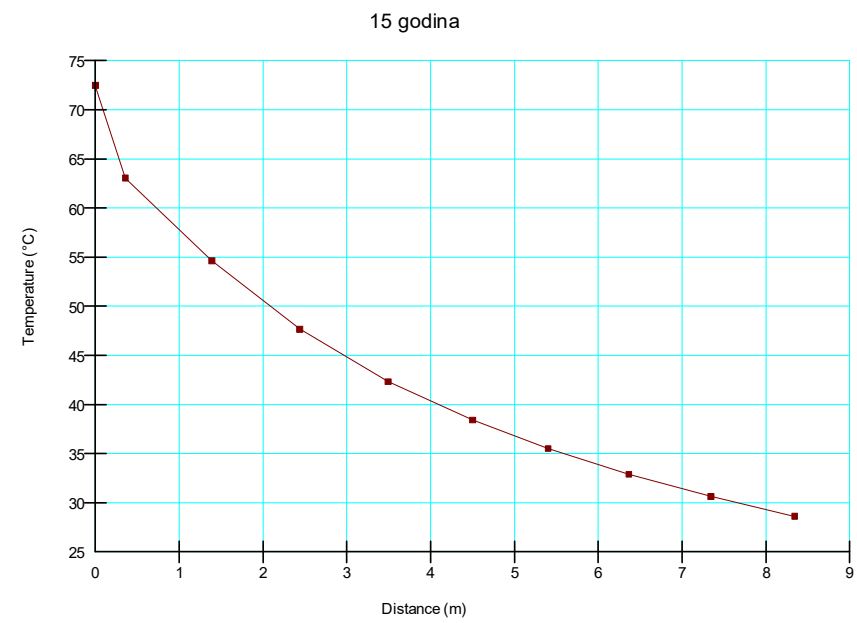
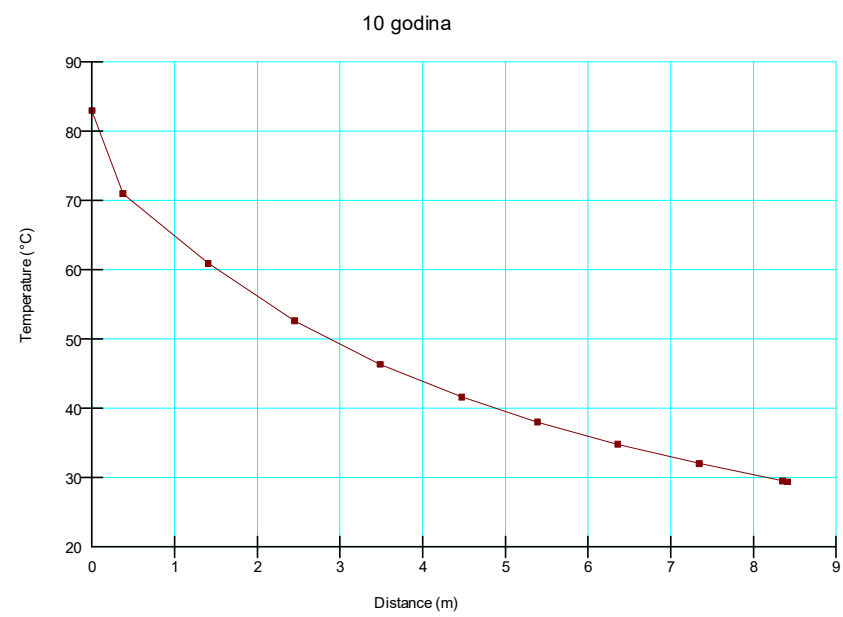
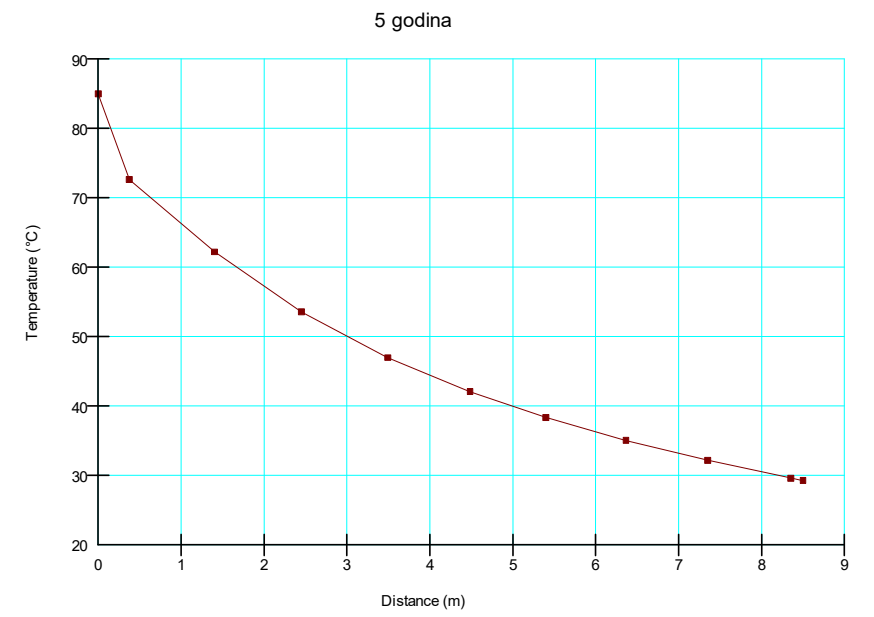
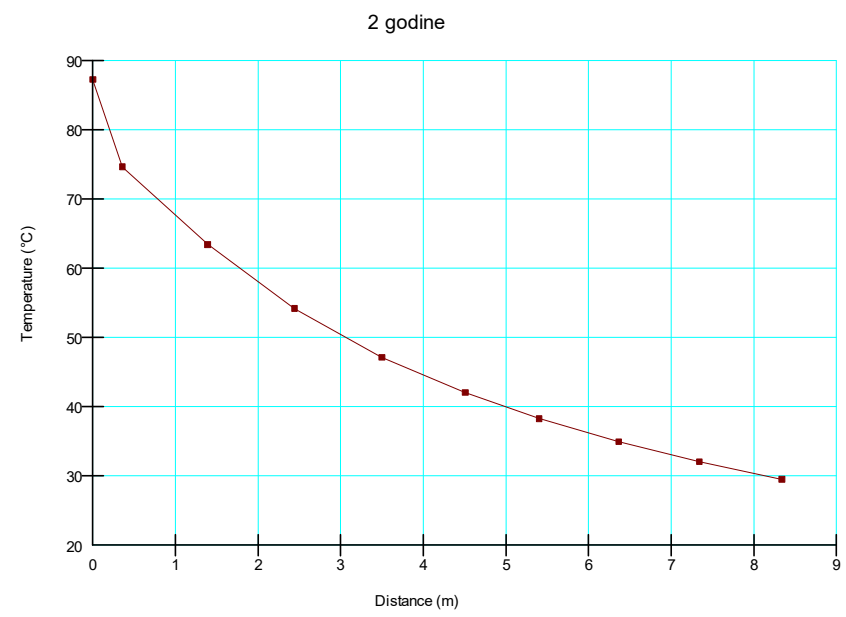
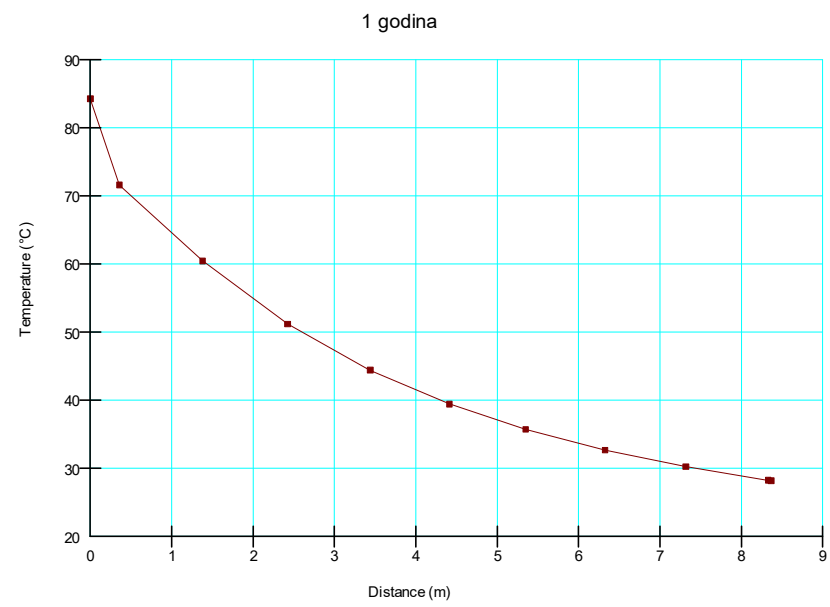
Na slici 5-28 prikazan je finalni rezultat analize: distribucije temperatura kroz poprečni presjek kroz bušotinu. S obzirom da je analiza rađena po fazama (inkrementi: 1 godina, 2 godine, 5 godina, 15 godina i 25 godina od odlaganja/ugradnje), a da su vizualizacije distribucije temperatura slične, prikazana je faza „25 godina“ kao primjer, a promjene temperatura po profilu (slika 5-29), kroz vrijeme, dane su grafikonima na slici 5-30.



Slika 5-28 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje.



Slika 5-29 Profil (horizontalni s početkom na SREDINI spremnika!, naznačen modrom bojom s karakterističnim točkama) po kojem su prikazane promjene temperatura kroz vrijeme, dane grafovima na slici 5-30.

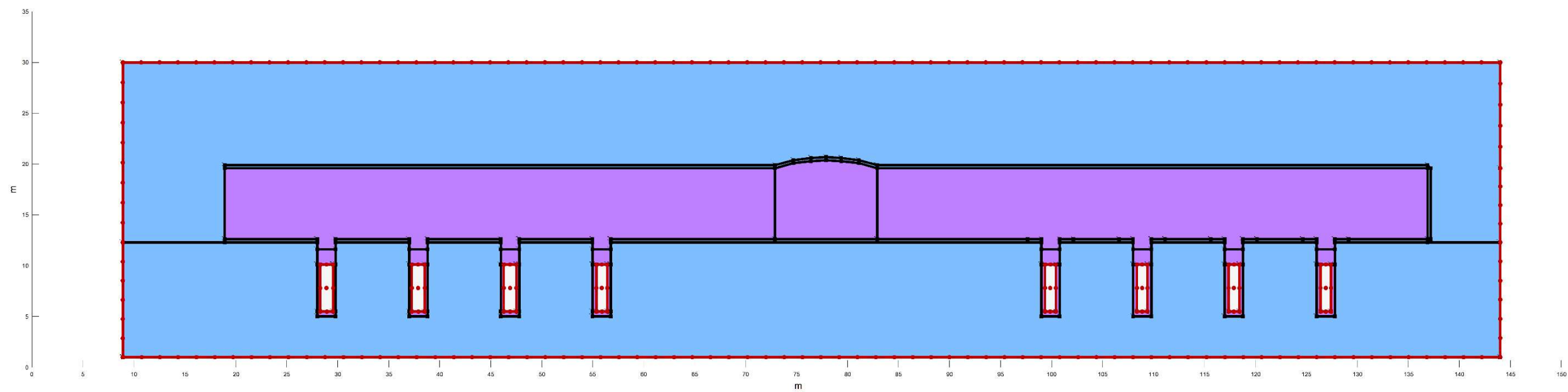


Slika 5-30 Promjene temperatura po profilu (slika 5-24), kroz vrijeme.

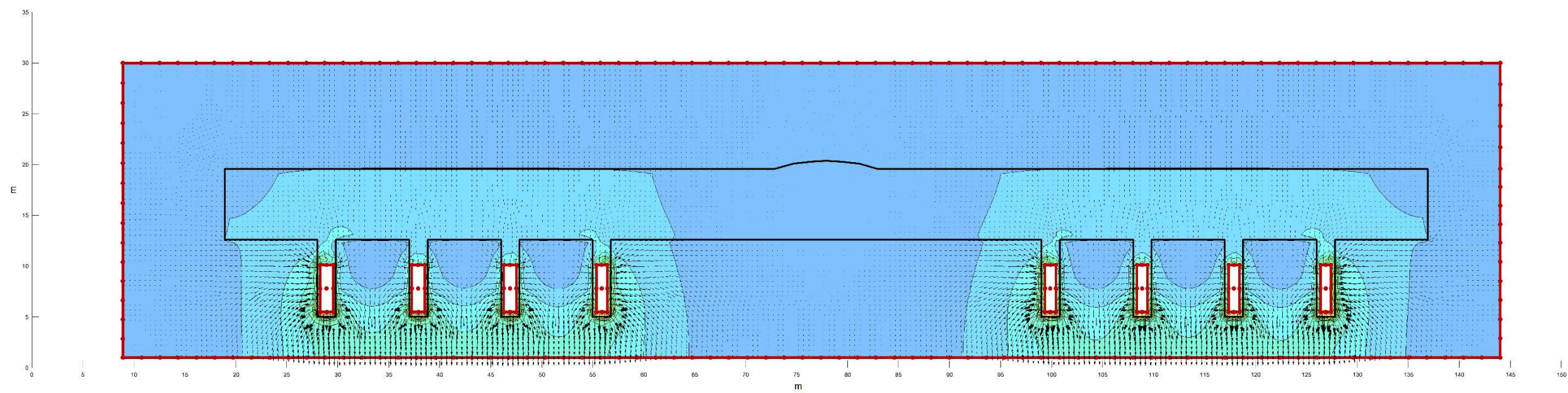
Primjećuje se kako maksimumi temperatura (na stijenki spremnika) imaju distribuciju kao na slici 5-25 (odnos promjene temperature na površini pojedinog spremnika i stijenki bušotine kroz vrijeme), što je bio jedan od početnih uvjeta analize.

Za model presjeka kroz odlagališne hodnike (lijevo i desno u odnosu na centralni transportni hodnik) napravljena je posebna analiza. Na slici 5-31 prikazan je osnovni model sa zadanim rubnim uvjetima, na slici 5-32 model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu, a na slici 5-33 model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu. Slika 5-34 predstavlja rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje.

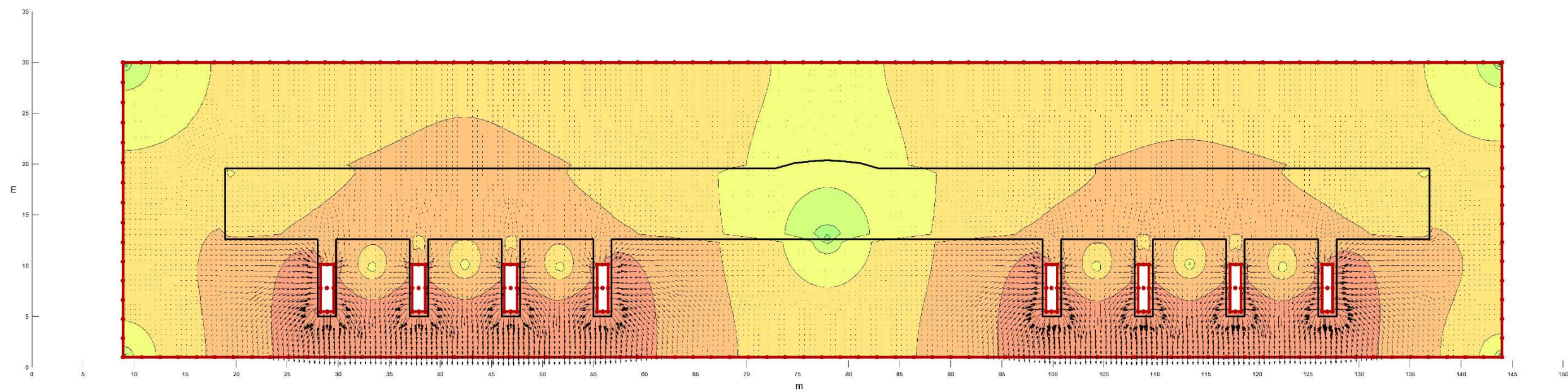
Važno je zaključiti kako se maksimalne temperature NE DIŽU do maksimalnih dopuštenim dizajnom koncepta (90-100 °C) što znači da geometrija rješenja i odabir materijala odgovaraju traženim zahtjevima koncepta (Ikonen, 2003).



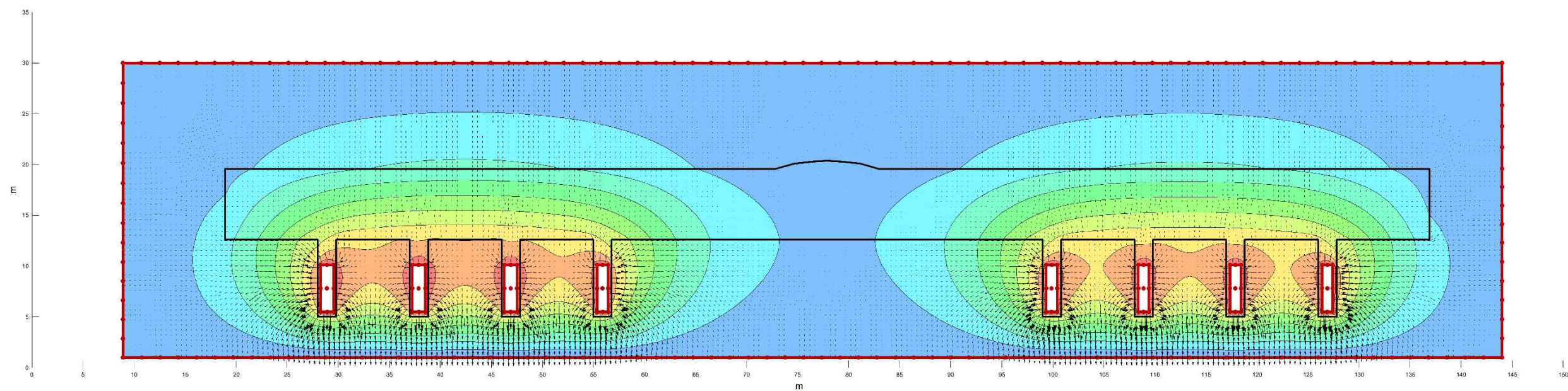
Slika 5-31 Postavljen osnovni model za simulaciju širenja topline kroz odlagališne tunele, lijevo i desno u odnosu na transportni tunel.



Slika 5-32 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu.

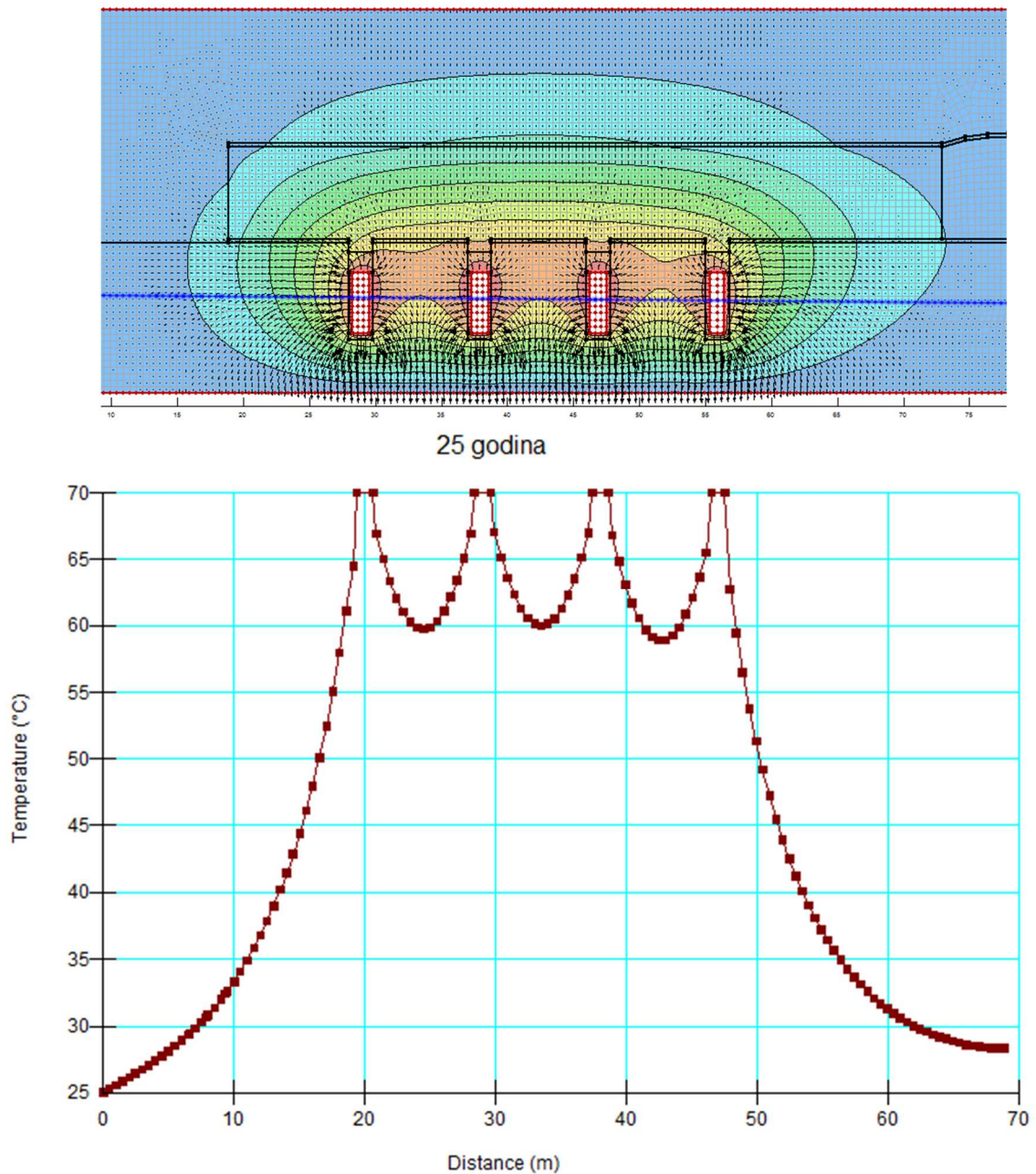


Slika 5-33 Model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu.



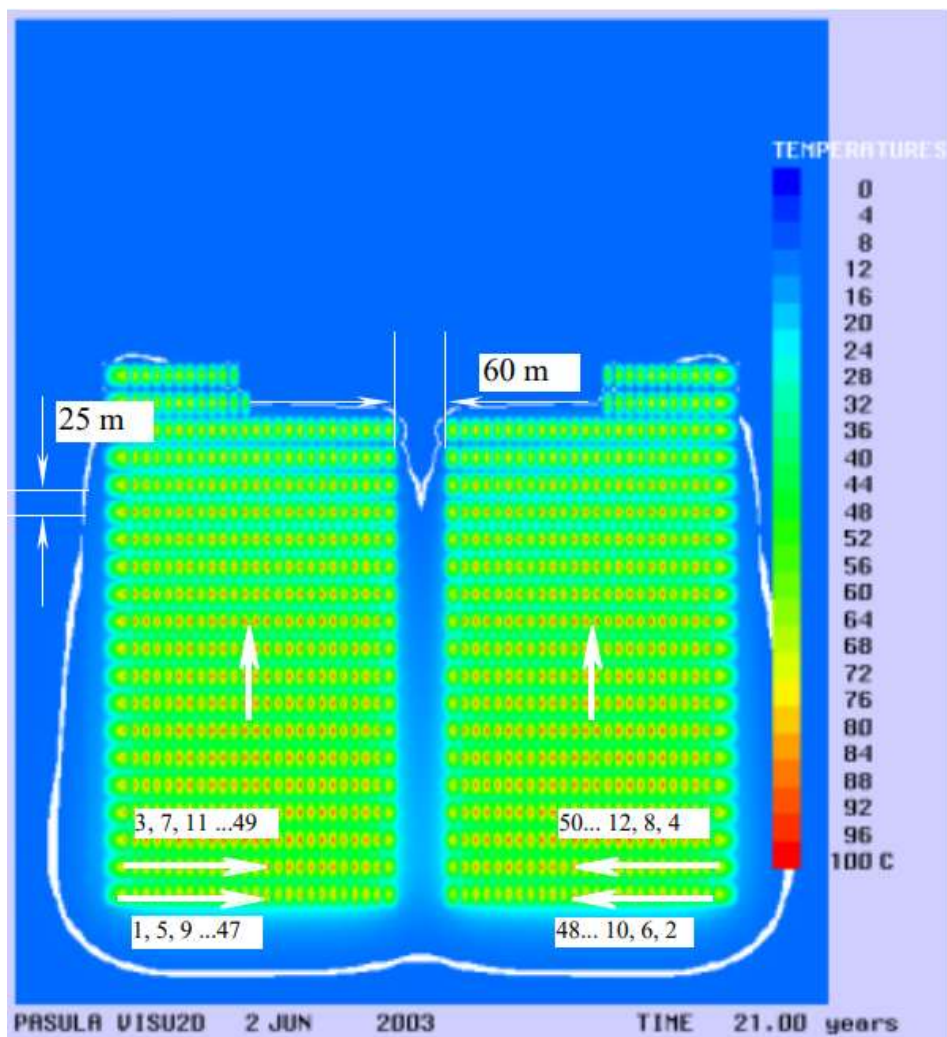
Slika 5-34 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje.

Promjene temperatura po profilu za fazu 25 godina (na slici 5-34), dane su grafikonom na slici 5-35 iznad kojeg je slika s naznačenim povučenim profilom kroz jednu granu odlagališnog hodnika.



Slika 5-35 Promjene temperatura po profilu za fazu 25 godina (dolje) za naznačeni povučeni profil kroz jednu granu odlagališnog hodnika (gore).

Na slici 5-36 prikazan je rezultat numeričke analize distribucije temperatura dva susjedna panela odlagališnih tunela nakon 21 godine (po odlaganju) – tlocrt (Ikonen, 2003). Identična verzija modela nije mogla biti simulirana za uvjete zadane u ovom radu poradi ograničenja računala na kojem su provedene simulacije na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu.

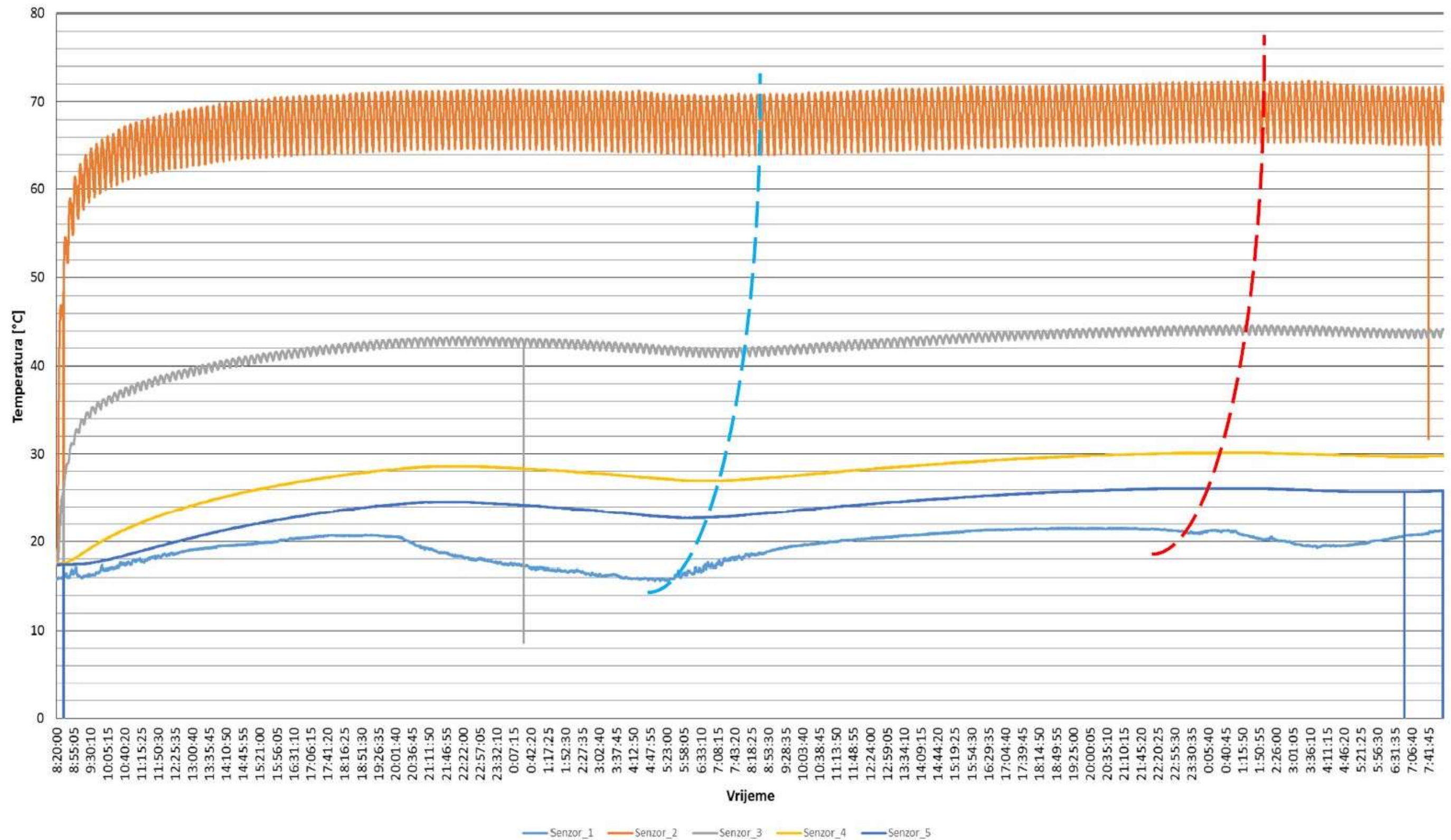


Slika 5-36 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura dva susjedna panela odlagališnih tunela nakon 21 godine (po odlaganju) – tlocrt, simulacija za Olkiluoto (Ikonen, 2003).

Primjećuje se kako je temperatura stijene oko 11 °C te da je zona zagrijavanja stijene jasno vidljiva – cijela stijenska masa zahvaćena panelima je zagrijana.

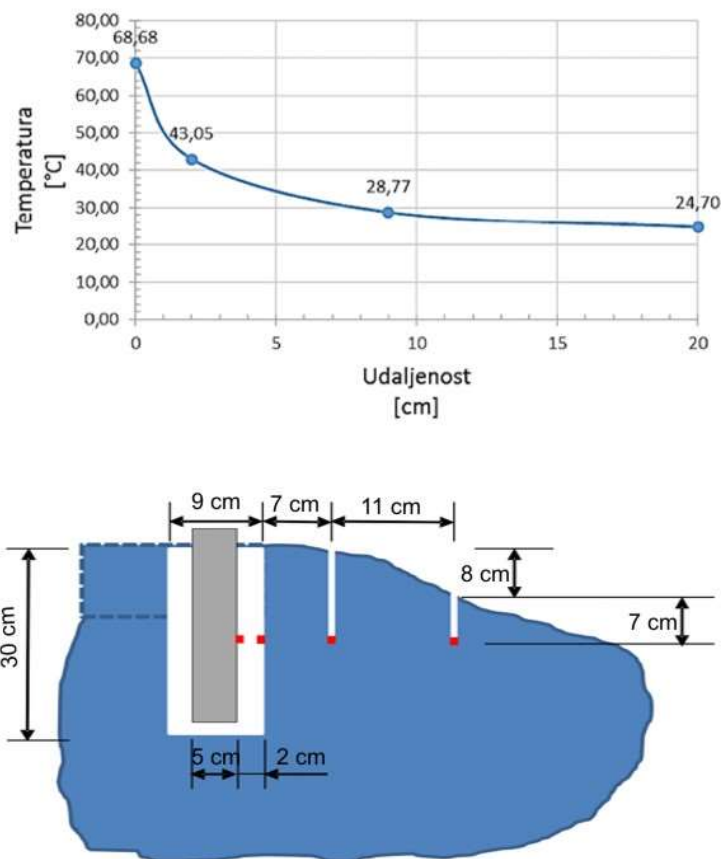
Očita je sličnost rezultata (vizualno predočenje širenja topline) između modela u ovom radu i finskog modela, uz primjedbu kako je stijena u Finskoj i Švedskoj daleko hladnija od pretpostavljene stijene u Hrvatskoj ili Sloveniji (11-14 °C u odnosu prema 25-30 °C, prema ARAO, 2019) tako da do drastične promjene temperature – jakog zagrijavanja stijene neće doći (ΔT će biti manji za barem desetak stupnjeva za slučaj hrvatsko-slovenskog rješenja u odnosu na finsko).

U prilog točnosti modela, prikazanog u ovom radu, govore i eksperimentalna mjerenja provedena na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu (Nogolica, 2015). Na slici 5-37 dan je rezultat mjerenja zagrijavanja magmatske stijene, prema shemi sa slike 5-38.



Slika 5-37 Eksperimentalna mjerenja provedena na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu: rezultat mjerenja promjene temperature pri zagrijavanju magmatske stijene električnim grijačem (Nogolica, 2015). Senzor 1 – vanjska temperatura (okoliš), senzor 2 – temperatura na stijenki grijača, senzor 3 – temperatura stijene na 2 cm od grijača (zbijeni suhi bentonit između senzora 2 i 3), senzor 4 temperatura stijene na 9 cm od grijača, senzor 5 - temperatura stijene na 20 cm od grijača.

Rezultat mjerenja pokazuje da pri temperaturi spremnika od $80\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ i pri prosječnoj temperaturi okoline od oko $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, nema jakog zagrijavanja stijene (slika 5-33 grafikon) te da se razlika temperatura ustalila na $\Delta T \approx 42\text{ }^{\circ}\text{C}$. Iz toga se da zaključiti kako spremnik, u uvjetima relativno tople stijene, neće bitno zagrijavati okolinu i time stijeni znatno mijenjati svojstva te da neće doći do značajnijeg preklapanja toplih zona susjednih spremnika. **Eksperimentalni/fizički model i numerički model time potvrđuju jedan drugog.**



Slika 5-38 Skica eksperimenta sa zagrijavanjem magmatske stijene (simulacija odlaganja spremnika s ING-om) električnim grijačem (Nogolica, 2015). Senzori za temperaturu (crveni kvadratići) odgovaraju položajem vrijednostima očitane srednje temperature na grafu iznad. Prostor između grijača (sivo) i stijene (plavo) bio je ispunjen suhim zbijenim bentonitom.

² Električni grijač u fizičkom eksperimentu, kontroliran termostatom, dao je na senzoru koji se nalazio naslonjen na stijenku grijača raspon temperature $64\text{--}72\text{ }^{\circ}\text{C}$, prosječna srednja od $\approx 68\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6. RASPRAVA I ZAKLJUČAK

U radu su istraživani termičko-hidro-mehanički efekti u svezi odlaganja istrošenog nuklearnog goriva u duboko geološko odlagalište u kristaliničnoj (magnatskoj) stijeni.

U okviru klasičnog postavljanja problema uvršteno je i razmatranje specifičnog ponašanja zone u stijeni oštećene iskopom.

Za numeričku analizu korišteni su parametri konkretnih stijena u Hrvatskoj/Sloveniji kao i geometrija preuzeta iz konkretnog projektnog rješenja.

Korištenje numeričkih metoda daje kvantitativno zadovoljavajuće rezultate u rješavanju praktičnih problema. Provođenje simulacija ponašanja stijenske mase i materijala ispunu (*buffer-a*) u dubokim geološkim odlagalištima istrošenog nuklearnog goriva (ING) u uvjetima termičko-hidro-mehaničkih promjena olakšano je primjenom ovih metoda i redovito se koristi za potvrdu ili kontrolu laboratorijskih i terenskih ispitivanja, odnosno primijenjenih analitičkih metoda istraživanja.

U ovom radu provedene simulacije ponašanja stijene (granodiorit) pri iskopu i zagrijavanju djelovanjem spremnika s ING-om dokazale su slijedeće:

1. odabrani koncept odlaganja ING-a (SKB-3V) je primjenjiv na odabranu stijenu;
2. parametri iskopa stijene (geometrija podzemnih prostorija) su dobro odabrani – pretpostavka o pojavi najvećih napreznja u kaloti tunela, unutar faktora sigurnosti je dokazana – nije došlo do sloma;
3. pomaci su u okviru očekivanih (čak i bez podgrade);
4. materijali korišteni za ispunu (Na-bentonit) zadovoljavaju tražene uvjete (slaba propusnost i postizanje tražene toplinske vodljivosti);
5. dokazano je kako model (sa zadanim razmakom spremnika) ne dostiže maksimalnu temperaturu dopuštenu dizajnom koncepta (90-100 °C) – zagrijavanje stijene neće stvarati neželjene efekte (bez izrazitog povećanja temperature u stijeni u odnosu na postojeću);
6. potvrđeno je kako tok podzemne vode (brzina toka) neće imati negativan utjecaj na inženjerske barijere te da oštećena zona služi kao put za brži protok vode (tzv. „hidraulički kavez“);
7. potvrđena su laboratorijska ispitivanja koja pokazuju kako magmatska stijena (domaći uzorak) pokazuje svojstva lokalnog prigušenja širenja topline.

Osobiti doprinos dosadašnjim istraživanjima ovog tipa (numeričko modeliranje termičko-hidro-mehaničkih promjena i efekata) je u **razmatranju oštećene zone nastale iskopom** koja se u drugim simulacijama ovog tipa (vidljivo u postojećoj literaturi) obično nije izdvajala kao zasebna zona i potencijalni problem – zona bržeg toka podzemne vode i potencijalni put širenja radionuklida.

Preporuke za nastavak istraživanja su slijedeće:

- Programski paket GeoStudio ima mogućnost za 2D simulacije što ograničava primjenu i točnost, obzirom na trodimenzionalno pozicioniranje toplih tijela (spremnika s ING-om). S obzirom na to bilo bi preporučljivo primijeniti neki drugi numerički alat (npr. CODE BRIGHT) za izradu simulacija u slučaju izrade konkretnog odlagališta.
- Slijedeći korak bi svakako bila simulacija toplinskih efekata odlagališta u cijelosti – svih panela s ukupnim brojem spremnika, što u ovom radu nije bilo moguće s obzirom na lošu informatičku opremu (slabo računalo).
- Kvalitetnije računalo i prilagođeniji alat za numeričku analizu omogućili bi izvođenje simulacije s paralelnim određivanjem utjecaja više efekata istovremeno, kao i točniju geometriju modela (oblik hodnika dobiven metodom bušenja i miniranja, uključivanje oštećene zone nastale bušenjem (debljine 3 cm), uski prazni prostor između bentonitnih prstenova i spremnika, uski prostor ispunjen peletima bentonita između bentonitnih prstenova i stijene, uključivanje više dodatnih projektnih parametara, veći i detaljniji model i dr.).
- Uzorci potencijalnih stijena domaćina ispitani u laboratoriju (ciljano određivanje parametara) bi svakako digli kvalitetu modela i dobivenih podataka.
- Trebalo bi provesti usporedna ispitivanja više različitih geometrija rješenja (različiti razmaci između bušotina za odlaganje (spremnika), usporedba KBS-3V i KBS-3H koncepta, različiti tipovi bentonita, različiti oblici zapunjavanja podzemnih prostorija, različite vlažnosti bentonita i dr.).

Navedena poboljšanja/preporuke nisu bili izvedivi u okviru izrade ovog rada s obzirom na raspoloživu opremu, programe i vrijeme. Bez obzira na to, provedene simulacije dokazuju kako u Hrvatskoj postoje kapaciteti i mogućnosti za izvođenje profesionalnih istraživanja ovog tipa koja su u skladu sa svjetskim iskustvima.

7. ZAHVALE

Zahvaljujem se mentoru, doc.dr.sc. Želimiru Veinoviću, na pruženoj podršci i pomoći tijekom izrade rada.

Također se zahvaljujem doc.dr.sc. Dubravku Domitroviću na savjetima i pomoći pri radu u programskom paketu GeoStudio i izradi numeričkih modela.

Posebno se zahvaljujem gosp. **Leonu Kegelu**, *ARAO - Agencija za radioaktivne odpadke*, Ljubljana, na pomoći u prikupljanju i dopuštenju za korištenje podataka za izradu numeričkih modela i simulacija, koji su time bili provedeni na konkretnom primjeru iz prakse.

8. POPIS LITERATURE

Članci, knjige, poglavlja iz knjiga

ÅKESSON, A., KRISTENSSON, BÖRGESSON, L., DUECK, A. 2010. THM modelling of buffer, backfill and other system components. Critical processes and scenarios. SKB. Stockholm. Sweden.

ARAO 2019. Revised referenced scenario for geological disposal facility in hard rock with cost estimation for its implemetation - Spent nuclear fuel and high-level waste disposal in Slovenia or Croatia. IBE Consulting Engineers. Ljubljana, Slovenija.

AUTIO, J., KIRKKOMÄKI, T. 1996.: Boring of full scale deposition holes using a novel dry blind boring method. Saanio & Riekkola Oy, Helsinki, Finland.

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

BENNET, G. 2012. Initial review of physical properties and processes of the buffer and backfill – Installation and initial state. Strålsäkerhetsmyndigheten Technical Note 2012:42. Sweden.

BOROJEVIĆ ŠOŠTARIĆ, S., NEUBAUER. 2012. Principle rock types for radioactive waste repositories. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. Vol. 24. str. 11-18.

BRNIĆ, J. 1996: Elastomehanika i plastomehanika. Sveučilište u Rijeci. Školska knjiga. Rijeka.

DUNDA, S., KUJUNDŽIĆ, T., 2000. Eksploatacija i obrada arhitektonsko-građevnog kamena, Digitalni udžbenik. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Zagreb.

GEO-SLOPE. 2015. Seepage Modeling with SEEP/W. An Engineering Methodology. Alberta, Canada.

GEO-SLOPE. 2013. Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W. An Engineering Methodology. Alberta, Canada.

GEO-SLOPE. 2014. Thermal Modeling with TEMP/W. An Engineering Methodology. Alberta, Canada.

GRALAND, W.J., SAUNDERS, F. 1998 Decay Heat Estimates for MNR. Technical report 1998-03. Hamilton, Ontairo.

Haldar, S.K., Tišljarić, J. 2014. Introduction to Mineralogy and Petrology, Elsevier, Oxford.

IAEA 2009a. Classification of Radioactive Waste. General safety guide. Vienna. Austria.

IAEA 2009b. Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability. Vienna. Austria.

IAEA 2012. Safety Standards Storage of Spent Nuclear Fuel for protecting people and the environment No. SSG-15 Specific Safety. Vienna. Austria.

IKONEN, K. 2003. Thermal Analyses of Spent Nuclear Fuel Repository. Posiva. Olkiluoto. Finland.

JEMEC AUFLIČ, M., KOMAC, M., ŠINIGOJ, J. 2015. Modern Remote Sensing Techniques for Monitoring Pipeline Displacements in Relation to Landslides and Other Slope Mass Movements. Environmental Security of the European Cross-Border Energy Supply Infrastructure. Str. 31-48. Springer.

JUVANKOSKI, M. 2010. Description of Basic Design for Buffer. Working Report. Posiva. Eurajoki. Finland.

KETO, P., KARTTUNEN, P., KUMPULAINEN, S., KIVIRANTA, L., KORKIALA-TANTTU, L., KOSKINEN, V. & KOHO, P. 2012. Design, production and initial state of the deposition tunnel backfill. Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement - 5 International meeting Book of abstracts, p. 923. France.

KNUTSSON, S. 1983. On the thermal conductivity and thermal diffusivity of highly compacted bentonite. University of Lulea. Lulea, Sweden.

KONČIĆ, A. 2013. Mogućnosti za odabir lokacije podzemnog istraživačkog laboratorija u Hrvatskoj. Diplomski rad. Voditelj: Veinović, Želimir. Rudarsko Geološko Naftni fakultet. Zagreb.

KUKKONEN, I. 2000. Thermal properties of the Olkiluoto mica gneiss: Results of laboratory measurements. Working Report 2000-40. Posiva.

MCBREARTY, S., BROOKS, A. 2000. The revolution that wasn't: a new interpretation of the origin of modern human behavior. Journal of Human Evolution. 39 (5) str. 453–563.

NIREX. 2005. Nirex Report Specification for Waste Packages Containing Vitrified High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. United Kingdom.

NOGOLICA, I. 2015. Laboratorijski model odlaganja visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva. Diplomski rad. Voditelj: Veinović, Želimir. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

OJOVAN, M.I., LEE, W.E. 2005. An introduction to nuclear waste immobilisation. University of Sheffield. Sheffield.

RAIKO, H., SALO, J.R. 1996. Design report of the canister for nuclear fuel disposal. Posiva. Finland.

SAANIO, T., IKONEN, A., KETO, P., KIRKKOMÄKI, T., KUKKOLA, T., NIEMINEN, J., RAIKO, H. 2013. Design of the Disposal Facility. Posiva. Finland.

SAVAGE, D., ARTHUR, R. 2012. Exchangeability of bentonite buffer and backfill materials. STUK. Helsinki.

SWISS FEDERAL OFFICE OF ENERGY. 2008. SFOE Sectoral Plan for Deep Geological Repositories. Conceptual Part. Bern, Switzerland.

TOPRAK, E., MOKNI, N., OLLVELLA, S. 2013. Thermo-Hydro-Mechanical Modelling of Buffer. Synthesis Report. Posiva 2012-47. Posiva.

TOPRAK, E., OLIVELLA, S., MOKNI, N., PINTADO, X. 2012. Modelling of the THM-evolution of Olkiluoto nuclear waste repository. International meeting Book of abstracts. str. 923. France.

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

Zakonski dokumenti

Narodne novine. 2013. Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 141/2013). Zagreb.

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

Narodne novine. 2015. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 39/2015). Zagreb.

Narodne novine. 2017. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 130/2017). Zagreb.

Narodne novine. 2018. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 118/2018). Zagreb.

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

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

REPUBLIKA HRVATSKA. 2018. Nacionalni program provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva (Program za razdoblje do 2025. godine s pogledom do 2060. godine). Zagreb.

Vlada Republike Hrvatske. 2018. Prijedloga zaključka o smanjenju broja agencija, zavoda, fondova, trgovačkih društava, instituta, zaklada i drugih pravnih osoba s javnim ovlastima, (110. sjednica Vlade Republike Hrvatske, 02.08.2018.)
<https://vlada.gov.hr/UserDocsImages//2016/Sjednice/2018/07%20srpanj/110%20sjednica%20VRH//110%20-%20%20%20%20%202.pdf>

WWW

DUKE ENERGY. The facts about used nuclear fuel.
http://cms.ipressroom.com.s3.amazonaws.com/297/files/20169/57f6457a2cfac27a53fd1718_08178/08178_thmb.jpg. (19.04.2019.)

BENJI JEREW. 12.11.2013. New Method Could Improve Nuclear Waste Disposal.
<https://www.greenoptimistic.com/new-method-improve-nuclear-waste-disposal-20131112/#.XMR-U-gzaUl>. (19.04.2019.)

WORLD NUCLEAR NEWS. 12.11.2015. Licence granted for Finnish used fuel repository.
<http://www.world-nuclear-news.org/WR-Licence-granted-for-Finnish-used-fuel-repository-1211155.html>. (17.04.2019.)

ZBRINJAVANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA. Skladištenje ING-a i VRAO-a.
<https://radioaktivniotpad.org/skladistenje-ing-a-i-vrao-a/>. (19.04.2019.)

SAŽETAK

Galla Uroić

TERMIČKO-HIDRO-MEHANIČKI EFEKTI NA ODLAGALIŠTU ISTROŠENOG NUKLEARNOG GORIVA

Odlukom Vlade Republike Hrvatske (124. sjednica 9.11.2018) o donošenju Nacionalnog programa provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva, problem zbrinjavanja radioaktivnog otpada u Hrvatskoj postaje aktualan. Slovensko-hrvatsko Suvlasništvo nad Nuklearnom elektranom Krško (NEK) znači da polovina pogonskog i dekomisijskog otpada te istrošenog nuklearnog goriva (ING) pripada Hrvatskoj. Hrvatski program zbrinjavanja nisko i srednje radioaktivnog otpada polako napreduje, ali ING se i dalje čuva u bazenu NEK, a predviđeno je i suho skladištenje do trenutka odlaganja. U svijetu jedino Finska ima građevinsku dozvolu za odlaganje ING-a. Republika Slovenija je izradila generički projekt odlagališta ING koji je već prošao drugu reviziju i recenziju. Projektna ideja uključuje traženje lokacije na teritoriju obje države te konceptualno rješenje tipa SKB-3V u kristaliničnoj stijeni. U radu je dana procjena termičko-hidro-mehaničkih efekata odlagališta ING-a u kristaliničnoj stijeni (granodiorit) SKB-3V koncepta izradom numeričkog modela u programima SIGMA/W, SEEP/W i TEMP/W. Simulacijama je dokazano kako je moguće izraditi odlagalište ING-a u kristaliničnim stijenama Hrvatske ili Slovenije, da je generički projekt odlagališta dobro dizajniran te da se može izraditi model hidro-termo-mehaničkih efekata istrošenog nuklearnog goriva na stijenu u Hrvatskoj/Sloveniji koji dokazuje podobnost stijenske mase za ovu svrhu. Izrađen je kvalitativni model ponašanja potencijalne stijene i funkcionalnosti odabranog koncepta odlaganja ING-a i time je dokazano kako u Hrvatskoj postoje kapaciteti za izradu projekata i studija funkcionalnosti i sigurnosti budućeg odlagališta ING-a.

Ključne riječi: odlagalište, istrošeno nuklearno gorivo, termičko-hidro-mehanički efekti, numerički model.

SUMMARY

Galla Uroić

THERMO-HYDRO-MECHANICAL EFFECTS AT SPENT NUCLEAR FUEL REPOSITORY

By the Decision of the Government of the Republic of Croatia (124th Session, November 9th 2018) on the adoption of the National Program for the Implementation of the Strategy for the Management of Radioactive Waste, Used Resources and Spent Nuclear Fuel, the issue of radioactive waste management in Croatia becomes current. Slovene-Croatian co-ownership over the Krško nuclear powerplant (KNPP) means that half of the operational and decommissioning waste, as well as spent nuclear fuel (SNF) belongs to Croatia. The Croatian low and intermediate radioactive waste management program is slowly advancing, but SNF is kept in the pool at KNPP, and dry storage before disposal is also planned. Only Finland has a building permit for the disposal of SNF. The Republic of Slovenia has developed a generic project of the SNF repository that has already undergone a second revision and review. The project idea involves site selection in both countries and the conceptual solution of the SKB-3V type in the crystalline rock. The paper presents the estimate of the thermal-hydro-mechanical effects of the SNF repository in the crystalline rock (granodiorite) of SKB-3V concept by developing a numerical model in the SIGMA/W, SEEP/W and TEMP/W software. Simulations have shown that it is possible to construct an SNF repository in the crystalline rocks of Croatia or Slovenia, that the generic landfill project is well-designed and that a model of hydro-thermo-mechanical effects of spent nuclear fuel on the rock in Croatia/Slovenia can be produced which proves the suitability of the rock mass for this purpose. A qualitative model of potential rock behaviour and functionality of the chosen SNF disposal concept has been developed, and it has been demonstrated that there are capacities for designing and studying the functionality and safety of the future SNF repository in Croatia.

Key words: repository, spent nuclear fuel, thermo-hydro-mechanical effects, numerical model.

ŽIVOTOPIS

Galla Uroić

Rođena sam 20.10.1992. godine u Zagrebu. Osnovnu i srednju školu završavam u Kutini. Tijekom osnovnoškolskog i srednjoškolskog obrazovanja redoviti sam natjecatelj iz područja astronomije, te sudjelujem na nizu državnih natjecanja iz astronomije i fizike. Aktivni sam član Astronomskog društva Ivan Štefek u Kutini od 2001. godine. 2011. godine upisujem Rudarsko Geološko Naftni Fakultet, studij Rudarstvo. Završavam ga 2016. godine, te stječem akademski naziv univ. bacc. ing. mining. Nakon završetka preddiplomskog studija u ak. godini 2016/2017. upisujem diplomski studij Rudarstvo, smjer Geotehnika. Višegodišnji sam demonstrator iz kolegija Fizika, za sve smjerove preddiplomskog studija na matičnom fakultetu te iz predmeta Podzemna odlagališta radioaktivnog otpada.