

Termičko-hidro-mehanički efekti na stijeni odlagališta iskorištenog nuklearnog goriva

Uroić, Galla

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:525438>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-17**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

**TERMIČKO-HIDRO-MEHANIČKI EFEKTI NA STIJENI ODLAGALIŠTA
ISKORIŠTENOG NUKLEARNOG GORIVA**

Diplomski rad

Galla Uroić

R180

Zagreb, 2019.

TERMIČKO-HIDRO-MEHANIČKI EFEKTI NA STIJENI ODLAGALIŠTA ISKORIŠTENOG
NUKLEARNOG GORIVA

Galla Uroić

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

Sažetak

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 (THME) odlagališta ING-a u kristaliničnoj stijeni (granodiorit) SKB-3V koncepta izradom numeričkog modela u programima SIGMA/W, SEEP/W i TEMP/W. Za usporedbu, procijenjeni su i THME u istim programima za Koncept-4 (odlaganje aksijalno u tunelu). 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. Dokazano je kako je primjena Koncepta-4 također moguća, ako ne i poželjnija. 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

Završni rad sadrži: 131 stranica, 18 tablica, 110 slika i 75 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Dr sc. Želimir Veinović, docent RGNF

Pomagao pri izradi: Marija Macenić, asistent RGNF

Ocjenjivači: Dr sc. Želimir Veinović, docent RGNF
Dr. sc. Željko Andreić, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Dr. sc. Tomislav Korman, docent RGNF
Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 05. 07. 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

THERMO-HYDRO-MECHANICAL EFFECTS IN HOST ROCK FOR SPENT NUCLEAR FUEL
REPOSITORIES

Galla Uroić

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

Abstract

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 (THME) 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. For comparison, THME were also estimated in the same software for the Concept-4 (container placed axially in the tunnel). 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. It has been shown that application of Concept-4 is also possible, if not more desirable. 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 reviewing the functionality and safety of the future SNF repository in Croatia.

Keywords: repository, spent nuclear fuel, thermo-hydro-mechanical effects, numerical model

Thesis contains: 131 pages, 18 tables, 110 figures & 75 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor

Tech. assistance: Marija Macenić, Assistant

Reviewers: Assistant Professor Želimir Veinović, PhD
Full Professor Željko Andreić, PhD
Assistant Professor Dubravko Domitrović, PhD
Assistant Professor Tomislav Korman, PhD
Associated Professor Tomislav Kurevija, PhD

Defence date: July 5th, 2019, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

ZAHVALE

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

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Željku Andreiću na dugogodišnjoj podršci i te pomoći i savjetima tijekom izrade rada.

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

Zahvaljujem se doc.dr.sc. Tomislavu Kormanu na pomoći i savjetima tijekom izrade rada.

Zahvaljujem se izv.prof.dr.sc. Tomislavu Kureviji na pomoći oko izrade rada i osobito numeričkih modela.

Zahvaljujem se Mariji Macenić, mag.ing.rud. na pomoći pri izradi simulacija prijenosa topline kroz stijenu.

Posebno se zahvaljujem gosp. **Leonu Kegelu**, *ARAO - Agencija za radioaktivne otpadke*, 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.

Galla Uroić

U Zagrebu, 2019.

z3r3a2 z br 3a3a6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

bortaS bIr jablu'DI', reH QaQqu' nay'!

qaStaHvIS nachllj!

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. RADIOAKTIVNI OTPAD I IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE.....	3
2.1. Radionuklidi i ionizirajuće zračenje	3
2.2. IAEA klasifikacija radioaktivnog otpada	10
2.3. Hrvatska klasifikacija radioaktivnog otpada.....	12
2.4. Istrošeno nuklearno gorivo	15
2.5. Visoko radioaktivni otpad.....	16
2.6. Radioaktivni otpad u Republici Hrvatskoj	18
2.6.1. Institucionalni radioaktivni otpad i iskorišteni izvori	18
2.6.2. Prirodno radioaktivni materijali	20
2.6.3. Radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo iz NE Krško	23
3. DUBOKA GEOLOŠKA ODLAGALIŠTA	26
3.1. Koncepti i tehnologije zbrinjavanja VRAO i ING	27
3.2. Koncept KBS-3V	32
3.3. Koncept KBS-3H.....	37
3.4. Koncept-4	39
3.5. Usporedba koncepata	41
3.6. Spremnici za odlaganje.....	43
3.7. Bentonitna ispuna	47
3.8. Stijenski materijal	53
4. NUMERIČKI MODEL TERMIČKO-HIDRO-MEHANIČKIH EFEKATA	58
4.1. Metoda konačnih elemenata	58
4.2. Postupak modeliranja u programu Geostudio.....	60
4.2.1. Odabrani materijali i osnovne pretpostavke	63
4.2.2. Proračun u programu „SIGMA/W“	64
4.2.3. Proračun u programu „SEEP/W“	75
4.2.4. Proračun u programu „TEMP/W“	79
4.3. Modeliranje koncepta Koncept-4 u programu GeoStudio.....	91
4.3.1. Proračun u programu „SIGMA/W“	91
4.3.2. Proračun u programu „SEEP/W“	103
4.3.3. Proračun u programu „TEMP/W“	104
5. RASPRAVA REZULTATA	118

6. ZAKLJUČAK	123
7. POPIS LITERATURE	126

POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Klasifikacija RAO-a (NN 12/2018)	13
Tablica 2-2 Procjena postojećeg institucionalnog RAO i II u RH (NN 125/2014).....	20
Tablica 2-3 Sumarni pregled inventara RAO iz NeK (NN 125/2014)	24
Tablica 2-4 Sumarni pregled inventara ING-a u NEK (NN 125/2014)	24
Tablica 3-1 Koncepti odlaganja ING-a i VRAO-a (Baldwin i dr., 2008).	29
Tablica 3-2 Usporedba različitih koncepata odlaganja prema njihovim karakteristikama (utežni kriteriji prema: Veinović, usmeno priopćenje, 2019).....	42
Tablica 3-3 Dimenzije spremnika za ING (NIREX, 2005, ARAO, 2019).....	45
Tablica 3-4 Tipični parametri ING-a za pojedinačni spremnik (NIREX, 2005).....	46
Tablica 3-5 Količine plinova koje se mogu osloboditi iz ING-a (NIREX, 2005).....	47
Tablica 3-6 Traženi parametri za bentonit (Keto i dr., 2012; Juvankoski, 2010).....	50
Tablica 3-7 Traženi parametri za bentonit u svim oblicima (prema: NAGRA, 2009 i 2002, Wiczorek i dr., 2011, ARAO, 2019).....	52
Tablica 3-8 Pojednostavljeni kriteriji za odabir lokacije dubokog geološkog odlagališta s gledišta sigurnosti i tehničke izvedivosti (SFOE, 2008).	54
Tablica 3-9 Neke od karakteristika granodiorita (Gill, 2010).	55
Tablica 4-1 Parametri potrebni za simulaciju u programu SIGMA/W.	66
Tablica 4-2 Granični uvjeti za proračun stanja naprezanja i pomaka u programu SIGMA/W.	66
Tablica 4-3 Maksimalni pomaci (u kaloti transportnog tunela) prema radnim fazama.	71
Tablica 4-4 Parametri potrebni za simulaciju u programu SIGMA/W.	91
Tablica 4-5 Granični uvjeti za proračun stanja naprezanja i pomaka u programu SIGMA/W.	92

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Grafički prikaz modela atoma litija (.....)	3
Slika 2-2 Grafički prikaz fisije atoma uranija U-235 (.....)	4
Slika 2-3 Grafički prikaz α raspada.....	5
Slika 2-4 Grafički prikaz β raspada.....	5
Slika 2-5 Grafički prikaz γ raspada.....	6
Slika 2-6 Spektar elektromagnetskog zračenja (MIRION TECHNOLOGIES, 2019).....	7
Slika 2-7 Lijevo: snimka (shadowgraph) vlastitog stopala koju je Nikola Tesla napravio 1896 (MNT, 2019); desno: prvi rendgenski snimak koji je napravio Wilhelm Röntgen 1895. šake svoje supruge Anne Berthe Ludwig.....	7
Slika 2-8 Grafički prikaz n zračenja.....	8
Slika 2-9 Grafički prikaz međudjelovanja ionizirajućeg zračenja s tvarima (.....)	8
Slika 2-10 Grafički prikaz radijacija i njihovog prodiranja (štitova).....	9
Slika 2-11 Grafički prikaz smanjenja intenziteta zračenja (jakost zračenja ili radijacijski intenzitet) s udaljenošću.	10
Slika 2-12 Shema klasifikacije radioaktivnog otpada.....	11
Slika 2-13 Shematski prikaz rasporeda odlagališta RAO po dubini: pripovršinska, plitka i duboka geološka.....	14
Slika 2-14 Shematski prikaz gorivnog elementa, šipke i peleta s uranijevim oksidom (gorivom).....	15
Slika 2-15 Borosilikatno staklo za vitrifikaciju VRAO-a.....	17
Slika 2-16 Spremnik za vitrificirani VRAO (NIREX, 2005).....	17
Slika 2-17 Ulaz u skladište institucionalnog radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada (Medaković, 2016).	19
Slika 2-18 Pogled na skladište institucionalnog radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora na Institutu Ruđer Bošković (Medaković, 2016).	19
Slika 2-19 Odlagalište šljake i pepela porijeklom iz proizvodnog procesa dobivanja električne energije izgaranjem ugljena u Termoelektrani Plomin I i II (HEP, 2011).	21
Slika 2-20 Područje nekadašnje tvornice Jugovinil u Kaštelanskom zaljevu: (A) odlagalište pepela i šljake svojevremeno dopremljenih iz drugih termoelektrana SFRJ na području mjesta kaštel Gomilica, (B) odlagalište pepela i šljake na području mjesta kaštel Sućurac, termoelektrane koja je pripadala tvornici Jugovinil (Veinović i dr., 2018).	22
Slika 2-21 Lokacija za privremeno pohranjivanje fosfogipsa tvornice Petrokemija d.d.: 4 nasipima odvojene kazete odlagališta (DGU, 2018).	23

Slika 2-22 Nuklearna elektrana Krško (NEK, 2018).....	23
Slika 2-23 Bazen za istrošeno gorivo (ZBRINJAVANJE RAO, 2019).....	25
Slika 3-1 Pad radiotoksičnosti kao rezultat radioaktivnog raspada prikazan kao funkcija vremena za ING i VRAO (Baldwin i dr., 2008).....	26
Slika 3-2 Konceptualno rješenje za odlaganje VRAO i/ili ING (Veinović i dr., 2015).....	27
Slika 3-3 Tip odlagališta s obzirom na položaj spremnika u hodniku: horizontalni (narančasto) ili vertikalni (plavo) (Končić, 2013).....	28
Slika 3-4 Švedski koncepti odlaganja istrošenog nuklearnog goriva: KBS-3V (lijevo) i KBS-3H (desno) (Savage, 2012).	32
Slika 3-5 Prikaz izrade hodnika za odlaganje (Saanio i dr., 2013).....	33
Slika 3-6 Uzdužni presjek kroz hodnik za odlaganje (prema: ARAO, 2019).	34
Slika 3-7 Poprečni presjek kroz hodnik i bušotinu za odlaganje (gore) i detalj – poprečni presjek kroz bušotinu i spremnik (dolje) (prema: ARAO, 2019).....	35
Slika 3-8 Tlocrtni prikaz transportnih/vjetrenih i odlagališnih tunela i okana (prema: ARAO, 2019), sve mjere izražene su u metrima.	36
Slika 3-9 Švedski koncept odlaganja istrošenog nuklearnog goriva KBS-3H (detalj prema: Savage, 2012).	38
Slika 3-10 Prikaz odlagališnog tunela za KBS-3H koncept (Börgesson i dr., 2017).....	38
Slika 3-11 Prikaz ugradnje spremnika na posteljicu od prešanog bentonita za Koncept-4 (prema: NAGRA, 2009 i 2002).....	39
Slika 3-12 Prikaz rasporeda spremnika u odlagališnom tunelu za Koncept-4 (prema: NAGRA, 2009 i 2002).....	40
Slika 3-13 Raspored spremnika u odlagališnom tunelu za Koncept-4 (prema: ARAO, 2019; Baldwin i dr., 2008; NAGRA, 2009 i 2002), sve mjere izražene su u metrima.....	40
Slika 3-14 Standardni dizajn spremnika za ING (lijevo) i VRAO (desno) (NIREX, 2005).	43
Slika 3-15 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).	44
Slika 3-16 Insert – unutrašnja struktura od lijevanog željeza, s jednim ubačenim gorivnim elementom, finski koncept (POSIVA), (izvor: prof.dr.sc. Ivan Vrkljan, privatna zbirka)..	45
Slika 3-17 Zapunjavanje hodnika blokovima prešanog bentonita i bentonitnim peletima (Keto i dr., 2012).....	48
Slika 3-18 Zapunjavanje hodnika i bušotina bentonitom (Keto i dr., 2012).....	49

Slika 3-19 Priprema prstenova od bentonita kao materijala zapunjavanja prostora između spremnika i stijene (Bennett, 2012).....	49
Slika 3-20 Zapunjavanje transportnih/vjetrenih hodnika bentonitnim peletima (prema: Keto i dr., 2012)	50
Slika 3-21 Spremnik na posteljici od prešanog bentonita u peletima djelomično zapunjenom odlagališnom hodniku, vidi se podgrada (čeličnom mrežom i sidrima – opcija u slučaju potrebe i transportne tračnice) (izvor: doc.dr.sc. Želimir Veinović, privatna zbirka).....	51
Slika 3-22 Testiranje tehnologije zapunjavanja prostora oko spremnika bentonitnim peletima (Fries i dr., 2008).....	52
Slika 3-23 Trokomponentni dijagram kiselih stijena (Gill, 2010).....	55
Slika 3-24 Fotografija granodiorita (Hauzenberger-Granodiorit) (ROLL-STONE, 2009).	56
Slika 3-25 Pojednostavljena geološka karta Republike Slovenije (Jemec Auflič i dr., 2015)	57
Slika 3-26 Pojednostavljena geološka karta Hrvatske (Dunda i Kujundžić, 2000).....	57
Slika 4-1 Unos točaka modela.	60
Slika 4-2 Definiranje regija.	61
Slika 4-3 Definiranje mreže konačnih elemenata.....	61
Slika 4-4 Zadavanje parametara materijala.	62
Slika 4-5 Zadavanje graničnih uvjeta.	62
Slika 4-6 Sučelje za unos parametara materijala u program SIGMA/W.....	65
Slika 4-7 Osnovni model s mrežom konačnih elemenata za proračun.....	67
Slika 4-8 Model naprezanja u stijeni za poprečni presjek po bušotini za odlaganje, prema fazama.....	68
Slika 4-9 Mohrove kružnice za točke s maksimalnim naprezanjima (naznačene strelicama).	69
Slika 4-10 Model pomaka u stijeni za poprečni presjek, prema fazama:	70
Slika 4-11 Model pomaka u stijeni za poprečni presjek po bušotini za odlaganje.....	71
Slika 4-12 Naprezanja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi iskopa...	72
Slika 4-13 Naprezanja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi ugradnje spremnika.	72
Slika 4-14 Naprezanja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi zapunjenih odlagališnih tunela.....	73
Slika 4-15 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi iskopa.	73

Slika 4-16 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi ugradnje spremnika.	74
Slika 4-17 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi zapunjenih odlagališnih tunela.....	74
Slika 4-18 Osnovni model, s postavljenim regijama materijala i graničnim uvjetima (tok s desna na lijevo i nepropusna podloga).	76
Slika 4-19 Rezultat analize prve faze: slabije frakturirana oštećena zona – porni tlakovi..	77
Slika 4-20 Rezultat analize prve faze: slabije frakturirana oštećena zona – brzine toka.....	77
Slika 4-21 Rezultat analize druge faze: jače frakturirana oštećena zona – porni tlakovi...	78
Slika 4-22 Rezultat analize druge faze: jače frakturirana oštećena zona – brzine toka.....	78
Slika 4-23 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).	80
Slika 4-24 Toplinska vodljivost bentonita kao funkcija stupnja saturacije (Ikonen, 2003 prema Kukkonen, 2000).	81
Slika 4-25 Odnos promjene temperature na površini pojedinog spremnika i stijenci bušotine kroz vrijeme (Ikonen, 2003).	82
Slika 4-26 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu.....	83
Slika 4-27 Model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu.....	83
Slika 4-28 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje.	84
Slika 4-29 Profil (horizontalni s početkom na SREDINI spremnika)	84
Slika 4-30 Promjene temperatura po profilu (slika 5-24), kroz vrijeme.	85
Slika 4-31 Postavljen osnovni model za simulaciju širenja topline kroz odlagališne tunele, lijevo i desno u odnosu na transportni tunel.	87
Slika 4-32 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu.....	87
Slika 4-33 Model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu.....	88
Slika 4-34 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje)	88
Slika 4-35 Profil (horizontalni kroz sredine spremnika naznačen modrom bojom s karakterističnim točkama) po kojem su prikazane promjene temperatura kroz vrijeme, dane grafovima na slici 4-36.	89
Slika 4-36 Promjene temperatura po profilu (slika 5-35), kroz vrijeme.	90

Slika 4-36 Model naprezanja u stijeni za Koncept-4: (a) prije iskopa, (b) nakon iskopa tunela, (c) nakon ugradnje spremnika na posteljicu, (d) nakon ugradnje bentonitne ispune.	93
Slika 4-36 Mohrove kružnice za točku s maksimalnim naprezanjima i tjeme tunela (kalota) (naznačene strelicama).	94
Slika 4-37 Pomaci u fazi iskopa tunela (iznosi u mm).	95
Slika 4-38 Pomaci u fazi ugradnje spremnika (iznosi u mm).	95
Slika 4-39 Pomaci u fazi zapunjavanja tunela (iznosi u mm).	96
Slika 4-40 Detalj kalote zapunjenog tunela s grafikonom iznosa pomaka po visini.	96
Slika 4-41 Naprezanja za model tri susjedna tunela u fazi iskopa.	97
Slika 4-42 Naprezanja za model tri susjedna tunela u fazi ugradnje spremnika.	98
Slika 4-43 Naprezanja za model tri susjedna tunela u fazi zapunjavanja tunela.	99
Slika 4-44 Pomaci za model tri susjedna tunela u fazi iskopa (iznosi u mm).	100
Slika 4-45 Pomaci za model tri susjedna tunela u fazi ugradnje spremnika (iznosi u mm).	101
Slika 4-46 Pomaci za model tri susjedna tunela u fazi zapunjavanja tunela (iznosi u mm).	102
Slika 4-47 Smjer toka nakon ispunjavanja tunela bentonitom s vjerojatnim rješenjem toka kroz propusniju stijenu oko bentonitom ispunjenog tunela.	104
Slika 4-48 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz bentonit i stijenu.	105
Slika 4-49 Distribucije temperatura kroz poprečni presjek kroz odlagališni tunel nakon 25 godina.	106
Slika 4-50 Model s vidljivom mrežom konačnih elemenata s označenim odabranim točkama po kojima je dan pregled promjena temperature prema fazama kroz vremenske periode 1, 2, 5, 10, 15 i 25 godina (na slici 4-51).	106
Slika 4-51 Promjene temperatura po profilu (slika 4-50), kroz vrijeme.	107
Slika 4-51 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz bentonit i stijenu.	109
Slika 4-52 Distribucije temperatura kroz poprečni presjek kroz odlagališni tunel nakon 25 godina.	110
Slika 4-53 Model s vidljivom mrežom konačnih elemenata s označenim odabranim točkama po kojima je dan pregled promjena temperature prema fazama kroz vremenske periode 1, 2, 5, 10, 15 i 25 godina (na slici 4-54).	111
Slika 4-54 Promjene temperatura po profilu (slika 4-53), kroz vrijeme.	112
Slika 4-55 Model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu.	114

Slika 4-56 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje.	115
Slika 4-57 Model s vidljivom mrežom konačnih elemenata s označenim odabranim točkama (profil) po kojima je dan pregled promjena temperature prema fazama kroz vremenske periode 1, 2, 5, 10, 15 i 25 godina (na slici 4-58).....	116
Slika 4-58 Promjene temperatura po profilu (slika 4-57), kroz vrijeme.	117
Slika 5-1 Crvenim pravokutnikom označeno područje jednog panela za koji se pokušalo provesti simulaciju, s obzirom da za cijelu površinu odlagališta (sva četiri panela) model nije bio provediv.....	118
Slika 5-2 Maksimalno pojednostavljeni elementi/regije gdje su presjeci kroz spremnike predstavljeni s kvadratima umjesto kružnicama.....	119
Slika 5-3 Crvenim pravokutnikom označeno područje za koje se pokušalo provesti simulaciju.	119
Slika 5-1 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura dva susjedna panela odlagališnih tunela nakon 21 godine (po odlaganju) – tlocrt, simulacija za Olkiluoto (Ikonen, 2003).....	120
Slika 5-2 Eksperimentalna mjerenja provedena na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu: rezultat mjerenja promjene temperature pri zagrijavanju magmatske stijene električnim grijačem (Nogolica, 2015).....	121
Slika 5-3 Skica eksperimenta sa zagrijavanjem magmatske stijene (simulacija odlaganja spremnika s ING-om) električnim grijačem (Nogolica, 2015).....	122

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
λ	valna duljina	m
μ	Poissonov koeficijent	-
ρ	gustoća	kg/m ³
ρ_d	suha gustoća	kg/m ³
σ	normalno naprezanje	Pa
σ	tlačna čvrstoća	Pa
τ	posmično naprezanje	Pa
τ	posmična čvrstoća	Pa
φ	kut	°
φ	kut unutrašnjeg trenja	°
Φ	toplinski tok	W
Φ	promjer	m
A	aktivnost radioaktivnoga izvora (radioaktivnost)	Bq
A	površina	m ²
A	maseni broj atoma	-
a	specifična aktivnost izvora	Bq/kg
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
e	naboj	C
F	sila	N
f	frekvencija	Hz
h	visina	m
I	intenzitet zračenja	
i	gradijent	-

k	propusnost	m/s
l	pomak	m
m	masa	g
N	broj neutrona u jezgri atoma	-
n	poroznost	-
r	polumjer	m
q	jedinični tok	m/s
Q	protok	m ³ /s
RT	stupanj radiotoksičnosti	-
S	stupanj saturacije	m ³ /m ³
S	jakost izvora	W/sr
t	vrijeme	s
t	temperatura	°C
T	temperatura	°K
$T_{1/2}$	vrijeme poluraspada	godina/dan/...
u	porni tlak	Pa
v	brzina	m/s
v	brzina toka	m/s
v	brzina valova	m/s
V	zapremina	m ³
w	vlažnost	%
W	toplinska snaga	W
Z	broj protona u jezgri atoma	-

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 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

NAGRA – *Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle*, Nacionalna zadruha za zbrinjavanje radioaktivnog otpada – švicarski tehnički centar za područje dubokog geološkog odlaganja radioaktivnog otpada

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

SFRJ – Socijalistička Federativna Republika Jugoslavija

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

SRAO – srednje radioaktivni otpad

TBM – *Tunnel Boring Machine*, punoprofilni tuneler

TE – termoelektrana

THME – termičko-hidro-mehanički efekti

VKRAO – vrlo kratkoživući radioaktivni otpad

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

VNRAO – vrlo niskoradioaktivni otpad

VRAO – visoko radioaktivni otpad

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

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.

Bremsstrahlung – (kočno zračenje, bijela radijacija, zakočno zračenje) zračenje nastalo kad jako pozitivno električno polje jezgre djeluje na upadni elektron koji skreće s putanje, pri čemu mu se kinetička energija smanjuje, a razlika razine kinetičke energije u vremenu emitira se kao rentgenska zraka.

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 plutonijevog 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.

Retrievability – politički uvjetovana i inženjerski opravdana mogućnost vraćanja (vađenja) ING-a iz odlagališta u slučaju napretka tehnologija obrade.

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.

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

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.

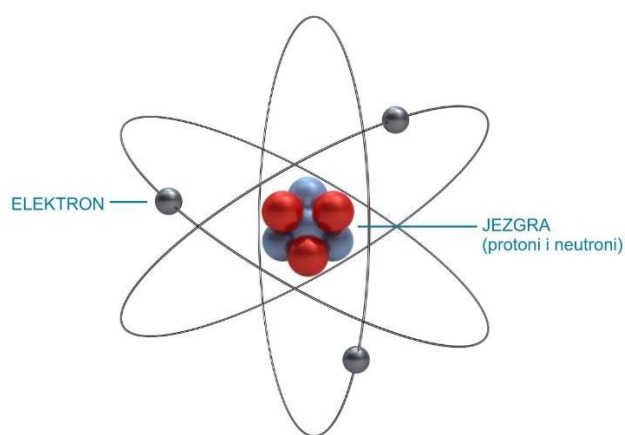
Premda RH i RS još nemaju odabranu lokaciju za odlaganje ING-a, nužno je znati postoji li mogućnost za izradu takvog odlagališta u Hrvatskoj i pod kojim uvjetima. Jedno od logičnih potencijalnih rješenja je odlaganje u granitne ili slične stijene (npr. granodiorit) kojih u Hrvatskoj i Sloveniji ima.

Cilj rada je provesti analizu funkcionalnosti dijela mogućeg generičkog modela odlagališta ING-a u Hrvatskoj ili Sloveniji, na isto tako generičkoj lokaciji, kao i alternativnog rješenja. **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, (3) alternativno rješenje (drugi koncept odlaganja) u istoj stijeni je isto tako izvediv i (4) 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 odabranih 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 I IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE

2.1. Radionuklidi i ionizirajuće zračenje

Atom (slika 2-1) je osnovni, najmanji dio na koji tvar može biti rastavljena bez otpuštanja električki nabijenih čestica, odnosno najmanji sastavni dio kemijskih elemenata koji zadržava svojstva elementa, a sastoji se od jezgre i elektronskog omotača (Browne, 1998).



Slika 2-1 Grafički prikaz modela atoma litija (MIRION TECHNOLOGIES, 2019).

Jezgra atoma sastoji se od nukleona: protona i neutrona. Proton ima pozitivan naboj ($e = +1,6 \times 10^{-19} C$), a neutron je električki neutralan. Mase su im oko 1 840 puta veće od mase elektrona (Browne, 1998).

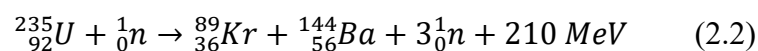
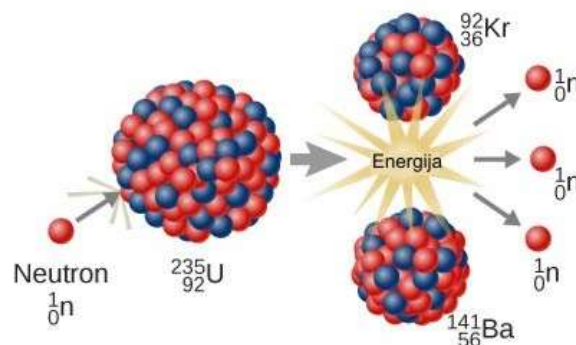
Maseni broj atoma (A) jednak je zbroju atomskog broja (broja protona – Z) i broja neutrona (N) u jezgri (izraz 2.1).

$$A = N + Z \quad (2.1)$$

Atomski broj Z je identifikacijski broj određenog elementa, kojih je trenutno je poznato 118. Neki od njih su nestabilni, a neki se ne pojavljuju u prirodi – proizvedeni su umjetno u laboratoriju i svi su radioaktivni i s vrlo kratkim vremenom života. Broj protona u jezgri je jednak njenom električnom naboju i uvijek odgovara rednom broju kemijskog elementa u periodnom sustavu elemenata.

Izotopi su varijante elemenata koje imaju isti atomski broj, ali se razlikuju po broju neutrona. Primjer je vodik s izotopima: procij (1_1H), deuterij (2_1H) i tricij (3_1H). Izotopi su nestabilni ako im je omjer protona i neutrona veći ili manji od omjera potrebnog za stabilnost, nestabilni izotopi teže stabilnosti postižu se radioaktivnim raspadom koji mijenja masu i/ili kemijska svojstva elemenata uz emitiranje ionizirajućeg zračenja: jezgra radionuklida (izotopa) se spontano raspada, prelazi u neku drugu jezgru i emitira čestice i/ili elektromagnetsko zračenje kratke valne duljine. Navedena pojava naziva se radioaktivnost, a proces transmutacija (radioaktivni raspad). Svi atomi teži od bizmuta (Bi-83) su radioaktivni (Browne, 1998).

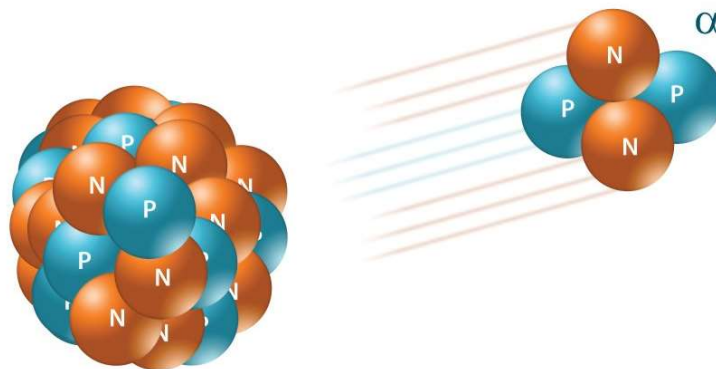
S obzirom da je energija vezanja atomske jezgra manja kod težih nuklida, oni se raspadaju (cijepaju) na dva fisijska produkta (dvije nove jezgre, dva nova elementa) uz emisiju jednog ili više neutrona i veliku količinu energija. Spontana fisija je spora, ali može se ubrzati djelovanjem sporih neutrona. Ovaj proces se odvija tijekom nuklearnih eksplozija ili u nuklearnim reaktorima (Browne, 1998). Primjer je dan na slici 2-2 i izrazom 2.2.



Slika 2-2 Grafički prikaz fisije atoma uranija U-235 (MIRION TECHNOLOGIES, 2019).

Raspadom nestabilnih jezgri emitira se radijacija. Postoji više vrsta radioaktivnih raspada, odnosno radioaktivnosti, od kojih su uobičajene (najčešće spominjane) alfa (α), beta (β), gama (γ), i neutronska (n), ostali oblici su manje poznati, odnosno spominjani u popularnoj literaturi (teškoionsko zračenje, dvostruko protonsko zračenje, protonsko zračenje...) i nisu tematski vezani uz ovaj rad.

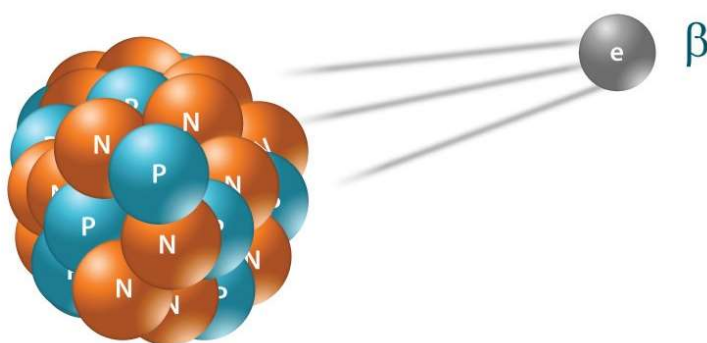
Alfa (α) zračenje (slika 2-3) je emitiranje jezgri helija (dva protona i dva neutrona – alfa čestica) iz velike jezgre koja se raspada, što uzrokuje smanjenje masenog broja atoma za 4. Primjeri radioizotopa koji imaju α -raspad (α emiteri) su: americij (Am-241), plutonij (Pu-236), uranij (U-238), torij (To-232), radij (Ra-226) i radon (Rn-222) (Browne, 1998).



Slika 2-3 Grafički prikaz α raspada (MIRION TECHNOLOGIES, 2019).

Brzina gibanja α čestice ovisi o jezgri iz koje je emitirana, a s obzirom da zbog velike mase i jakog ionizirajućeg djelovanja brzo gubi kinetičku energiju, ima mali doseg (nekoliko centimetara) i ne prodire duboko u tvar (Browne, 1998).

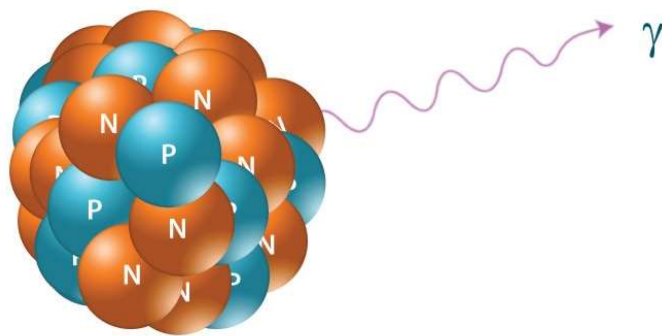
Beta raspad (β) je izazvan djelovanjem slabe nuklearne sile pri kojem se oslobađa (zrači) jedan elektron (slika 2-4) ili pozitron, uz što ne dolazi do promjene atomske mase – atomski broj se povećava ili smanji za 1 i jezgra se transmutira u novi element. Postoji više vrsta β raspada, od kojih su najznačajniji: β^- raspad (jezgra zrači elektron i antineutrino), β^+ raspad (jezgra zrači pozitron i antineutrino – pozitronsko zračenje) i elektronski uhvat (jezgra uhvati elektron iz orbite i zrači neutrino) (Browne, 1998).



Slika 2-4 Grafički prikaz β raspada (MIRION TECHNOLOGIES, 2019).

S obzirom da β čestica ima manju veličinu (masu) od α čestice, ona ima i manju sposobnost ionizacije, ali veći doseg (do nekoliko metara) i prodire dublje u tvar. Kod prolaza β čestica kroz tvar može nastati i tzv. zakočno rendgensko zračenje (njem. *bremstrahlung*) poznato i kao bijela radijacija, kad jako pozitivno električno polje jezgre djeluje na upadni elektron koji skreće s putanje, pri čemu mu se kinetička energija smanjuje, a razlika razine kinetičke energije u vremenu emitira se kao rentgenska zraka. (Browne, 1998).

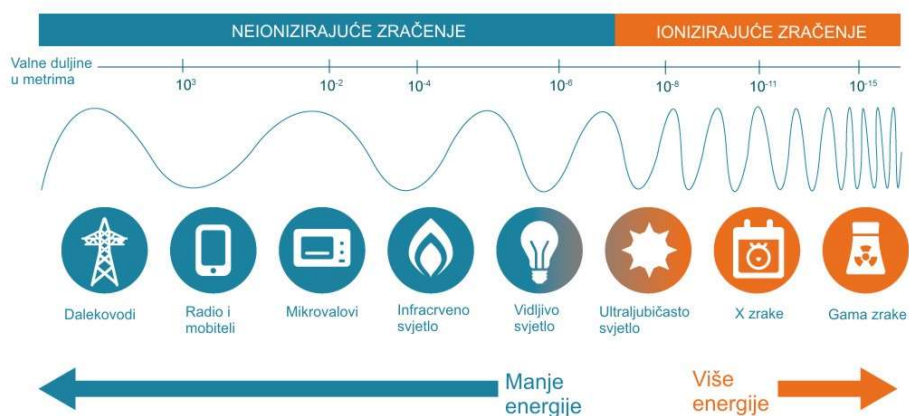
Gama zračenje (γ) (slika 2-5) nastaje kad jezgra pada iz pobuđenog u stanje niže energije, obično nakon α ili β raspada koji su jezgru ostavili u pobuđenom stanju, u obliku elektromagnetskog zračenja visoke frekvencije s jako kratkim valovima ($< 0,5 \text{ nm}$) (Browne, 1998).



Slika 2-5 Grafički prikaz γ raspada (MIRION TECHNOLOGIES, 2019).

S obzirom da fotoni γ zraka posjeduju znatno veću energiju od fotona vidljive svjetlosti, prodornost i doseg su im veći od α ili β čestica, tako da γ zrake prodiru duboko u tvar.

X-zrake (rendgensko zračenje) su područje elektromagnetskog zračenja (slika 2-6) s valnim duljinama 10,00-0,01 nm, što odgovara području između ultraljubičastog i gama zračenja. Osnovna razlika između rendgenskih i γ zraka je u načinu nastajanja: rendgenske zrake nastaju u vanjskom elektronskom omotaču atoma, a γ zrake u jezgri atoma (Browne, 1998).



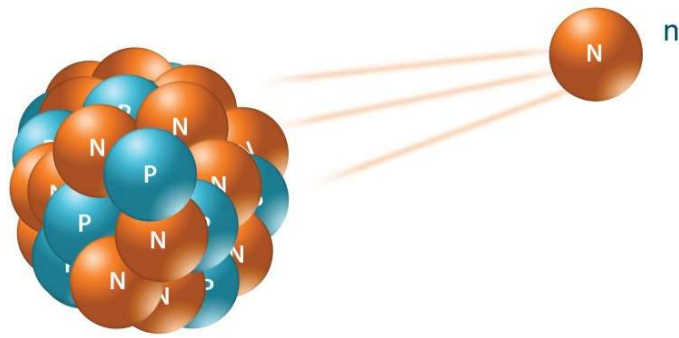
Slika 2-6 Spektar elektromagnetskog zračenja (MIRION TECHNOLOGIES, 2019).

Zanimljivo je primijetiti kako je Nikola Tesla u periodu 1887.-1892. radio istraživanja s x-zrakama, s tzv. *sensitive brush x-ray tube* kojima je dobivao snimke (slika 2-7) i nazvao ih *shadowgraphs* (Vučević i dr., 2016), prije Wilhelma Röntgena, koji ih je otkrio 1895., o njima objavio rad iste godine i za to otkriće dobio Nobelovu nagradu 1901., a po njemu su zrake, kao počast radi njihovog otkrivanja, dobile ime. Na žalost, oprema kojom je Nikola Tesla radio istraživanja, zajedno s prvobitnim snimkama i brojnim drugim materijalima, izgubljena je u požaru 1895. (Baltić i Baltić, 2007).



Slika 2-7 Lijevo: snimka (shadowgraph) vlastitog stopala koju je Nikola Tesla napravio 1896 (MNT, 2019); desno: prvi rendgenski snimak koji je napravio Wilhelm Röntgen 1895. šake svoje supruge Anne Berthe Ludwig (Thomas i Banerjee, 2013).

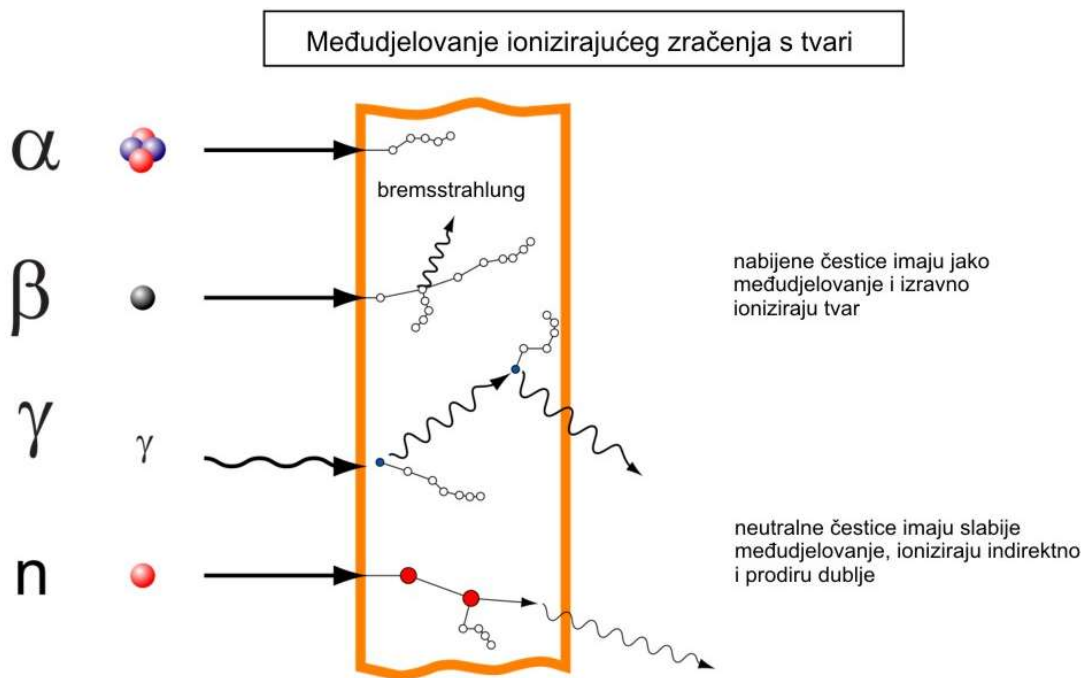
Neutronska (n) zračenje (slika 2-8) predstavljaju brzi slobodni neutroni, obično emitirani spontanom ili induciranom nuklearnom fisijom.



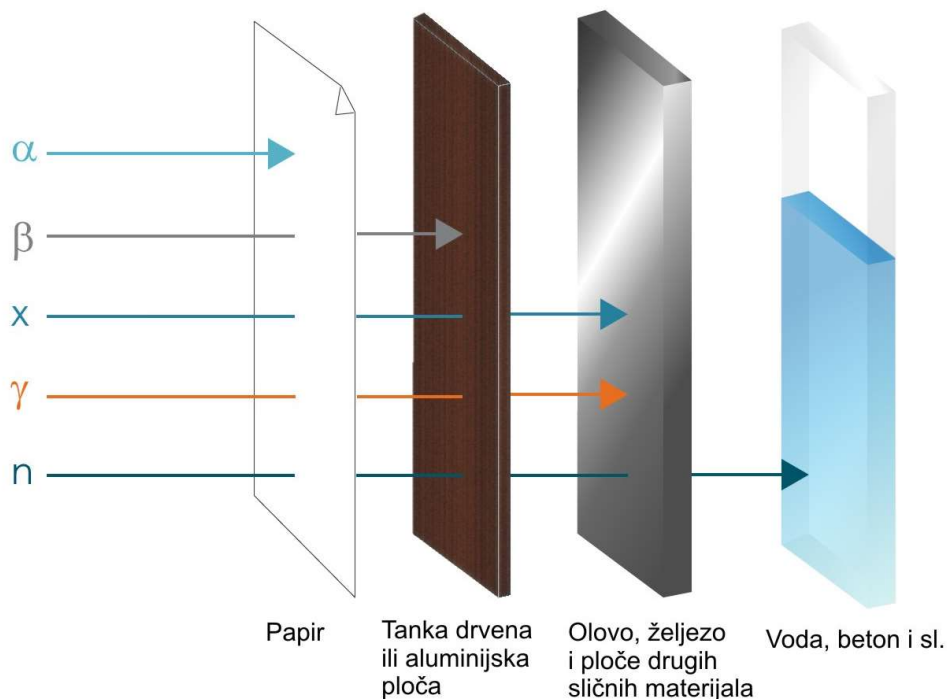
Slika 2-8 Grafički prikaz n zračenja (MIRION TECHNOLOGIES, 2019).

Neutroni lako prodiru kroz tvar jer nemaju električni naboj i imaju jako velik doseg, ali mogu se uhvatiti vodikom bogatim materijalima (voda, beton, određeni tipovi parafina). Atom koji ih apsorbira postaje nestabilan što može izazvati dodatno ionizirajuće zračenje (Browne, 1998).

Međudjelovanje ionizirajućeg zračenja i tvari prikazano je na slici 2-9, a način zaustavljanja (štitovi) na slici 2-10.



Slika 2-9 Grafički prikaz međudjelovanja ionizirajućeg zračenja s tvarima (NAPYIKENOBI, 2019)

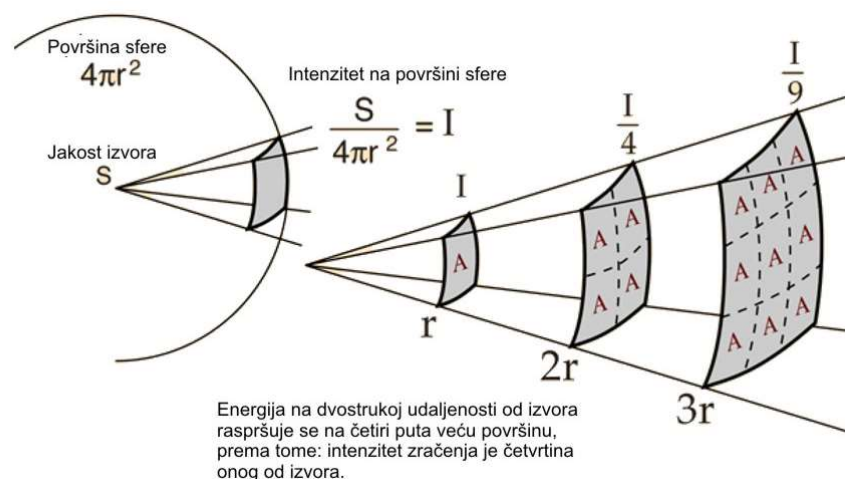


Slika 2-10 Grafički prikaz radijacija i njihovog prodiranja (štitova) (MIRION TECHNOLOGIES, 2019).

Debljina štita i materijal od kojeg je štiti napravljen nisu u jednostavnom odnosu poput: što je štiti deblji ili gušći time je i bolji (učinkovitiji). Jedan od materijala od kojih se mogu izrađivati biološki štitovi je i osiromašeni uranij, odnosno beton koji sadrži osiromašeni uranij kao agregat. Učinkovitost štita zavisit će o više parametara, no proračun biološkog štita nije dio ovog rada.

ALARA princip (*As Low As Reasonably Achievable*) je sigurnosni princip koji je dizajniran kako bi se minimiziralo doze radijacije i utjecaj radioaktivnih materijala (WHO, 2004). Glavni čimbenici ALARA principa su:

- VRIJEME – minimizirati vrijeme izloženosti
- UDALJENOST (slika 2-11) – povećanjem udaljenosti (za faktor 2) smanjuje se utjecaj radijacije (za faktor 4)
- ŠTIT – prepreka radijaciji umanjuje njeno djelovanje.



Slika 2-11 Grafički prikaz smanjenja intenziteta zračenja (jakost zračenja ili radijacijski intenzitet) s udaljenošću.

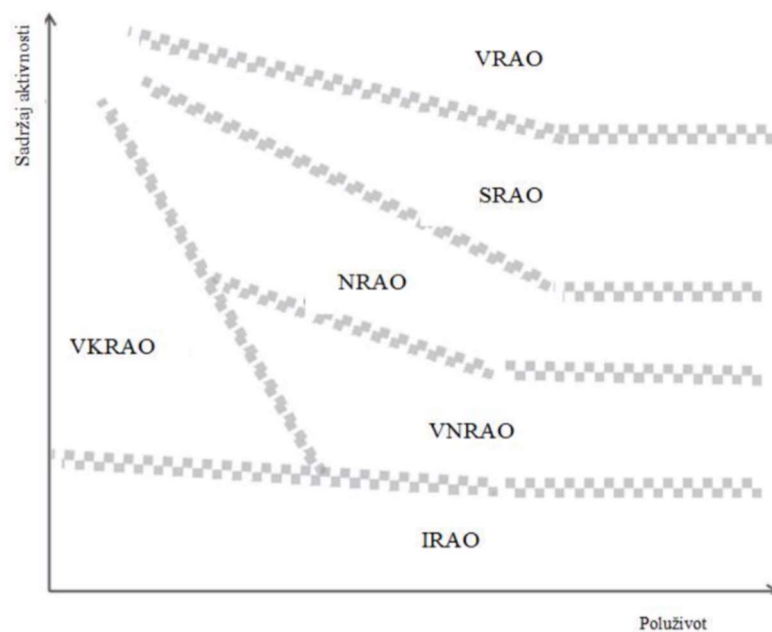
Aktivnost izvora (A) predstavlja dozimetrijsku fizikalnu veličinu kojom se opisuje brzina raspadanja radioaktivne tvari, količnik je broja radioaktivnih raspada radionuklida u jedinici vremena, a izražava se u bekerelima (Bq). Specifična aktivnost izvora (a) je aktivnost izvora po masi tvari (Bq/kg) (Browne, 1998).

Vrijeme poluraspada (poluživot) nekog radionuklida predstavlja vrijeme potrebno da se raspadne polovica jezgri u uzorku izotopa. Dugoživući radionuklidi su radionuklidi s vremenom poluraspada reda veličine 30 godina i više, a kratkoživući radionuklidi s vremenom poluraspada manje od 30 godina (Browne, 1998).

2.2. 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 2-12.) postoji 6 osnovnih vrsta radioaktivnog otpada (IAEA, 2009a).



Slika 2-12 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.

2.3. 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 toksičnost, 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 2-1).

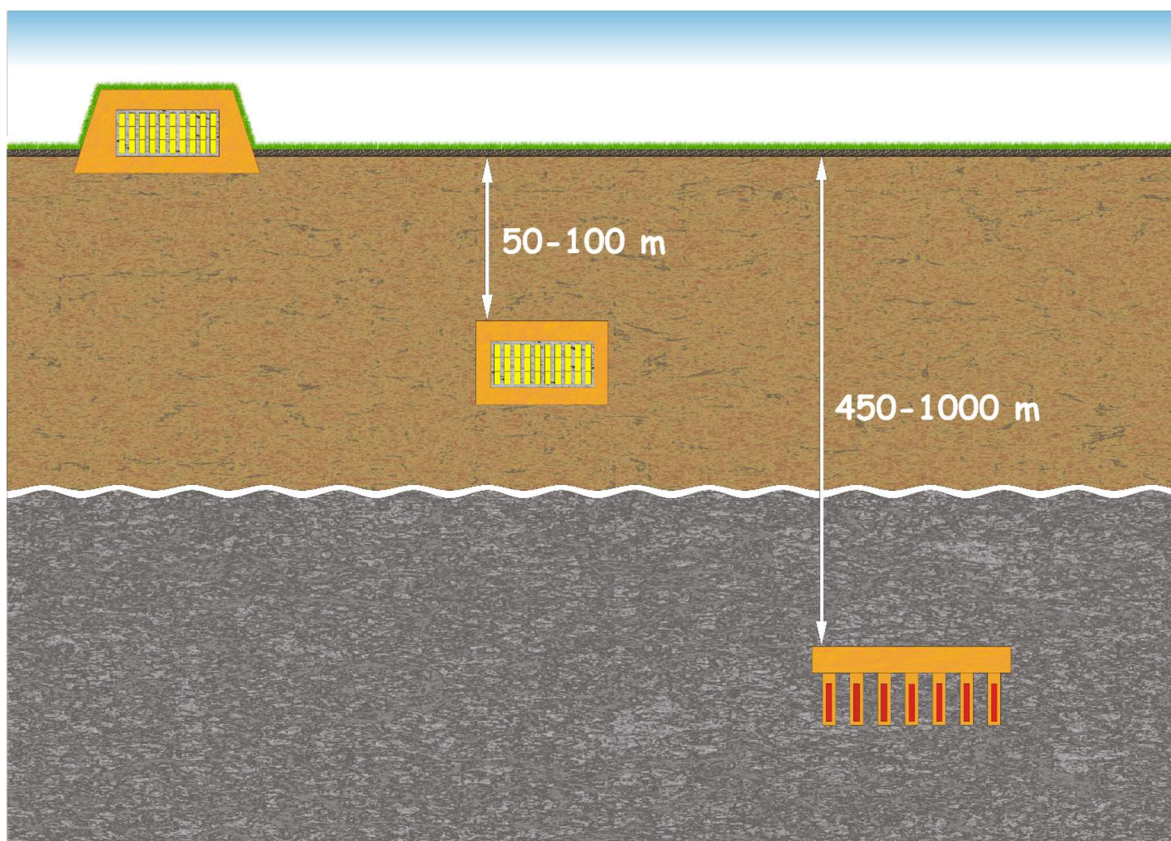
Tablica 2-1 Klasifikacija RAO-a (NN 12/2018)

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 dugoživićih 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 dugoživićih radionuklida (4 000 Bq/g u pojedinom pakiranju, odnosno 400 Bq/g za kompletnu masu rad. 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.
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.

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.

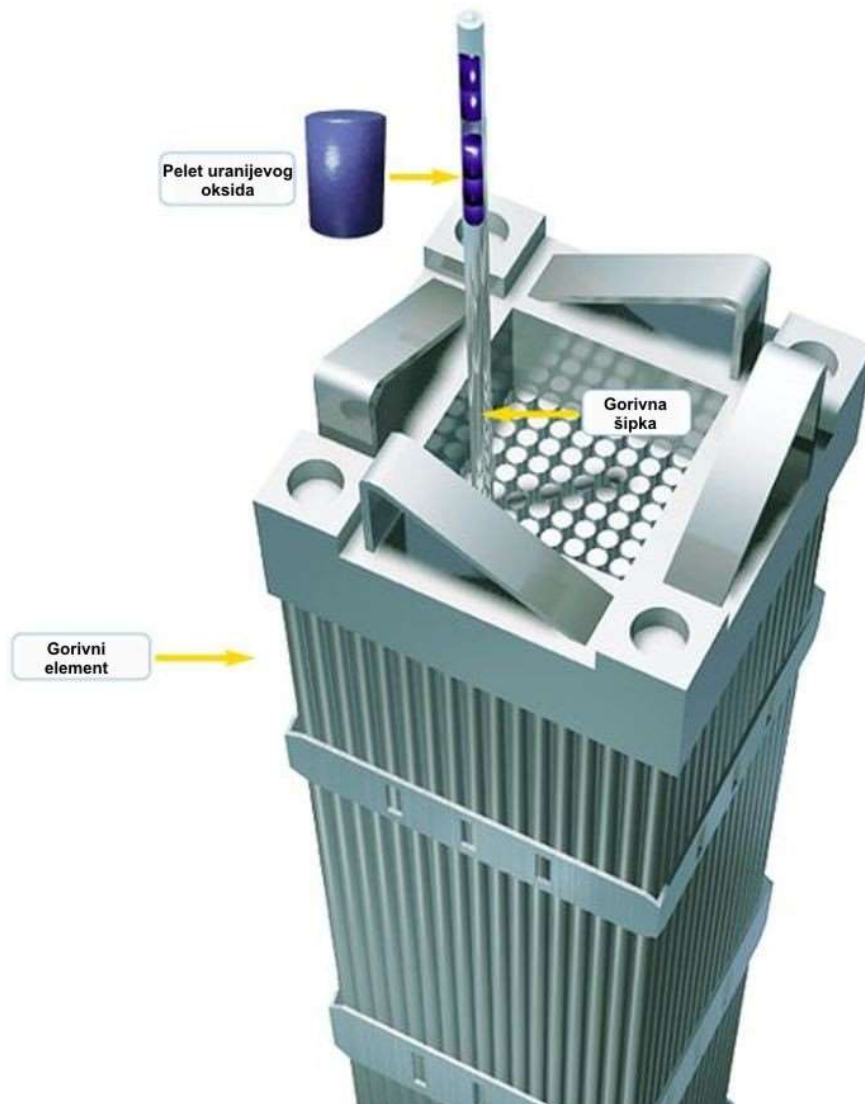
Kao što je iz navedenih klasifikacija RAO-a vidljivo, s porastom aktivnosti i radiotoksičnosti otpada raste i dubina odlaganja. Premda nema točne definicije o tome na kojoj se dubini grade plitka odlagališta, obično se podrazumijeva da je dubina na kojoj se grade barem nekoliko desetaka metara (slika 2-13).



Slika 2-13 Shematski prikaz rasporeda odlagališta RAO po dubini: pripovršinska, plitka i duboka geološka (izvor: doc.dr.sc. Želimir Veinović, privatna zbirka).

2.4. 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 2-14) uklonjeni iz reaktora nakon što im se smanji korisnost u smislu da više ne mogu održavati spontanu nuklearnu reakciju (IAEA, 2012).



Slika 2-14 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 fizijske produkte, količina korisnog goriva (U-235) se smanjila, a gorivni element ostaje vruć. Bez obzira što je fisija prekinuta, beta raspad fizijskih 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.

2.5. 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 fisijskih 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.

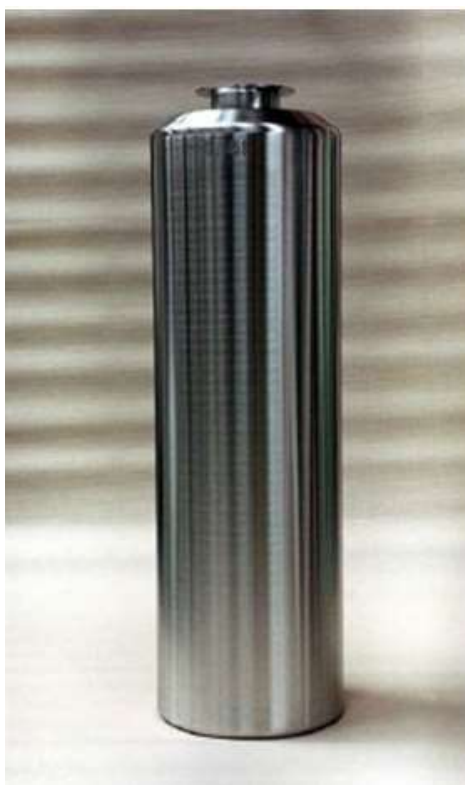
Preradom ING-a dobije se 95 % uranija (neiskorišteni U-235, 0,8 %), 1 % plutonija i 4 % otpada (fisijski produkti i ostalo) (Ojovan i Lee, 2005).

ING se obično vitrificira borosilikatnim staklom (slika 2-15) i pohranjuje u spremnike koji se skladište u suhim skladištima do trenutka odlaganja u duboka geološka odlagališta.



Slika 2-15 Borosilikatno staklo za vitrifikaciju VRAO-a (BENJI JEREW, 2019).

Premda se spremnici (slika 2-16) 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 2-16 Spremnik za vitrificirani VRAO (NIREX, 2005).

2.6. 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).

2.6.1. 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 (slika 2-17) 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).



Slika 2-17 Ulaz u skladište institucionalnog radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada (Medaković, 2016).

Skladište IRB-a (slika 2-18) 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.



Slika 2-18 Pogled na skladište institucionalnog radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora na Institutu Ruđer Bošković (Medaković, 2016).

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 2-2 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 2-2 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

2.6.2. 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).

Pojave prirodno radioaktivnih materijala, bilo u obliku prirodnih izvora ionizirajućeg zračenja, rezidua ili povećanih koncentracija radona, predstavljaju bitan čimbenik kvalitete života. S obzirom na moguću izloženost ljudi ionizirajućem zračenju, te određeni rizik za biotu, nužno je poznavati lokacije pojava prirodno radioaktivnih materijala te time moguće i rezidua, odnosno područja s povećanim koncentracijama aktivnosti radona te provoditi ispravnu politiku gospodarenja s reziduima. Pojam „rezidui“ definiran je u Pravilniku o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu (NN RH 40/18) kao „materijal koji ostaje nakon industrijskog procesa a koji se sastoji od ili koji je onečišćen prirodnim radionuklidima i nastaje u industrijskim sektorima koji su navedeni u točki A Priloga 2. koji je sastavni dio ovoga Pravilnika“.

U Republici Hrvatskoj postoje 3 službeno navedene lokacije na kojim se nalaze prirodno radioaktivni materijali, međutim, osim službeno navedenih lokacija s koncentriranim prirodno radioaktivnim materijalima ili reziduima, postoji i niz manjih, čiji je cjelovit popis napravljen prema podacima iz Veinović i dr., 2018. i usmenom priopćenju dr.sc. Ivica Prlića:

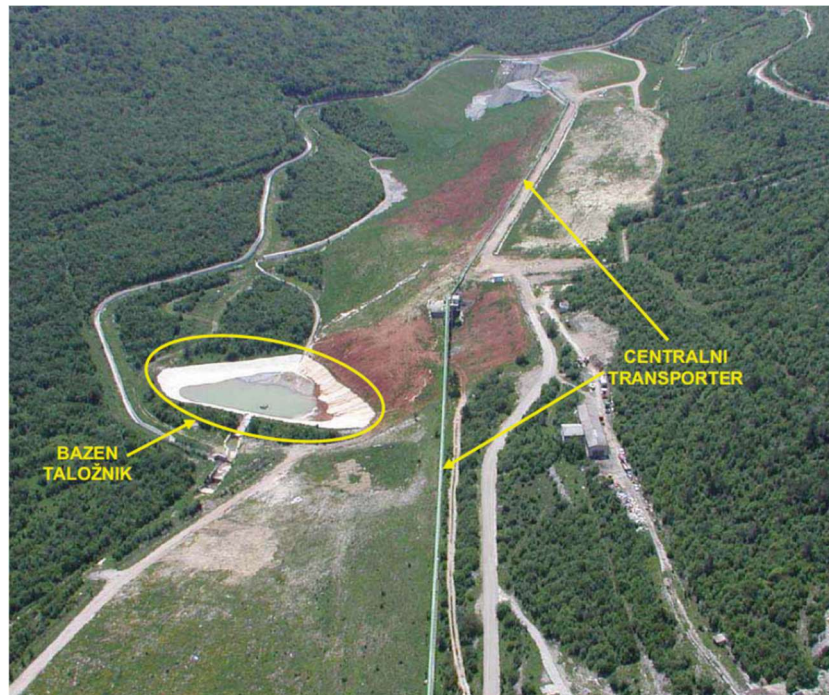
- odlagalište pepela i šljake termoelektrana Plomin I (sanirano) i Plomin II (u

eksploataciji)

- odlagalište pepela i šljake svojevremeno dopremljenih iz drugih termoelektrana Socijalističke Federativne Republike Jugoslavije (SFRJ) na području mjesta kaštel Gomilica, u okviru nekadašnje tvornice Jugovinil u Kaštelanskom zaljevu (sanirano)
- odlagalište pepela i šljake na području mjesta kaštel Sućurac, bivše termoelektrane koja je pripadala nekadašnjoj tvornici Jugovinil u Kaštelanskom zaljevu (u postupku sanacije)
- odlagalište fosfogipsa Petrokemije d. d., Tvornica gnojiva, Kutina (u eksploataciji)
- privremena odlagališta otpadnih (mineralnih) materijala iz proizvodnje nafte i plina (u eksploataciji)
- privremena odlagališta šljake i otpada iz primarne proizvodnje željeza
- privremena odlagališta kalcifikata i sličnih materijala iz postrojenja za filtraciju podzemnih voda.

Dalje u tekstu detaljnije su objašnjene tri najvažnije, službeno navedene lokacije.

Na lokaciji termoelektrane Plomin nalazi se odlagalište pepela i šljake nastalih sagorijevanjem ugljena u TE Plomin 1 i TE Plomin 2 (slika 2-19).



Slika 2-19 Odlagalište šljake i pepela porijeklom iz proizvodnog procesa dobivanja električne energije izgaranjem ugljena u Termoelektrani Plomin I i II (HEP, 2011).

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 Kaštela, na području bivše tvornice Jugovinil nalaze se 2 odlagališta pepela i šljake: jedno, sanirano, s materijalom dopremljen iz termoelektrana bivše SFRJ (slika 2-20, A) i drugo koje sadrži produkte sagorijevanja ugljena u tvorničkoj termoelektrani (slika 2-20, B). 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).



Slika 2-20 Područje nekadašnje tvornice Jugovinil u Kaštelanskom zaljevu: (A) odlagalište pepela i šljake svojevremeno dopremljenih iz drugih termoelektrana SFRJ na području mjesta kaštel Gomilica, (B) odlagalište pepela i šljake na području mjesta kaštel Sućurac, termoelektrane koja je pripadala tvornici Jugovinil (Veinović i dr., 2018).

Na lokaciji Kutina (slika 2-21) 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).



Slika 2-21 Lokacija za privremeno pohranjivanje fosfogipsa tvornice Petrokemija d.d.: 4 nasipima odvojene kazete odlagališta (DGU, 2018).

2.6.3. Radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo iz NE Krško

Nuklearna elektrana Krško (NEK) (slika 2-22) je opremljena Westinghouseovim lakovodnim tlačnim reaktorom toplinske snage od 2000 MW, a priključena je na 400-kilovoltnu mrežu za napajanje potrošačkih središta u Sloveniji i Hrvatskoj (NEK, 2018).



Slika 2-22 Nuklearna elektrana Krško (NEK, 2018).

Službenog stava o tome hoće li se ING prerađivati ili neće nema, s obzirom da Republika Slovenija još nije donijela odluku o izboru finalnog rješenja za gospodarenje/zbrinjavanje ING-om (IAEA, 1993, Official Gazette, 31/16). 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.

U tablicama 2-3 i 2-4 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 2-3 Sumarni pregled inventara RAO iz NeK (NN 125/2014)

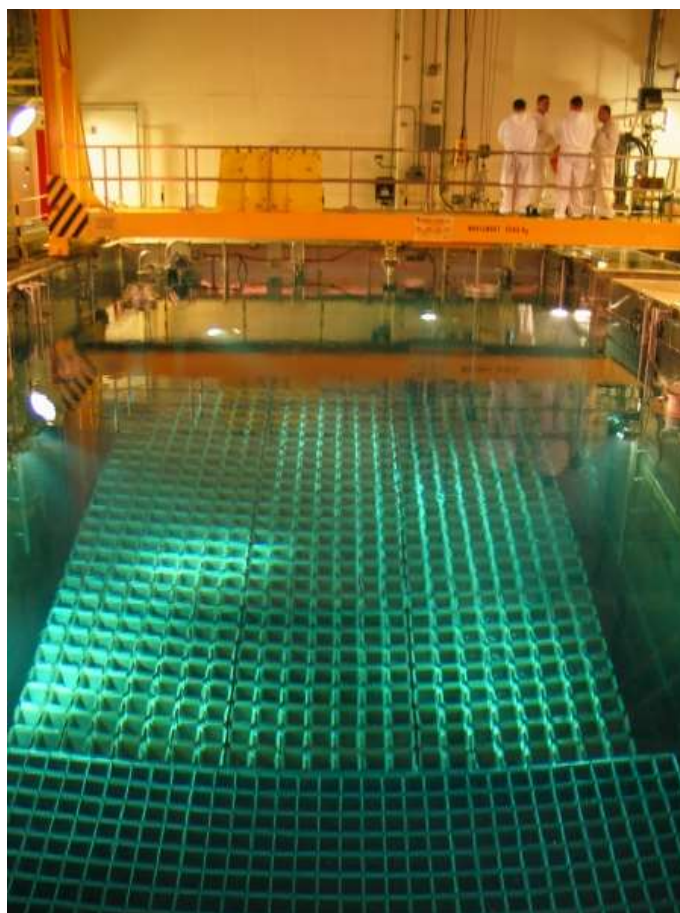
Vrsta RAO	Karakteristike	2023.	2043.
Pogonski	Masa (t)	3 953	4 903
	Aktivnost (Bq)	$2,35 \times 10^{13}$	$2,92 \times 10^{13}$
Dekomisijski	Masa (t)	4 998	5 307
	Aktivnost (Bq)	$1,0 \times 10^{13}$	$1,1 \times 10^{13}$
UKUPNO	Masa (t)	8.951	10 210
	Aktivnost (Bq)	$4,25 \times 10^{13}$	$5,42 \times 10^{13}$

Tablica 2-4 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)	$5,4 \times 10^{20}$	$8,2 \times 10^{20}$

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 2-23).



Slika 2-23 Bazen za istrošeno gorivo (ZBRINJAVANJE RAO, 2019)

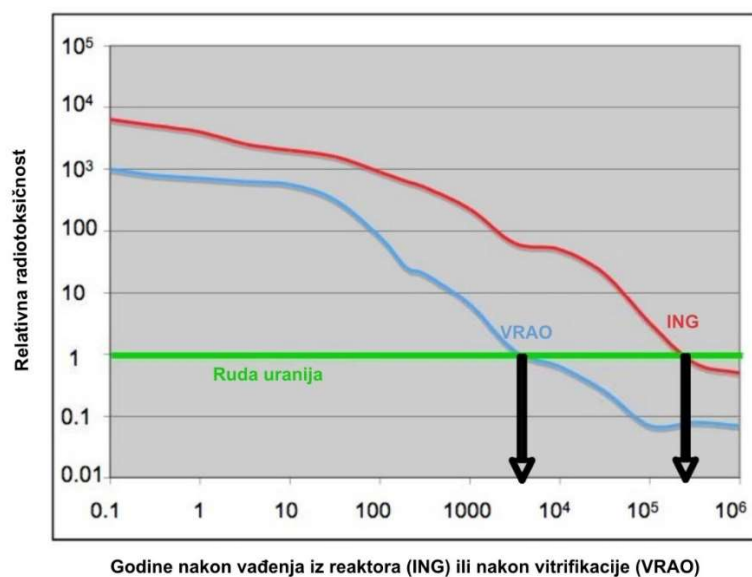
Bazen je sastavni dio sustava za zamjenu, rukovanje, skladištenje i hlađenje istrošenih gorivnih elemenata, te je smješten u zgradi za istrošeno nuklearno gorivo. Borirana voda koja se nalazi u bazenu ima dvostruku funkciju, te služi kao zaštita od intenzivnog radioaktivnog zračenja te kao rashladno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

3. 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 VRAO 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 3-1), ali u oba slučaja odlagališta se projektiraju na 100 000 do 1 000 000 godina.



Slika 3-1 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.

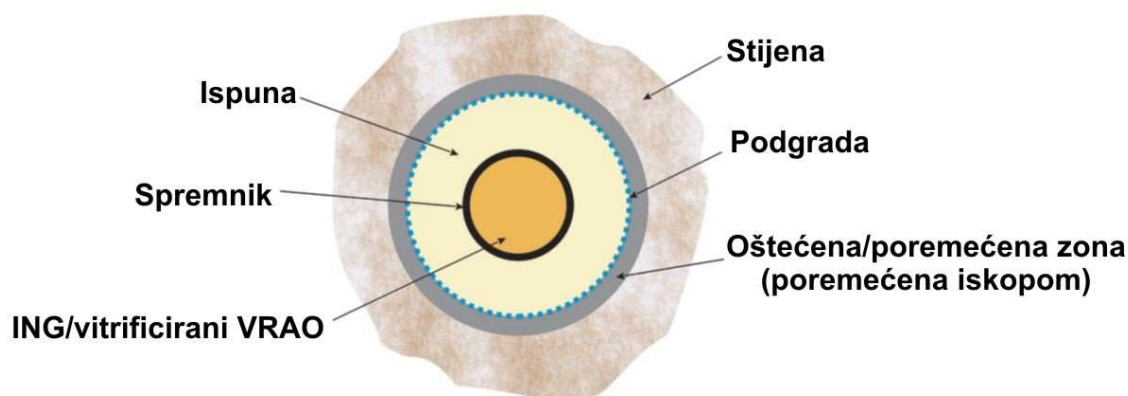
Alternativni načini zbrinjavanja, poput lansiranja otpada van Zemljine orbite, bacanja na dno oceana, utiskivanje ili ukapanje u Zemljinu koru ispod oceana ili odlaganje u polarne kape, pokazali su se pre nesigurnim ili ekonomski neopravdanim i od njih se odustalo.

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.

3.1. Koncepti i tehnologije zbrinjavanja VRAO i ING

Koncept odlaganja u duboka geološka odlagališta može se, pojednostavljeno, predstaviti kao na slici 3-2.



Slika 3-2 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).

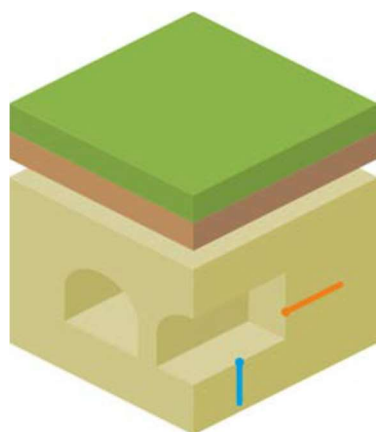
Oštećena zona – u stijena je nastala iskopom i obično je širine oko 30 cm, u slučaju iskopa bušenjem i miniranjem, odnosno oko 3 cm, u slučaju iskopa punoprofilnim tunelerom (Veinović i dr., 2015).

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).

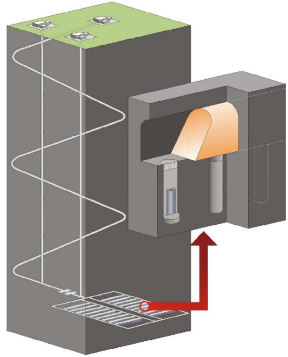
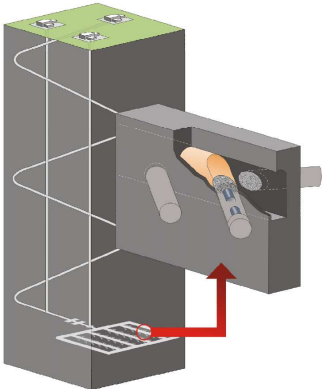
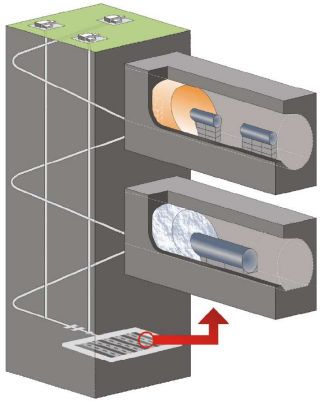
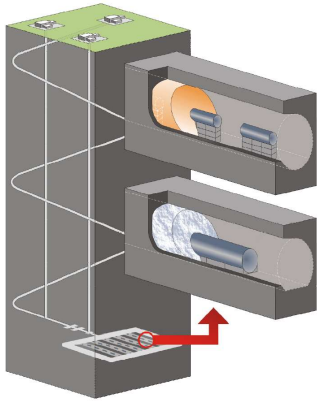
S obzirom kako će se spremnici postavljati u odnosu na tunele za odlaganje, generalno moguće je odabrati horizontalni ili vertikalni položaj (slika 3-3).



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

Generalno prihvaćeni i do određene mjere razrađeni koncepti odlaganja (Baldwin i dr., 2008) su prikazani u tablici 3-1.

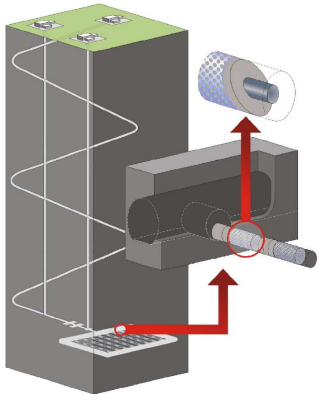
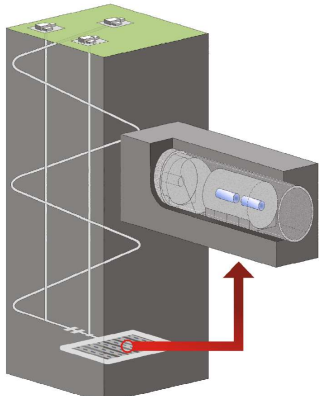
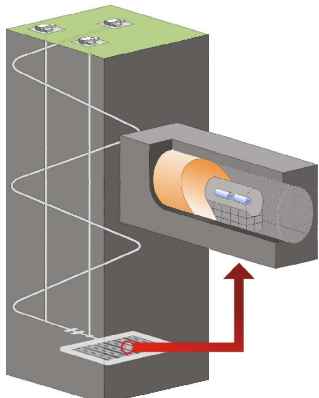
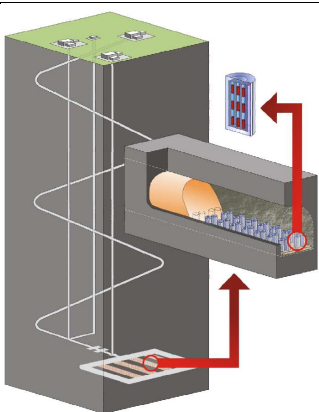
Tablica 3-1 Koncepti odlaganja ING-a i VRAO-a (Baldwin i dr., 2008).

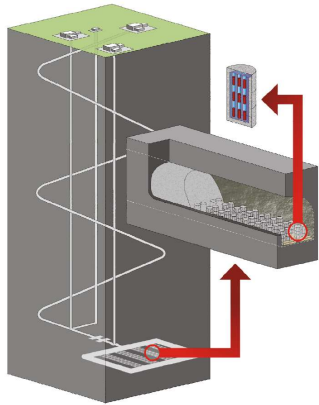
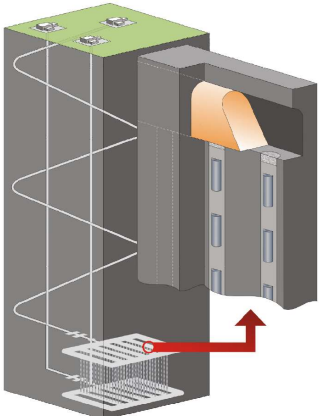
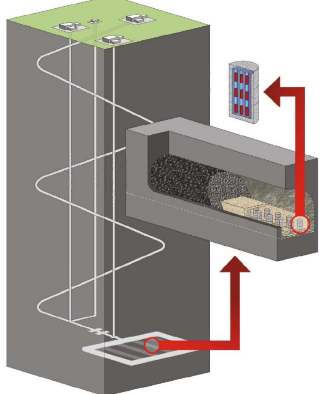
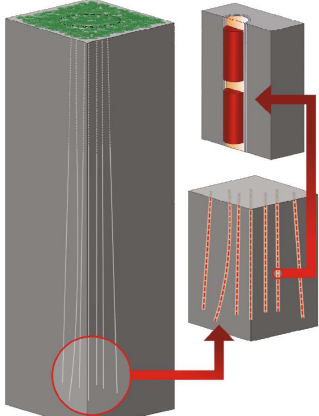
KONCEPT	DRŽAVE	STIJENA	SLIKA
Odlaganje u tunelu (vertikalna bušotina) s dugovječnim ili kratkovječnim spremnikom ¹	Švedska (KBS-3V) Finska Slovenija/ Hrvatska	Kristalinična Sedimentna (sol)	
Odlaganje u tunelu (horizontalna bušotina) s dugovječnim ili kratkovječnim spremnikom	Belgija Francuska Švicarska	Sedimentna (glina) Kristalinična (raspućala)	
Odlaganje u tunelu (aksijalno) s kratkovječnim spremnikom (Koncept-3) ²	Švicarska Belgija Njemačka Japan Španjolska	Kristalinična Sedimentna (glina, sol)	
Odlaganje u tunelu (aksijalno) s dugovječnim spremnikom (Koncept-4) ³	Kanada	Kristalinična	

¹ Dalje u tekstu: **KBS-3V**.

² Dalje u tekstu: **Koncept-3** (u skladu s: Baldwin i dr., 2008).

³ Dalje u tekstu: **Koncept-4** (u skladu s: Baldwin i dr., 2008).

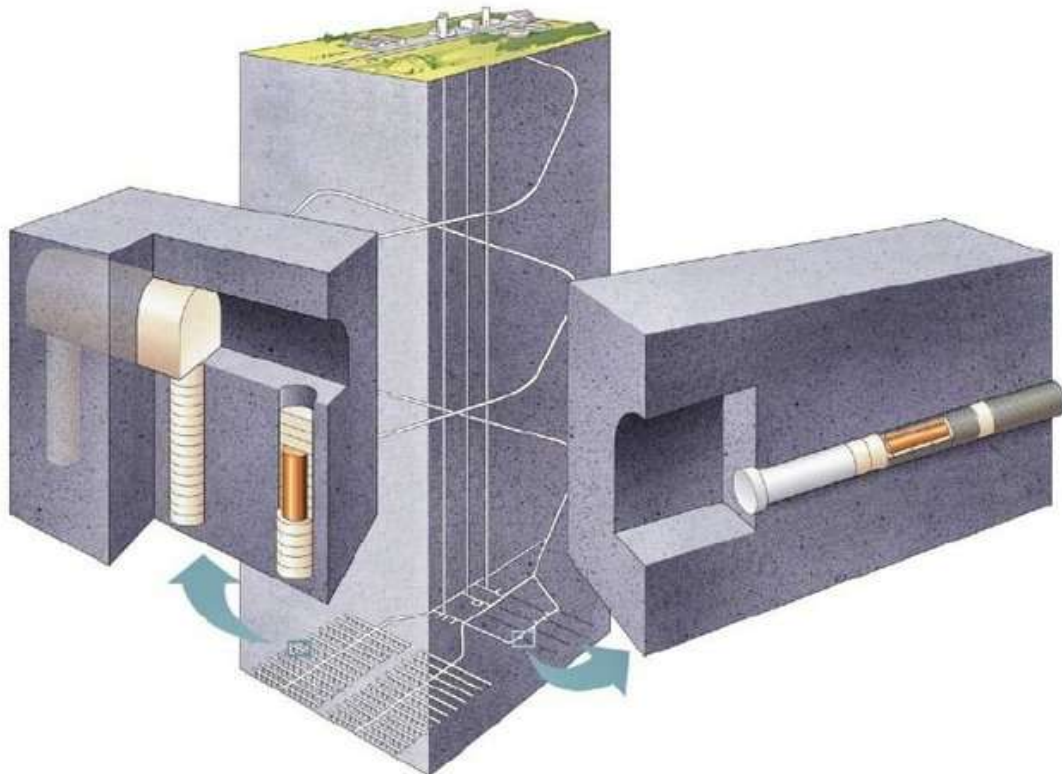
<p>Odlaganje u tunelu (aksijalno) sa super spremnikom (tunel malog promjera)</p>	<p>Švedska (KBS-3H) Finska</p>	<p>Kristalinična</p>	
<p>Odlaganje u tunelu (aksijalno) sa super spremnikom (beton kao materijal ispune)</p>	<p>Belgija</p>	<p>Sedimentna (glina)</p>	
<p>Odlaganje u tunelu (aksijalno) sa super spremnikom (tunel velikog promjera)</p>	<p>Švicarska Japan</p>	<p>Kristalinična</p>	
<p>Podzemne prostorije velikog volumena (<i>caverns</i>) s višenamjenskim spremnicima za transport/skladištenje/odlaganje (bentonitna zapuna)</p>	<p>Japan</p>	<p>Kristalinična</p>	

<p>Podzemne prostorije velikog volumena (<i>caverns</i>) s višenamjenskim spremnicima za transport/skladištenje/odlaganje ili betonskim/<i>DUCRETE</i>⁴ spremnicima za odlaganje (cementna zapuna)</p>	<p>Japan</p>	<p>Kristalinična</p>	
<p>Matrica dubokih bušotina u podzemlju</p>	<p>Kanada Japan Njemačka</p>	<p>Kristalinična Sedimentna (sol)</p>	
<p>Hidraulički kavez (oko podzemne prostorije za odlaganje)</p>	<p>Švedska Japan</p>	<p>Kristalinična</p>	
<p>Duboke bušotine</p>	<p>SAD</p>	<p>-</p>	

⁴ *DUCRETE* – *Depleted Uranium Concrete*, beton s oksidom osiromašenog urana kao agregatom umjesto šljunka i Portland cementom kao vezivom.

3.2. Koncept KBS-3V

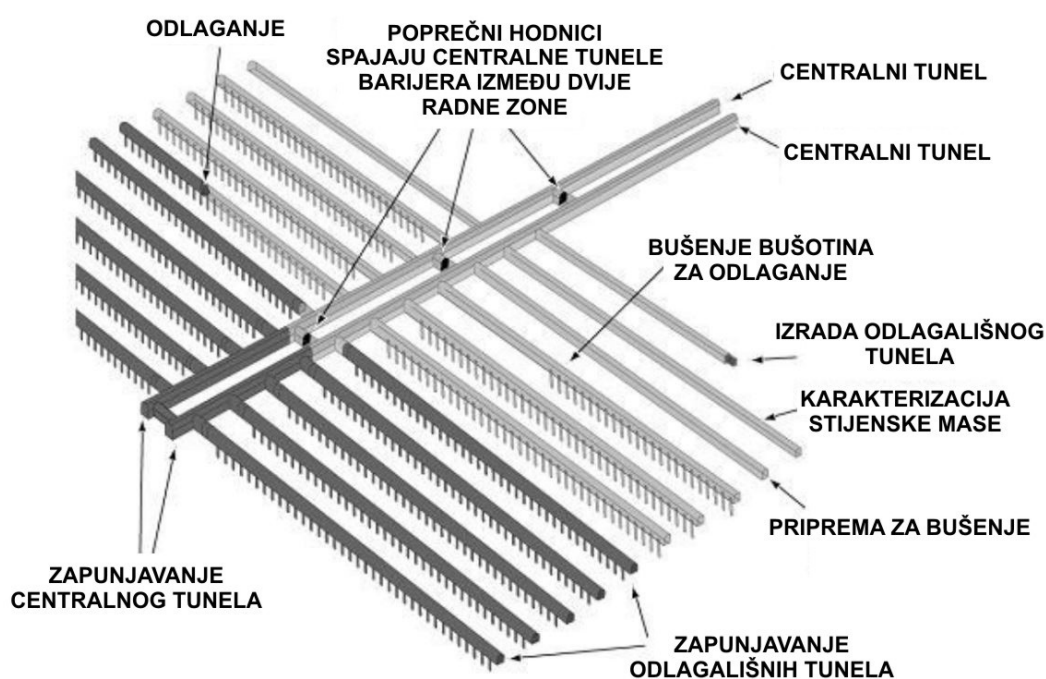
Premda postoji cijeli niz koncepata razvijenih za odlaganje VRAO i ING u duboka geološka odlagališta, koji se do određene mjere razlikuju, dva principa: odlaganje u plitke bušotine iz tunela ili odlaganje aksijalno u tunelu, su tehnološki najmanje zahtjevna (Veinović i dr., 2015). Na slici 3-4 su prikazana oba koncepta, razvijena od strane švedske tvrtke za upravljanjem nuklearnim gorivom i otpadom – SKB.



Slika 3-4 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 koncepta KBS-3V, te s obzirom da neki od drugih koncepata nisu primjenjivi u Sloveniji i Hrvatskoj (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 primarnog numeričkog modela u ovom radu korišten je koncept KBS-3V.

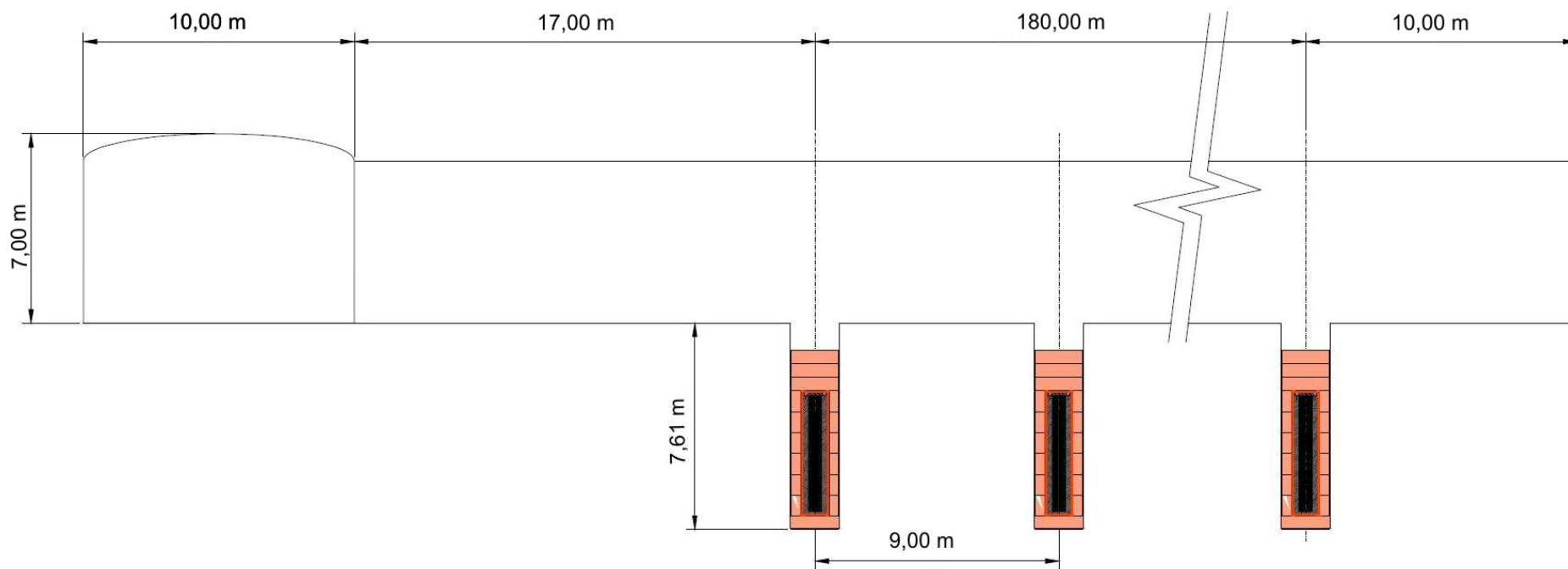
Koncept KBS-3V je razvijen za odlaganje ING-a u Švedskoj, s idejom smanjenja utjecaja zone oštećenog materijala metodom bušenja i miniranja primjenom bušenja bušotina većeg promjera (Baldwin i dr., 2008). Originalno je ideja uključivala dugovječne spremnike od titanija ili bakra, a kasnije je koncept detaljno razrađen uz ideju korištenja čeličnih i bakrenih spremnika, prihvaćen u Švedskoj, Finskoj i Ujedinjenom Kraljevstvu i pojednostavljeno podrazumijeva izradu odlagališnih hodnika na dubini od 400 do 700 m, otprilike kao na slikama 3-4 i 3-5, s tim da će broj hodnika za odlaganje zavisiti o količini potrebnih spremnika za ING, odnosno VRAO (Baldwin i dr., 2008).



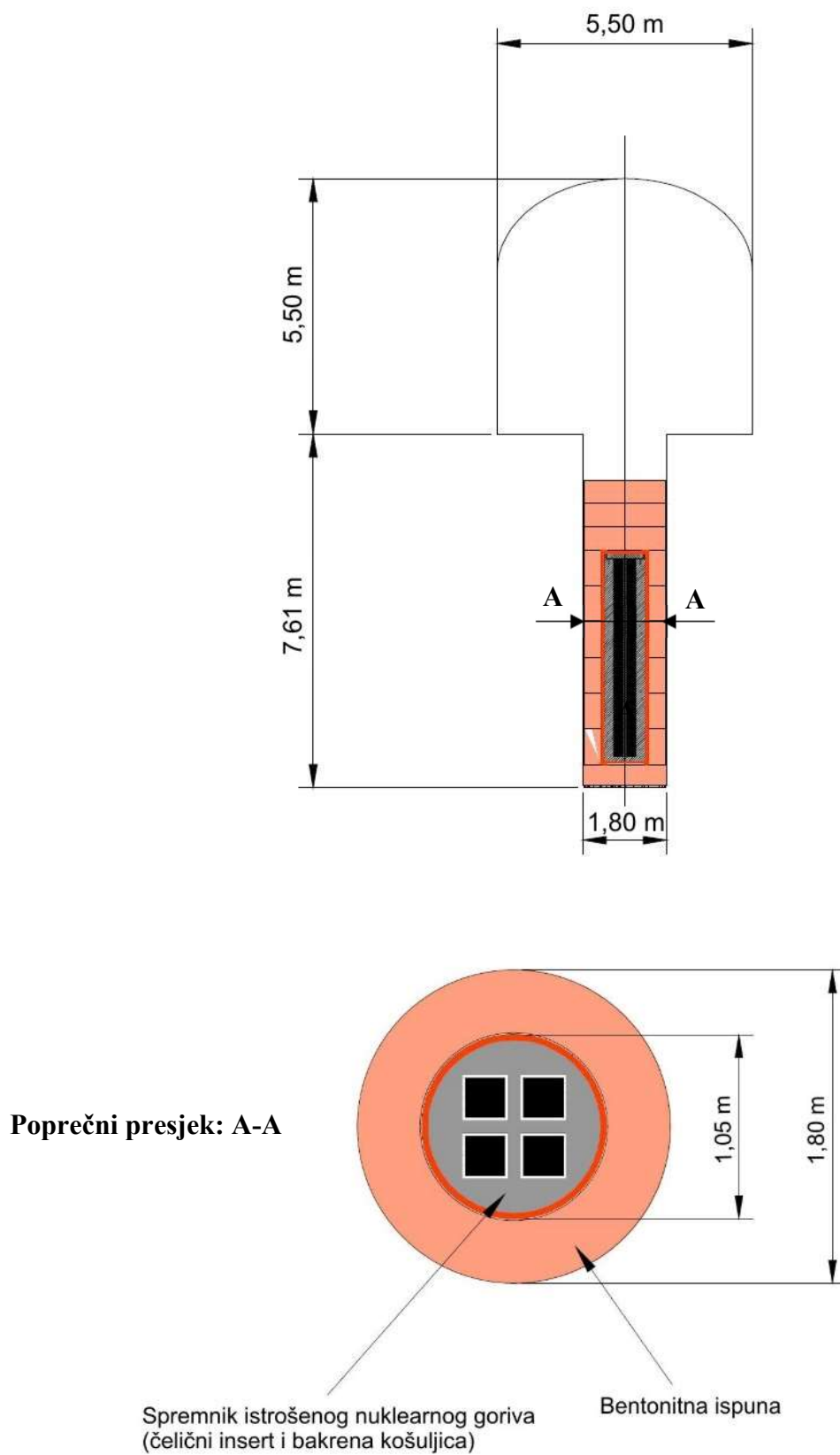
Slika 3-5 Prikaz izrade hodnika za odlaganje (Saanio i dr., 2013).

Konceptom je predviđeno odlaganje ING ili VRAO u kratkim bušotinama (obično 6-8 m dubine) srednjeg do velikog promjera (0,6-1,5 m) koje se buše u podu odlagališnih tunela. Predviđeno je korištenje kratkovječnih spremnika od čelika (nekoliko stotina do nekoliko tisuća godina trajnosti) ili dugovječnih spremnika s košuljicom od bakra (trajnosti do oko 10 000 godina), koji bi se odlagali u kristaliničnoj stijeni (moguće i u soli) s bentonitom kao materijalom ispune otvorenih i slobodnih prostora (Baldwin i dr., 2008).

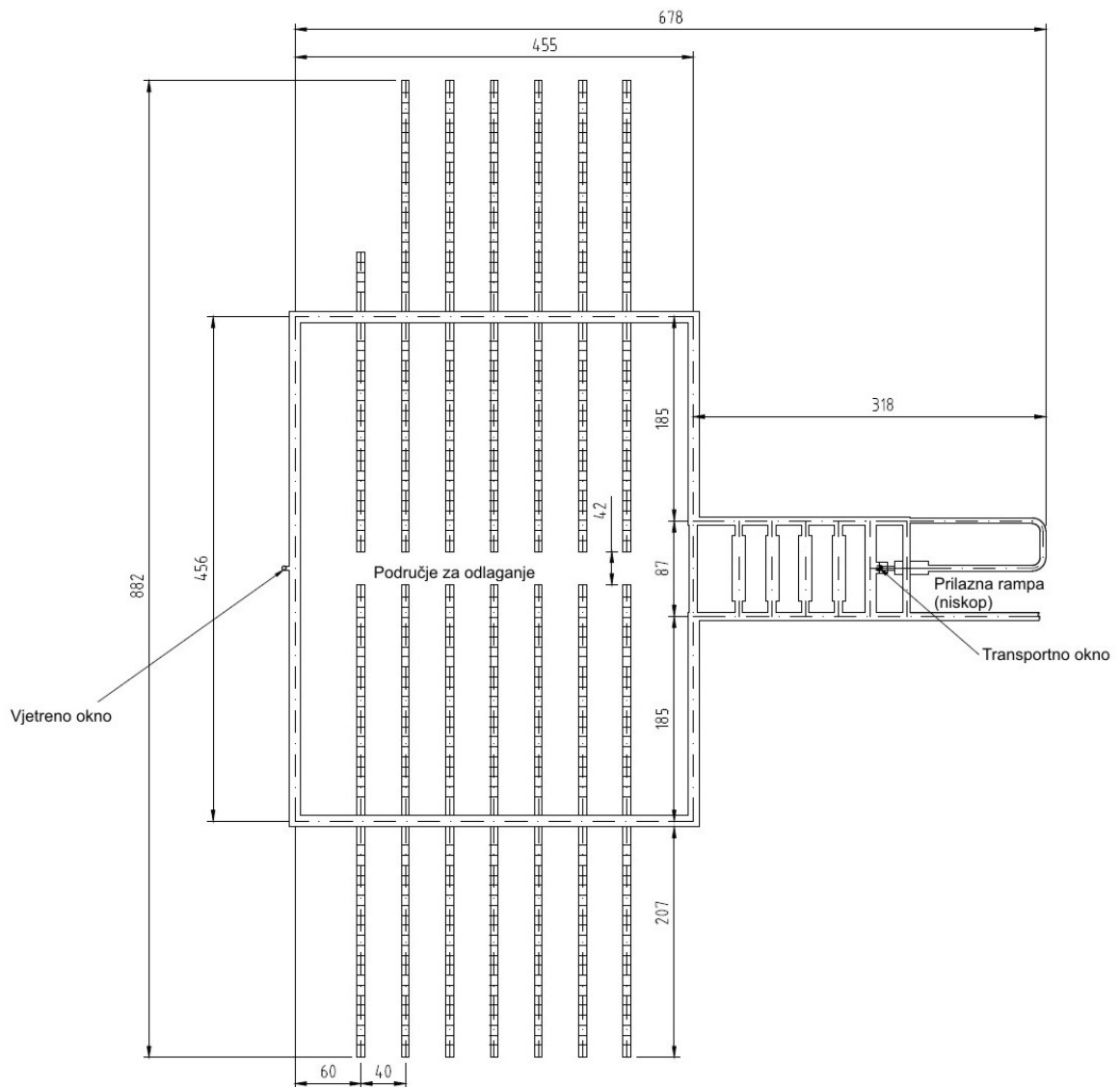
Uzdužni presjek kroz hodnik prikazan je na slici 3-6, a poprečni (kroz jednu od bušotina za odlaganje) na slici 3-7, dok je jedna od mogućih shema rasporeda odlagališnih tunela u tlocrtu prikazana na slici 3-8.



Slika 3-6 Uzdužni presjek kroz hodnik za odlaganje (prema: ARAO, 2019).



Slika 3-7 Poprečni presjek kroz hodnik i bušotinu za odlaganje (gore) i detalj – poprečni presjek kroz bušotinu i spremnik (dolje) (prema: ARAO, 2019).



Slika 3-8 Tlocrtni prikaz transportnih/vjetrenih i odlagališnih tunela i okana (prema: ARAO, 2019), sve mjere izražene su u metrima.

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).

Odlagališni tuneli su originalnim konceptom predviđeni u dužini od oko 250 m s razmakom od oko 40 m, što će zavisiti od stijene u kojoj bi se odlagalo i primjene/prilagodbe koncepta u određenom državnom programu. Razmak između kratkih vertikalnih bušotina je

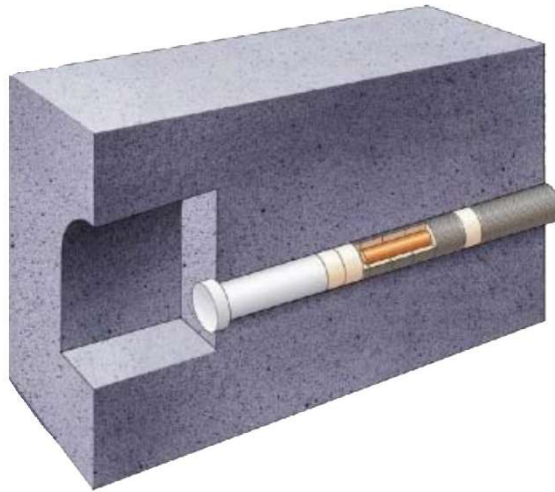
predviđen na oko 6 m, a njihova dubina na oko 8 m (Baldwin i dr., 2008). Postoje i manje modifikacije od programa do programa, tako da švedski program podrazumijeva i niveliranje dna bušotine s betonom niskog pH u debljini od oko 5-10 cm i par milimetara debelom bakrenom pločom (Baldwin i dr., 2008).

Podgrađivanje 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).

Jedan od čimbenika koji treba uzeti u razmatranje je način zapunjavanja odlagališnih hodnika, kao i zatvaranja krajeva hodnika, budući da vremenski slijed zatvaranja cijelog odlagališta može trajati više desetljeća (prema: Veinović, usmeno priopćenje, 2019). Naime, koncept „*retrievability*“ (mogućnost vraćanja, vađenja) je u većini država usvojen kao nužan, što znači da se spremnici s ING-om moraju moći izvaditi iz odlagališta ukoliko za to bude potrebe, npr. u slučaju napretka tehnologija prerade ING-a i sličnih materijala. Poradi toga se u nacionalnim programima redovito razmatra čim sporije zatvaranje cijelog odlagališta (transportnih i vjetrenih hodnika i okana) iako se odlagališni hodnici moraju popuniti i zatvoriti. S obzirom da se popunjavanje i zatvaranje odlagališnih hodnika u različitim konceptima obično svodi na ugradnju bentonita ili bentonitnih smjesa (bentonit/drobljena matična stijena ili bentonit/pijesak i sl.), očekuju se veliki pritisci prilikom bubrenja bentonite uslijed njegove hidratacije (upijanja podzemne vode). Stoga se na krajevima odlagališnih tunela obično planiraju tzv. „čepovi“ od betona (niskog pH) ili sličnih materijala, kojima bi se spriječilo širenje bentonita iz odlagališnih hodnika i gubitak traženih svojstava ispune hodnika. Taj materijal čepa se smatra „stranim materijalom“, odnosno, za razliku od bentonita koji je praktički inertan i neće prolaziti promjene slijedećih oko milijun godina i npr. materijala matične stijene, koji se smatra lokalnim, beton može početi korodirati (korozija strukture betona s cementom kao vezivom), premda se odlagališta planiraju u reduktivnim sredinama s čim višim pH vrijednostima okoliša, ako pH betona ostane ekstremno lužnat ($\text{pH} \approx 12$) (prema: Veinović, usmeno priopćenje, 2019).

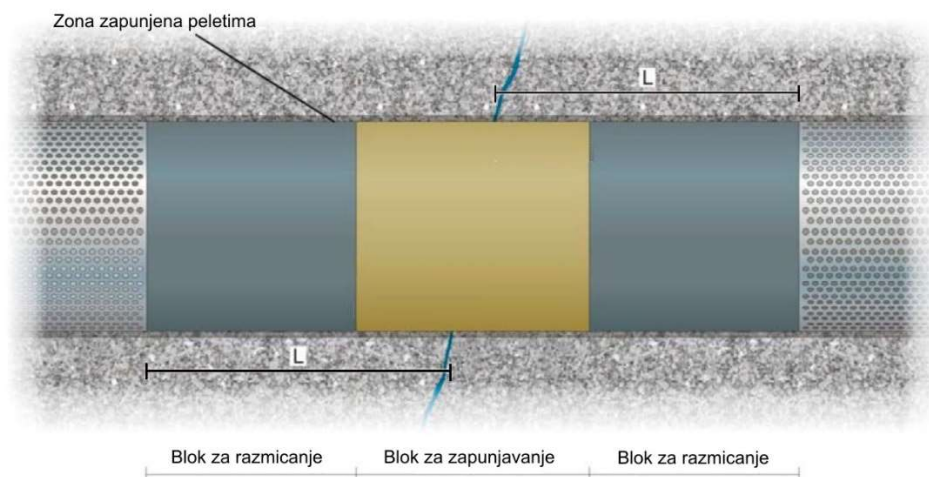
3.3. Koncept KBS-3H

Alternativni koncept, KBS-3H (slika 3-9), podrazumijeva odlaganje spremnika aksijalno u tunelu, ali i uz primjenu složenije tehnologije.



Slika 3-9 Švedski koncept odlaganja istrošenog nuklearnog goriva KBS-3H (detalj prema: Savage, 2012).

Super spremnik (spremnik od bakra obložen prstenovima od prešanog bentonita s vanjskom tankom košuljicom od perforiranog titanijskog čelika, u početku koncepta predviđao se) se ubacuje u odlagališni tunel koji je tek malo većeg promjera, dok se prostor između dva super spremnika popunjava blokom za razmicanje i, u slučaju pojave širih pukotina, s blokom za zapunjavanje, a prazni prostori oko blokova i super spremnika se dodatno popunjavanje peletima bentonita (Baldwin i dr., 2008) (slika 3-10).



Slika 3-10 Prikaz odlagališnog tunela za KBS-3H koncept (Börgesson i dr., 2017).

Blokovi za zapunjavanje ugrađivali bi se u segmentima širine 50 cm, a ukupne širine blokova za zapunjavanje (oznaka „L“ na slici 3-10) zavisit će o brzini toka vode kroz šire pukotine (Börgesson et al., 2017):

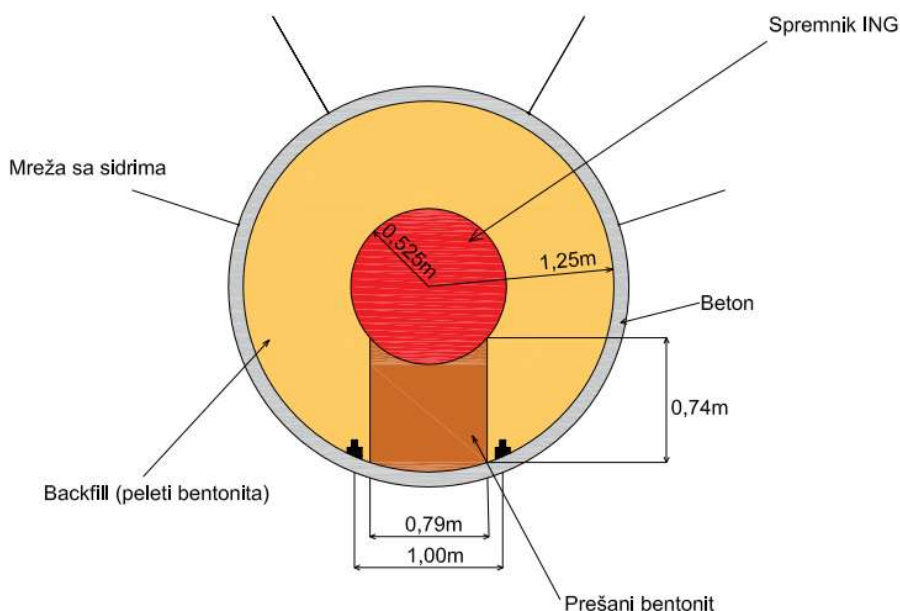
- $L = 3000$ mm za protok $Q = 0,1-0,5$ l/min
- $L = 5000$ mm za protok $Q = 0,5-1,0$ l/min
- $L = 6000$ mm za protok $Q > 1,0$ l/min.

Originalna ideja razvoja koncepta potekla je iz želje za smanjenjem volumena iskopa stijene i smanjenjem oštećene zone, a super spremnik poradi mogućeg bubrenja i pucanja bentonitnih prstenova ako bi se ugrađivali zasebno u odnosu na spremnik (Börgesson et al., 2017). Slobodni prostori bi se zapunjavali peletima bentonita.

3.4. Koncept-4

Kao alternativa konceptu KBS-3V za provedbu simulacija termičko-hidro-mehaničkih efekata na stijenu odabran je Koncept-4 (prema: Baldwin i dr., 2008). Razlika između Koncepta-4 i koncepta KBS-3H je u jednostavnosti izvedbe i ugradnje, a između Koncepta-3 i Koncepta-4 praktično samo u tipu spremnika.

Premda KBS-3V i Koncept-4 imaju niz specifičnih zahtjeva, Koncept-4 je znatno jednostavniji: u odlagališni tunel, na posteljicu od prešanog bentonita, spremnik se polaže aksijalno, a slobodan prostor iznad spremnika (slika 3-11) i između dva spremnika (slika 3-12) zapunjava peletima bentonita.

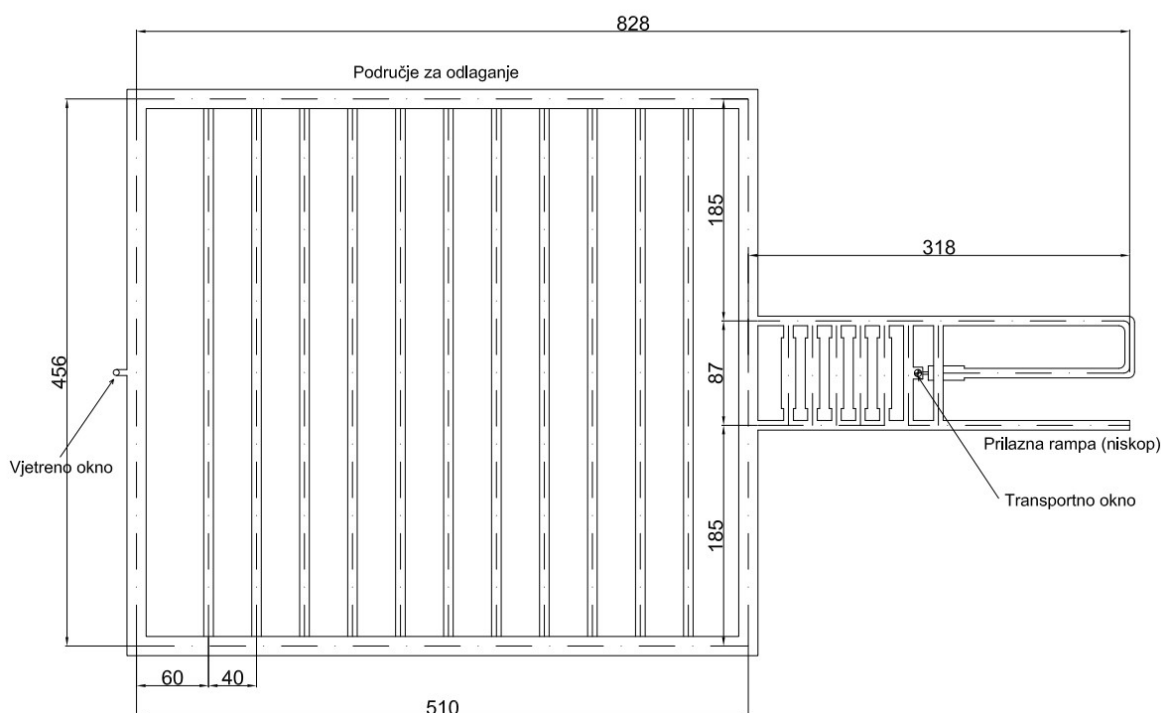


Slika 3-11 Prikaz ugradnje spremnika na posteljicu od prešanog bentonita za Koncept-4 (prema: NAGRA, 2009 i 2002)



Slika 3-12 Prikaz rasporeda spremnika u odlagališnom tunelu za Koncept-4 (prema: NAGRA, 2009 i 2002)

Koncept-4 predviđa uporabu dugoživućeg bakrenog ili titanijskog spremnika, ali s obzirom na dosadašnja iskustva u primjeni i varenju tih materijala te ispitivanja provedenih u svrhu izrade spremnika za odlaganje ING.a i VRAO-a, vjerojatnije je kako će se koristiti bakreni spremnici. Koncept je na temelju Koncepta-3 razvila kanadska tvrtka *Ontario Power Generation*, za primjenu u kristaliničnim stijenama. Kao još jedna razlika između Koncepta-3 i Koncepta-4 može se navesti primjena čistog bentonita ili smjese bentonita i pijeska (Koncept-4) kao materijala ispune (Baldwin i dr., 2008). Raspored odlagališnih tunela za Koncept-4 prilagođen potrebama slovensko/hrvatskog rješenja prikazan je na slici 3-13.



Slika 3-13 Raspored spremnika u odlagališnom tunelu za Koncept-4 (prema: ARAO, 2019; Baldwin i dr., 2008; NAGRA, 2009 i 2002), sve mjere izražene su u metrima.

Osnova Konceptata 3 i 4 podrazumijeva izradu odlagališnih tunela punoprofilnim tunelerima ili sličnim metodama izrade bušotina velikog promjera (3,7 m u kristaliničnim stijinama i 2-2,5 m u glini/glinjaku) kako bi se izbjegao nastanak široke zone oštećenog materijala i ona svela na oko 3 cm. Oba koncepta također znače i manji volumen ukupnog iskopa stijene (Baldwin i dr., 2008), što je vidljivo usporede li se odgovarajuće slike konceptata prilagođenih za slovensko/hrvatski program.

Za potrebe ovog rada odabran je promjer tunela (visina) od 3 m, a ostali parametri su preuzeti iz korištenih projektnih materijala kako bi rješenja tehnički bila čim sličnija.

3.5. Usporedba konceptata

Bira li se optimalan koncept odlaganja, u obzir treba uzeti niz čimbenika, uključivo složenost tehničkog rješenja, cijenu, odabir strojeva, pouzdanost i ispitnost tehnologija i sl., što bitno komplicira problem. Kako bi se ideja odabira optimalnog rješenja uzela u obzir, nužno je primijeniti „utežne kriterije“, koji govore o složenosti i cijeni pojedinog čimbenika/parametra te „primjenjivosti kriterija“, koja govori o količini utjecaja kriterija na određeni koncept. Pojednostavljena matrica s popisanim bitnim čimbenicima za analizirane koncepte dana je u tablici 3-2.

Iz tablice 3-2 jasno je vidljivo kako Koncept-4 predstavlja najjednostavniji model, s najnižim zbirnim utežnim kriterijima, što je jasno iz broja/dužine tunela, jednostavnosti tehnologije i sličnog. Uz to, mogao bi se pokazati i najjeftinijim. Jedan od presudnih utjecaja, je i volumen iskopane stijenske mase, koji se primjenom Koncepta-4 bitno smanjuje. Kako bi se ovi podaci potvrdili, trebalo bi provesti detaljnu analizu i procjenu poslova i troškova, što nije tema ovog rada.

Osobit problem po pitanju kvalitete izvedbe odlagališta – manja oštećena zona, uvjetovan je odabirom načina izrade odlagališnih tunela. Ukoliko se primjeni TBM (*Tunnel Boring Machine*) tehnologija izrade tunela (barem odlagališnih) punoprofilnim tunelerom, oštećena zona se smanjuje s 30-tak cm na oko 3 cm, ali se i bitno povećava cijena izrade tunela. Druga prednost primjene TBM tehnologije je u tome što će zapunjavanje praktički glatkih tunela kružnog presjeka biti daleko lakše (bilo peletima bentonita bilo na neki drugi način) u odnosu na zapunjavanje neravnog tunela dobivenog metodom bušenja i miniranja, gdje će uvijek postojati mogućnost pojave nepopunjenih zona.

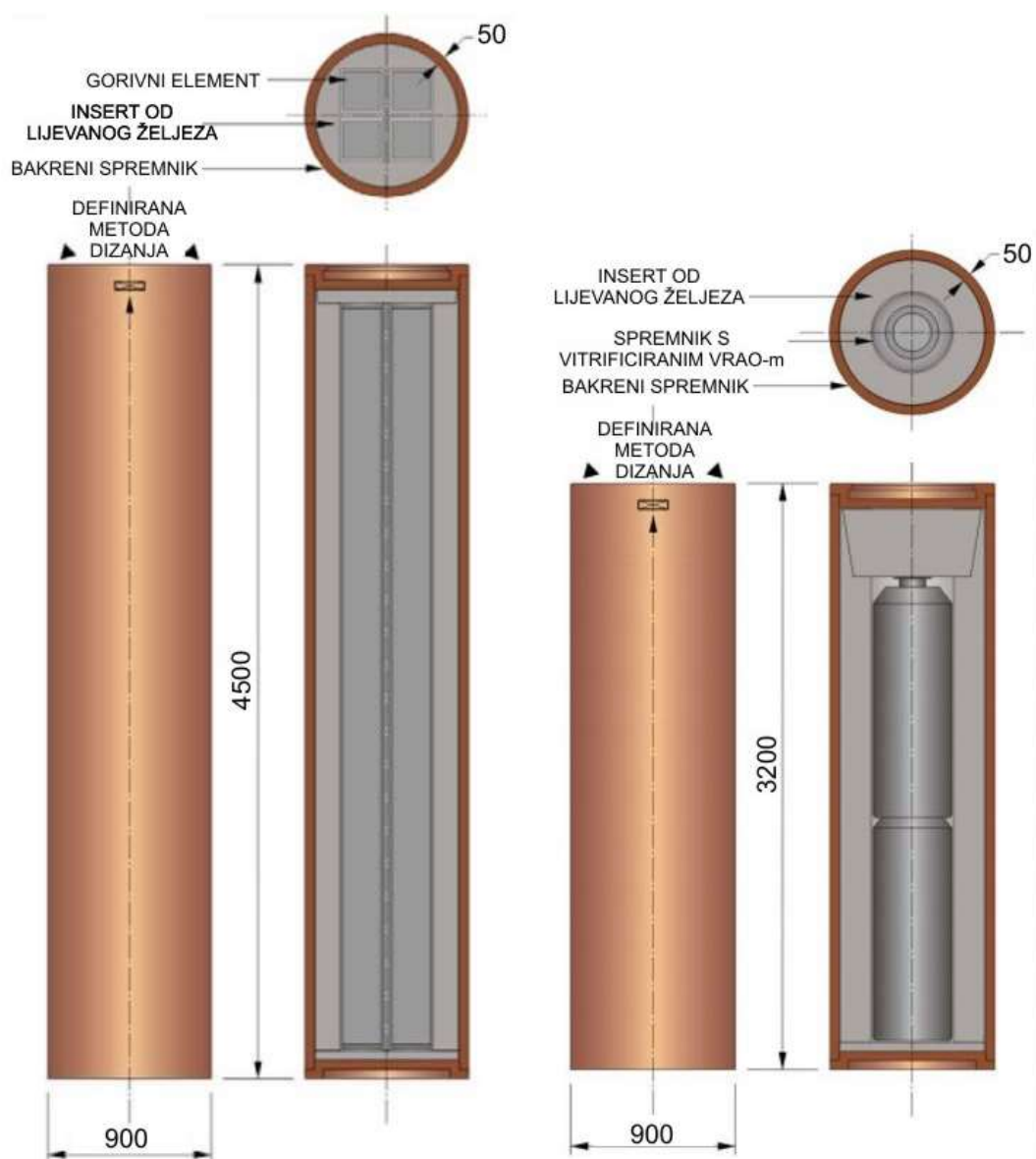
Tablica 3-2 Usporedba različitih koncepata odlaganja prema njihovim karakteristikama (utežni kriteriji prema: Veinović, usmeno priopćenje, 2019).

KONCEPT	PARAMETAR/ČIMBENIK	UTEŽNI KRITERIJ	PRIMJENJIVOST KRITERIJA	UKUPNO	KOMENTAR
KBS-3V	Duljina tunela iskopenih metodom bušenja i miniranja.	5 %	+++	81,67 %	Vjerojatno će se svi tuneli izrađivati ovom metodom, uz oprezno ili konturno miniranje odlagališnih tunela. Primjena TBM tehnologije je malo vjerojatna, sudeći po razvijenom modelu odlagališta.
	Duljina tunela iskopenih TBM ⁵ metodom.	15 %	-		-
	Broj i duljina bušotina za odlaganje (ukupna).	15 %	+++		Bušenje traje dugo i podrazumijeva kupovinu posebnog postrojenja sposobnog za bušenje bušotina velikog promjera u stijeni. Bušotina ima koliko i spremnika (571). osim u slučaju grešaka u izradi bušotina ili pojave većih pukotina, što će zahtijevati izradu novih bušotina
	Prisutnost stranih materijala.	10 %	++		Materijal podgrade (čelična sidre, mreža, lukovi, beton), možda i tračnice za transport te materijali za izradu pregrada (beton).
	Priprema materijala za ispunu tunela.	5 %	+++		Kompaktiranje blokova i priprema peleta.
	Priprema materijala za izolaciju spremnika.	15 %	+++		Kompaktiranje bentonitnih prstenova i valjaka.
	Ugradnja materijala za ispunu tunela.	10 %	+++		Slaganje blokova i ispunjavanje relativno malih prostora između blokova i stijene peletima posebnim strojem.
	Ugradnja materijala za izolaciju spremnika.	20 %	+++		Posebno pažljivo spuštanje valjaka i prstenova, odnosno spremnika, u bušotinu.
	Relativna brzina odlaganja.	5 %	+++		Treba računati na niz procesa poradi specifične geometrije koncepta (tuneli i bušotine) te zasebno malu brzinu ugradnje bentonitnih blokova i prstenova poradi njihove mehaničke osjetljivosti.
KBS-3H	Duljina tunela iskopenih metodom bušenja i miniranja.	5 %	+	68,33 %	Izrada samo onih podzemnih prostorija (uglavnom vjetreni i transportni hodnici) koje ne služe za odlaganje.
	Duljina tunela iskopenih TBM metodom.	15 %	+++		Izrada većine podzemnih prostorija – odlagališnih tunela.
	Broj i duljina bušotina za odlaganje (ukupna).	15 %	-		-
	Prisutnost stranih materijala.	10 %	+++		Materijal podgrade (čelična sidre, mreža, lukovi, beton), možda i tračnice za transport, materijali za izradu pregrada/čepova na krajevima odlagališnih tunela (beton) i titanijska obloga oko super spremnika.
	Priprema materijala za ispunu tunela.	5 %	+		Priprema peleta.
	Priprema materijala za izolaciju spremnika.	15 %	+++		Priprema dijelova/segmenata super spremnika (kompaktiranje bentonitnih prstenova i valjaka).
	Ugradnja materijala za ispunu tunela.	10 %	+		Ugradnja peleta.
	Ugradnja materijala za izolaciju spremnika.	20 %	+++		Utiskivanje diskova (blokova za razmicanje i blokova za zapunjavanje) i ispunjavanje relativno malih prostora između diskova i stijene peletima posebnim strojem.
Relativna brzina odlaganja.	5 %	+	Treba računati na stanke u periodu premještanja TBM-a te zasebno malu brzinu ugradnje bentonitnih blokova/prstenova poradi njihove mehaničke osjetljivosti.		
Koncept-4	Duljina tunela iskopenih metodom bušenja i miniranja.	5 %	+	53,33 %	Izrada samo onih podzemnih prostorija (uglavnom vjetreni i transportni hodnici) koje ne služe za odlaganje.
	Duljina tunela iskopenih TBM metodom.	15 %	+++		Izrada većine podzemnih prostorija – odlagališnih tunela.
	Broj i duljina bušotina za odlaganje (ukupna).	15 %	-		-
	Prisutnost stranih materijala.	10 %	++		Materijal podgrade (čelična sidre, mreža, lukovi, beton), tračnice za transport i materijali za izradu pregrada/čepova na krajevima odlagališnih tunela (beton).
	Priprema materijala za ispunu tunela.	5 %	+		Priprema peleta.
	Priprema materijala za izolaciju spremnika.	15 %	++		Kompaktiranje blokova i priprema peleta.
	Ugradnja materijala za ispunu tunela.	10 %	+		Ugradnja peleta.
	Ugradnja materijala za izolaciju spremnika.	20 %	++		Slaganje blokova posteljice i ugradnja peleta.
Relativna brzina odlaganja.	5 %	+	Treba računati na stanke u periodu premještanja TBM-a.		

⁵ TBM – Tunnel Boring Machine, hrv. punoprofilni tuneler.

3.6. Spremnici za odlaganje

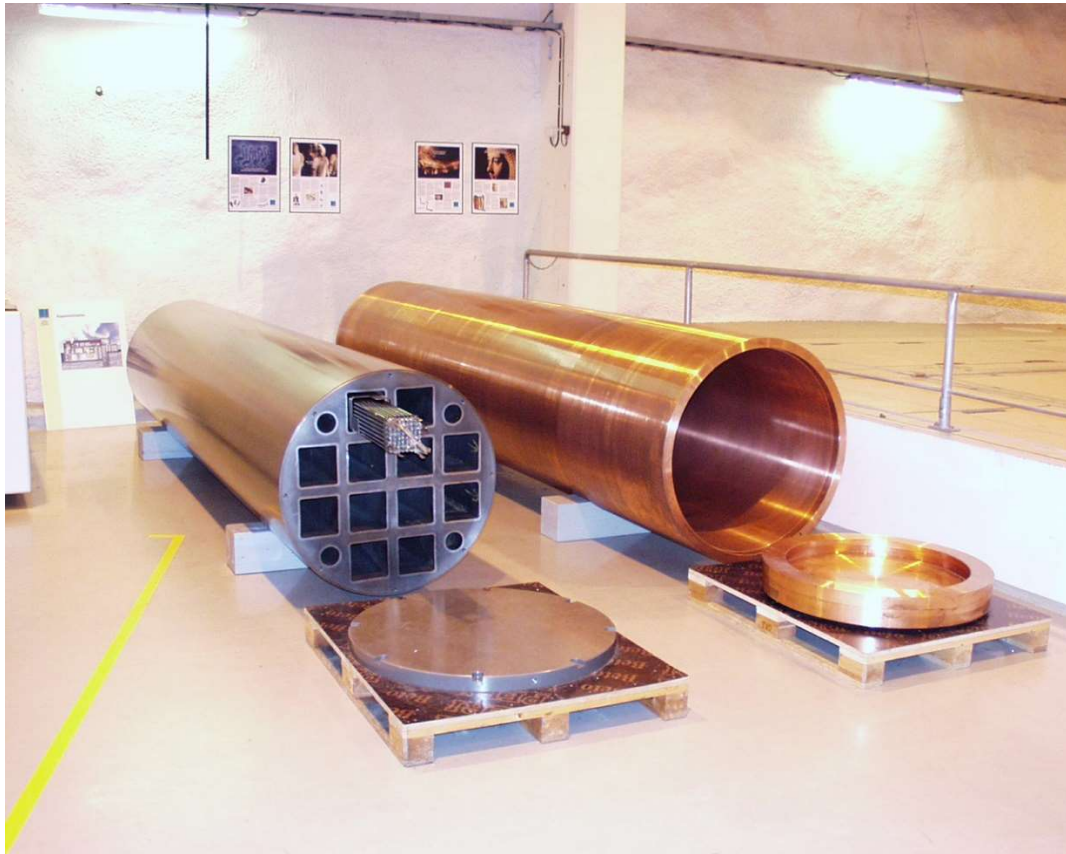
Iako se kao mogućnost navodi primjena dugovječnih spremnika od titanija ili bakra, odnosno kratkovječnih od čelika (Baldwin i dr., 2008), u većini nacionalnih programa (Švedska, Finska, Ujedinjeno Kraljevstvo, Slovenija...) prihvaćen je koncept spremnika (NIREX, 2005; Raiko i Salo, 1996) za odlaganje od vanjske izolacijske barijere od bakra s unutrašnjom strukturom od lijevanog željeza koja će služiti za slaganje istrošenih gorivnih elemenata, ili spremnika s VRAO-m i dati spremniku mehaničku čvrstoću (slika 3-14).



Sve mjere su u milimetrima

Slika 3-14 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 3-15), 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 3-15 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 toplote unutar spremnika. Na slici 3-16 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 (tvrtke 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 3-16 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 3-3.

Tablica 3-3 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 3-4.

Tablica 3-4 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 3-5.

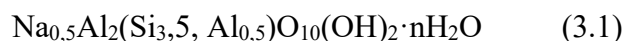
Tablica 3-5 Količine plinova koje se mogu osloboditi iz ING-a (NIREX, 2005)

Plin	Izvor	Vrijednosti za gorivni element
Radon [m ³ /a] ⁶	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

Za oba simulirana koncepta (KBS-3V i Koncept-4) korišteno je isto rješenje za spremnik, s obzirom da se htjelo pojednostaviti posao oko izvođenja simulacija, a spremnici su u osnovi jednaki.

3.7. 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).

⁶ a – *anum* (godina)

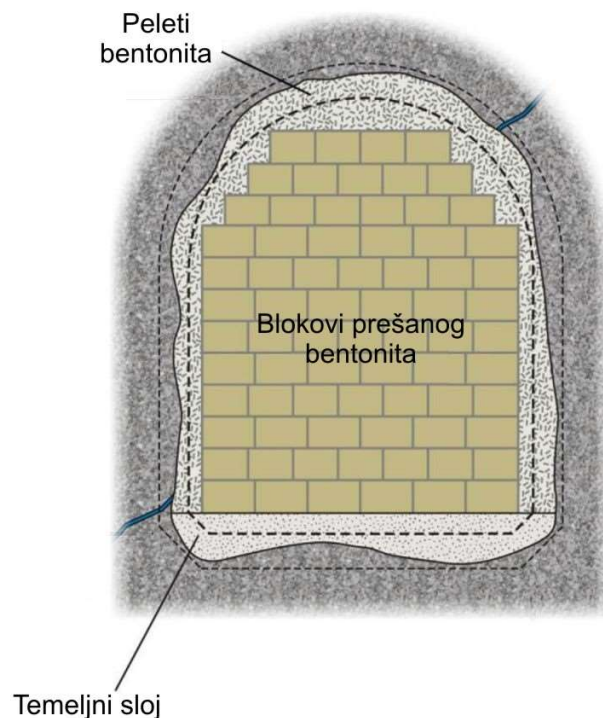
Upravo poradi ovih karakteristika, bentonit je odabran kao materijal ispune između spremnika s ING-om, odnosno VRAO-m i stijene, kao i za zatvaranje iskopanih hodnika budućeg odlagališta. Koeficijent propusnosti bentonitne gline je oko 1×10^{-12} m/s što ga čini idealnim materijalom ispune. S obzirom 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 u simulacijama koncepta KBS-3V koristiti na dva mjesta:

- Materijal za ispunu prostora između spremnika i stijene (prešani bentonit u obliku prstenova i diskova)
- Materijal za ispunu hodnika (blokovi prešanog bentonita i peleti bentonita za popunjavanje prostora).

S obzirom da se očekuje kako će bentonit ostati stabilan i zadržati svoja svojstva, primarno nisku propusnost, do milijun godina, osim u slučaju zagrijavanja na iznad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, koncept je dizajniran na način da spremnici ne bi trebali postizati temperature od iznad $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Baldwin i dr., 2008)

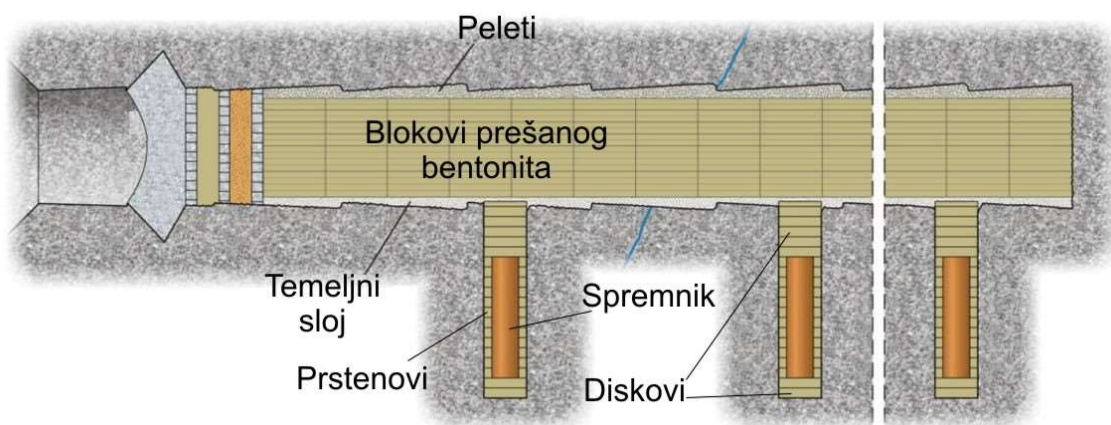
Na slici 3-17 prikazan je način zapunjavanja hodnika bentonitnim blokovima i peletima bentonita.



Slika 3-17 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 obzirom 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 3-18).



Slika 3-18 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 3-19).



Slika 3-19 Priprema prstenova od bentonita kao materijala zapunjavanja prostora između spremnika i stijene (Bennett, 2012).

Traženi parametri za bentonit dani su u tablici 3-6.

Tablica 3-6 Traženi parametri za bentonit (Keto i dr., 2012; Juvankoski, 2010).

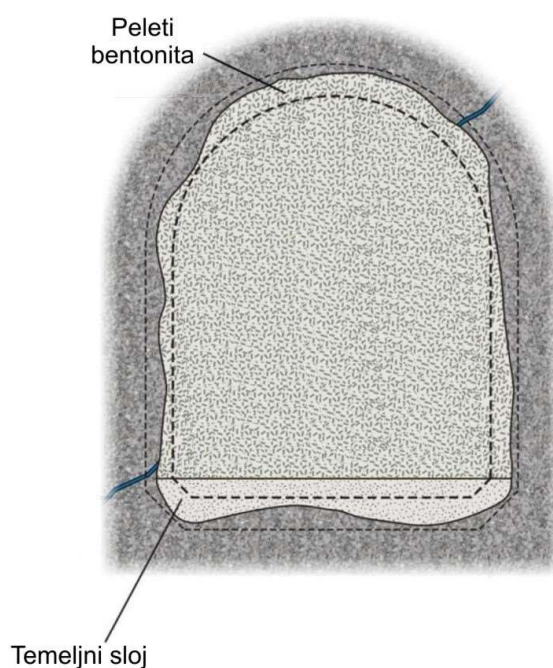
Parametar	Blokovi	Peleti	Prstenovi i diskovi
Dimenzije	550 x 470 x 330 mm	6,5 mm promjer 5-20 mm duljine	400 mm visina 1050 mm unutrašnji promjer 1700 mm vanjski promjer
Masa	183-196 kg	-	1907 kg disk 1151 kg prsten
Sadržaj bentonita	30-38 %	75-90 %	75 %
Suha gustoća	1990-2070 kg/m ³	900-1100 kg/m ³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

Bentonit će se u simulacijama Koncepta-3/4 koristiti na dva mjesta:

- Materijal posteljice za spremnik (prešani bentonit u obliku prizmi)
- Materijal za ispunu hodnika (peleti bentonita).

Na slici 3-20 prikazan je način zapunjavanja transportnih i vjetrenih hodnika peletima bentonita.



Slika 3-20 Zapunjavanje transportnih/vjetrenih hodnika bentonitnim peletima (prema: Keto i dr., 2012)

Na slici 3-21 je fotografija modela odlagališnog tunela u prirodnoj veličini na kojem se vidi način postavljanja posteljice od prešanog bentonita i zapunjavanja prostora peletima bentonita. Tehnologija zapunjavanja peletima prikazana je na slici 3-22.



Slika 3-21 Spremnik na posteljici od prešanog bentonita u peletima djelomično zapunjenom odlagališnom hodniku, vidi se podgrada (čeličnom mrežom i sidrima – opcija u slučaju potrebe i transportne tračnice) (izvor: doc.dr.sc. Želimir Veinović, privatna zbirka).



Slika 3-22 Testiranje tehnologije zapunjavanja prostora oko spremnika bentonitnim peletima (Fries i dr., 2008)

Poradi pojednostavljenja izrade simulacija, s obzirom da primarno analizirano projektno rješenje ne uključuje razvoj koncepta aksijalnog odlaganja (ARAO, 2019), parametri za bentonit su prilagođeni onima za konceptualno korišteno rješenje odlaganja u kratke bušotine, a podaci za bentonitne pelete preuzeti su iz Wieczorek i dr., 2011 (tablica 3-7).

Tablica 3-7 Traženi parametri za bentonit u svim oblicima (prema: NAGRA, 2009 i 2002, Wieczorek i dr., 2011, ARAO, 2019).

Parametar	Blokovi	Peleti
Dimenzije (posteljica)	4610 x 740 x 790 mm ⁷	6,5 mm promjer 5-20 mm duljine
Masa	≈ 5 569,50 kg	-
Sadržaj bentonita	75 %	75-90 %
Gustoća pri ugradnji	2100 kg/m ³	1667 kg/m ³
Postotak vlage pri ugradnji	≈16 %	5,91 %

Od materijala za zapunjavanje odlagališnih hodnika očekuje se da postigne visok tlak bubrenja tijekom zasićenja, tako da tunelska brtve (čepovi na krajevima tunela) moraju

⁷ Pojednostavljeni oblik poradi lakše izvedbe modela.

odoljeti tlaku bubrenja kako bi se održala gustoća zapune i položaji odloženih spremnika. Brtve/čepovi na krajevima odlagališnih tunela su složene konstrukcije ispunjene bentonitom visoke gustoće na dionici od oko 12 m (moguća primjena tehnologije zapunjavanja mlaznim/špricanim bentonitom (Hausmannová i dr., 2012)), odvojenim međuslojem od suhozida (od kamena kao što je granit ili bazalt kako bi se izbjegla interakcija s bentonitom) i 6 m dugim šljunkom punjenim hodnikom, koji je zatvoren betonskim čepom. Pristupni dijelovi transportnih/vjetrenih tunela (na mjestima gdje se križaju s odlagališnim) bi se popunjavali u intervalima od 20 m smjesom bentonita i pijeska i završavali s betonskim čepom uglavljenim (upetim) u matičnu stijenu (Nagra, 2002).

3.8. 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 (npr. Hidraulički kavez (oko podzemne prostorije za odlaganje), prikazan u tablici 3-1) 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 (barem posljednjih milijun godina) nije bio izložen osobito značajnim morfološkim i drugim promjenama.

Kriteriji za odabir lokacije za odlaganje ING-a i/ili VRAO-a su brojni i složeni i uključuju niz stavki koje govore o usklađenosti lokacije s geološkim, hidrogeološkim, hidrološkim i drugim parametrima traženim za kvalitetnu izvedbu odlagališta, ali s obzirom da se ovaj rad ne bavi odabirom lokacije, već primjenjivošću tehnologije na generičkoj lokaciji, neće biti detaljno obrađeni. Pojednostavljeni kriteriji za odabir lokacije, dobrim dijelom u svezi karakteristika stijene u kojoj će se odlagati, dani su u tablici 3-8.

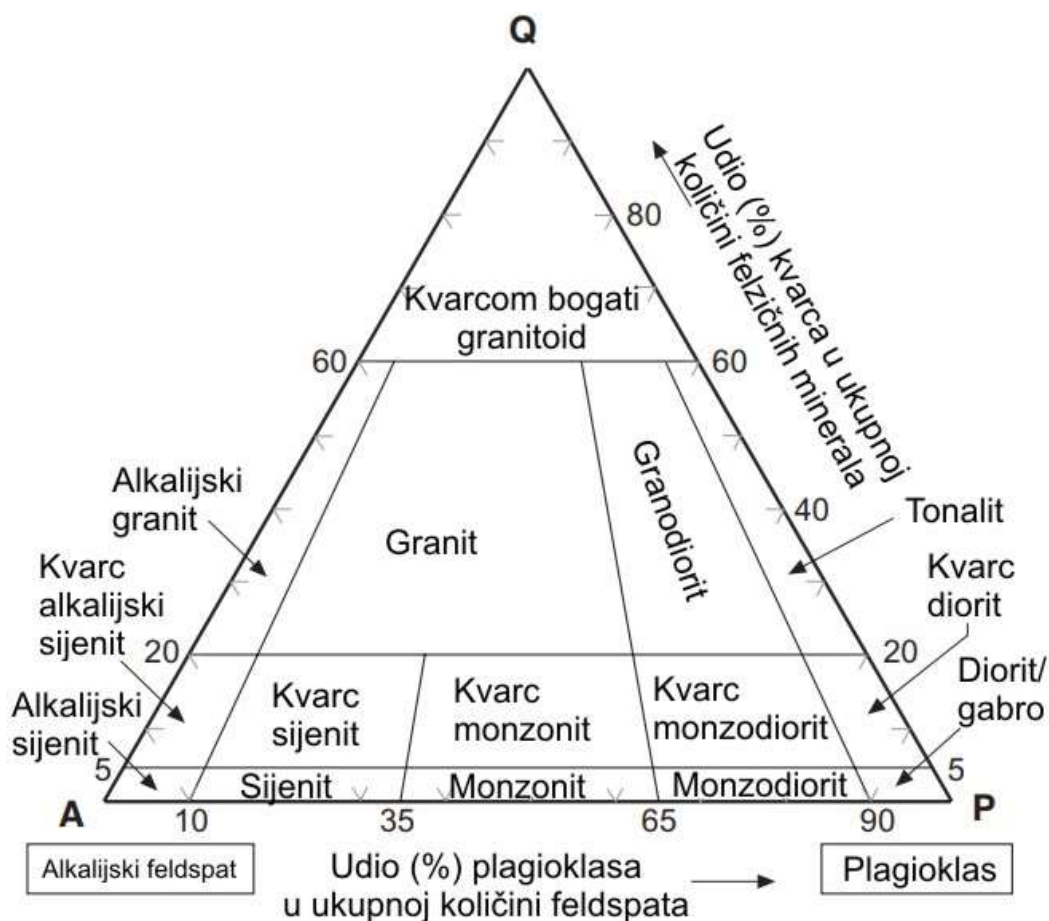
Tablica 3-8 Pojednostavljeni kriteriji za odabir lokacije dubokog geološkog odlagališta s gledišta sigurnosti i tehničke izvedivosti (SFOE, 2008).

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 Erozijska 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.**

Vjerojatni tip magmačke stijene u koju bi se materijal odlagalo je granodiorit. Granodiorit je kisela intruzivna stijena koja se obično sastoji od kvarca, natrijevih plagioklasa i manje količine alkalijskih feldspata s hornblendom i biotitom. Krupnozrnat je i spada u skupinu leukokratnih (svijetlih) magmačkih stijena (Gill, 2010). Granodiorit je najrasprostranjenija stijena ovog tipa i obično sadrži oligoklase, rjeđe andezin. Sastav

plagioklasa je obično An₀ – An₅₀ što ih razlikuje od granogabra u kojima je sastav plagioklasa An₅₀ – An₁₀₀ (Gill, 2010). Granodiorit na tokomponentnom dijagramu kiselih stijena prikazan je na slici 3-23.



Slika 3-23 Trokomponentni dijagram kiselih stijena (Gill, 2010).

Neke od karakteristika granodiorita su predstavljene u tablici 3-9.

Tablica 3-9 Neke od karakteristika granodiorita (Gill, 2010).

PARAMETAR	VRIJEDNOST
Tlačna čvrstoća	133-230 [MPa]
Posmična čvrstoća	1,45-20,4 [MPa]
Prosječna brzina longitudinalnih valova	5500 [m/s]
Parametri čvrstoće	$\varphi = 37-43^\circ$, $c = 60-74$ [MPa]
Gustoća	2 700-2 800 [kg/m ³]

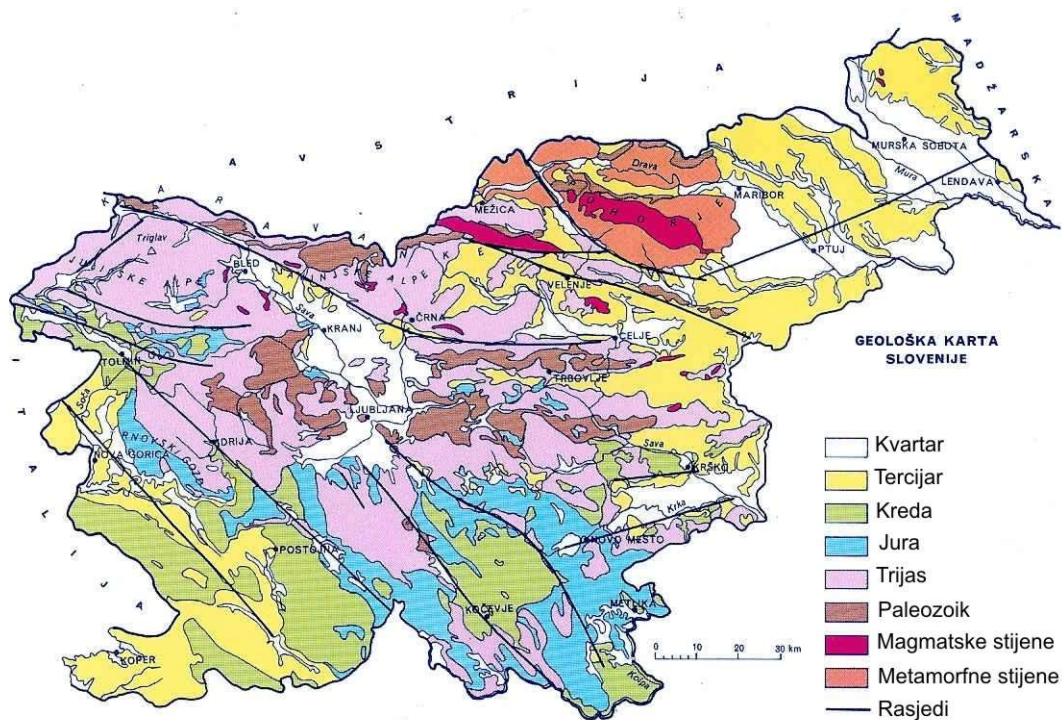
Na slici 3-24 prikazana je fotografija granodiorita. Zavisno od udjela određenih minerala stijena može biti svjetlija ili tamnija (sivlja), a s obzirom na udio kvarca mijenjat će se i čvrstoća i boja (čvršća stijena i više prozirno-sivih područja).



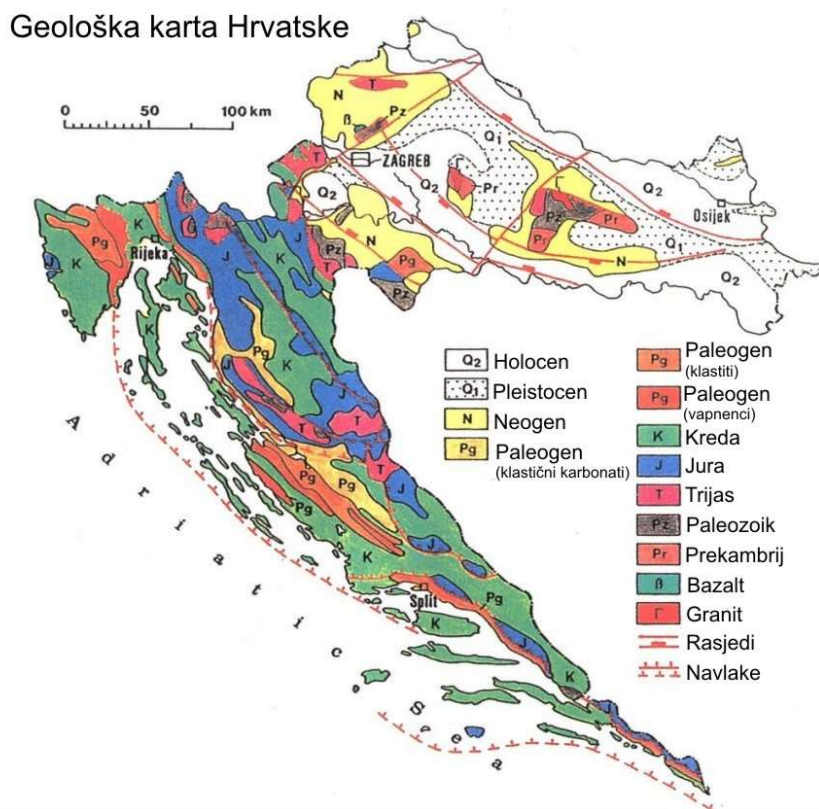
Slika 3-24 Fotografija granodiorita (Hauzenberger-Granodiorit) (ROLL-STONE, 2009).

Nužno je primijetiti slijedeće: **s obzirom da konkretni stijenski materijal za potrebe odlaganja ING-a u Sloveniji i Hrvatskoj još nije službeno određen niti potvrđen, postoji mogućnost da će se u konačnici odlagati u nekom drugom materijalu, a ne granodioritu, isto tako, postoji mogućnost odlaganja navedenog materijala van ove dvije države u slučaju da neko od budućih odlagališta (država) pristane na to rješenje, ako se lokalno odlagalište pokaže preskupom investicijom.**

Pojednostavljene geološke karte Republike Hrvatske i Republike Slovenije, s naznačenim lokacijama magmatskih i drugih stijena, dane su na slikama 3-25 i 43-26.



Slika 3-25 Pojednostavljena geološka karta Republike Slovenije (Jemec Auflič i dr., 2015)



Slika 3-26 Pojednostavljena geološka karta Hrvatske (Dunda i Kujundžić, 2000).

4. 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.

4.1. 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).

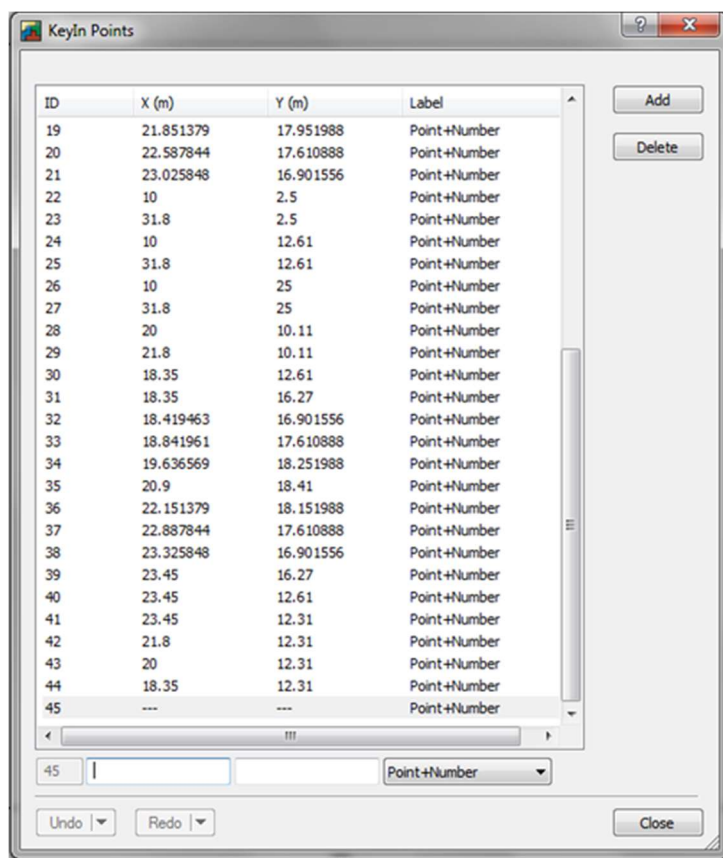
Kriterij kompatibilnosti glasi: za konvergenciju rješenja po MKE potrebno je da su elementi konformni, tj. kompatibilni, što znači da varijable i njihove derivacije do $m-1$ stupnja, u kojem je m stupanj najviše derivacije funkcionala, moraju biti kontinuirane na svim granicama između elemenata (Brnić,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

4.2. Postupak modeliranja u programu Geostudio

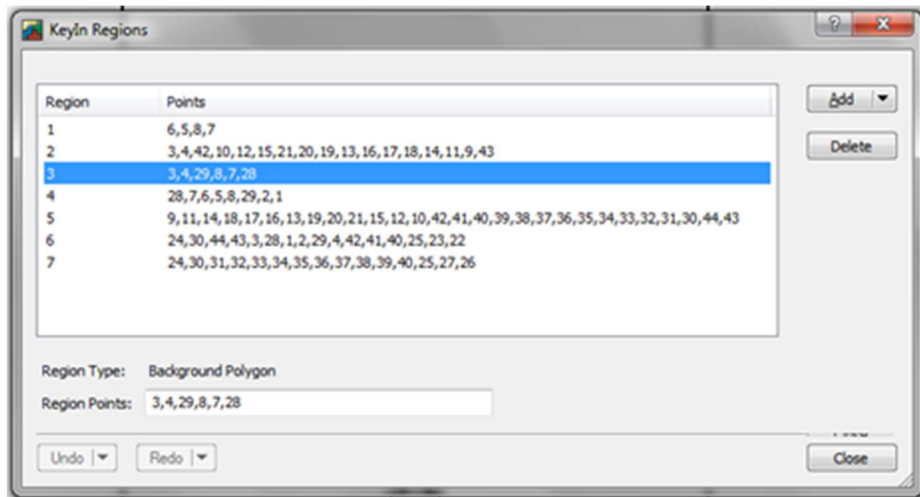
Numeričko modeliranje u potprogramima programa Geostudio svodi se na 3 faze. Prva faza uključuje postavljanje geometrije modela, druga faza je provođenje samog proračuna te u trećoj fazi slijedi prikaz podataka.

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 4-1 prikazano je sučelje za definiranje točaka modela.



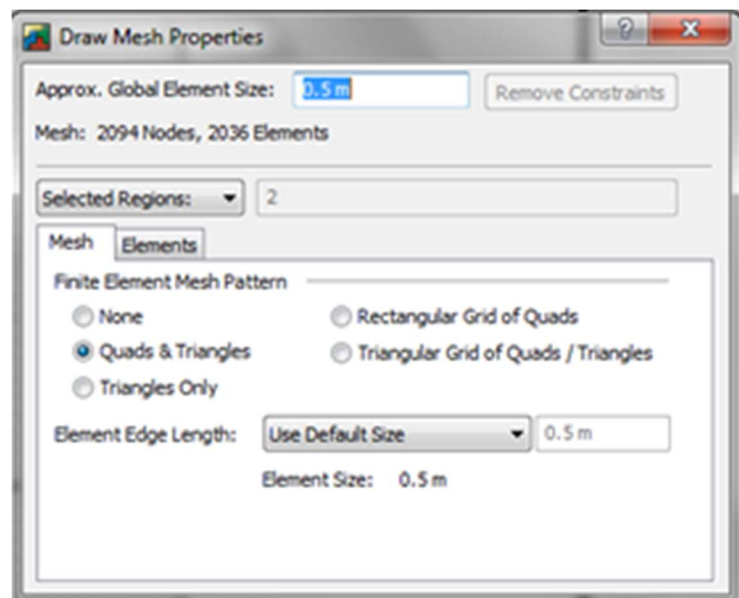
Slika 4-1 Unos točaka modela.

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 4-2.



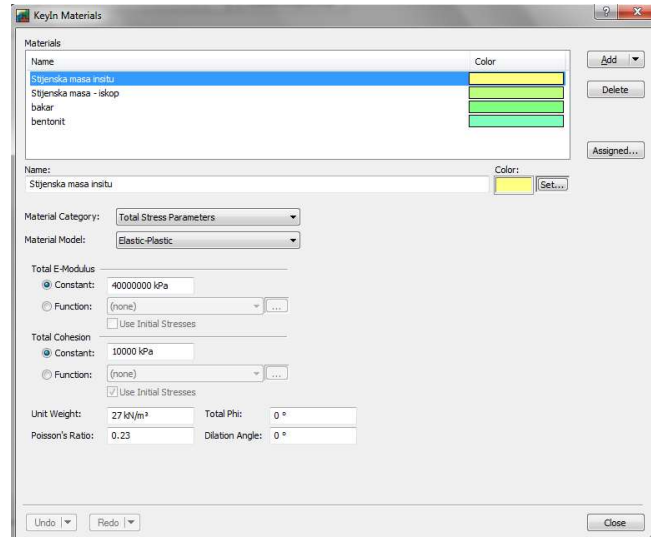
Slika 4-2 Definiranje regija.

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 4-3.



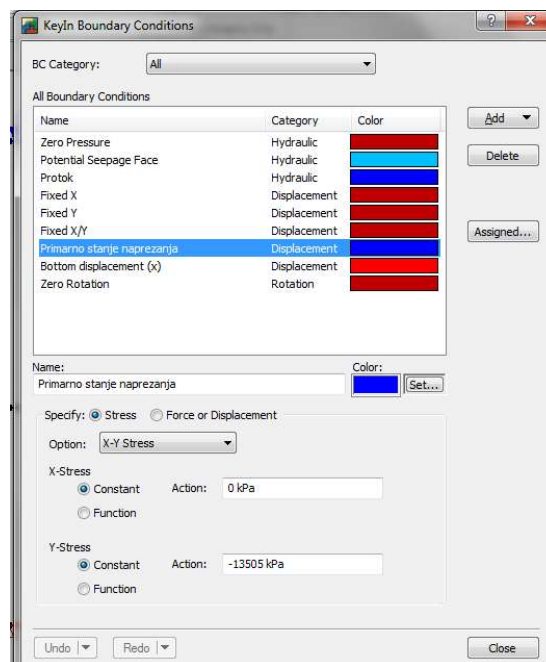
Slika 4-3 Definiranje mreže konačnih elemenata.

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



Slika 4-4 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 4-5 prikazano je zadavanje graničnih uvjeta iz potprograma SIGMA/W.



Slika 4-5 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.

4.2.1. 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.

4.2.2. 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 4.1-4.3 prikazan je način kojim se izračunavaju pomaci, maksimalna naprezanja i maksimalne sile. Izraz za izračunavanje pomaka u točki (XY pomak) (GEO-SLOPE, 2013):

$$\delta_{xy} = \sqrt{\delta_x^2 - \delta_y^2} \quad (4.1)$$

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):

$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4.2)$$

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:

$$\sigma_{max} = \frac{(\sigma_y + \sigma_x)}{2} + \sqrt{\left[\frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.3)$$

gdje su:

σ_{max} –maksimalno normalno naprezanje,

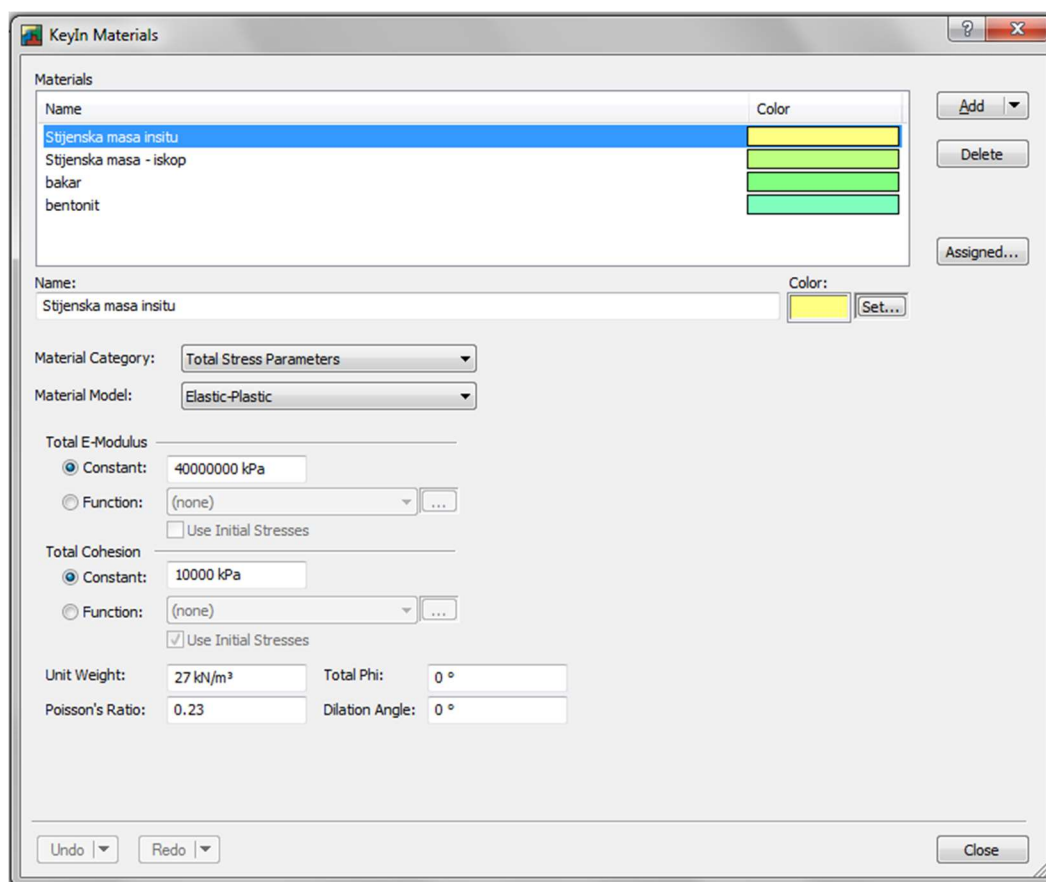
σ_y – naprezanje u smjeru y ,

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 4-6 dan je primjer sučelja za unos parametara materijala, konkretno za neporemećenu stijensku masu, a parametri odabrani za izradu modela su dani u tablici 4-1. Parametri su odabrani prema literaturi vezanoj uz odabrani koncept i predloženu generičku lokaciju (ARAO, 2019; Korkiala-Tanttu, 2009; Keto i dr., 2012; Juvankoski, 2010).



Slika 4-6 Sučelje za unos parametara materijala u program SIGMA/W.

Tablica 4-1 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	40 000 000	10 000	27,00	0,23
Granodiorit poremećen			2 000 000	6 000	26,00	0,28
Bentonit			10 000 000	20	20,59	0,30
Bakar		Linearno elastični	1,17x10 ⁸	-	87,57	0,36

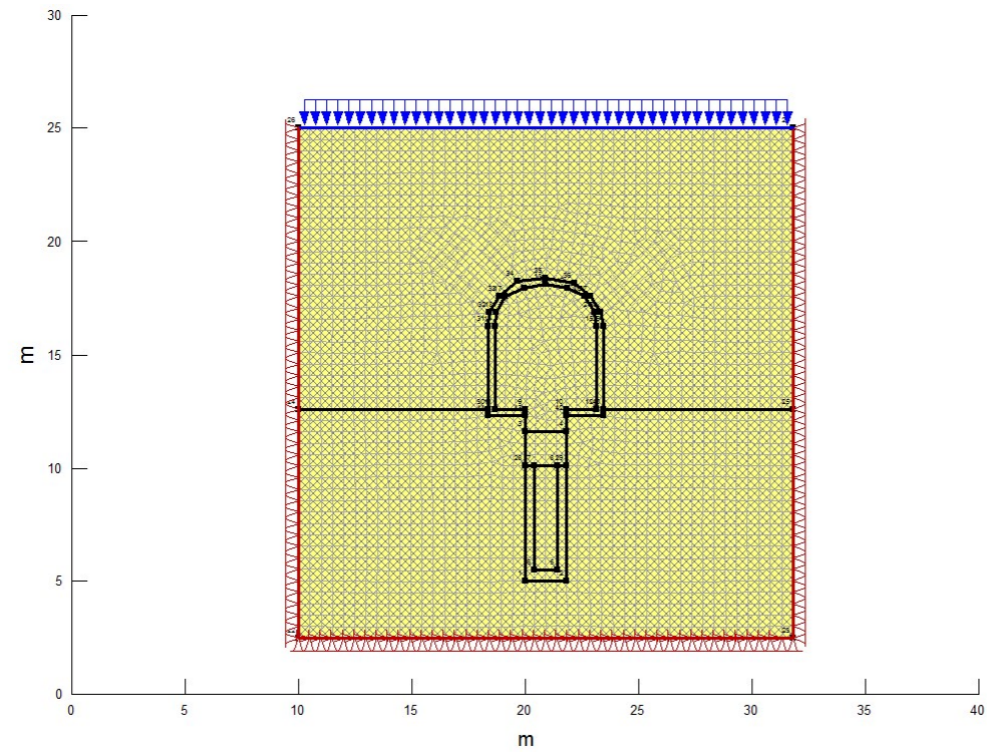
Granični uvjeti koje je trebalo zadati za proračun stanja naprezanja i pomaka dani su u tablici 4-2, a odabrani su u skladu s literaturom vezanom uz odabrani koncept i predloženu generičku lokaciju (ARAO, 2019; Korkiala-Tanttu, 2009; Keto i dr., 2012; Juvankoski, 2010).

Tablica 4-2 Granični uvjeti za proračun stanja naprezanja i pomaka u programu SIGMA/W.

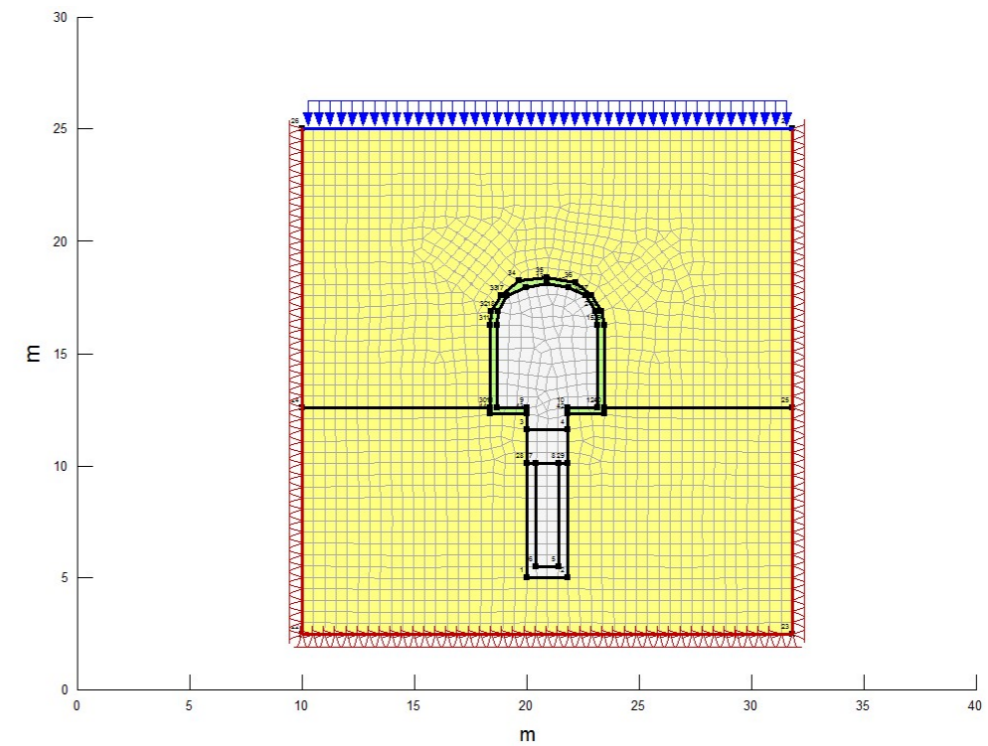
Granični uvjet	Kategorija	Tip	Iznos
Protok	Hidraulički	Jedinični tok	$1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
<i>Fixed x</i>	Pomaci	x - pomak	0 m
<i>Fixed x/y</i>	Pomaci	x – pomak y - pomak	0 m 0 m
Prirodno stanje naprezanja	Naprezanje	x naprezanje y naprezanje	0 kPa 1 3505 kPa

Osnovni model s mrežom konačnih elemenata, po fazama, prikazan je na slici 4-7. Definirane su slijedeće „regije“ materijala: intaktna stijena, zona poremećene stijenske mase oko tunela (debljine 30 cm), bakreni spremnik i bentonitna ispuna.

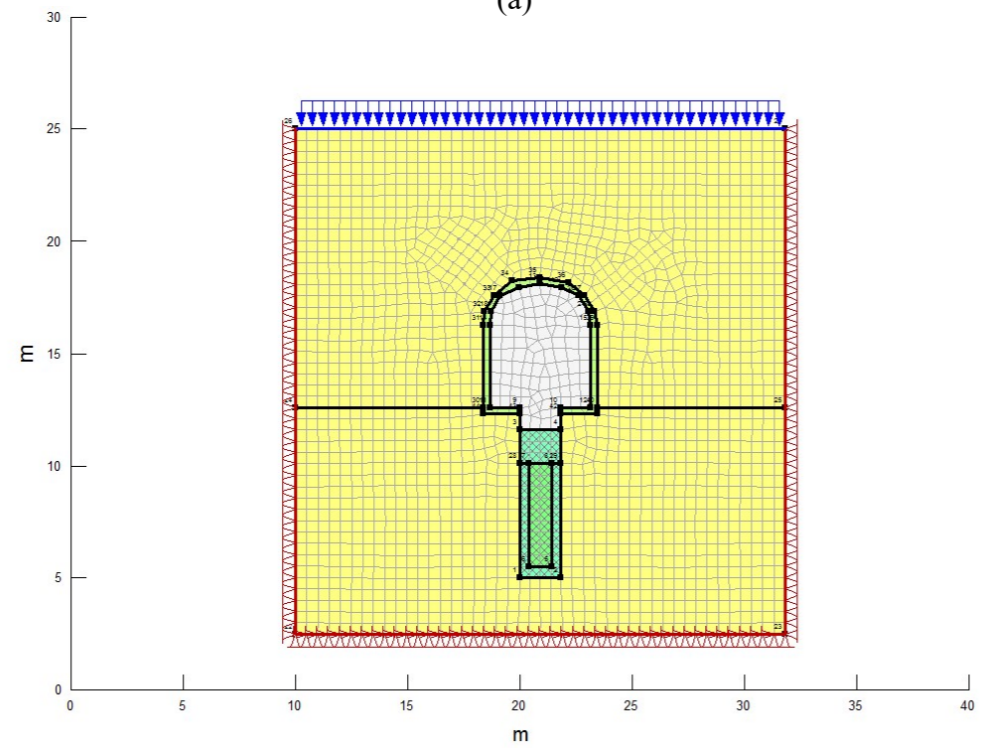
Model naprezanja u stijeni također je dan po fazama: stanje in situ (prije iskopa, s označenim „regijama“ različitih materijala koji će se primijeniti), stanje nakon iskopa tunela i izrade bušotine, stanje nakon ugradnje spremnika i materijala ispune (bentonita) i stanje nakon zapunjavanja odlagališnog tunela, a prikazan je na slici 4-8.



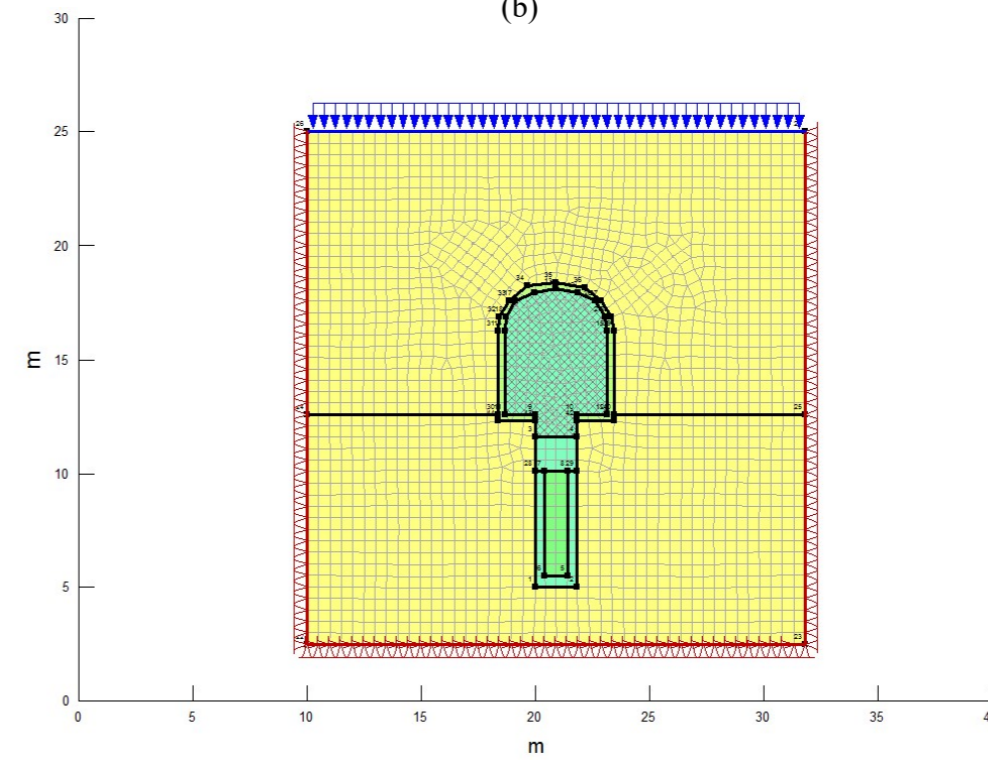
(a)



(b)

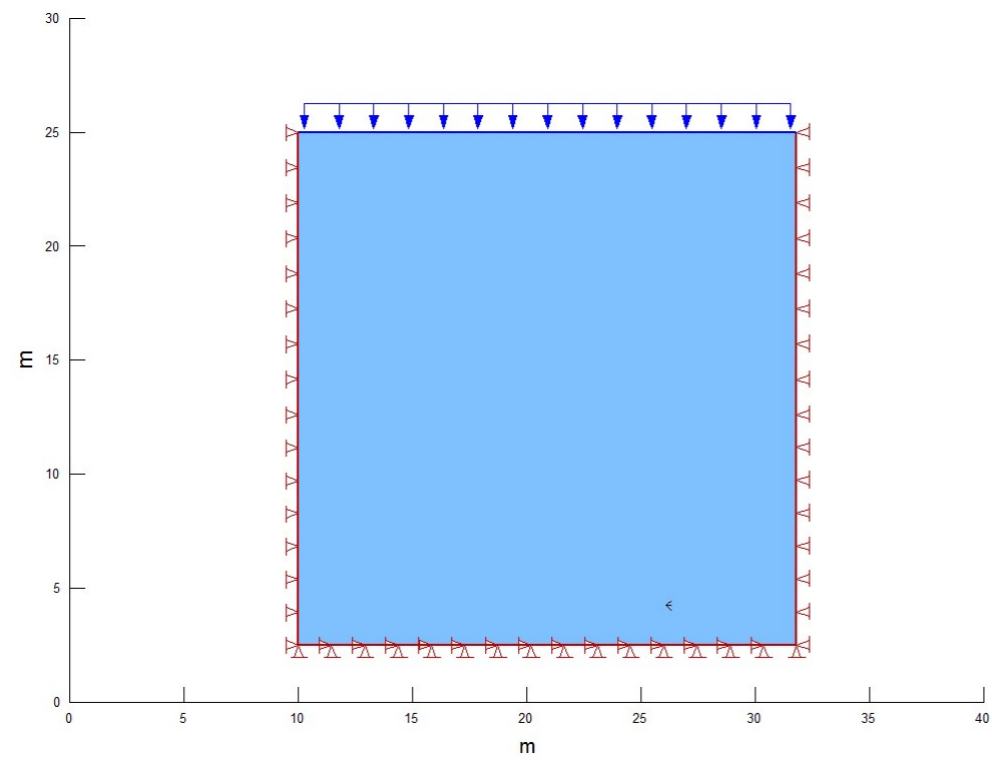


(c)

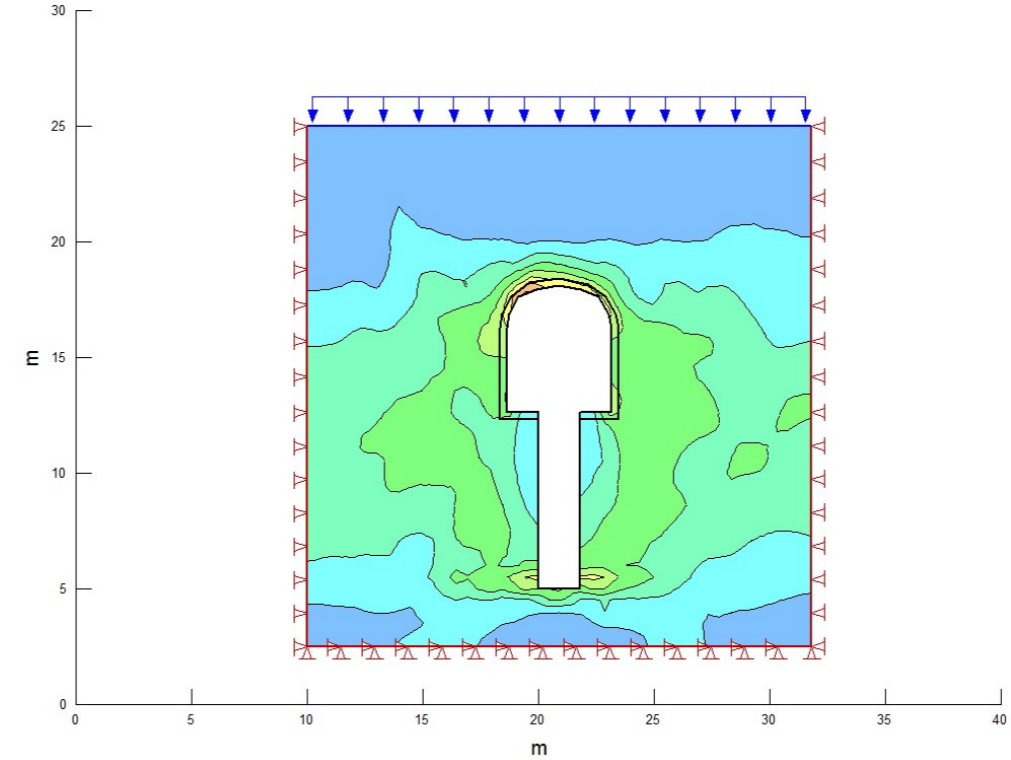


(d)

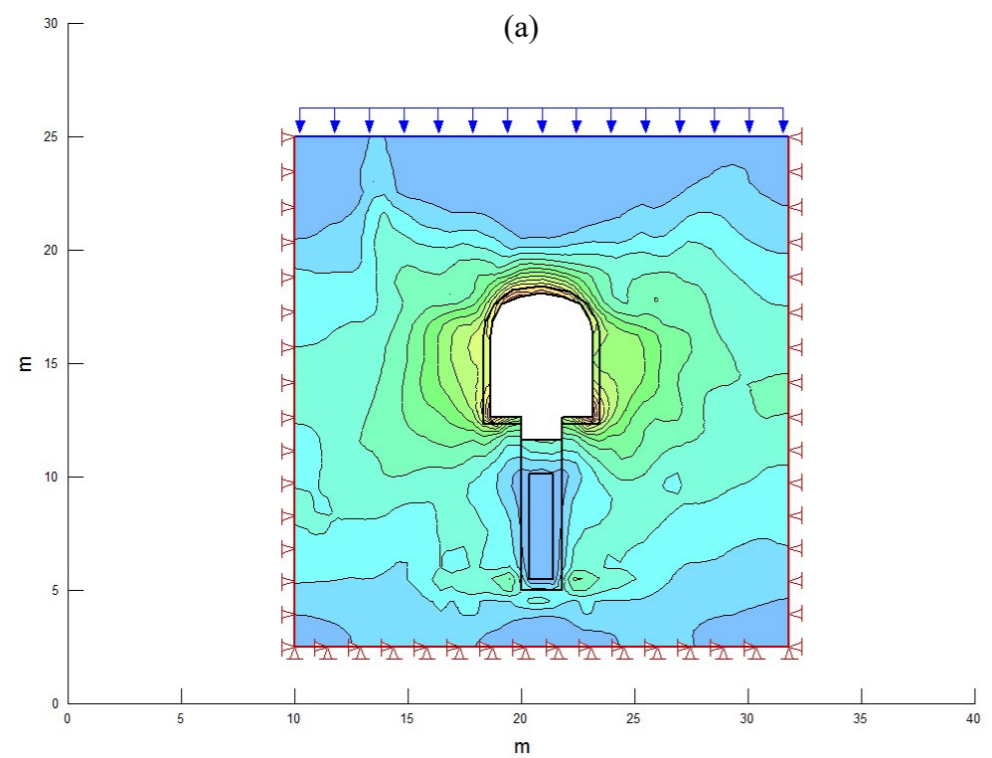
Slika 4-7 Osnovni model s mrežom konačnih elemenata za proračun: (a) stanje in situ (prije iskopa, s označenim „regijama“ različitih materijala koji će se primijeniti), (b) stanje nakon iskopa tunela i izrade bušotine, (c) stanje nakon ugradnje spremnika i materijala ispune (bentonita), (d) stanje nakon zapunjavanja odlagališnog tunela.



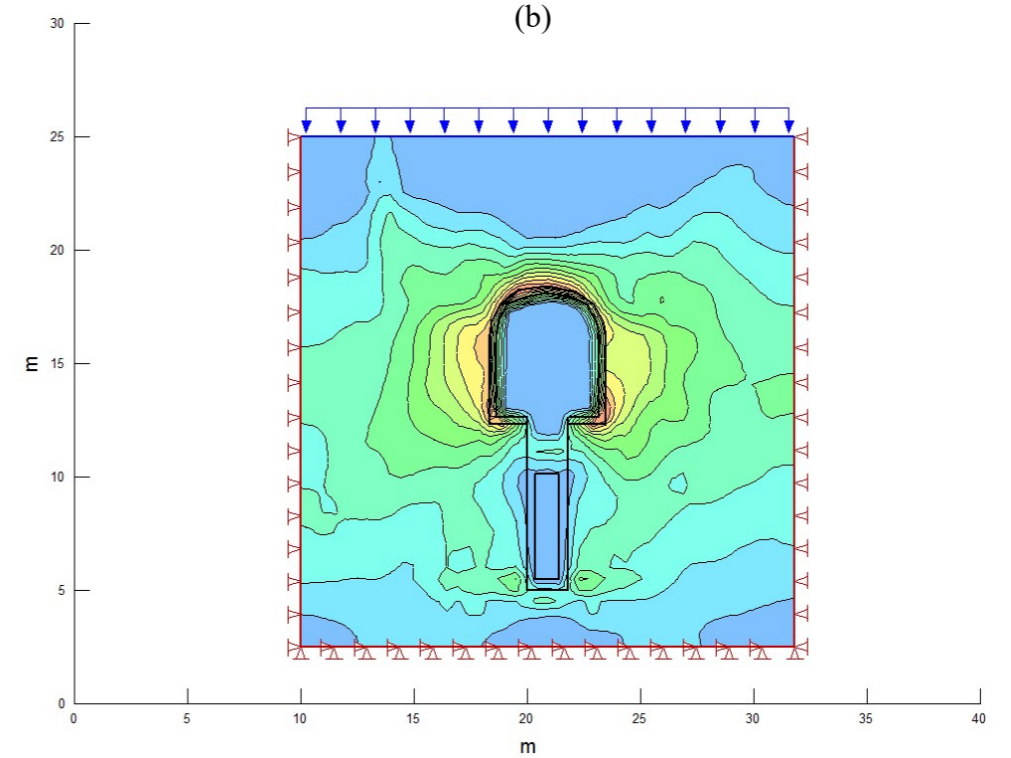
(a)



(b)



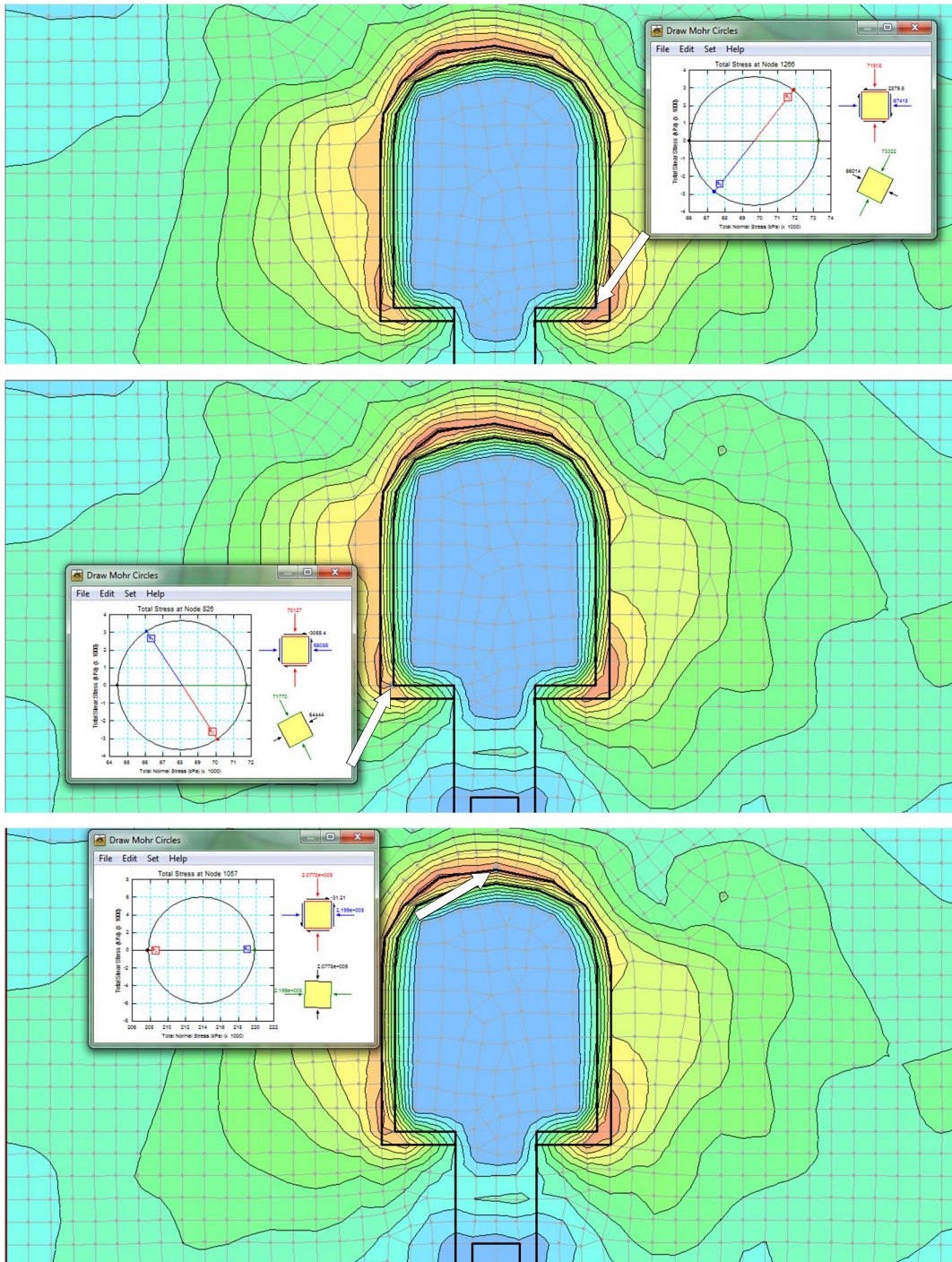
(c)



(d)

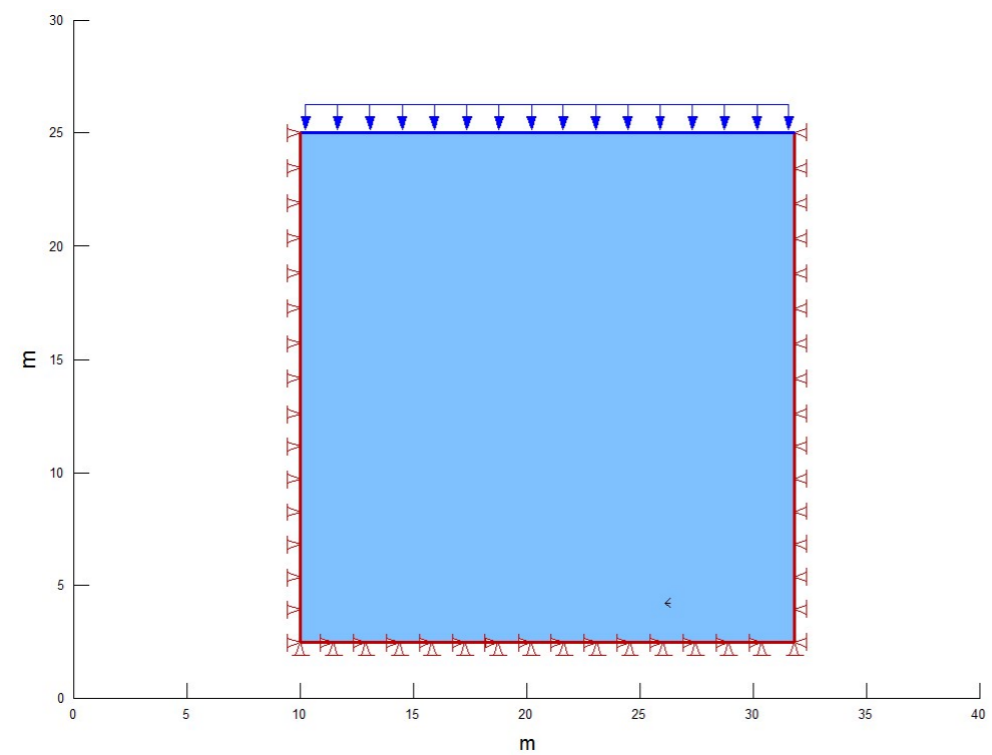
Slika 4-8 Model naprezanja u stijeni za poprečni presjek po bušotini za odlaganje, prema fazama: (a) stanje in situ (prije iskopa), (b) stanje nakon iskopa tunela i izrade bušotine, (c) stanje nakon ugradnje spremnika i materijala ispune (bentonita), (d) stanje nakon zapunjavanja odlagališnog tunela.

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 4-9.

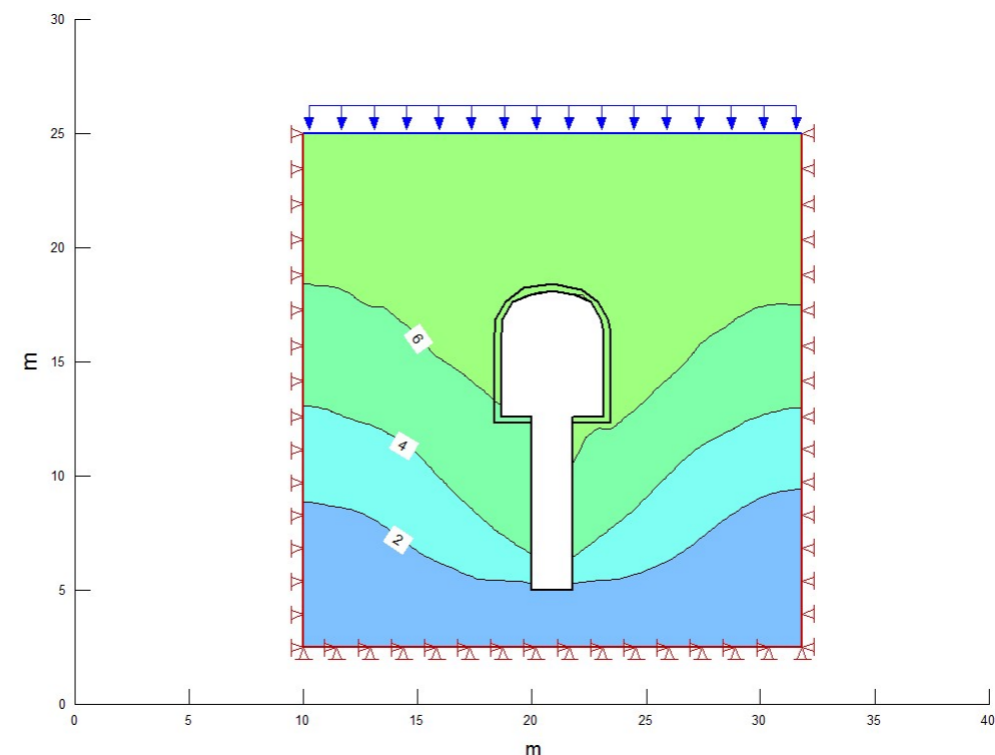


Slika 4-9 Mohrove kružnice za točke s maksimalnim naprezanjima (naznačene strelicama).

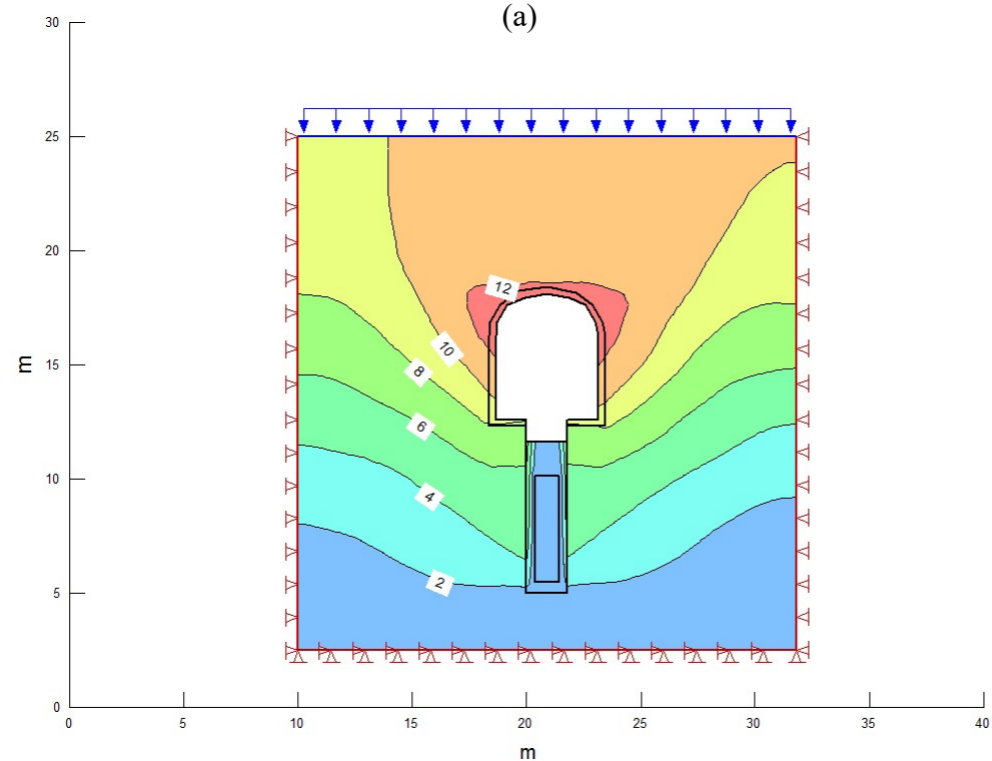
Modeli pomaka, prema fazama, dani su na slici 4-10.



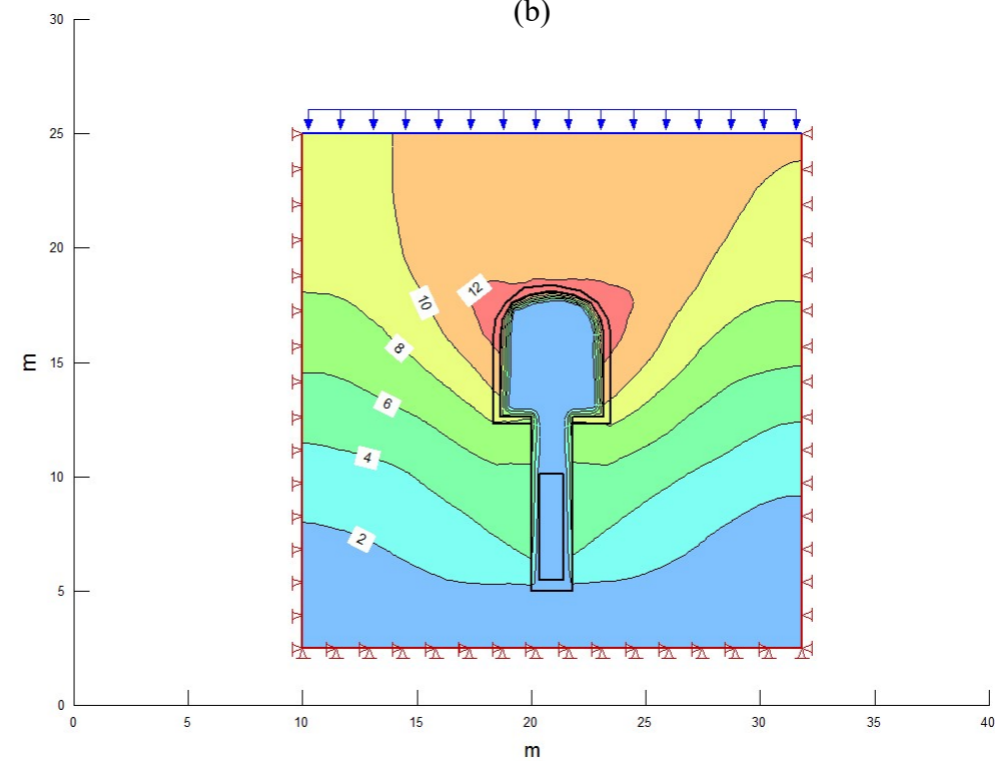
(a)



(b)



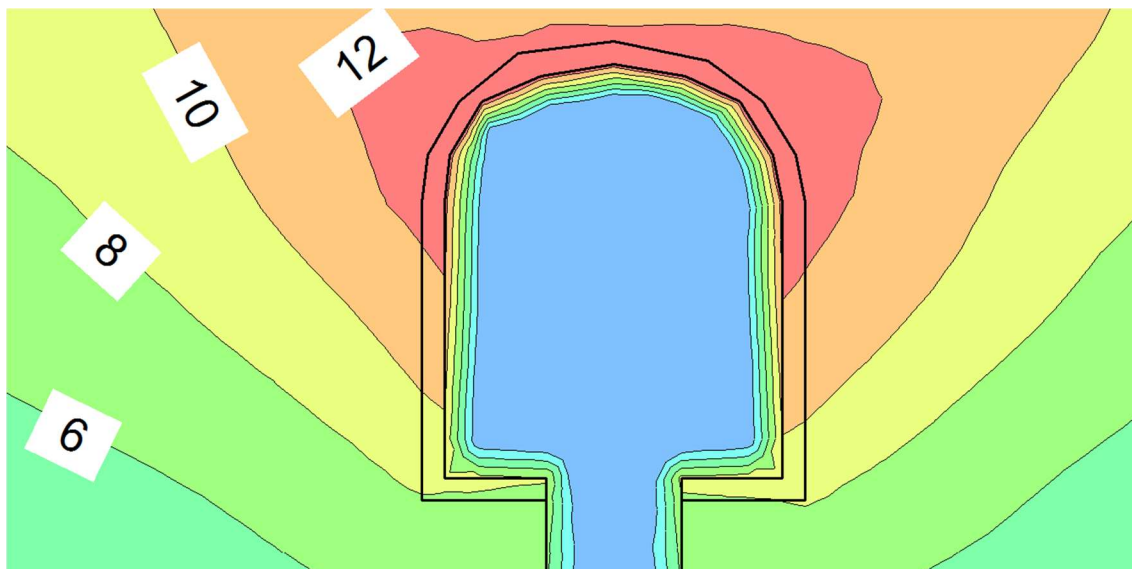
(c)



(d)

Slika 4-10 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 (iznosi u mm).

Maksimalni pomaci iznose 12 mm (kalota tunela) što je unutar parametara sigurnosti. Detalj slike 4-10 d, prikazan je na slici 4-11, gdje se jasnije vide iznosi pomaka.



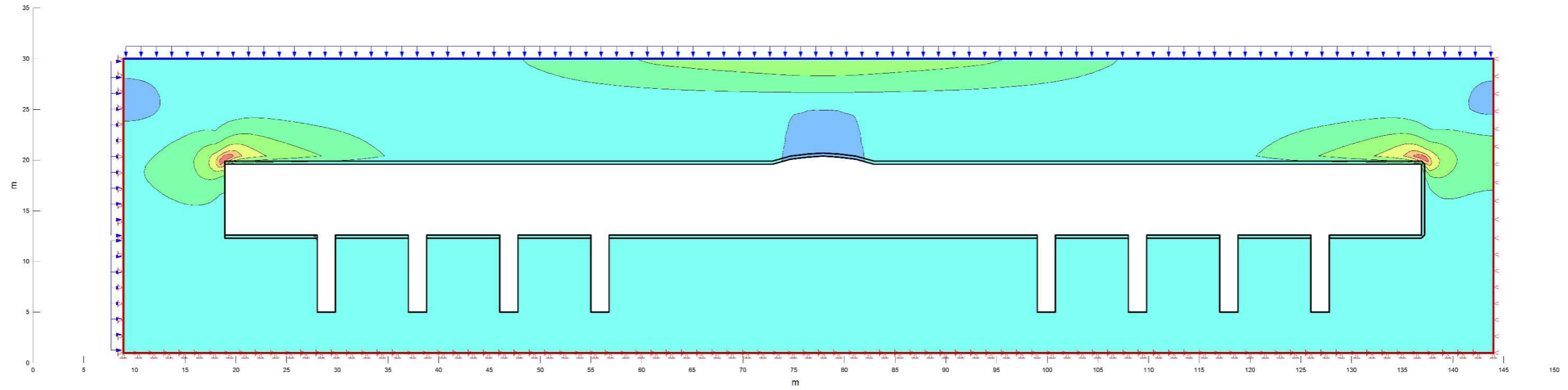
Slika 4-11 Model pomaka u stijeni za poprečni presjek po bušotini za odlaganje.

Maksimalni pomaci se, za model duž presjeka odlagališnog tunela, očekivano nalaze u kaloti transportnog tunela i dani su u tablici 4-3.

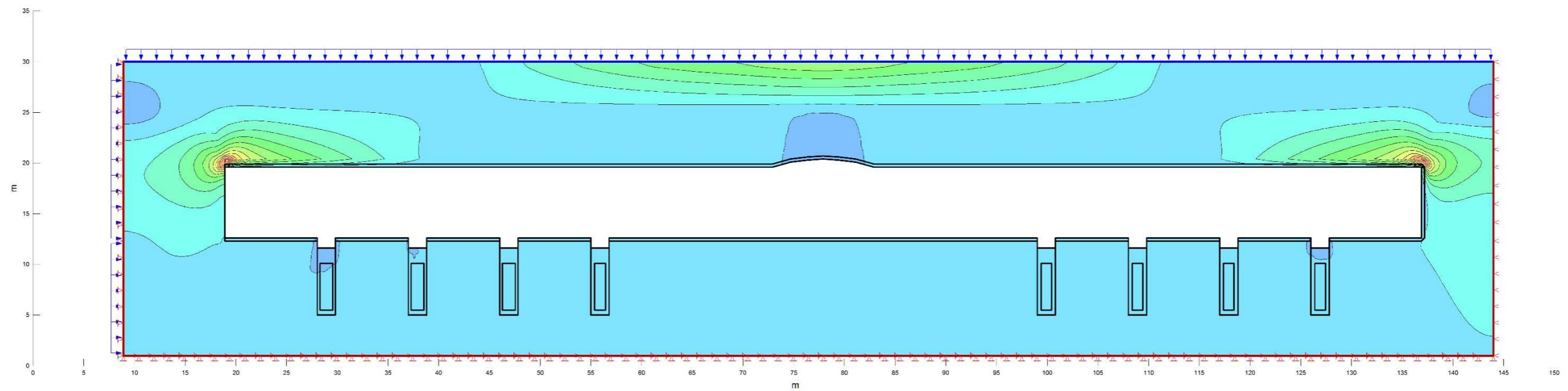
Tablica 4-3 Maksimalni pomaci (u kaloti transportnog tunela) prema radnim fazama.

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

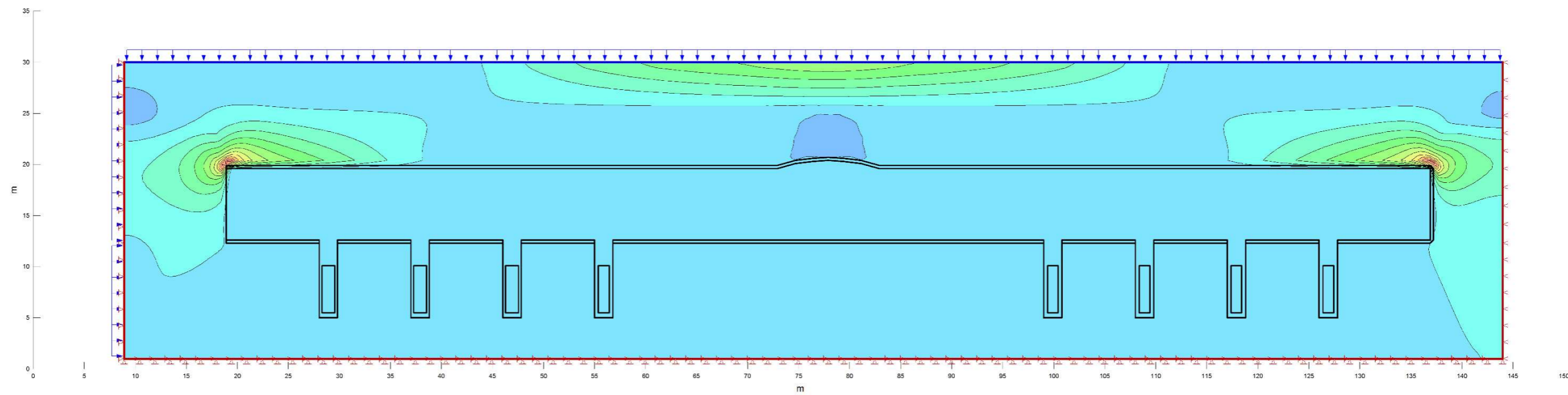
Model napravljen kroz presjek uzduž odlagališnog tunela prikazan je slikama naprezanja: 4-12 u fazi iskop, 4-13 u fazi ugradnje spremnika, 4-14 u fazi zapunjenih odlagališnih tunela te pomaka: 4-15 u fazi iskop, 4-16 u fazi ugradnje spremnika, 4-17 u fazi zapunjenih odlagališnih tunela.



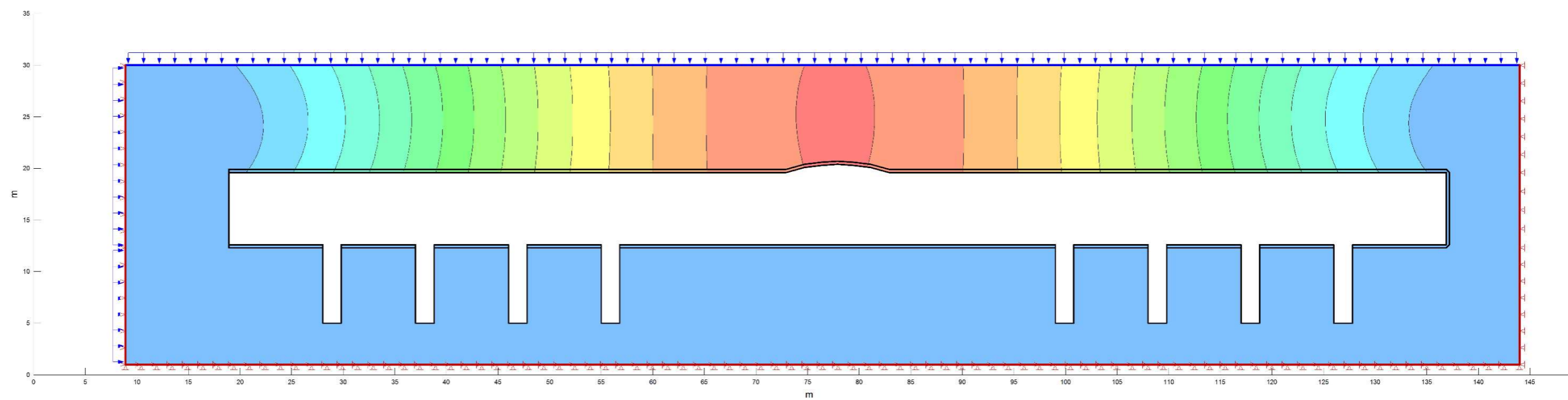
Slika 4-12 Naprezanja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi iskopa.



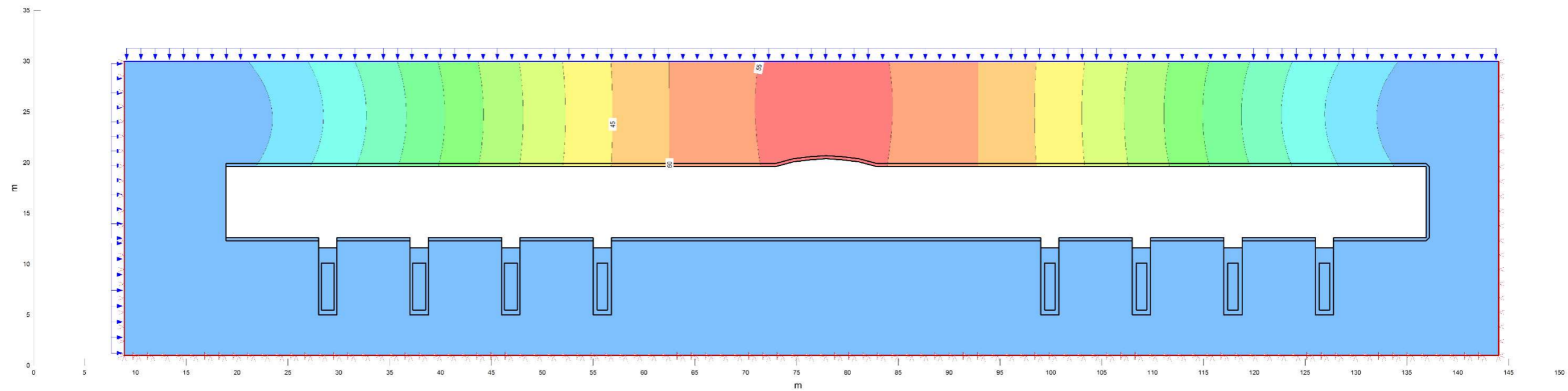
Slika 4-13 Naprezanja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi ugradnje spremnika.



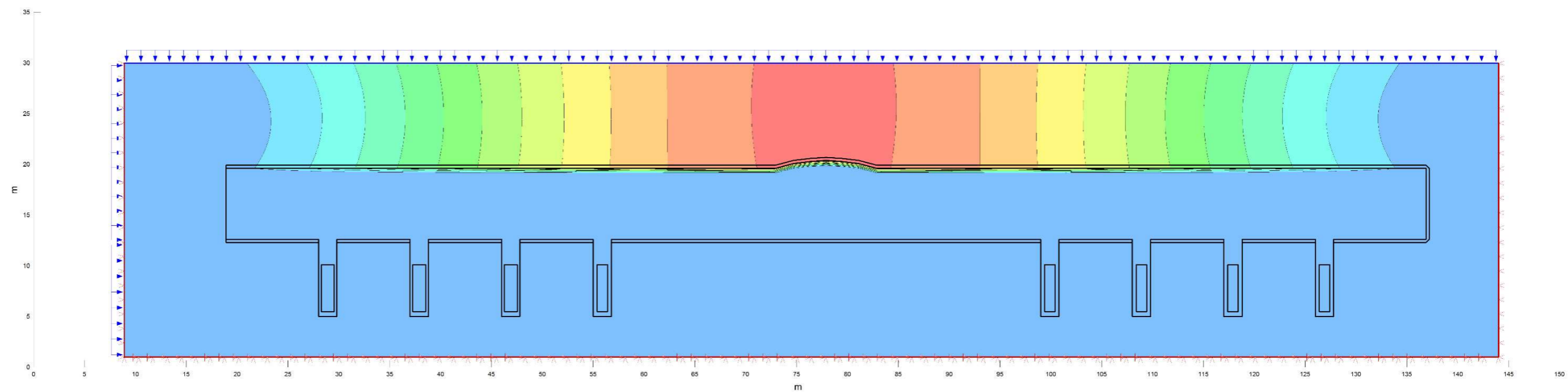
Slika 4-14 Napreznja na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi zapunjenih odlagališnih tunela.



Slika 4-15 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi iskopa.



Slika 4-16 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi ugradnje spremnika.



Slika 4-17 Pomaci na modelu kroz presjek uzduž odlagališnog tunela u fazi zapunjenih odlagališnih tunela.

4.2.3. 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):

$$v = ki \quad (4.4)$$

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):

$$v_s = \frac{v}{n} \quad (4.5)$$

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:

$$\begin{Bmatrix} i_x \\ i_y \end{Bmatrix} = [B]\{H\} \quad (4.6)$$

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:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = [C][B]\{H\} \quad (4.7)$$

gdje su:

v_x – brzina u smjeru x ,

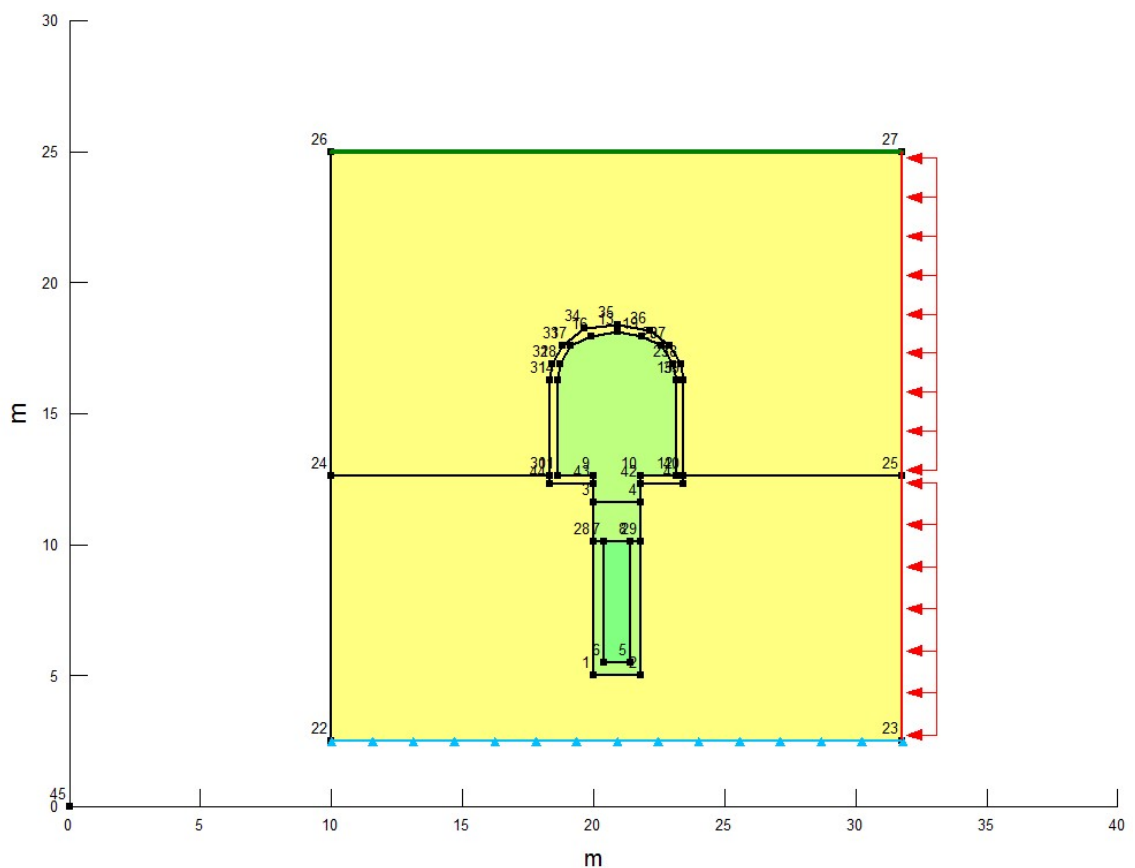
v_y – brzina u smjeru y ,

$[C]$ – matrica gradijenata,

$[B]$ – matrica gradijenata,

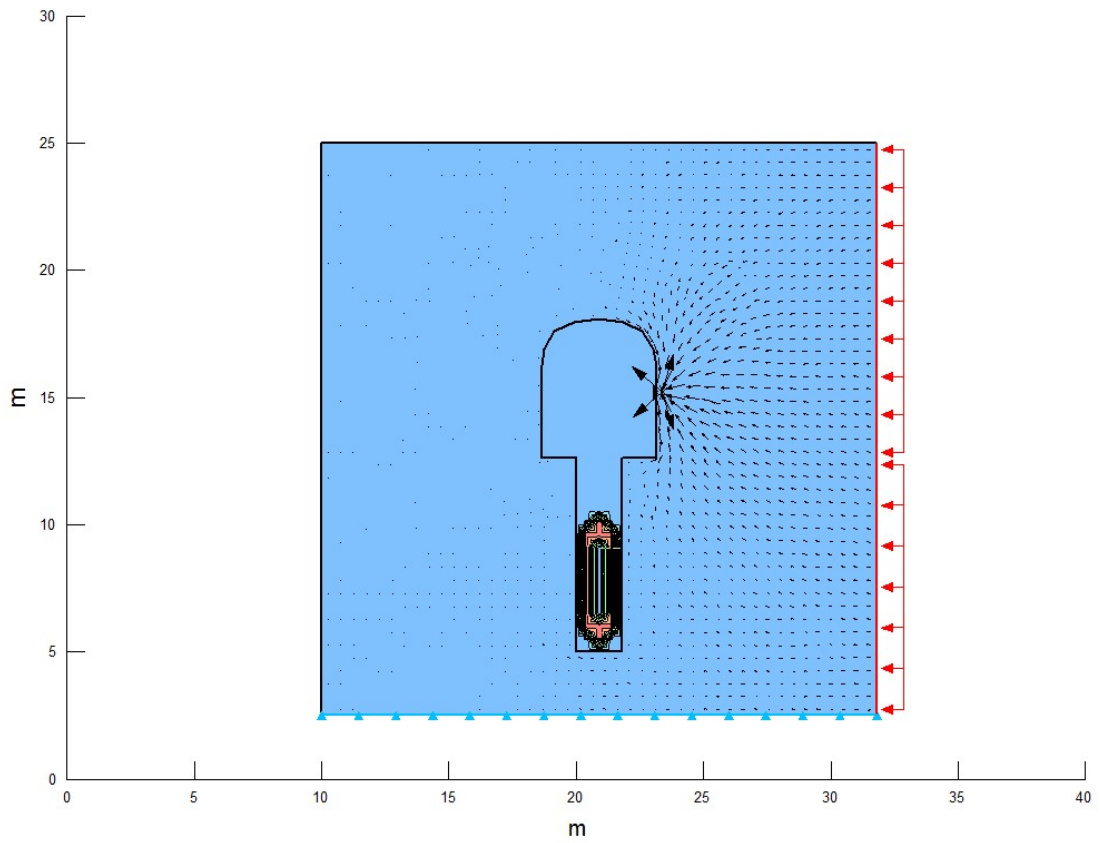
$\{H\}$ – vektor ukupnog tlaka u točki mreže konačnih elemenata.

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 4-18.

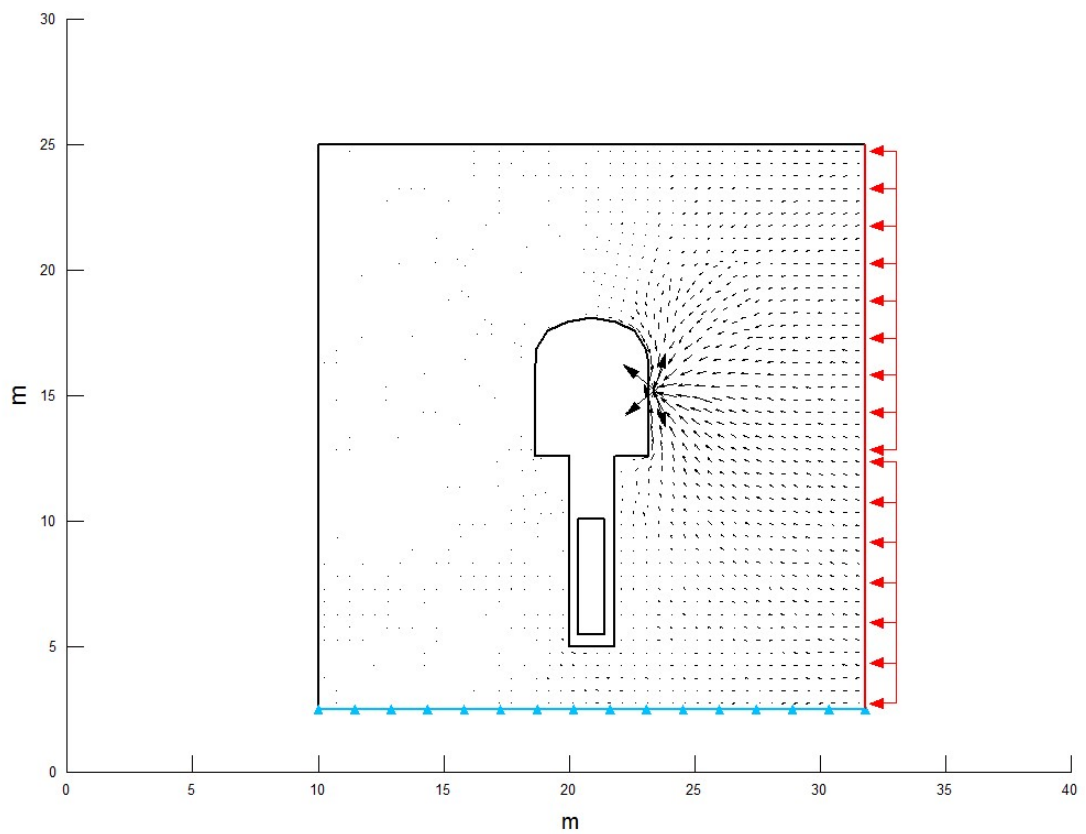


Slika 4-18 Osnovni model, s postavljenim regijama materijala i graničnim uvjetima (tok s desna na lijevo i nepropusna podloga).

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 4-19 s rezultatnim pornim tlakovima i na slici 4-20 s brzinama toka.

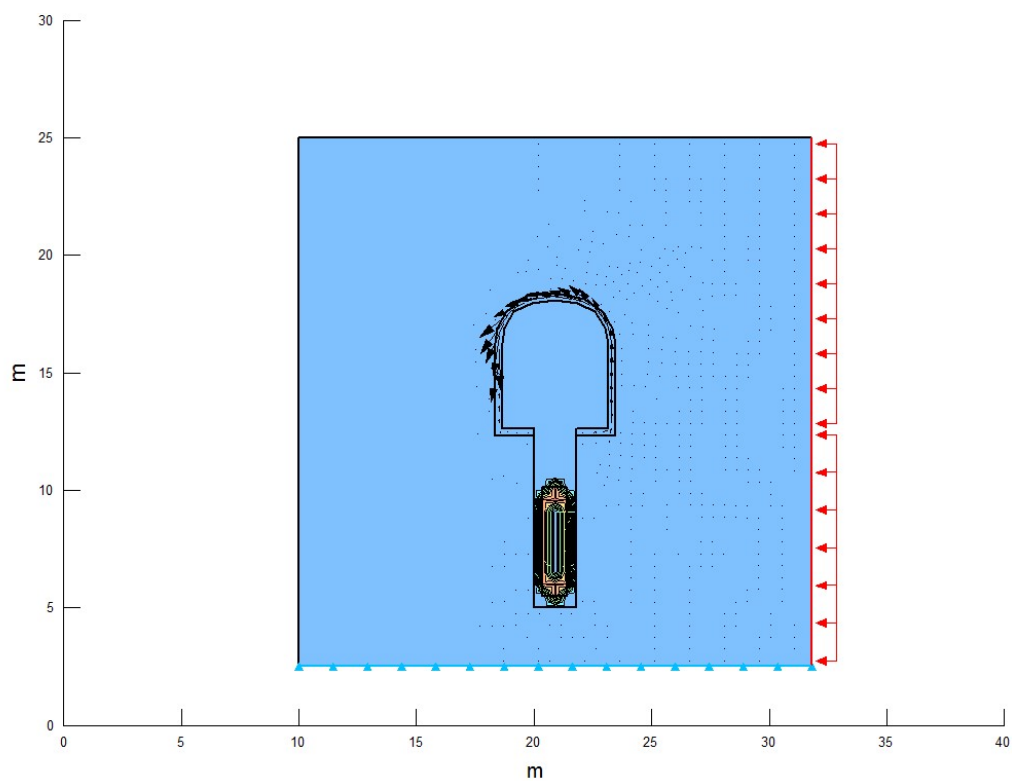


Slika 4-19 Rezultat analize prve faze: slabije frakturirana oštećena zona – porni tlakovi.

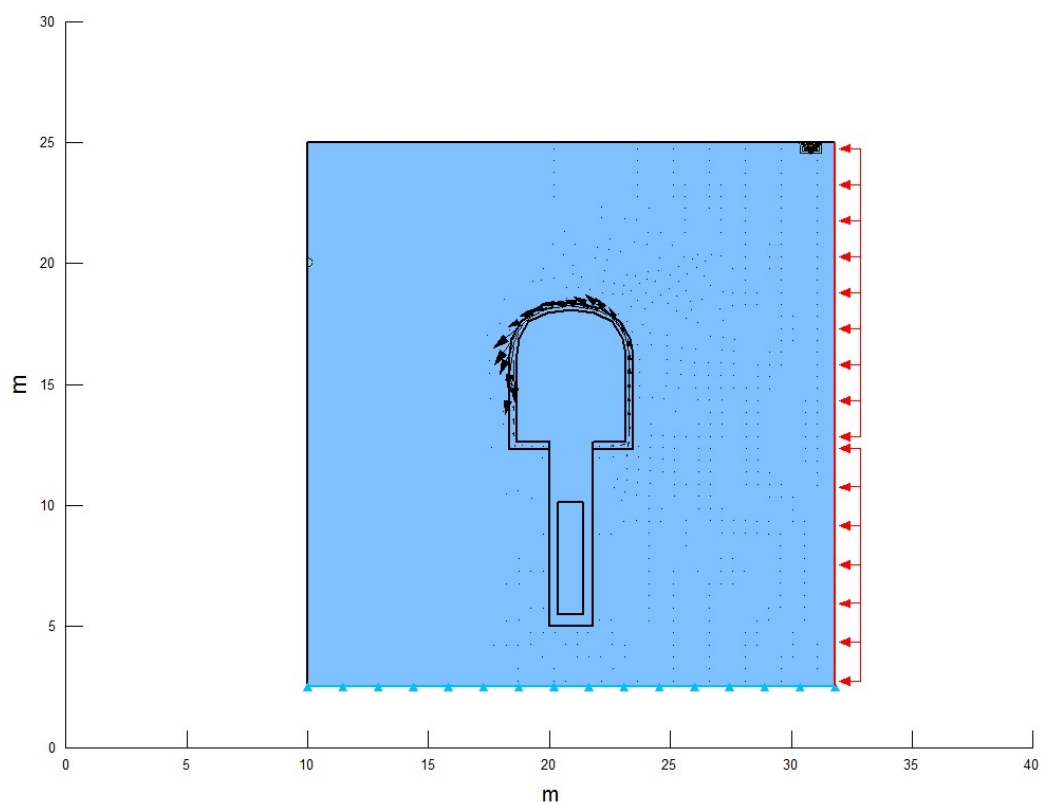


Slika 4-20 Rezultat analize prve faze: slabije frakturirana oštećena zona – brzine toka.

Druga faza, tok sa jače frakturiranom oštećenom zonom, prikazana je na slici 4-21 s rezultatnim pornim tlakovima i na slici 4-22 s brzinama toka.



Slika 4-21 Rezultat analize druge faze: jače frakturirana oštećena zona – porni tlakovi.



Slika 4-22 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.

4.2.4. 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):

$$\begin{Bmatrix} i_x \\ i_y \end{Bmatrix} = [B]\{T\} \quad (4.8)$$

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:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = [C][B]\{T\} \quad (4.9)$$

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:

$$t = \langle N \rangle \{T\} \quad (4.10)$$

gdje su:

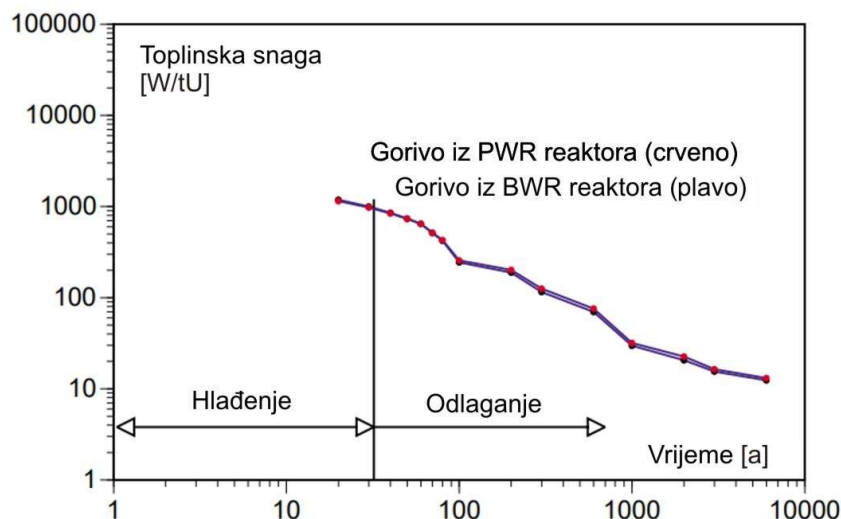
t – temperatura u bilo kojoj koordinati modela,

$\langle N \rangle$ – 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 4-23.



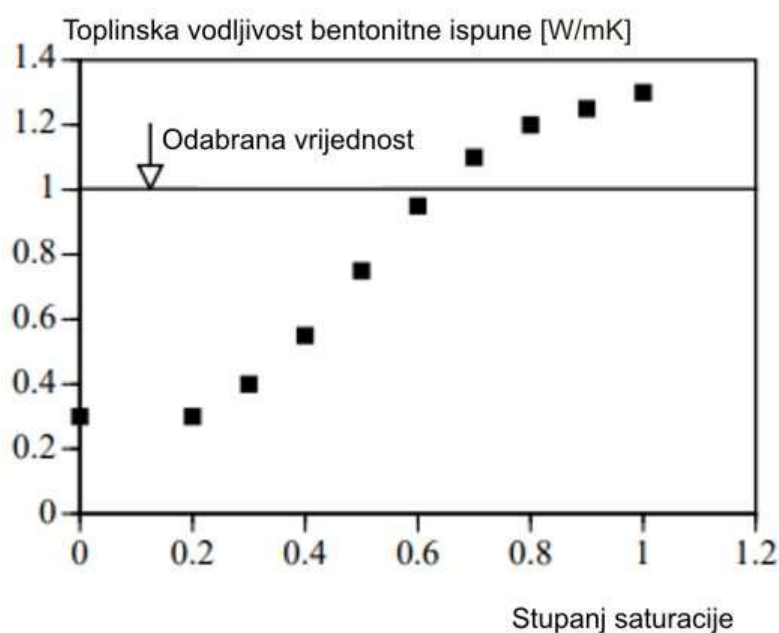
Slika 4-23 Promjena toplinske snage s vremenom (PWR - *Pressurized Water Reactor*, reaktor s vodom pod tlakom, kao u NEK; BWR - *Boiling water reactor*, reaktor s ključajućom vodom) (Ikonen, 2003).

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 4-24), a za potrebe izrade modela odabrana je vrijednost 1,0 W/mK.

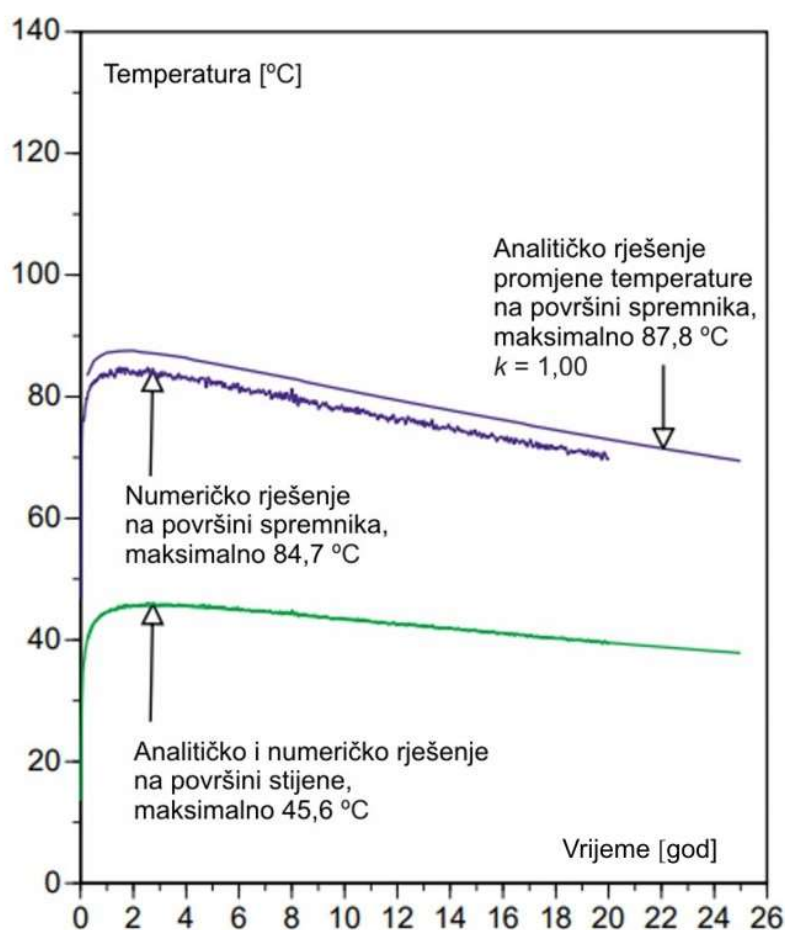


Slika 4-24 Toplinska vodljivost bentonita kao funkcija stupnja saturacije (Ikonen, 2003 prema Kukkonen, 2000).

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 3-6, odabran u iznosu 0,16 m³/m³ (16%).

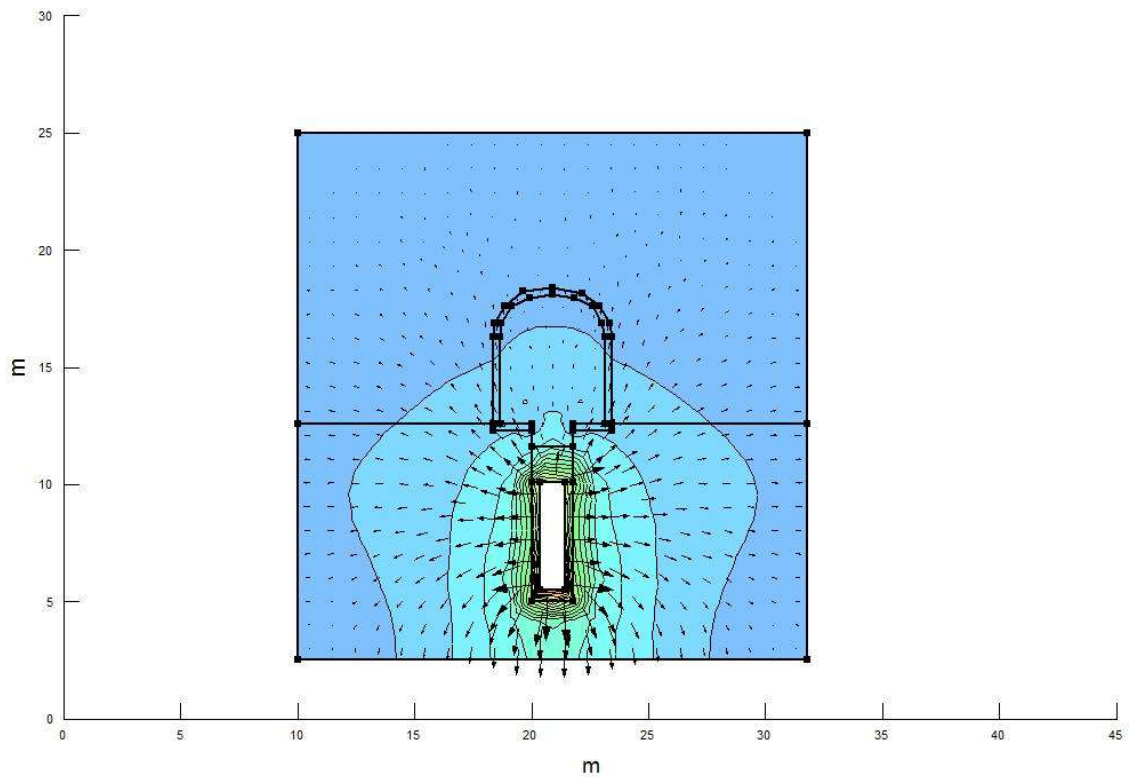
Na slici 4-25 prikazan je odnos promjene temperature na površini pojedinog spremnika i stijenci bušotine kroz vrijeme. Taj odnos poslužio je za izradu funkcije promjene temperature kroz vrijeme, parametra korištenog za izradu modela u radu.



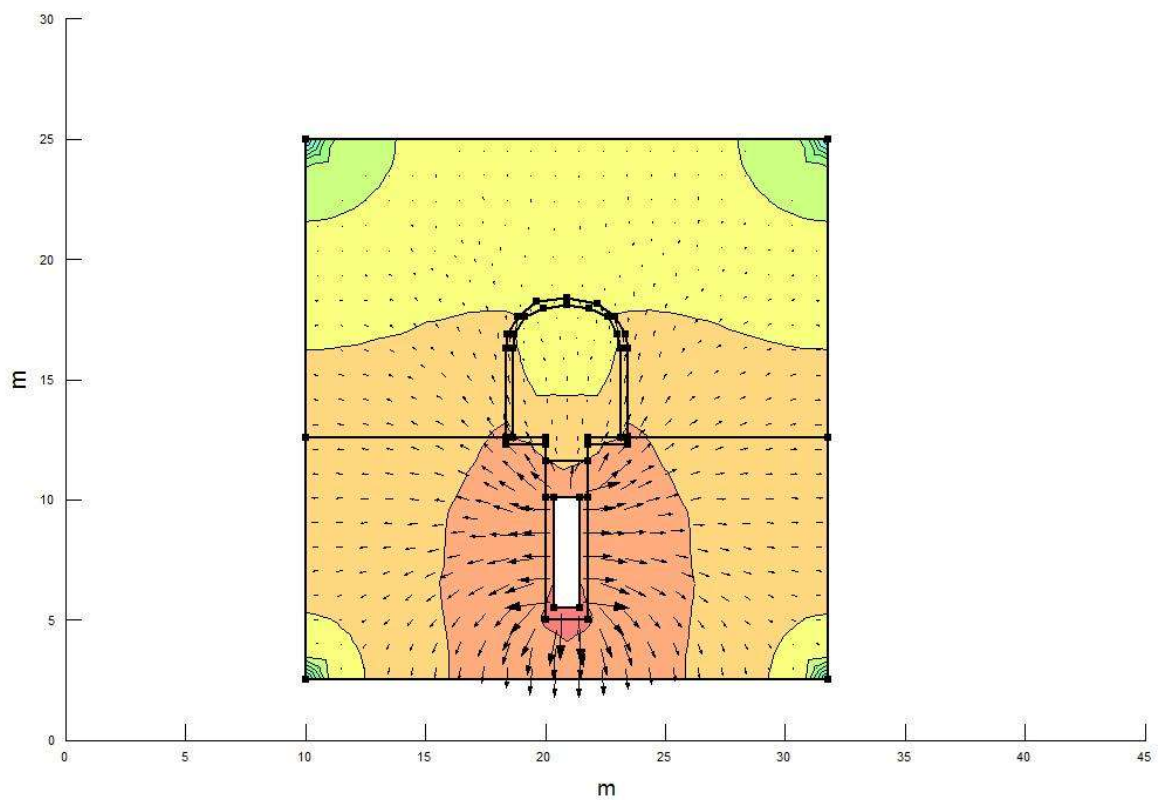
Slika 4-25 Odnos promjene temperature na površini pojedinog spremnika i stijenci bušotine kroz vrijeme (Ikonen, 2003).

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 4-7. 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 4-26, a na slici 4-27 prikazan je model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu.

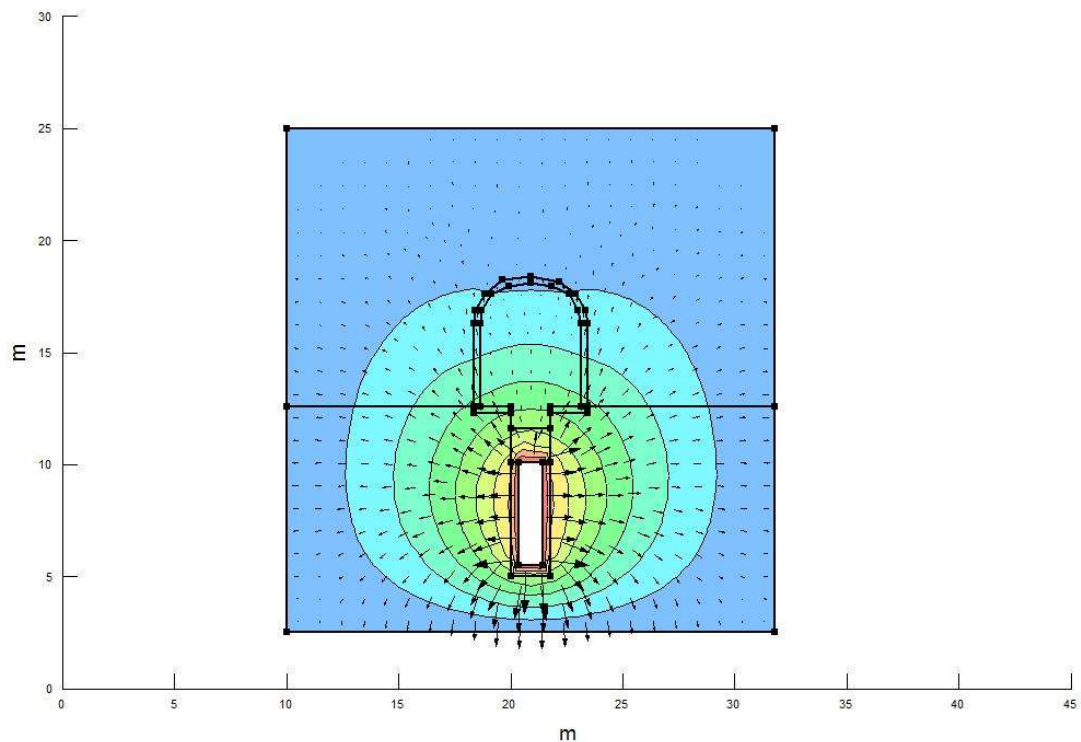


Slika 4-26 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu.

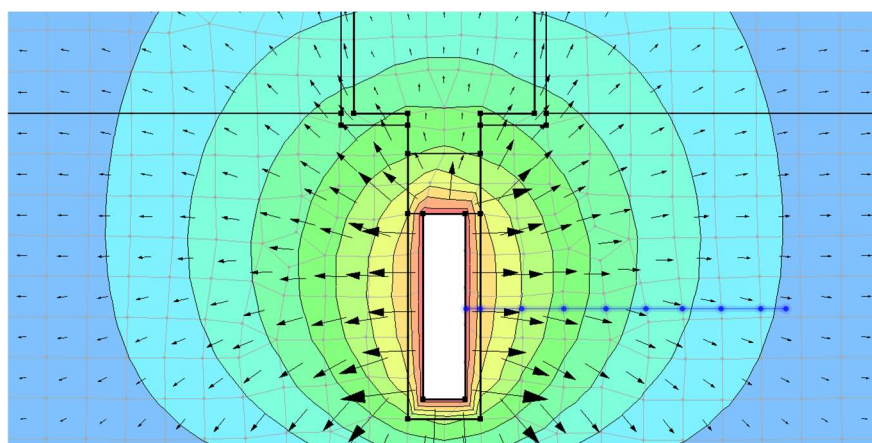


Slika 4-27 Model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu.

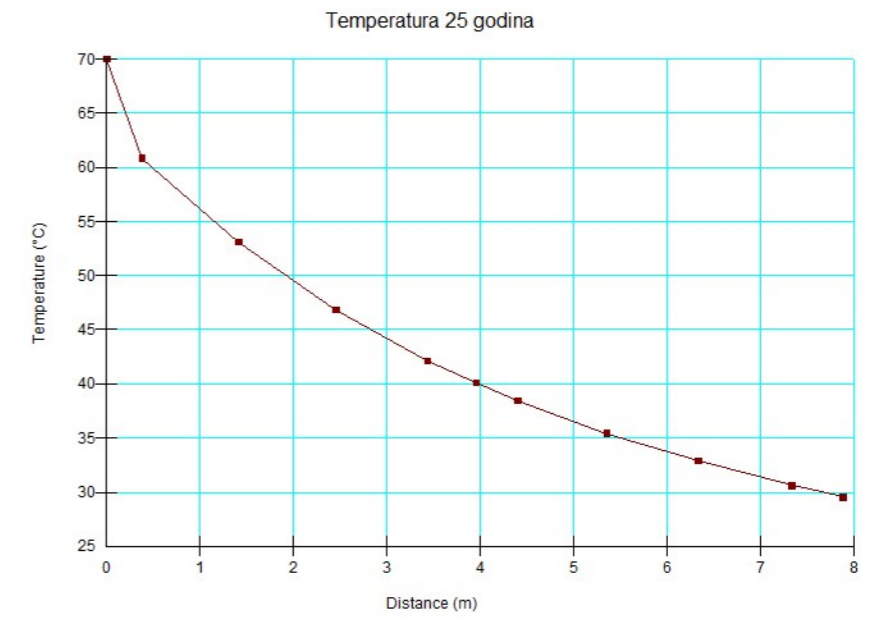
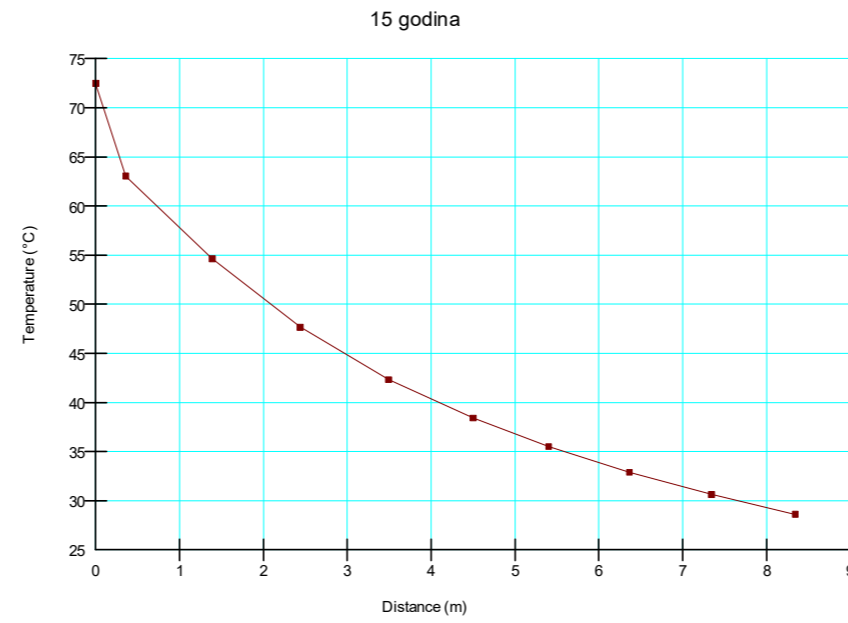
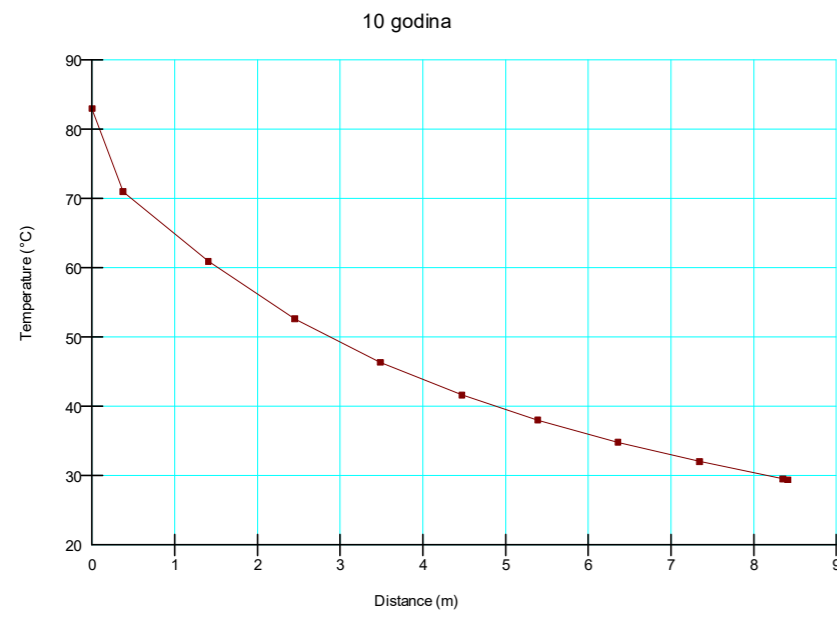
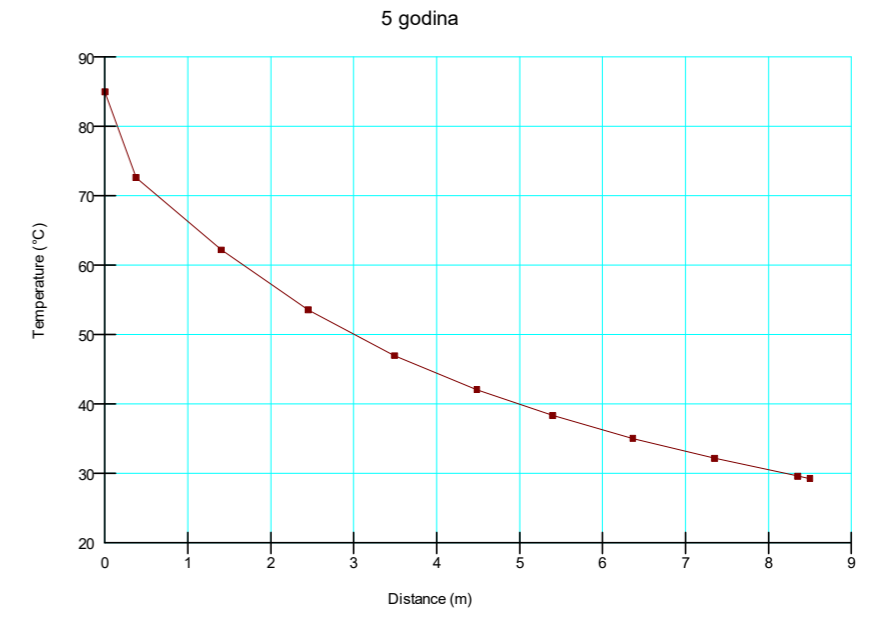
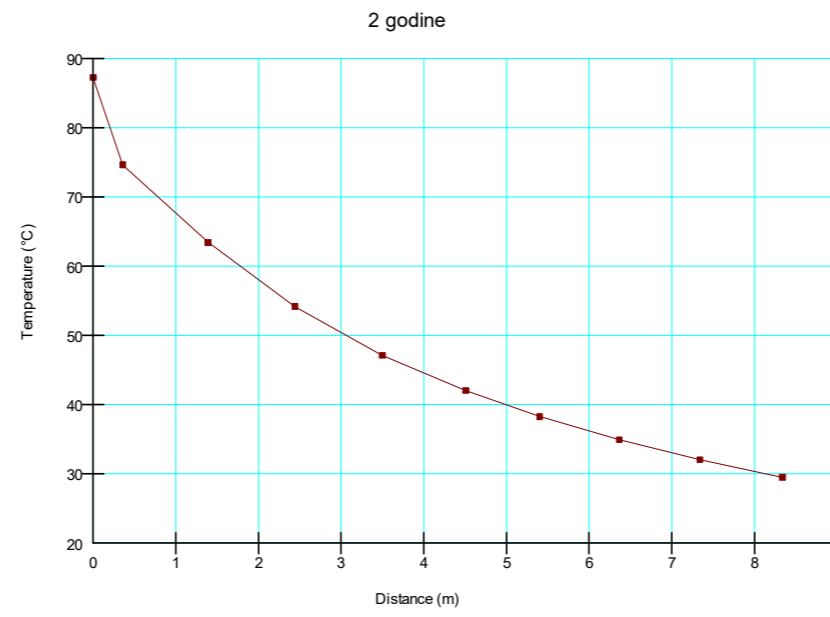
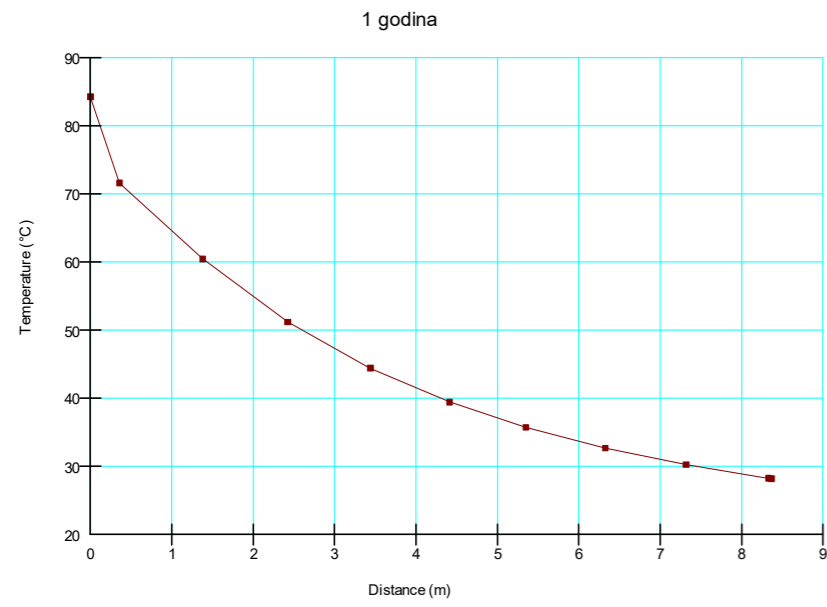
Na slici 4-28 prikazan je finalni rezultat analize: distribucije temperatura kroz poprečni presjek kroz bušotinu. S obzirom da je analiza rađena po fazama (inkrementi: 1 godina, 2 godine, 5 godina, 15 godina i 25 godina od odlaganja/ugradnje), a da su vizualizacije distribucije temperatura slične, prikazana je faza „25 godina“ kao primjer, a **promjene temperatura po profilu (slika 4-29), kroz vrijeme, dane su grafikonima na slici 4-30.**



Slika 4-28 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje.



Slika 4-29 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 4-30.



Slika 4-30 Promjene temperatura po profilu (slika 5-24), kroz vrijeme.

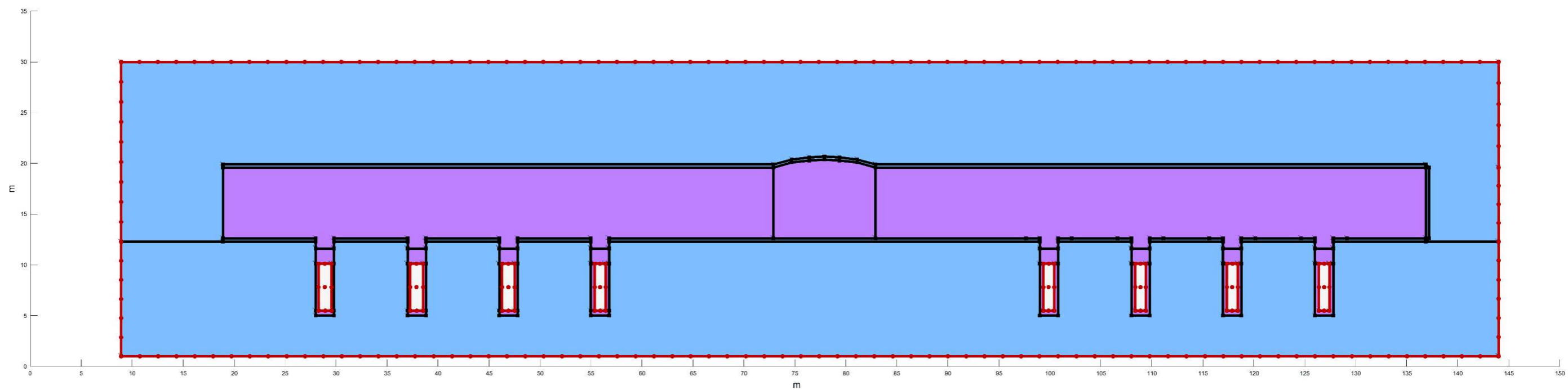
Primjećuje se kako maksimumi temperatura (na stijenci spremnika) slijede trend pada koji odgovara podacima na slici 4-25 (odnos promjene temperature na površini pojedinog spremnika i stijenci bušotine kroz vrijeme), što je bio jedan od početnih uvjeta analize.

Premda je za očekivati kako će temperature na površini spremnika padati s vremenom, poradi smanjenja topline koja se oslobađa iz gorivnih elemenata, jedan od bitnih parametara za odabir brzine i početka odlaganja, svakako je starost gorivnih elemenata, odnosno vrijeme koje su proveli hladeći se u bazenu elektrane ili u suhom skladištu. Tako će termički utjecaj na bentonitnu ispunu i stijenu biti time manji što je manija toplina koja se oslobađa iz gorivnih elemenata. Svakako, poradi toga nužno je čekati dovoljno dugo s odlaganjem kako bi se gorivni elementi ohladili do te mjere da temperatura na stijenci spremnika za odlaganje bude ispod 90 °C. Kritični element po pitanju utjecaja topline svakako je bentonit, čija svojstva će se mijenjati ukoliko bude izložen temperaturama od 100 °C i više, dok stijena kao takva nema sličnu reakciju na povišenu temperaturu, osobito na lokacijama s višim temperaturnim gradijentom. Potencijalne matične stijene u Sloveniji i Hrvatskoj imaju očekivanu temperaturu stijenske mase od 25 °C na dubini od oko 500 m, dok, primjera radi, temperature starijih stijena u Švedskoj i Finskoj imaju desetak stupnjeva niže temperature na istim dubinama, što znači da će sustav doživjeti bitnije promjene u odnosu na početno stanje (intaktna stijenska masa) u slučaju odlaganja VRAO i/ili ING.

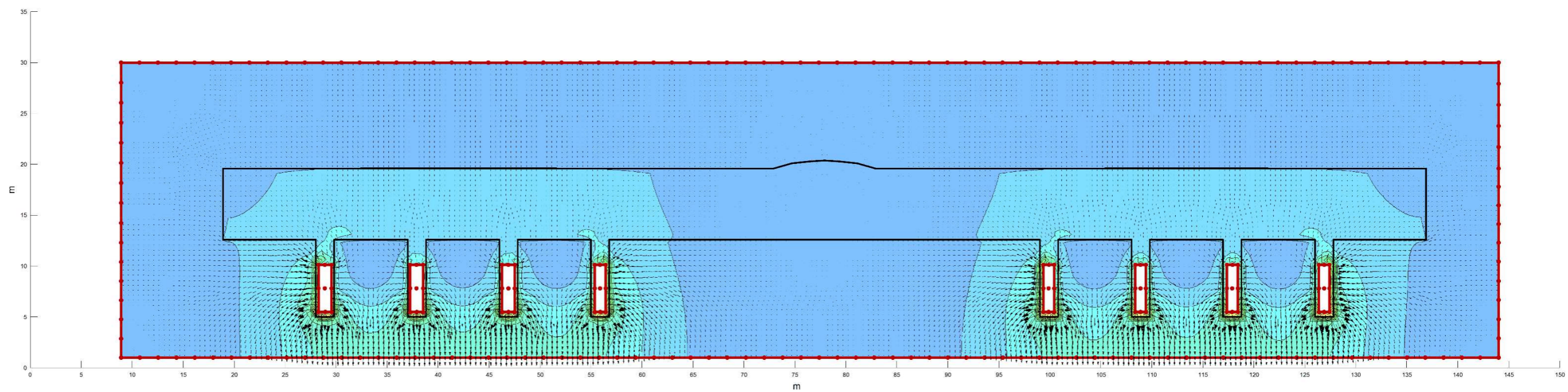
Za model presjeka kroz odlagališne hodnike (lijevo i desno u odnosu na centralni transportni hodnik) napravljena je posebna analiza kako bi se prikazao utjecaj više susjednih spremnika koji u isto vrijeme griju stijenu. Model je pojednostavljen kako bi lakše prošao analize i kako bi bio pregledniji.

Na slici 4-31 prikazan je osnovni model sa zadanim rubnim uvjetima, na slici 4-32 model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu, a na slici 4-33 model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu. Slika 4-34 predstavlja rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje.

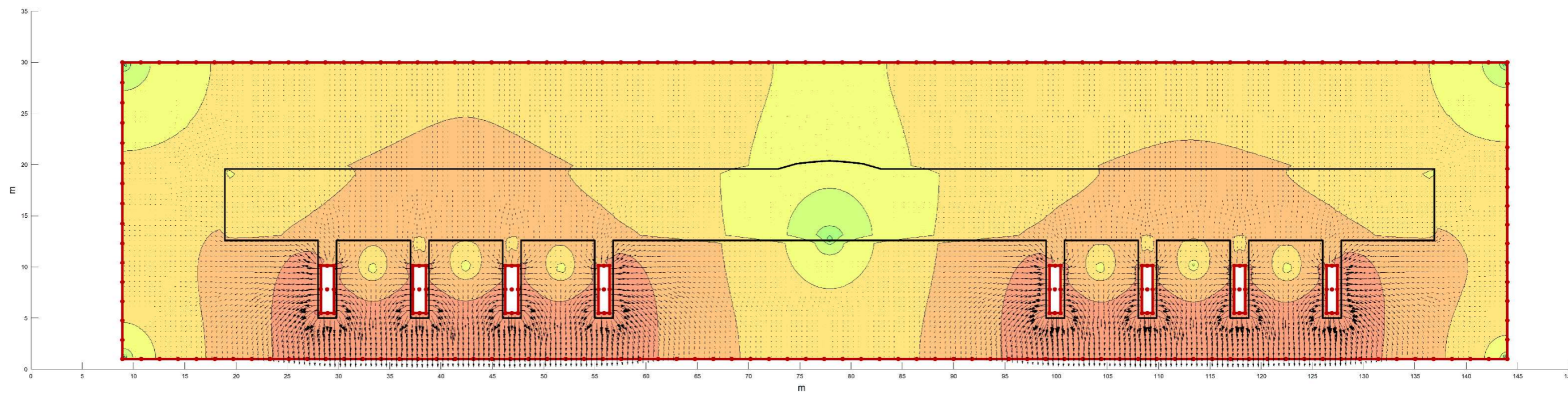
Važno je zaključiti kako se maksimalne temperature NE DIŽU do maksimalnih dopuštenim dizajnom koncepta (90-100 °C) što znači da geometrija rješenja i odabir materijala odgovaraju traženim zahtjevima koncepta (u skladu s: Ikonen, 2003).



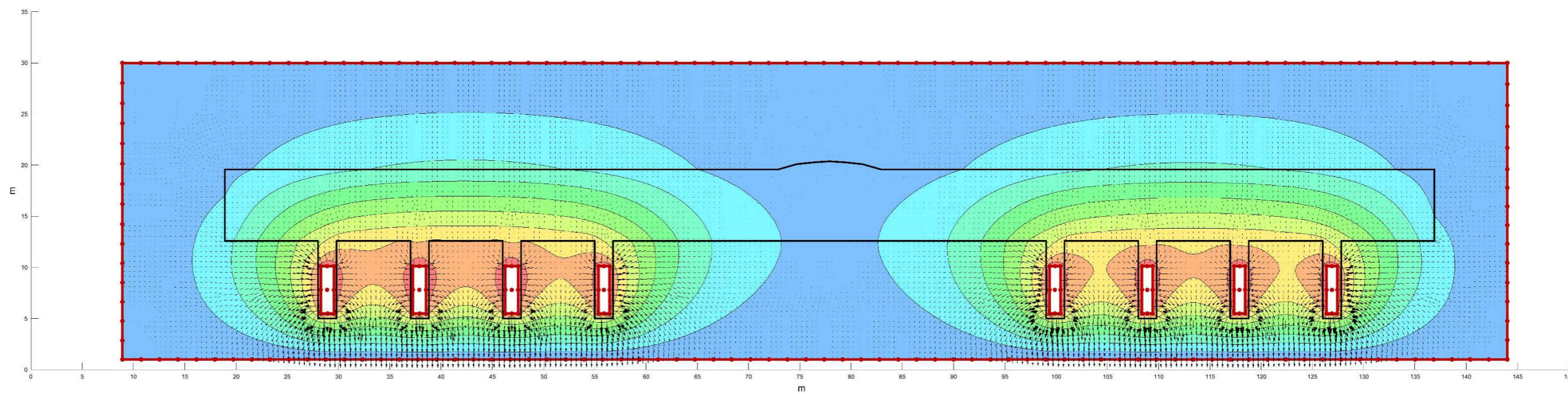
Slika 4-31 Postavljen osnovni model za simulaciju širenja topline kroz odlagališne tunele, lijevo i desno u odnosu na transportni tunel.



Slika 4-32 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu.

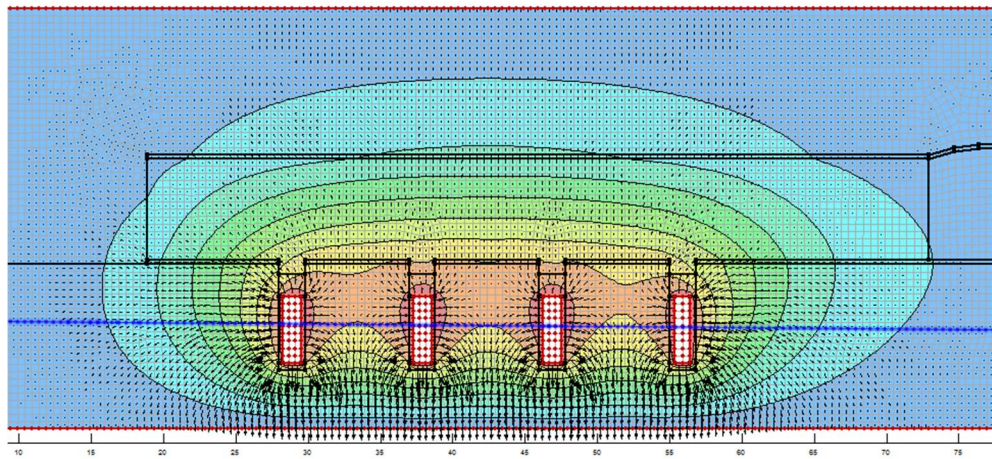


Slika 4-33 Model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu.

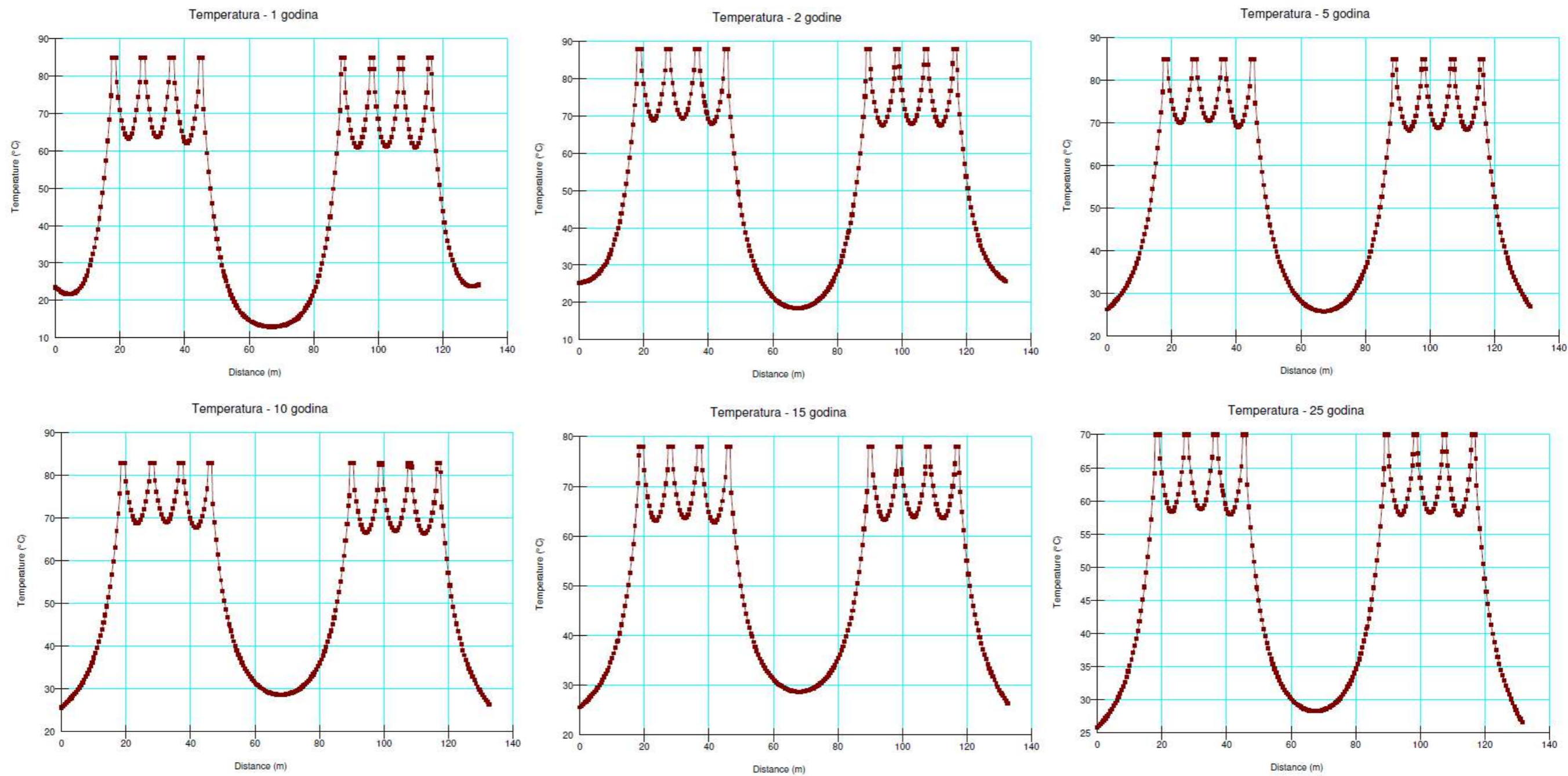


Slika 4-34 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje.

Zanimljiv za analizu je presjek kroz model duž pravca koji prolazi sredinom spremnika. S obzirom da se radi o mjestima s očekivanim maksimumima temperatura i mjestima s najvećim utjecajem na stijenu, odnosno da je u toj zoni vjerojatno najveće međudjelovanje susjednih spremnika na stijenu (Ikonen, 2003), taj profil je odabran za detaljniju analizu, odnosno prikaz temperatura kroz vrijeme. Odabrani profil prikazan je na slici 4-35, a grafikoni s promjenama temperatura po profilu na slici 4-36.



Slika 4-35 Profil (horizontalni kroz sredine spremnika naznačen modrom bojom s karakterističnim točkama) po kojem su prikazane promjene temperatura kroz vrijeme, dane grafovima na slici 4-36.



Slika 4-36 Promjene temperatura po profilu (slika 5-35), kroz vrijeme.

4.3. Modeliranje koncepta Koncept-4 u programu GeoStudio

Numeričko modeliranje u potprogramima programa Geostudio za Koncept-4 provedeno je kao i za koncept KBS-3V u 3 faze. Prva faza uključuje postavljanje geometrije modela, druga faza je provođenje samog proračuna te u trećoj fazi slijedi prikaz podataka. Materijali i osnovne pretpostavke su odabrani kao kombinacija generičkog rješenja za slovensko/hrvatski generički projekt (ARAO, 2019) i studija provedenih za Koncept-3 i Koncept-4 (Baldwin i dr., 2008; NAGRA, 2009 i 2002). Tako da su primijenjeni čimbenici i parametri navedeni u poglavlju „4.2.1. Odabrani materijali i osnovne pretpostavke“.

4.3.1. Proračun u programu „SIGMA/W“

Parametri odabrani za izradu modela su dani u tablici 4-4, a odabrani su prema literaturi vezanoj uz odabrani koncept i predloženu generičku lokaciju (ARAO, 2019; Korkiala-Tanttu, 2009; NAGRA, 2009 i 2002; Müller i dr., 2018; Rutqvist i dr., 2014).

Tablica 4-4 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	40 000 000	10 000	27	0,23
Granodiorit poremećen			2 000 000	6 000	26	0,28
Bentonit (peleti)			20 000	10	9,81	0,40
Bentonit (posteljica)			10 000 000	20	20,59	0,30
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 4-5, a odabrani su u skladu s literaturom vezanom uz odabrani koncept i predloženu generičku lokaciju (ARAO, 2019; Korkiala-Tanttu, 2009; NAGRA, 2009 i 2002).

Tablica 4-5 Granični uvjeti za proračun stanja naprezanja i pomaka u programu SIGMA/W.

Granični uvjet	Kategorija	Tip	Iznos
Protok	Hidraulički	Jedinični tok	$1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
<i>Fixed x</i>	Pomaci	x - pomak	0 m
<i>Fixed x/y</i>	Pomaci	x – pomak y - pomak	0 m 0 m
Prirodno stanje naprezanja	Naprezanje	x naprezanje y naprezanje	0 kPa 1 3505 kPa

Proračun je postavljen za tri modela:

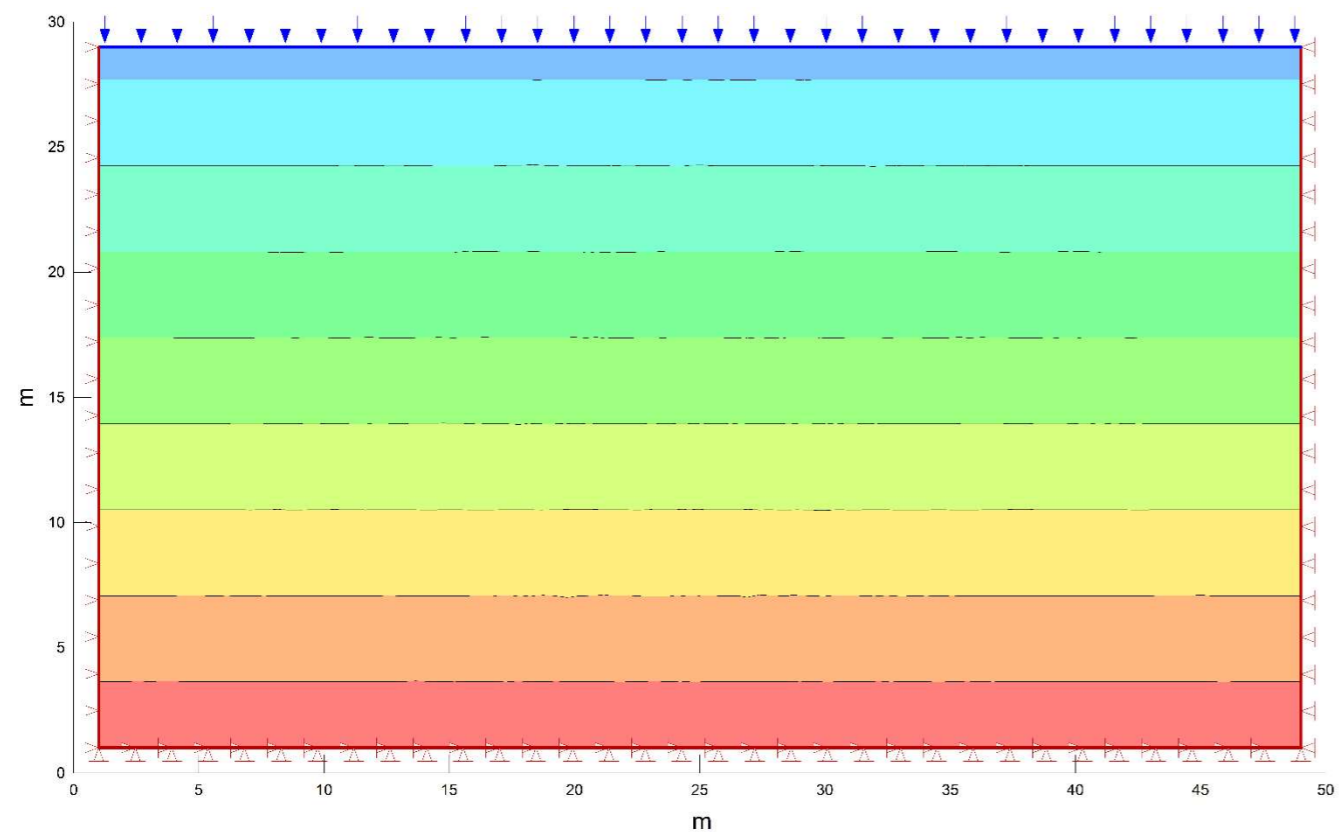
1. poprečni presjek kroz jedan odlagališni tunel;
2. poprečni presjek kroz tri susjedna odlagališna tunela;
3. uzdužni presjek kroz tunel za odlaganje.

Model poprečnog presjeka kroz tri susjedna odlagališna tunela odabran je po principu dobrog pregleda međudjelovanja susjednih tunela. Za izvedbu procjene za konkretno buduće odlagalište preporuča se izrada modela za karakteristične presjeke odlagališta, bez obzira na broj elemenata. S obzirom da poradi nedostatne (neodgovarajuće) računalne opreme to nije bilo moguće za ovaj rad, model je morao biti ograničen.

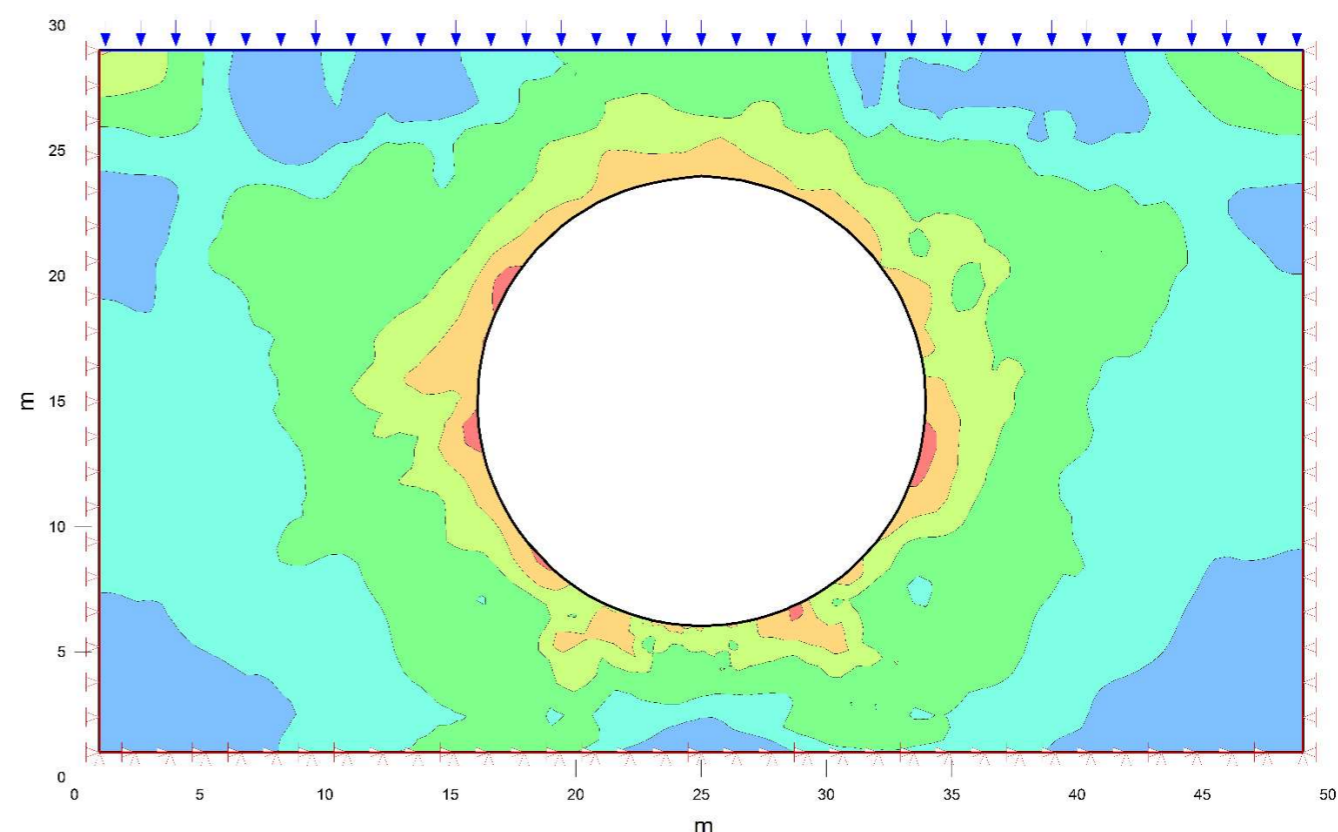
Treći pretpostavljeni model (uzdužni presjek duž odlagališnog tunela) nije izrađen, jer računalna oprema nije dopuštala model te veličine, čak i u skraćenom i pojednostavljenom obliku.

Definirane su slijedeće „regije“ materijala: intaktna stijena, bakreni spremnik, posteljica od prešanog bentonita i ispuna s peletima bentonita. Zona poremećene stijenske mase oko tunela je debljine oko 3 cm (poradi primjene TBM metode) pa je izuzeta iz modela. S obzirom da su pretpostavljeni uvjeti čvrste stijene s minimalnim brojem pukotina, izostavljena je podgrada, a s obzirom da tračnice ne predstavljaju značajan čimbenik po pitanju naprezanja, također su izuzete iz modela.

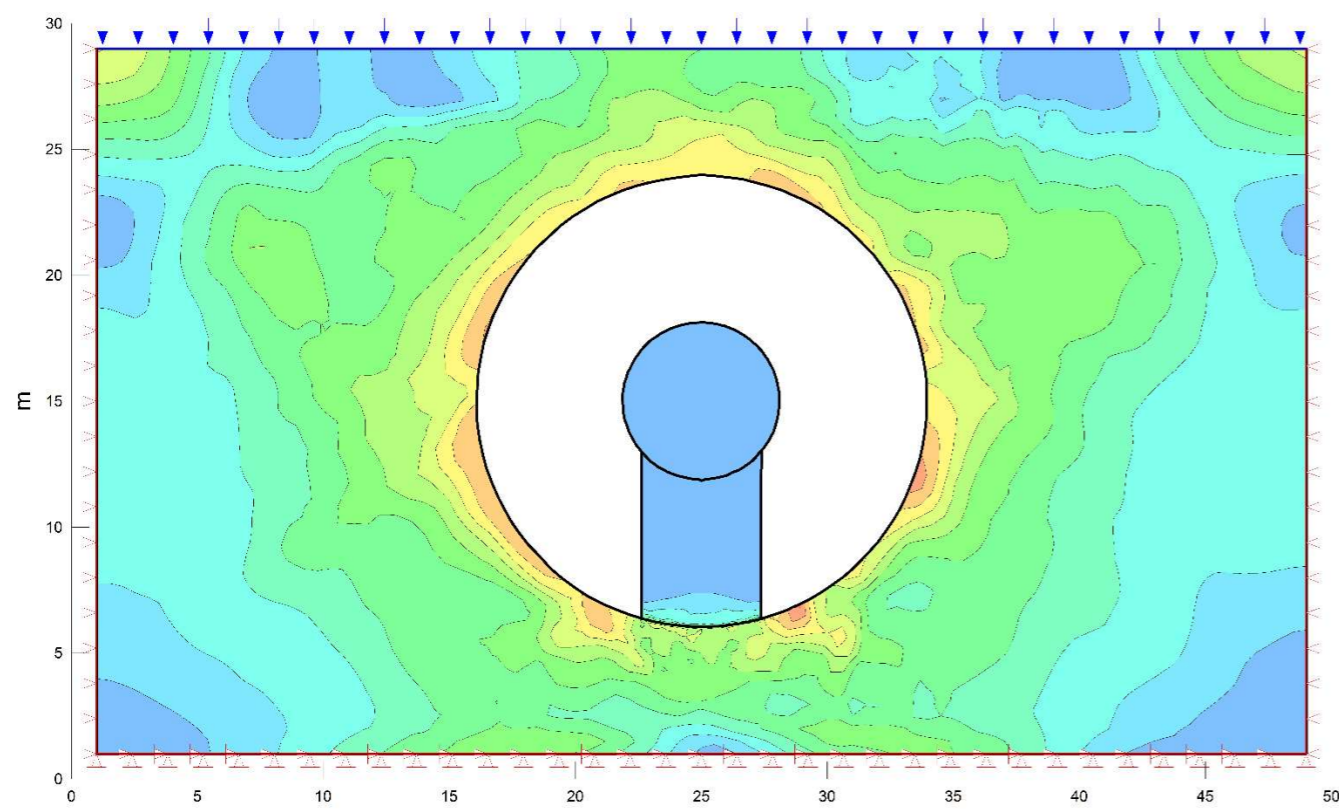
Model naprezanja u stijeni za slučaj pojedinog odlagališnog tunela, prije iskopa prikazan je na slici 4-36a, a po fazama: iskop, ugradnja spremnika, zapunjen odlagališni tunel, na slikama 4-36b-d. Rezultati su u okviru očekivanih (raspodjela naprezanja oko kružnog otvora).



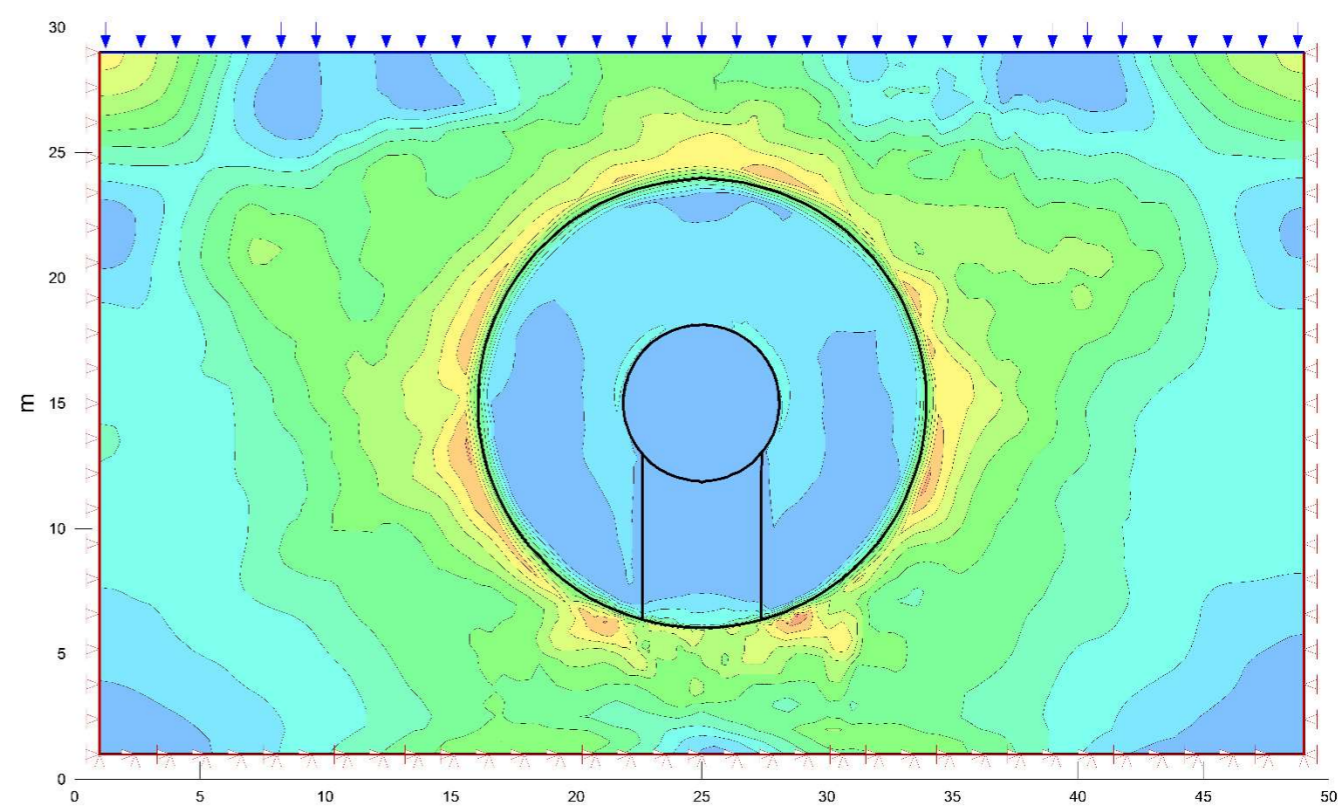
(a)



(b)



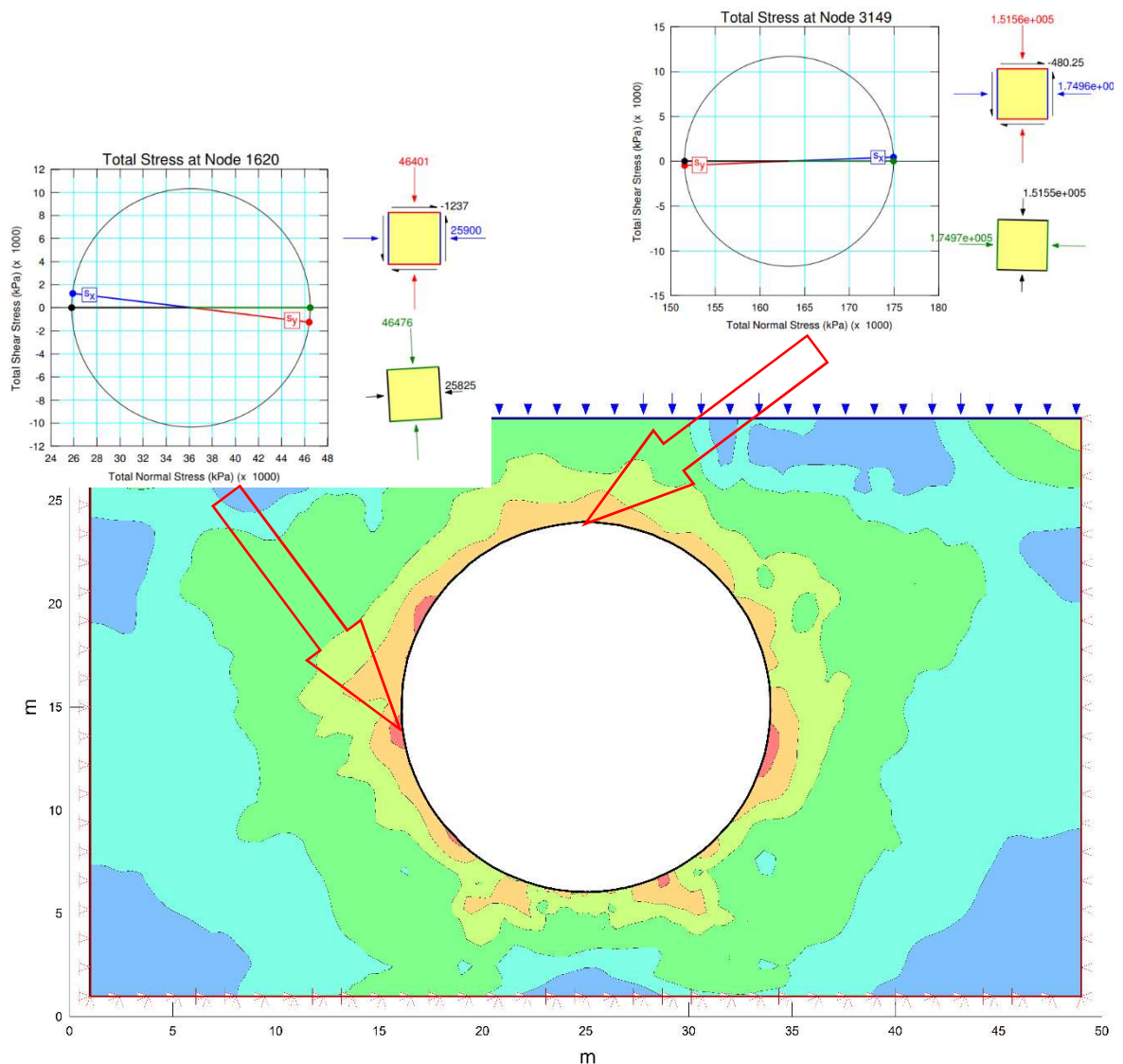
(c)



(d)

Slika 4-36 Model naprezanja u stijeni za Koncept-4: (a) prije iskopa, (b) nakon iskopa tunela, (c) nakon ugradnje spremnika na posteljicu, (d) nakon ugradnje bentonitne ispune.

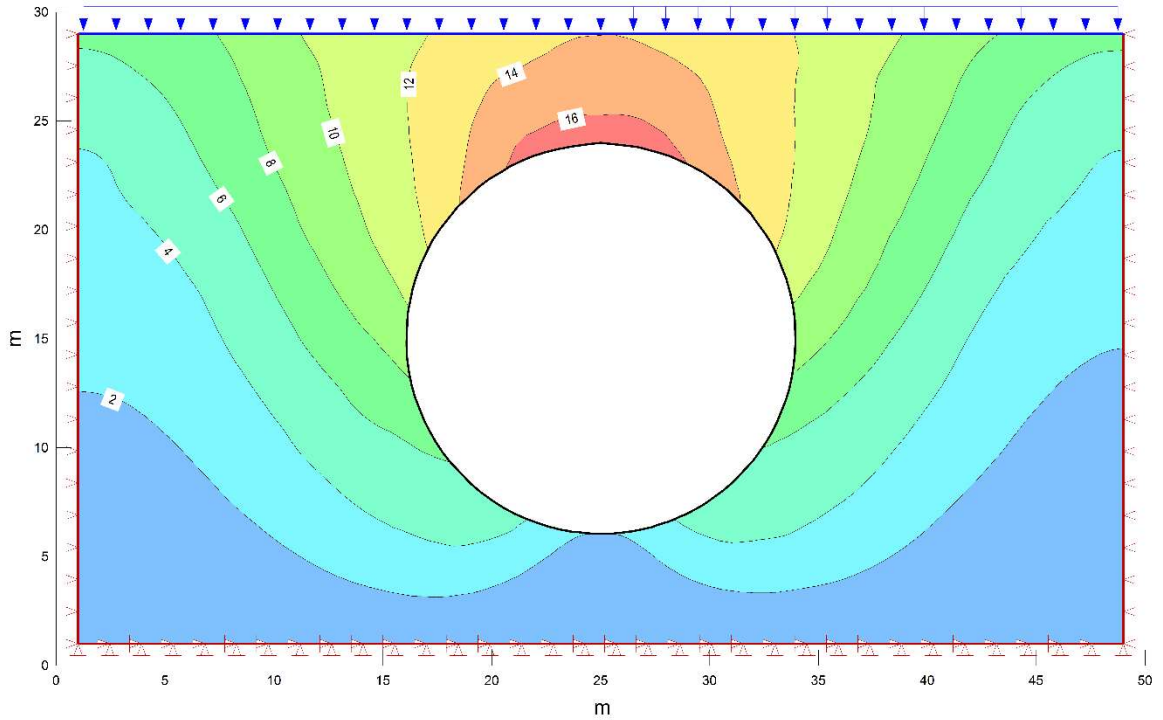
Mohrove kružnice dane su za karakterističnu točku (tjeme) i onu s maksimalnim naprezanjima prema rezultatima analize, označene strelicama, a prikazane su na slici 4-37.



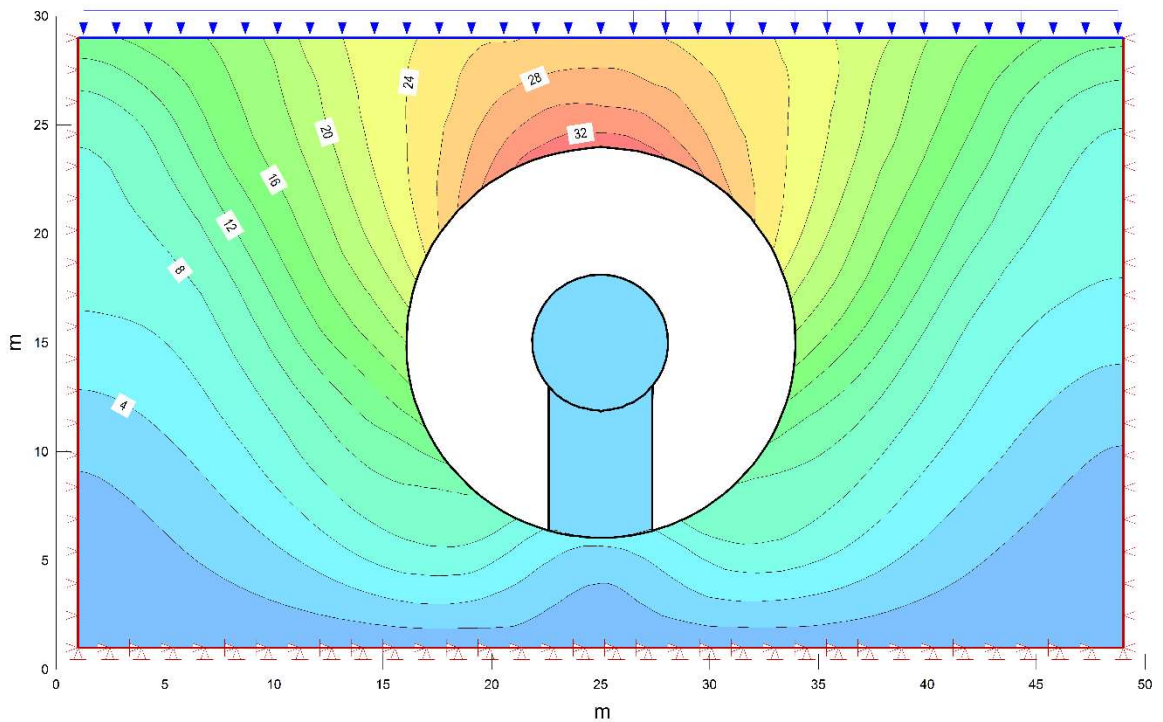
Slika 4-36 Mohrove kružnice za točku s maksimalnim naprezanjima i tjeme tunela (kalota) (naznačene strelicama).

Modeli pomaka, prema fazama, dani su na slikama: 4-37 – faza iskopa, 4-38 – faza ugradnje spremnika i 4-39 – faza zapunjavanja tunela. Pomaci su veći od očekivanih, ali još uvijek u granicama prihvatljivih. Detalj slike 4-37 dan je na slici 4-40 na kojoj je za pojedine iznose pomaka (u bojama na modelu) priložen i odgovarajući grafikon iznosa. Pomaci u bentonitu su prihvatljivo minimalni.

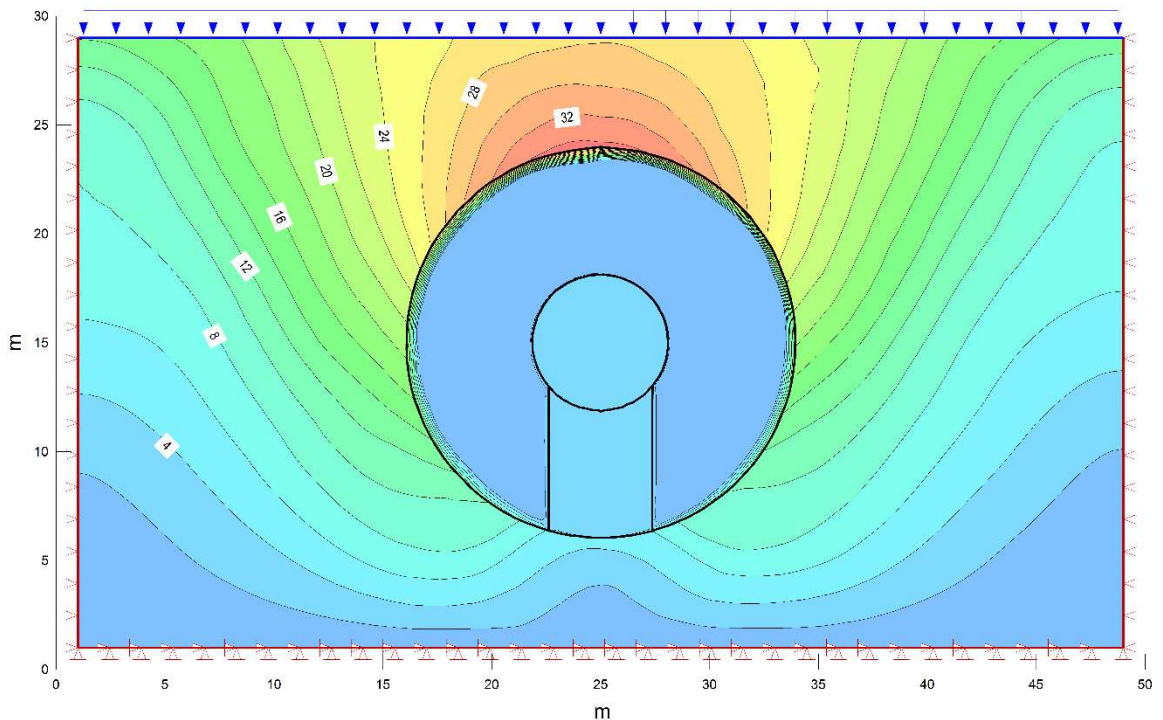
Treba primijetiti da će nakon hidratacije bentonita poradi tlaka bujanja (*swelling pressure*) tlak bentonita na stijenu poslužiti kao reakcija i dati dodatnu potporu stijeni – pozitivni tlak. Također, pomaci bi bili manji da se ugradila podgrada.



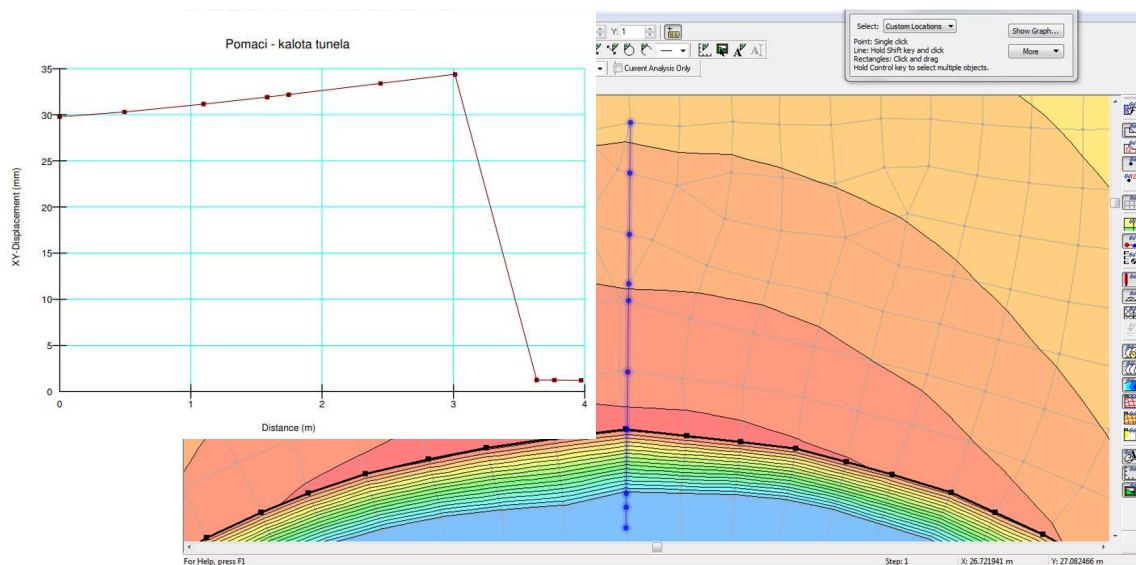
Slika 4-37 Pomaci u fazi iskopa tunela (iznosi u mm).



Slika 4-38 Pomaci u fazi ugradnje spremnika (iznosi u mm).



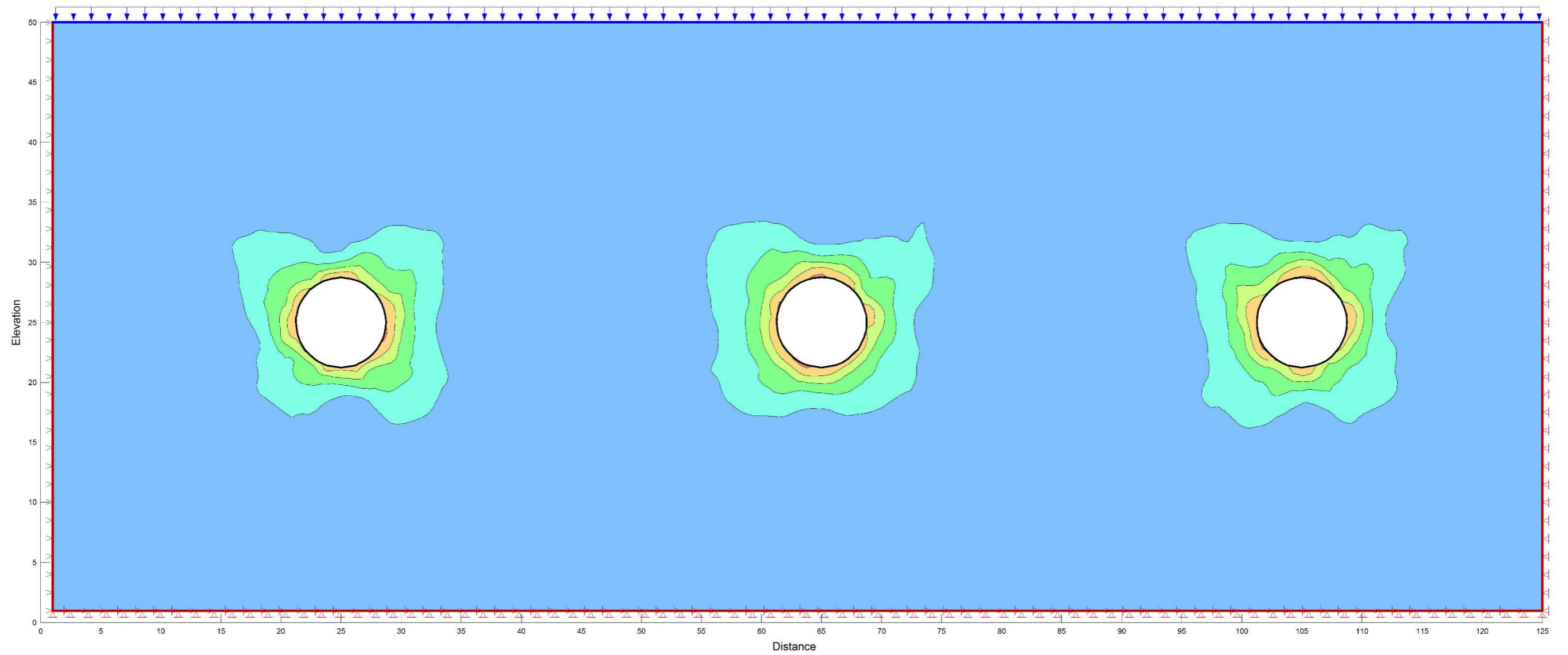
Slika 4-39 Pomaci u fazi zapunjavanja tunela (iznosi u mm).



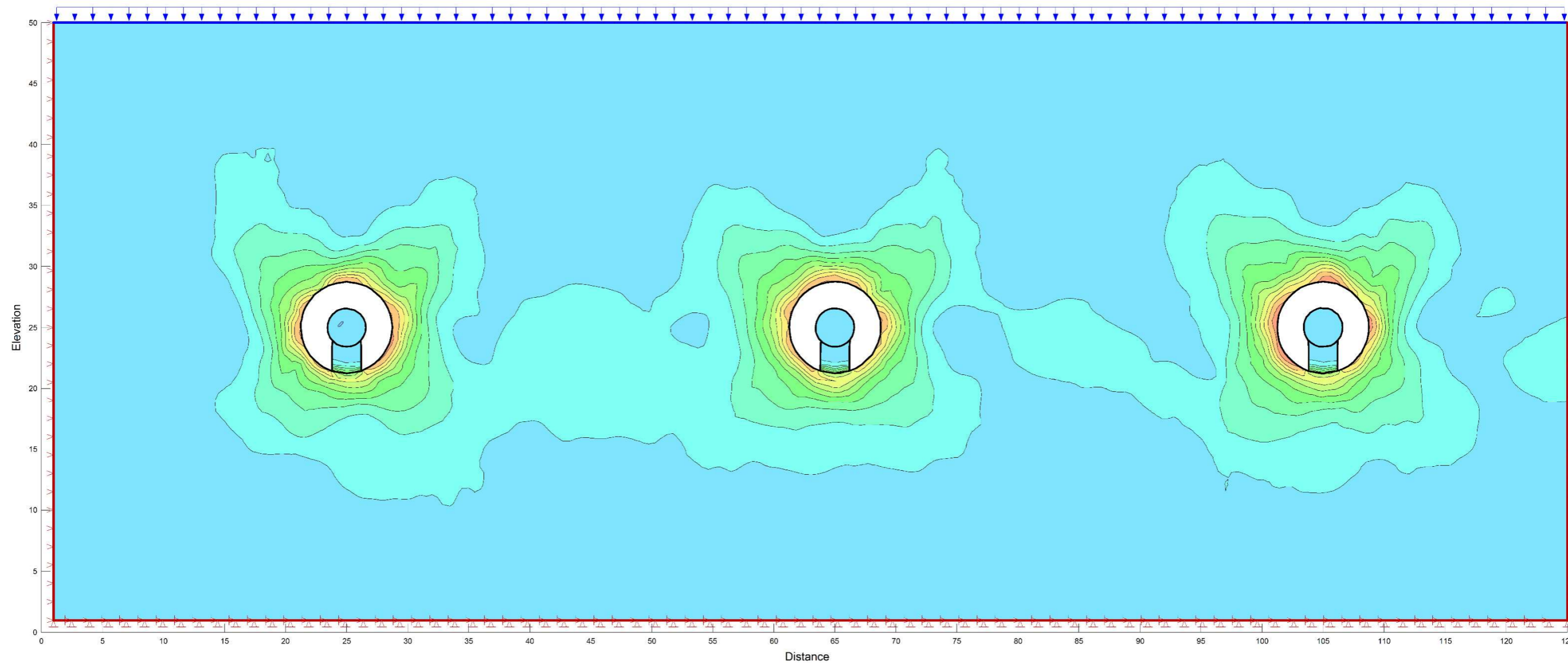
Slika 4-40 Detalj kalote zapunjenog tunela s grafikonom iznosa pomaka po visini.

Razlog poradi kojeg su pomaci prikazani za odabrane točke koje se ne nalaze na granicama izo-linija pomaka je taj što program daje jedino mogućnost prikaza iznosa za točke mreže konačnih elemenata, a ne za pojedine točke na izo-linijama.

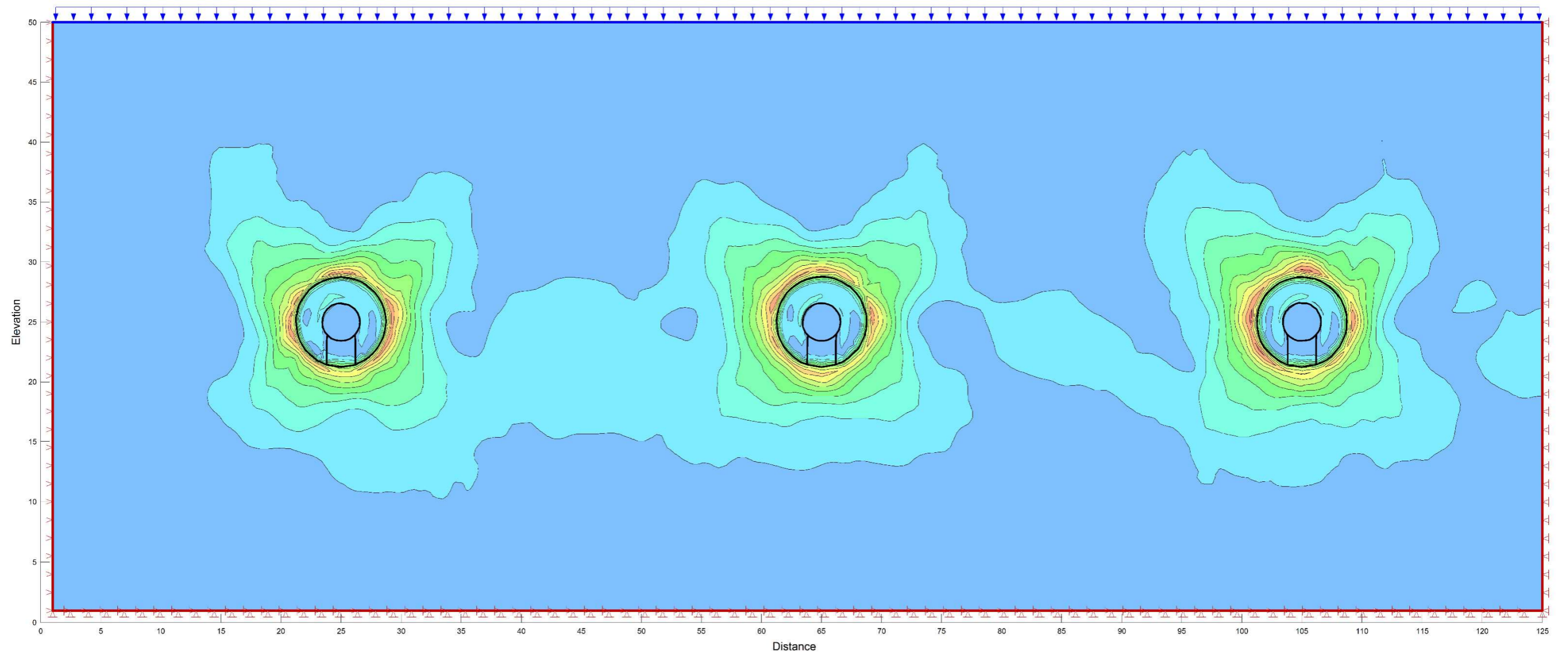
Naprezanja za model presjeka tri susjedna tunela prikazana su slikama: 4-41 faza iskopa, 4-42 faza ugradnje spremnika i 4-43 faza zapunjenih odlagališnih tunela, a pomaci za iste faze na slikama 4-44 – 4-46.



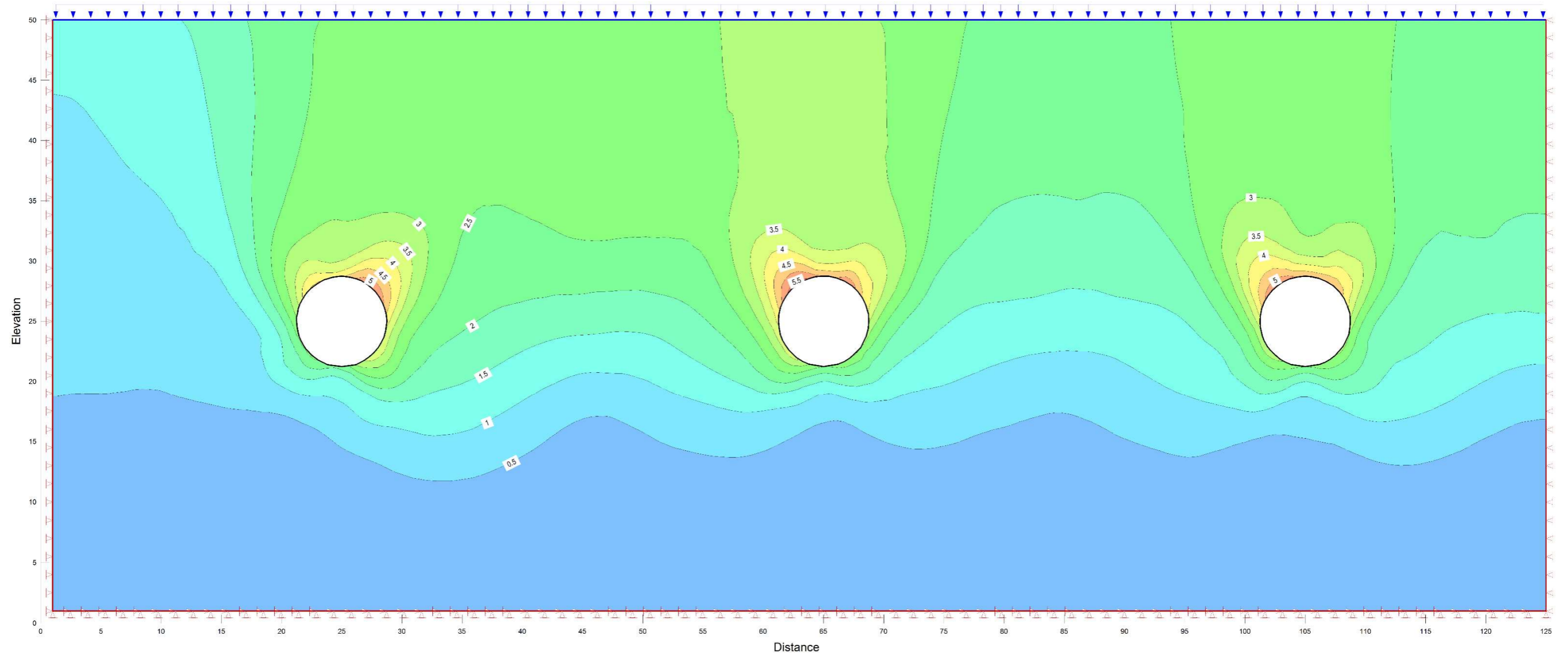
Slika 4-41 Naprezanja za model tri susjedna tunela u fazi iskopa.



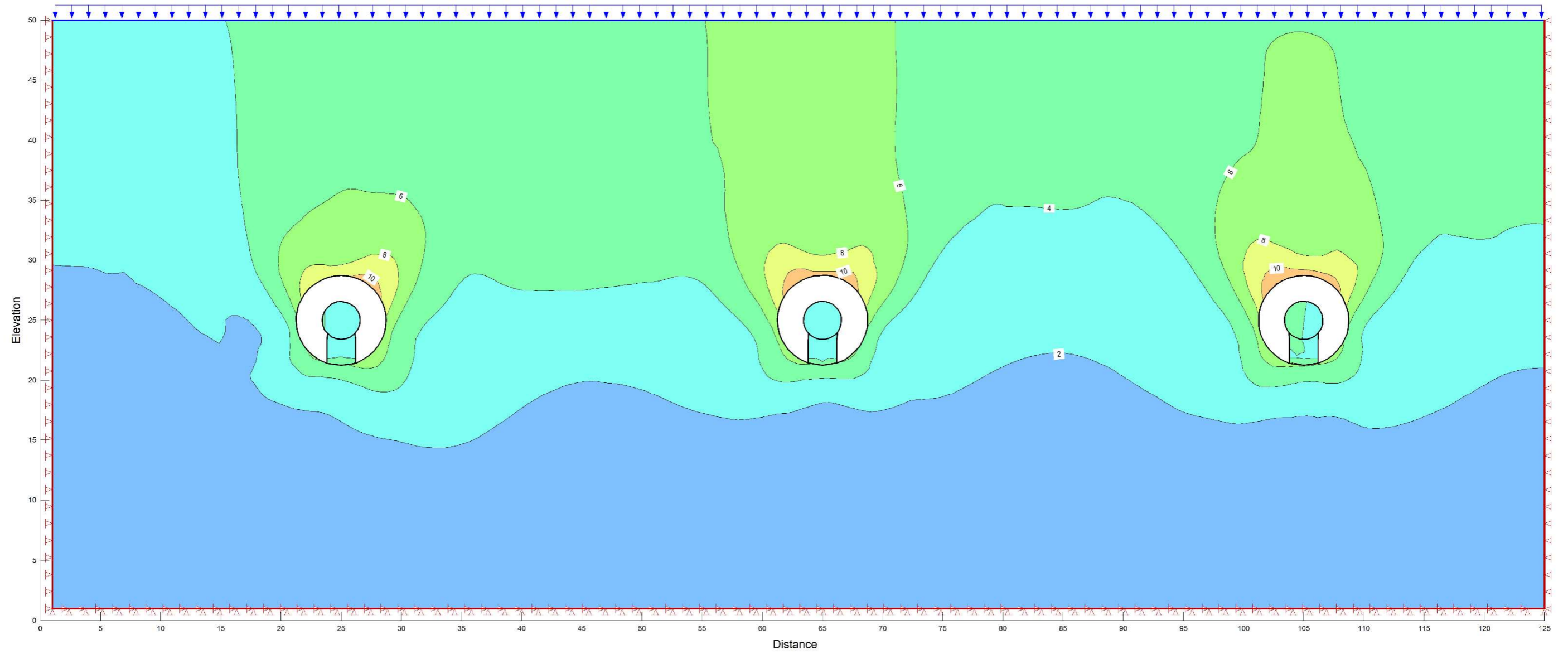
Slika 4-42 Naprezanja za model tri susjedna tunela u fazi ugradnje spremnika.



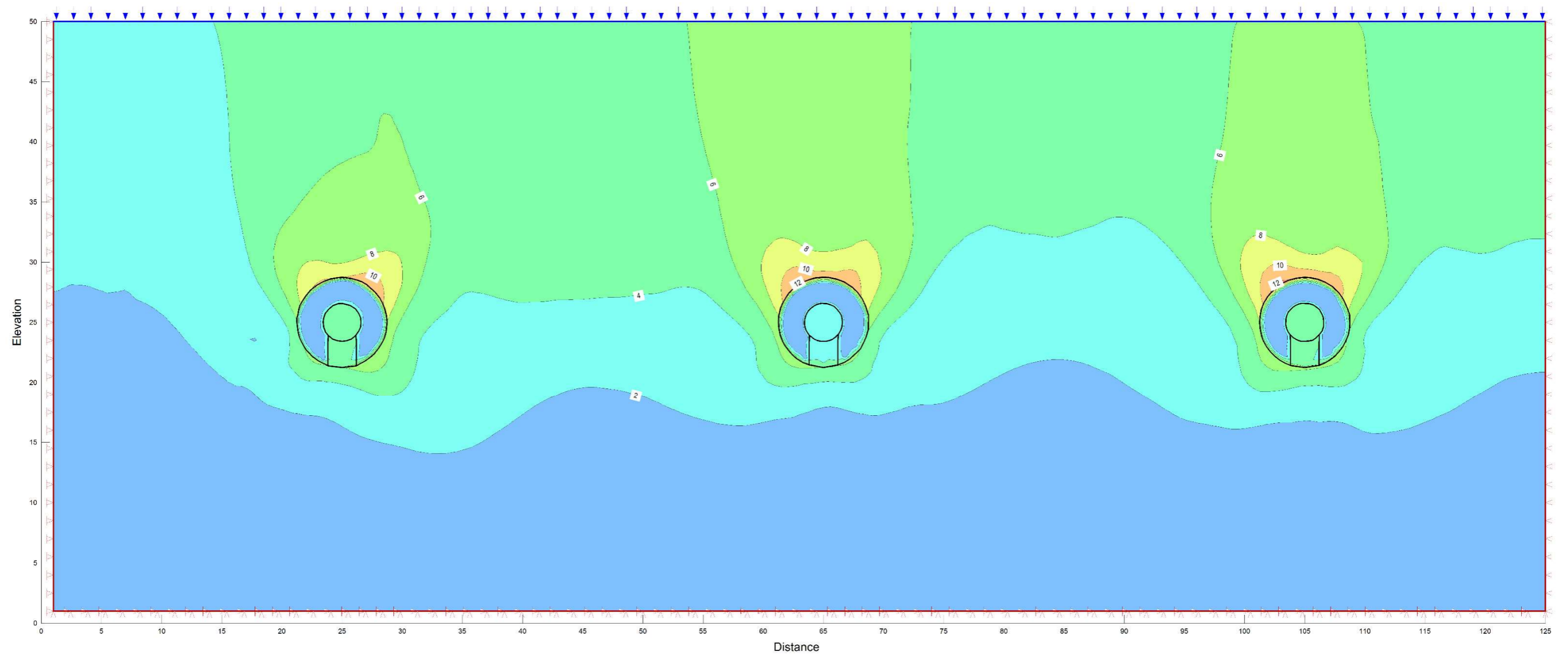
Slika 4-43 Naprezanja za model tri susjedna tunela u fazi zapunjavanja tunela.



Slika 4-44 Pomaci za model tri susjedna tunela u fazi iskopa (iznosi u mm).



Slika 4-45 Pomaci za model tri susjedna tunela u fazi ugradnje spremnika (iznosi u mm).



Slika 4-46 Pomaci za model tri susjedna tunela u fazi zapunjavanja tunela (iznosi u mm).

Pomaci na slikama 4-44 – 4-46 su manji u iznosima od onih na modelu za pojedini tunel. Razlog za to je u rezoluciji programa i mreži konačnih elemenata koja nije iste gustoće. Svakako bi trebalo računati na veće pomake i tako biti na strani sigurnosti, a u slučaju izgradnje odlagališta postavlja se pitanje hoće li stijena biti zaista toliko čvrsta i monolitna, kako se u generičkom projektu navodi. Vjerojatno do sigurno bi se u fazi iskopa tunela pokazalo kako za barem određene dionice tunela treba razmisliti ili o podgrađivanju sidrima, što je malo poželjan čimbenik u izgradnji odlagališta, budući da predstavlja mogući put povezivanja pukotina i može olakšati procjeđivanje. Ugradnja čelične mreže i sidara svakako predstavlja još manje poželjan utjecaj na odlagalište, a u slučaju korištenja špricanog betona kao dodatnog dijela podgradnog sustava, bez obzira koristi li se i beton niskog pH, dokazivanje sigurnosti odlagališta (*safety case*) u periodu projektiranog trajanja odlagališta bit će dodatno otežano.

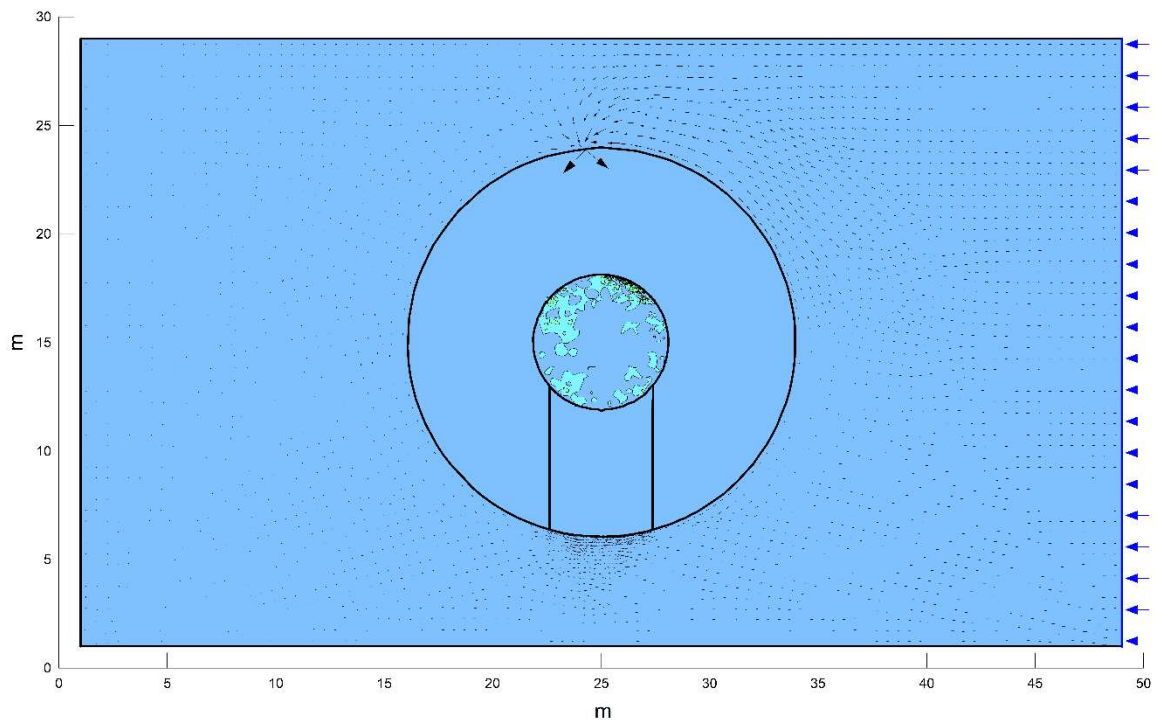
4.3.2. Proračun u programu „SEEP/W“

Podaci korišteni za modeliranje su isti kao i u modelu za koncept KBS-3V: propusnost slabo raspucale magmatske stijene (granit, granodiorit) u Sloveniji i Hrvatskoj pretpostavlja se u rasponu 1×10^{-8} - 1×10^{-12} m/s, dok je oštećena zona zanemariva s obzirom na pretpostavljenu debljinu od 3 cm (ARAO, 2019). Oštećena zona ne bi bila zanemarena niti bi model bio pojednostavljen da je računalna oprema dopuštala izradu modela takve razine (finoće). Za potrebe izrade modela u ovom radu odabrane su vrijednosti: 1×10^{-8} m/s za intaktnu stijensku masu.

Parametri odabrani za ispunu bentonitnim peletima su: koeficijent propusnosti $k = 1 \times 10^{-11}$ m/s i postotak vlage u bentonitu u iznosu $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (40 %). Razlog za ovako visok postotak vlažnosti je u procesu saturacije bentonitnih peleta. Podaci su odabrani u skladu s istraživanjima Hoffmann i dr. 2007.

Rezultati za sva tri modela su uniformno slični – pokazuju minimum procjeđivanja. Iz tog razloga **grafički prikazi rezultata nisu priloženi, s obzirom da ne daju nikakve osobite rezultate**. Razlog za to je odabir parametara s vrlo niskim koeficijentima propusnosti. U realnosti, brži protok se može očekivati duž pukotinskih sustava, oštećene zone i sličnih oslabljenja u stijeni.

Da bi se prikazao smjer toka, koji je minimalan, na slici 4-47 dan je model za presjek kroz odlagališni tunel s vjerojatnim smjerom toka oko bentonitne ispune kroz propusniju stijenu.



Slika 4-47 Smjer toka nakon ispunjavanja tunela bentonitom s vjerojatnim rješenjem toka kroz propusniju stijenu oko bentonitom ispunjenog tunela.

4.3.3. Proračun u programu „TEMP/W“

Većina postavki je preuzeta iz modela za koncept KBS-3V (poglavlje: 4.2.4.). Tako je procijenjena je temperatura stijene (in situ) na 25 °C (ARAO, 2019), toplinska vodljivost stijene 3 W/mK (prema: ARAO, 2019; Ikonen, 2003; Kukkonen, 2000), maseni toplinski kapacitet stijene 784 J/kgK (prema: ARAO, 2019; Ikonen, 2003; Kukkonen, 2000), gustoća stijene 2 700 kg/m³ pa je prema tome volumetrijski toplinski kapacitet stijene pretpostavljen u iznosu od 2,15 MJ/m³K, a stupanj saturacije stijene 0,5% (0,005 m³/m³) (ARAO, 2019).

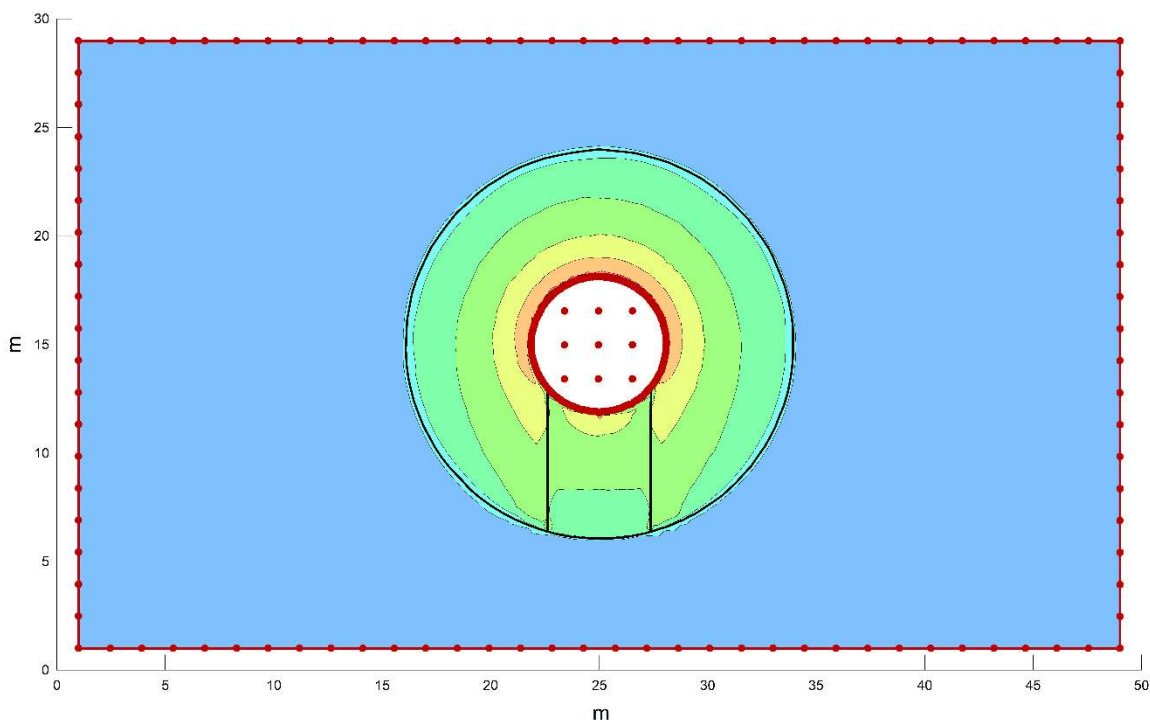
Za posteljicu od prešanog bentonita odabrani su parametri: toplinska vodljivost 1,0 W/mK (prema: Ikonen, 2003 i Kukkonen, 2000), volumetrijski toplinski kapacitet 3,40x10⁶ J/m³K (prema: Knutsson, 1983), postotak vlage 0,16 m³/m³ (16%).

Za bentonitne pelete odabrani parametri su preuzeti iz Wiczorek i dr., 2011: gustoća pri ugradnji 1 667 kg/m³, toplinska vodljivost 0,338 W/mK, volumetrijski toplinski kapacitet 0,92x10⁶ J/m³K i postotak vlage 0,059 m³/m³ (5,9 %).

Prema odabranim parametrima i s graničnim uvjetom: spremnik je izvor topline, preuzeti su modeli s mrežom konačnih elemenata, po fazama, pripremljeni za analizu u programu

SIGMA/W i definirane su identične „regije“ materijala: intaktna stijena, bakreni spremnik, posteljica od prešanog bentonita i ispuna od bentonitnih peleta.

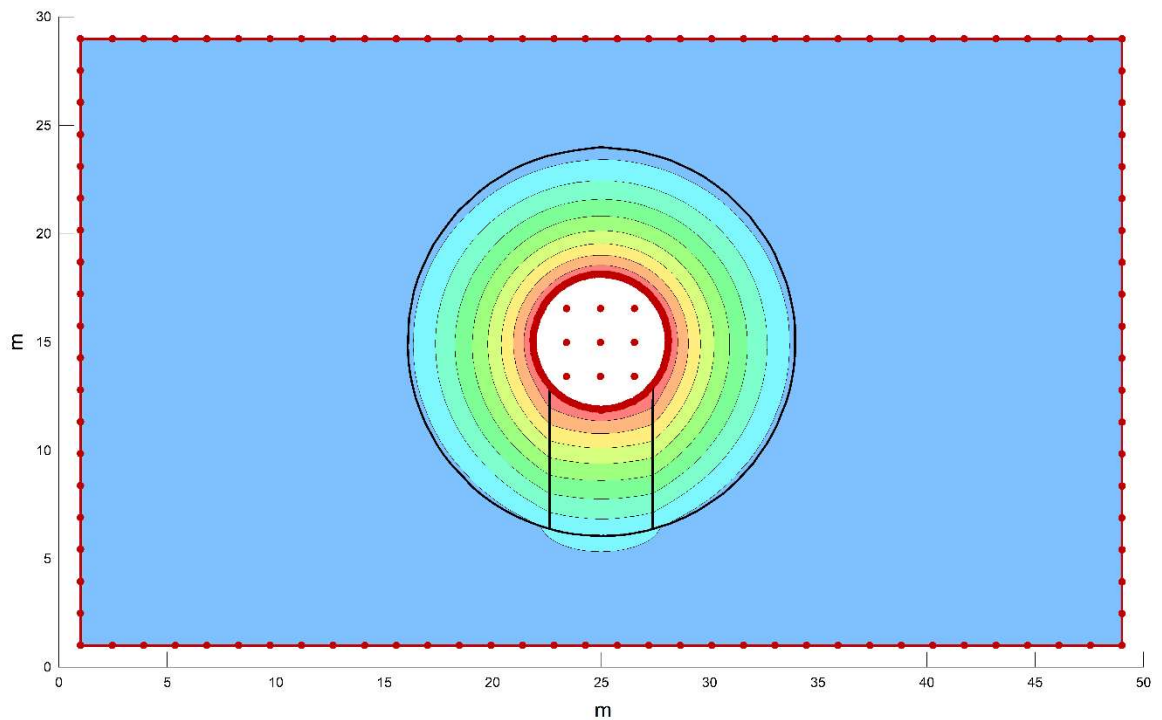
Model širenja topline za poprečni presjek kroz odlagališni tunel i spremnik, gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu, prikazan je na slici 4-48.



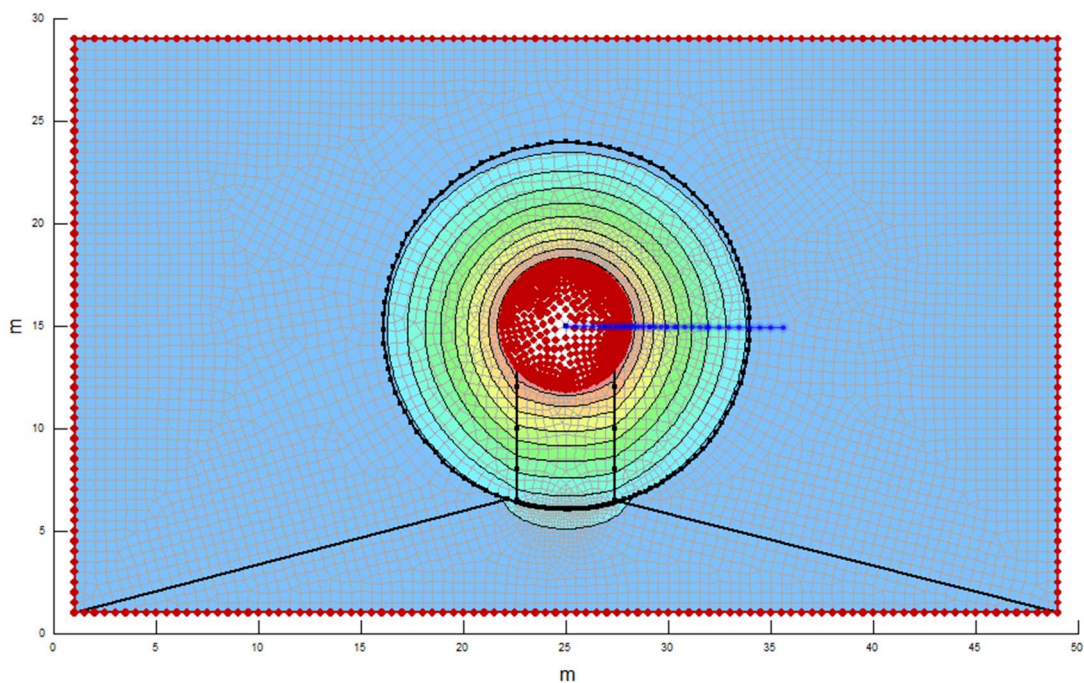
Slika 4-48 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz bentonit i stijenu.

Iz slike 4-48 jasno je vidljivo kako većina promjena u smislu prijenosa topline ostaje ograničena na bentonitnu ispunu, što je pozitivno u smislu kako stijena neće prolaziti osobiti period zagrijavanja i bitne promjene u temperaturi (u skladu s: Ikonen, 2003). S druge strane, najveći toplinski utjecaj je na bentonitnu ispunu, što ima određene mane. Bentonit je, doduše, postojan na temperaturama do 100 °C, ali povišene temperature svakako će imati određeni utjecaj na hidratizirane strukture unutar bentonita.

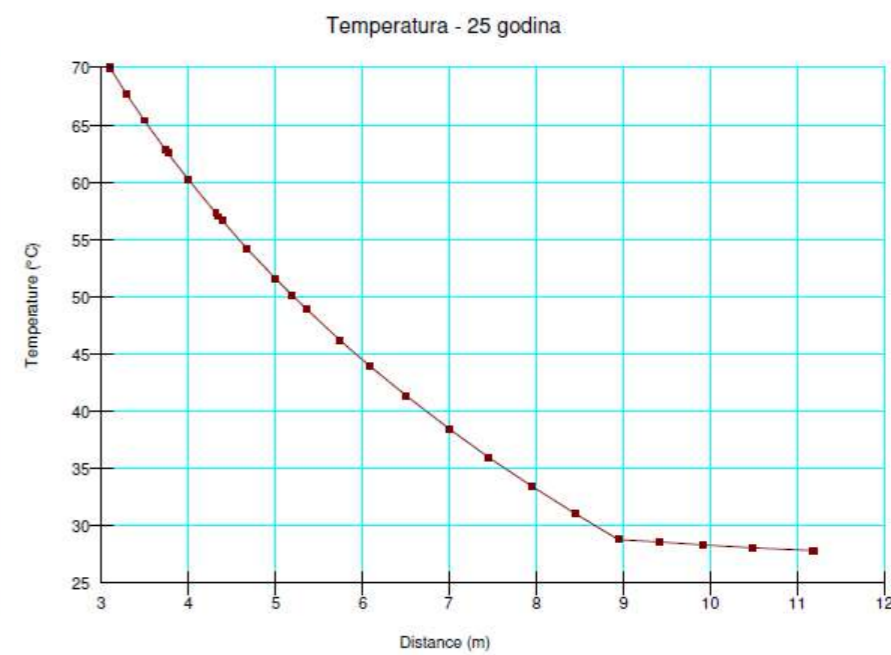
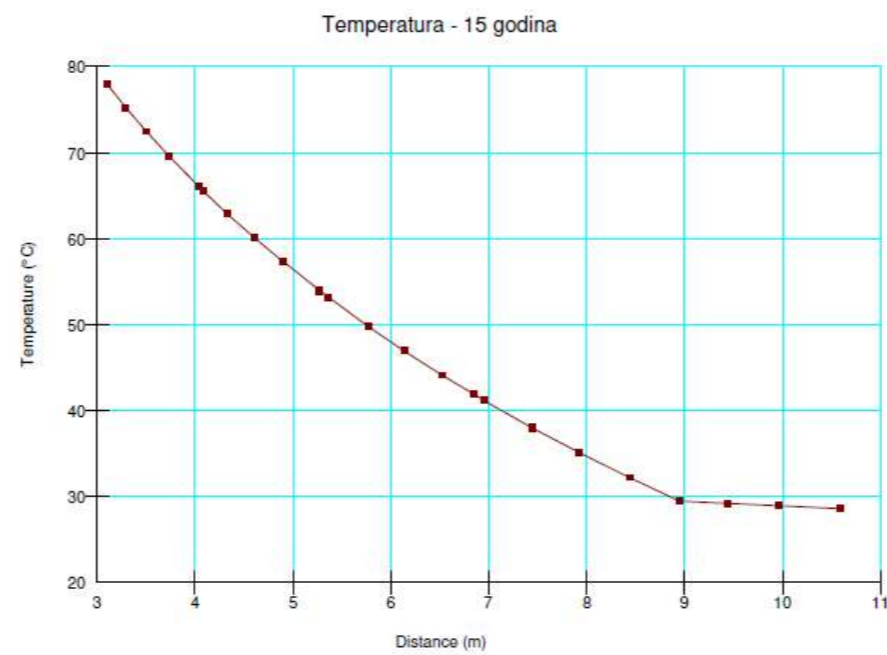
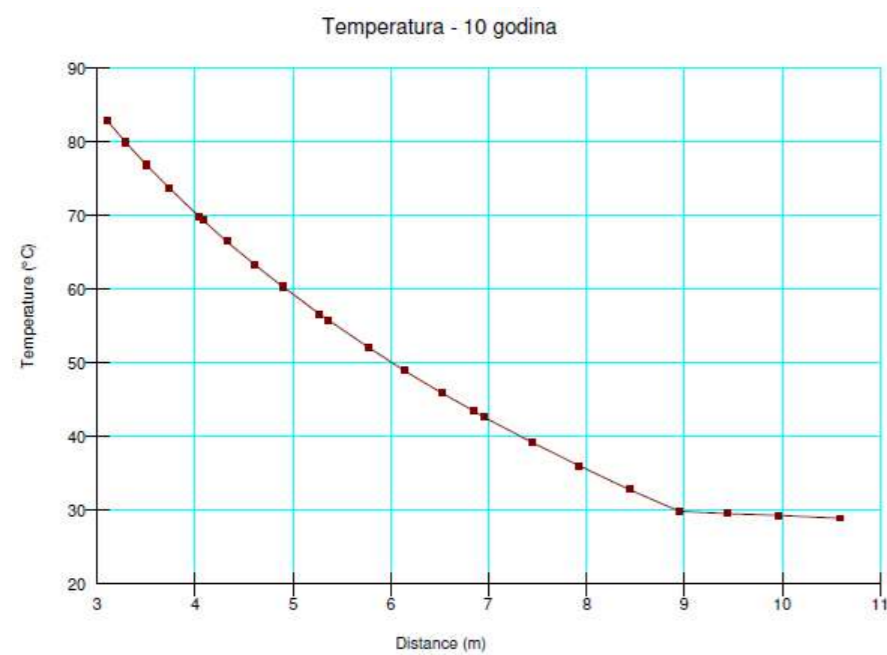
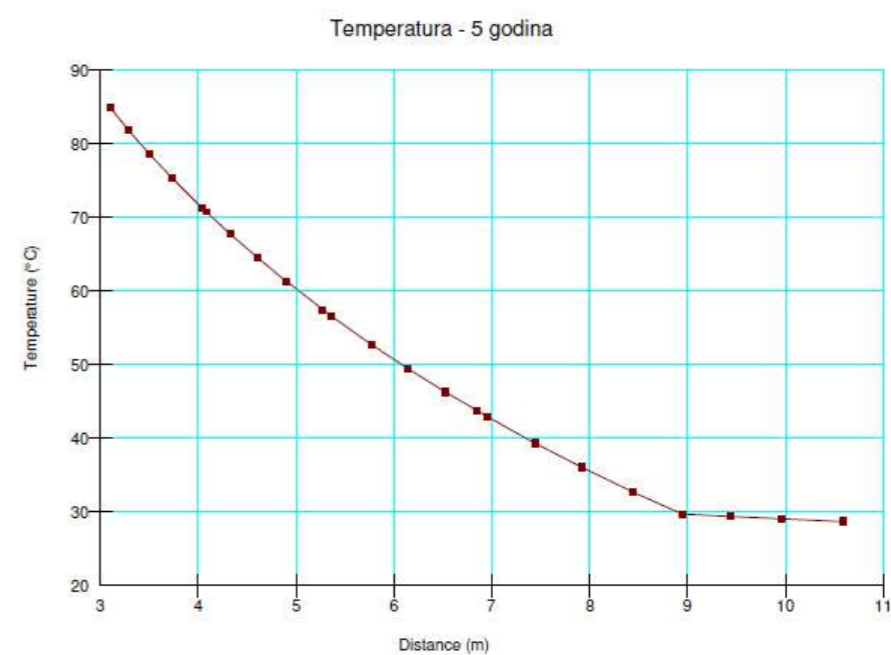
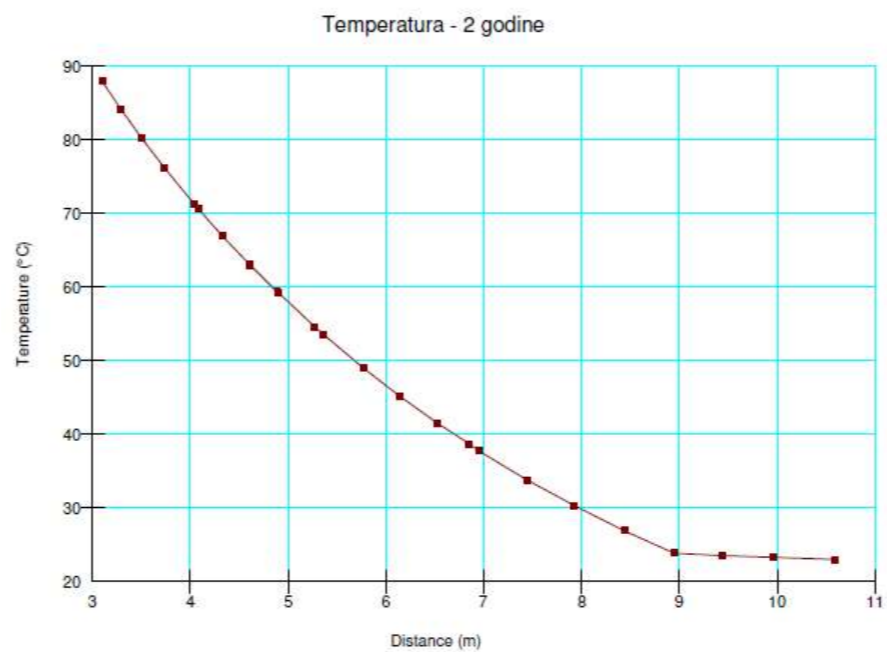
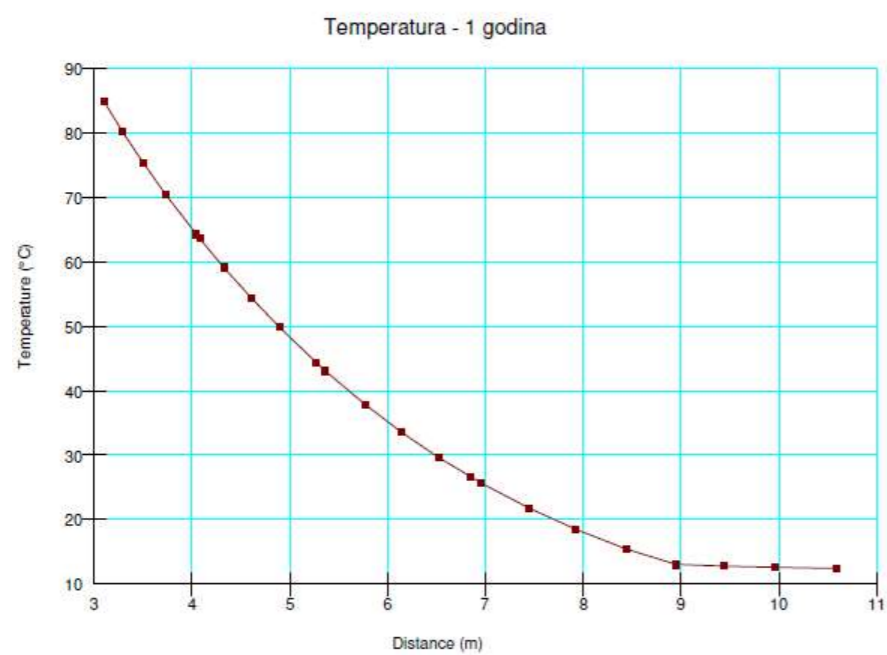
Na slici 4-49 prikazane su distribucije temperatura kroz poprečni presjek kroz odlagališni tunel nakon 25 godina. S obzirom da je analiza rađena po fazama (inkrementi: 1 godina, 2 godine, 5 godina, 15 godina i 25 godina od odlaganja/ugradnje), a da su vizualizacije distribucije temperatura slične, prikazana je samo faza „25 godina“ kao primjer. **Promjene temperatura kroz vrijeme po profilu: od centra spremnika na desno, slika 4-50, dane su grafikonima na slici 4-51.**



Slika 4-49 Distribucije temperatura kroz poprečni presjek kroz odlagališni tunel nakon 25 godina.



Slika 4-50 Model s vidljivom mrežom konačnih elemenata s označenim odabranim točkama po kojima je dan pregled promjena temperature prema fazama kroz vremenske periode 1, 2, 5, 10, 15 i 25 godina (na slici 4-51).



Slika 4-51 Promjene temperatura po profilu (slika 4-50), kroz vrijeme.

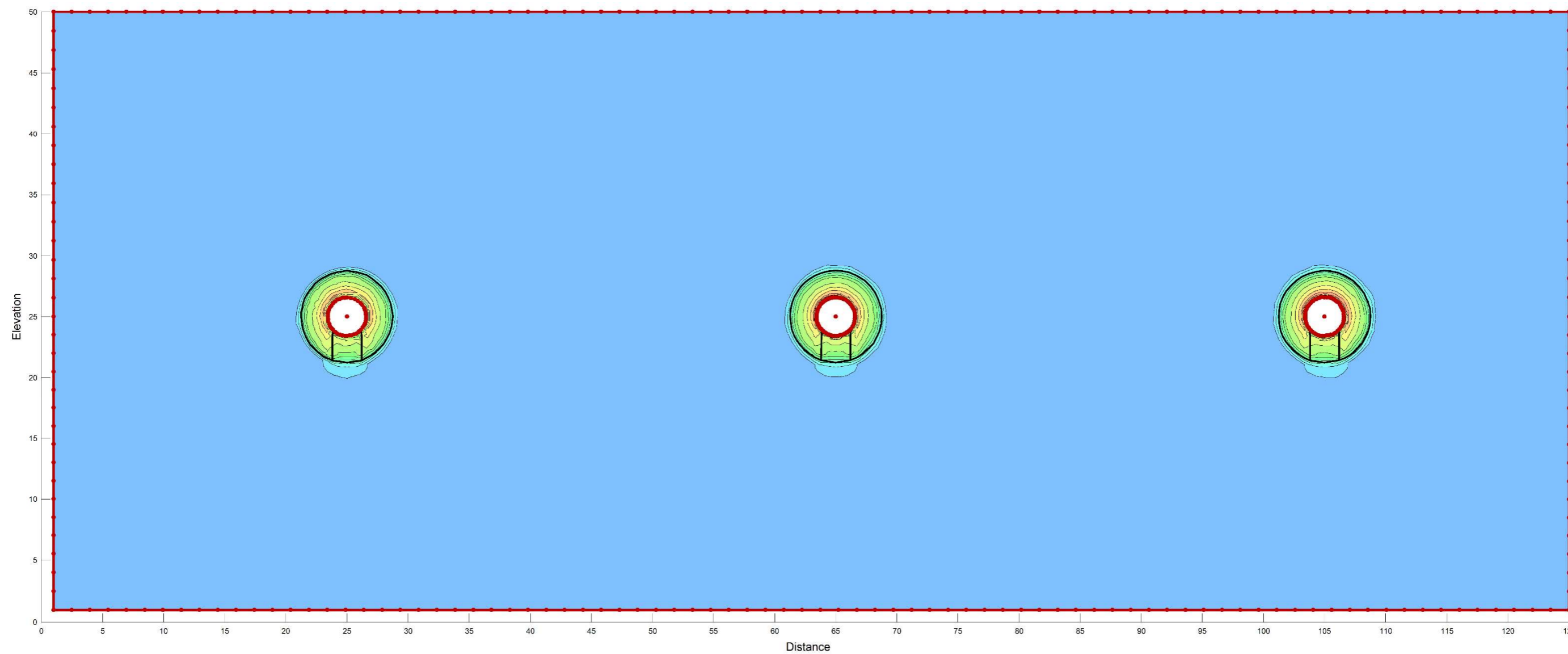
Primjećuje se kako maksimumi temperatura (na stijenci spremnika) slijede trend pada slično rezultatima za koncept KBS-3V (slika 4-30) u smislu oštrijeg pada kroz bentonit i manje oštrog (naglog) kroz stijenu. Ovi rezultati također odgovaraju podacima na slici 4-25 (odnos promjene temperature na površini pojedinog spremnika i stijenci bušotine kroz vrijeme), što je bio jedan od početnih uvjeta analize.

Zasebna analiza provedena je za tri susjedna hodnika (poprečni presjek) u smislu provjere međudjelovanja susjednih spremnika na zagrijavanje stijenske mase. Radi složenosti modela i nedostatnosti računalne opreme nije bilo izvedivo napraviti provjeru na cjelovitom presjeku kroz svih 11 hodnika i zadržati dovoljan broj točaka koje definiraju kružnice, odnosno dovoljno progustiti mrežu konačnih elemenata. Jače pojednostavljene modela ocijenjeno je kao nedostatan jer bi smanjilo kvalitetu modela.

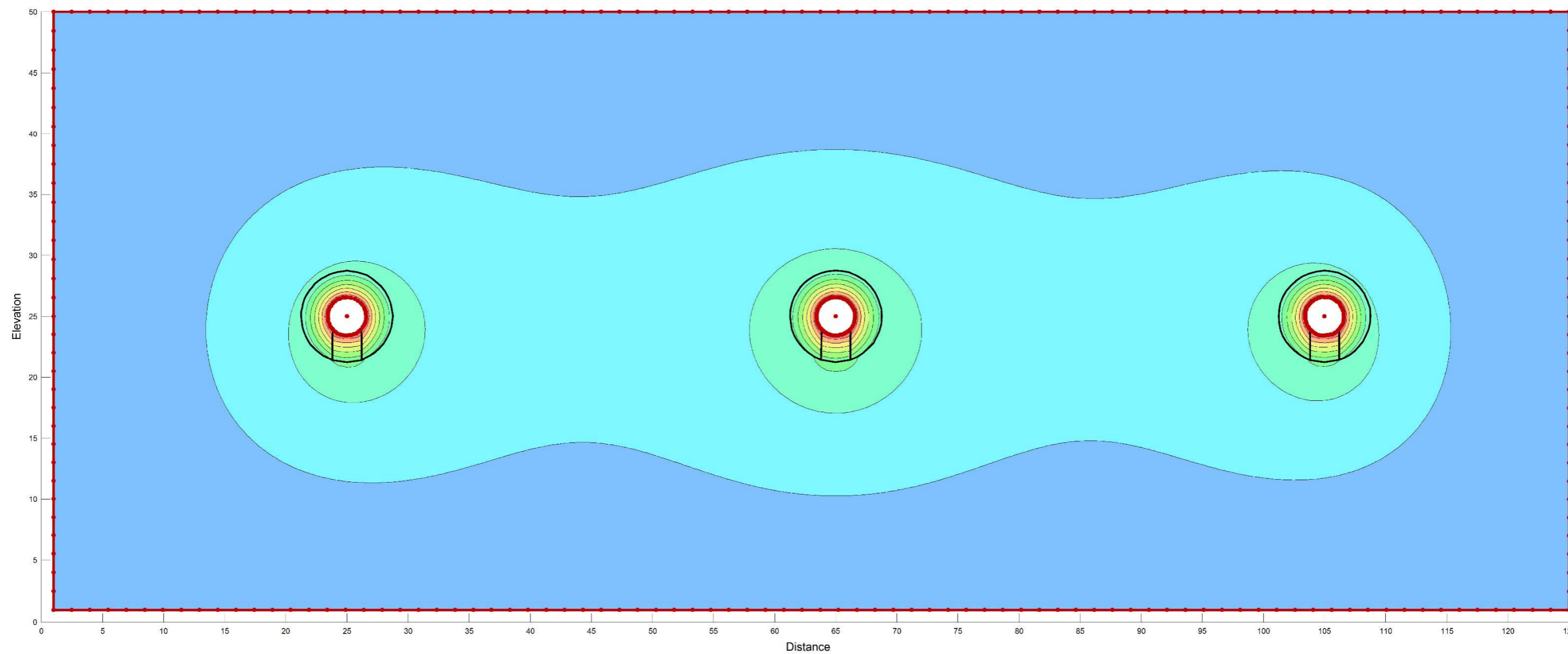
Rezultati analize utjecaja tri susjedna spremnika u tri paralelna odlagališna tunela dani su na slikama 4-51 (model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu) i 4-52 (distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje).

Modeli širenja topline i raspodjele temperatura su u očekivanim granicama. Ponovo se pokazuje bitna razlika u prijenosu topline između bentonita i stijene, osobito s obzirom da u Konceptu-4 za razliku od koncepta KBS-3V bentonitna ispuna ima drukčiju konzistenciju – ne radi se o prešanim blokovima, već i peletima bentonita koji su hidratizirali. Prijenos topline je intenzivniji na mjestu gdje se posteljica od prešanog bentonita nalazi u kontaktu sa stijenom, što je za očekivati, budući da ima daleko veću gustoću (materijal posteljice) od ostatka ispune tunela.

Povećanje temperature u smislu zagrijavanja stijene i bentonitne ispune je ponovo u traženim granicama, što govori u prilog odabiru modela i njegovoj prihvatljivosti. Maksimalne temperature se NE DIŽU do maksimalnih dopuštenim dizajnom koncepta (90-100 °C) što znači da geometrija rješenja i odabir materijala odgovaraju traženim zahtjevima koncepta (u skladu s: Ikonen, 2003).

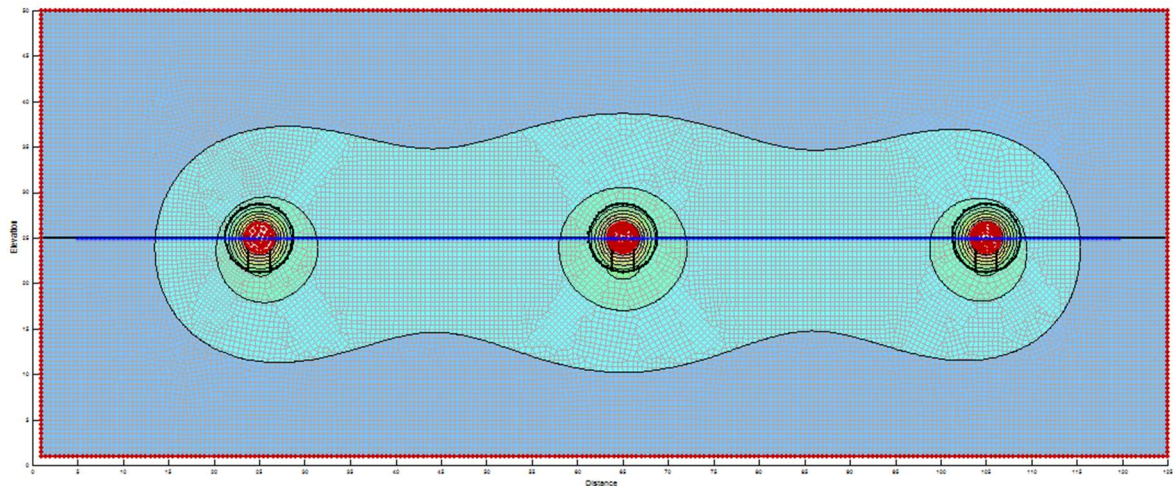


Slika 4-51 Model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz bentonit i stijenu.



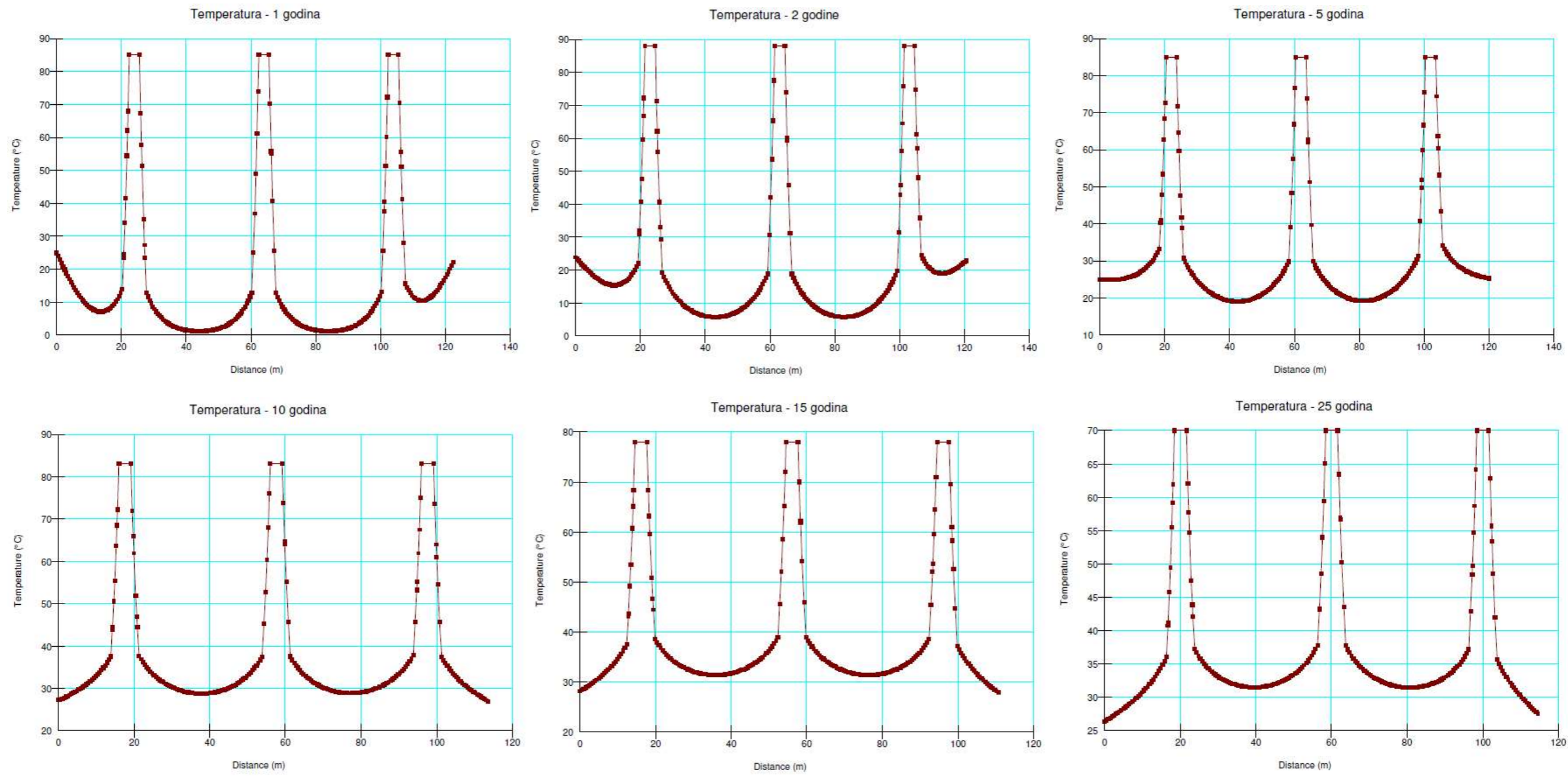
Slika 4-52 Distribucije temperatura kroz poprečni presjek kroz odlagališni tunel nakon 25 godina.

Na slici 4-53 dan je prikaz odabira položaja presjeka za koji su prikazane distribucije temperatura kroz vrijeme. Razlog za odabir položaja profila: kroz centre spremnika, je u tome što se na tim mjestima očekuju maksimumi temperatura.



Slika 4-53 Model s vidljivom mrežom konačnih elemenata s označenim odabranim točkama po kojima je dan pregled promjena temperature prema fazama kroz vremenske periode 1, 2, 5, 10, 15 i 25 godina (na slici 4-54).

Na slici 4-54 grafikonima su prikazane distribucije temperatura po presjeku kroz vrijeme, koje slijede logiku prijenosa topline s obzirom na karakteristike materijala i pokazuju kako postoji očekivani trend pada temperatura kako odmiče vrijeme i kako se smanjuje količina topline koju generira ING.

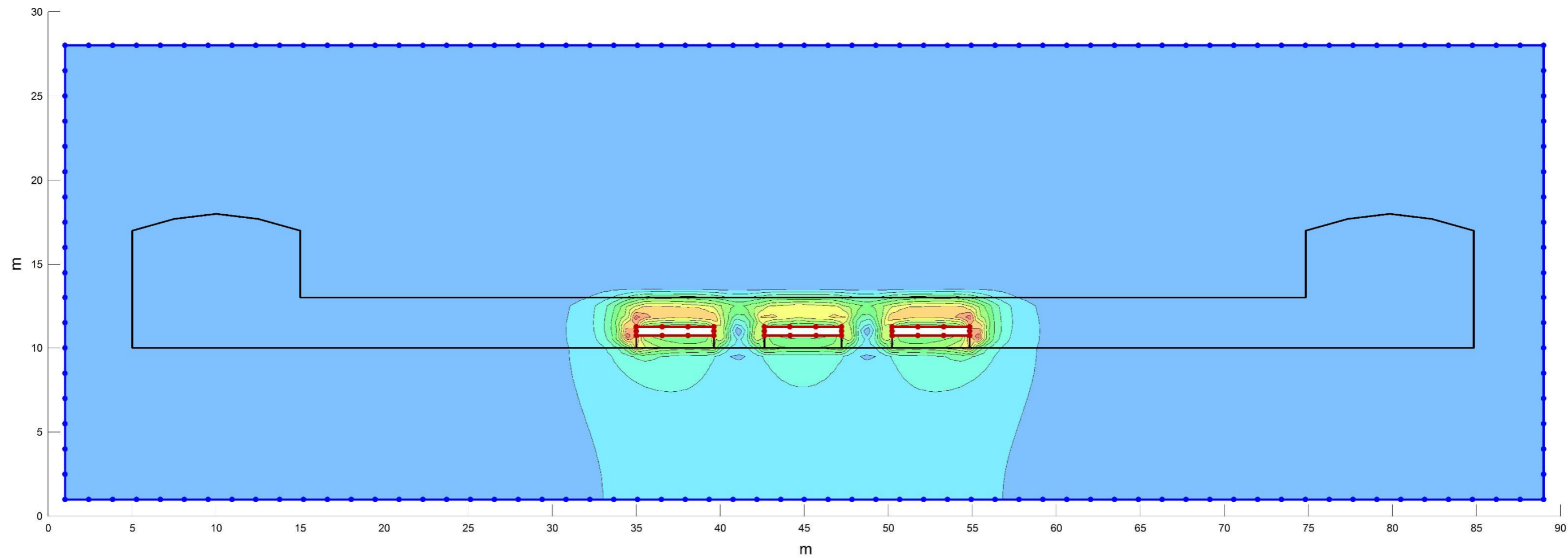


Slika 4-54 Promjene temperatura po profilu (slika 4-53), kroz vrijeme.

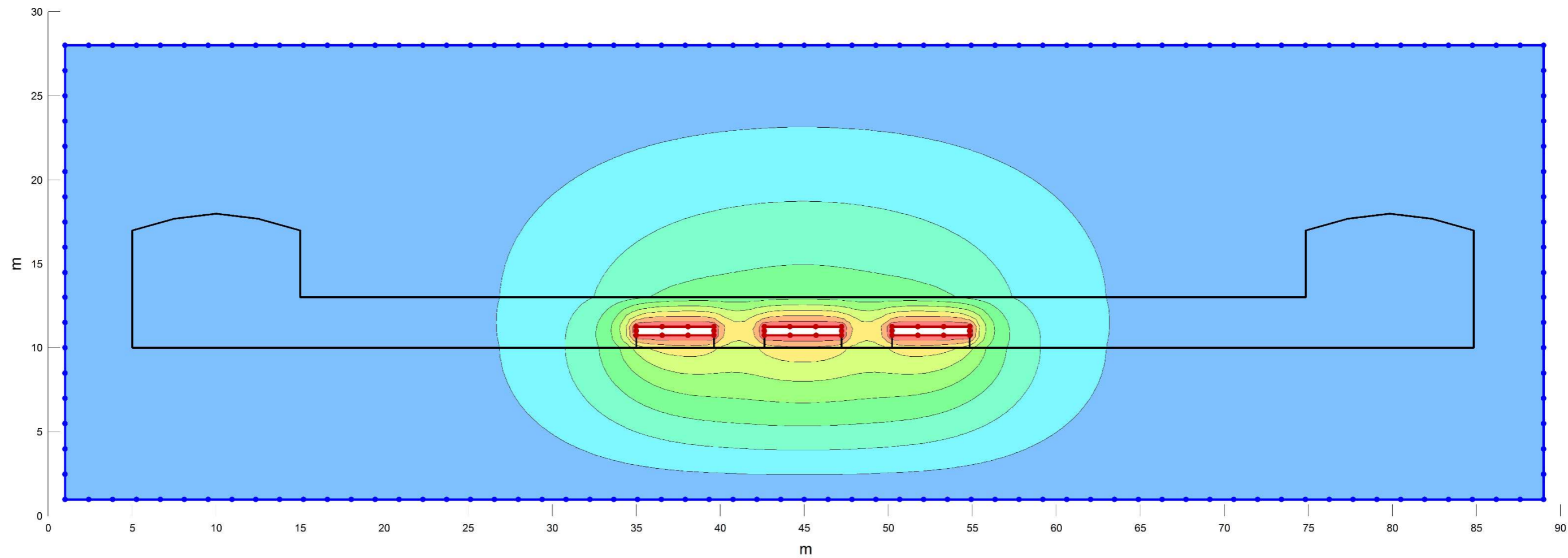
Model presjeka duž odlagališnog tunela pojednostavljen je na način da prikazuje samo 3 od planiranih 58 po tunelu za Koncept-4. Od realnijeg modela – s više spremnika, moralo se odustati poradi ograničenja računalne opreme, kao i poradi preglednosti rezultata. Svakako bi bilo preporučljivo u daljnjim analizama razmotriti ideju izrade modela koji bi uključivao detaljniju geometriju, sve materijale koji se nalaze u tunelu i puni broj spremnika.

Kao rezultate analize u programu TEMP/W dobiven je model širenja topline – gradijent topline (x i y smjer) kroz stijenu (slika 4-55), i distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje (slika 4-56). S obzirom da su rezultati za periode manje od 25 godina vizualno slični i ubacivanje svih zanimljivih analiza (svakih npr. pet godina) bi značajno proširilo rad, u radu je slikom prikazan samo rezultat distribucije temperatura nakon 25 godina.

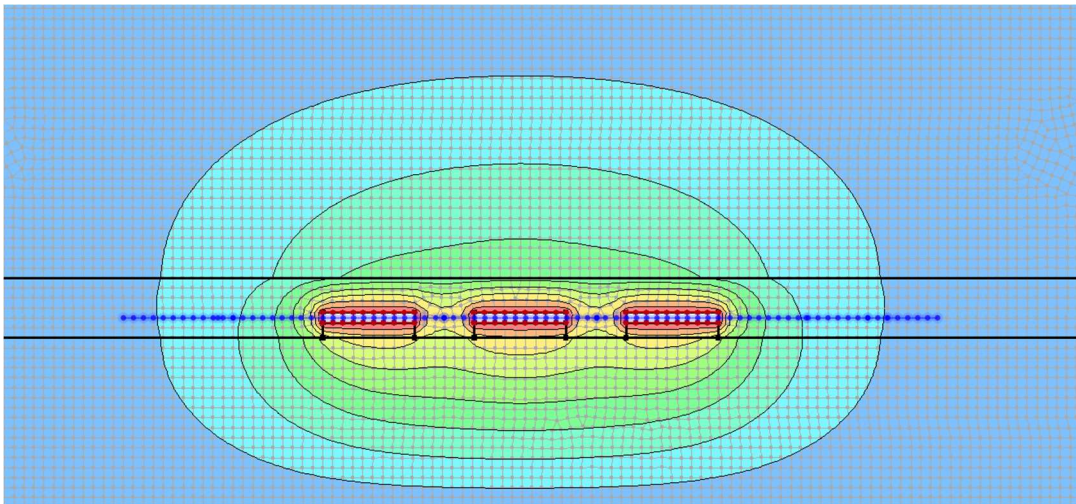
Za karakterističan profil – presjek kroz spremnike (slika 4-57) dani su grafikoni distribucije temperatura kroz godine po fazama: 1, 2, 5, 10, 15 i 25 godina (slika 4-58).



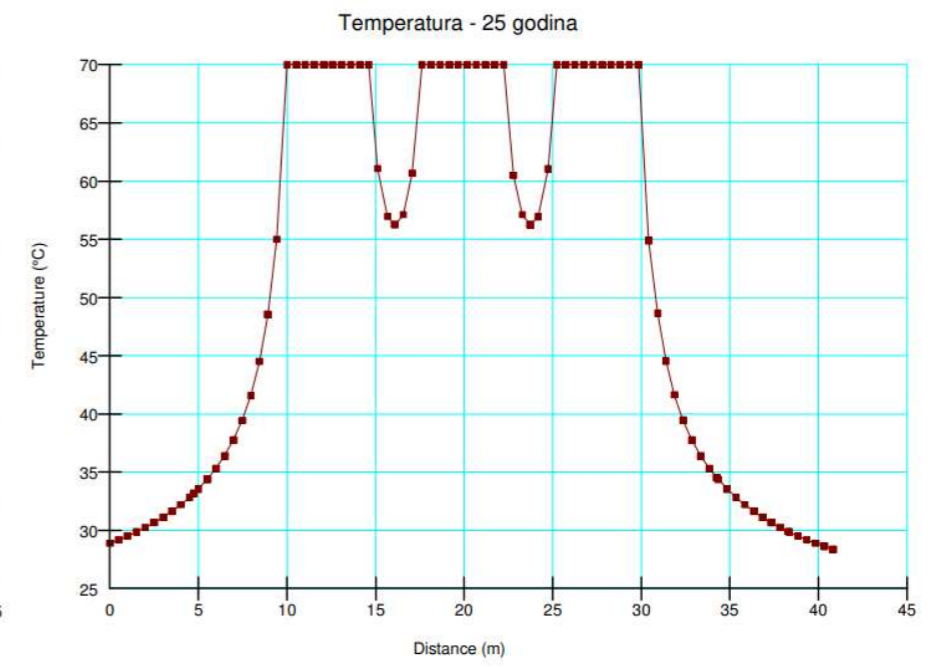
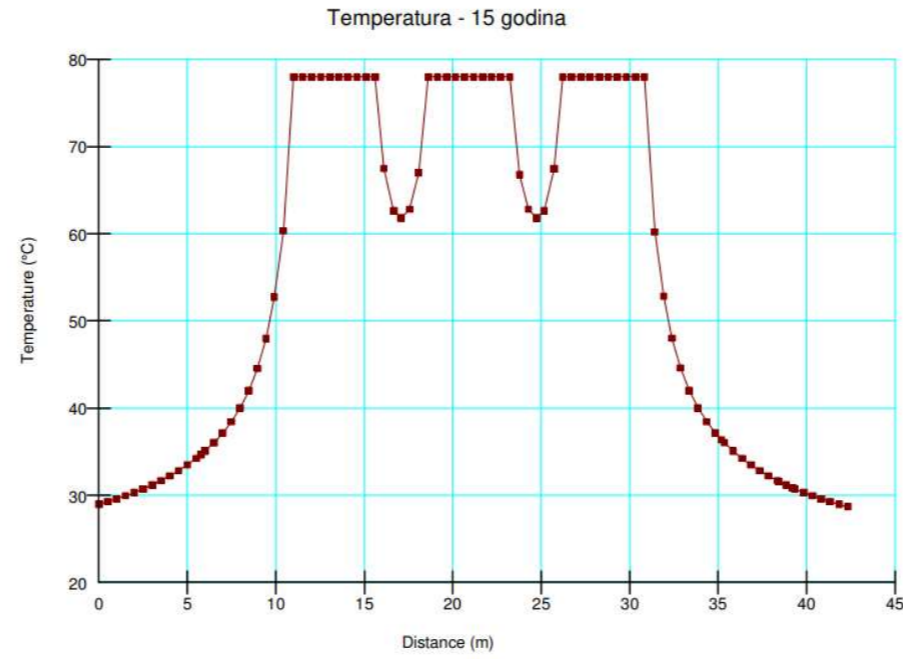
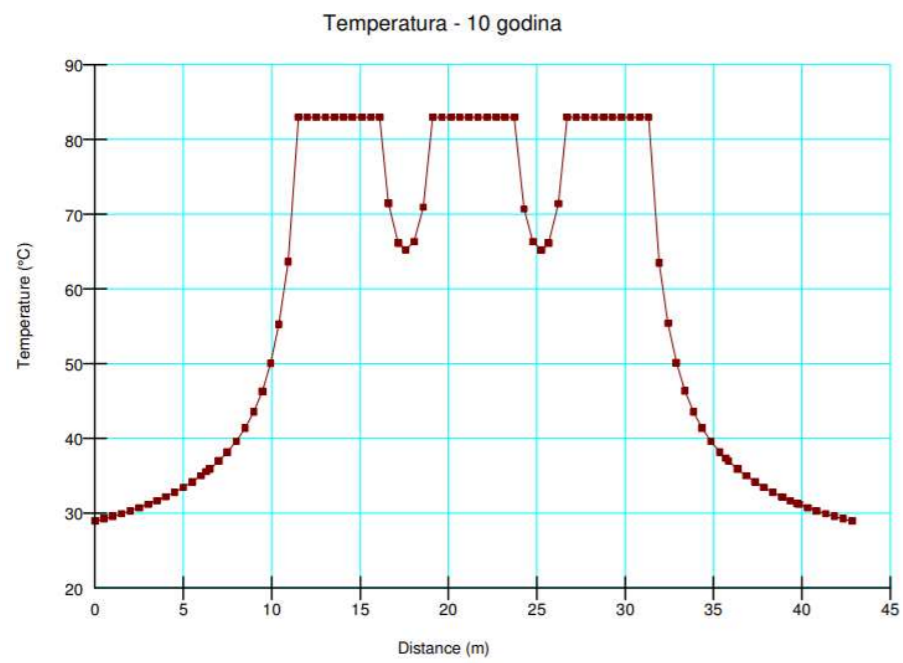
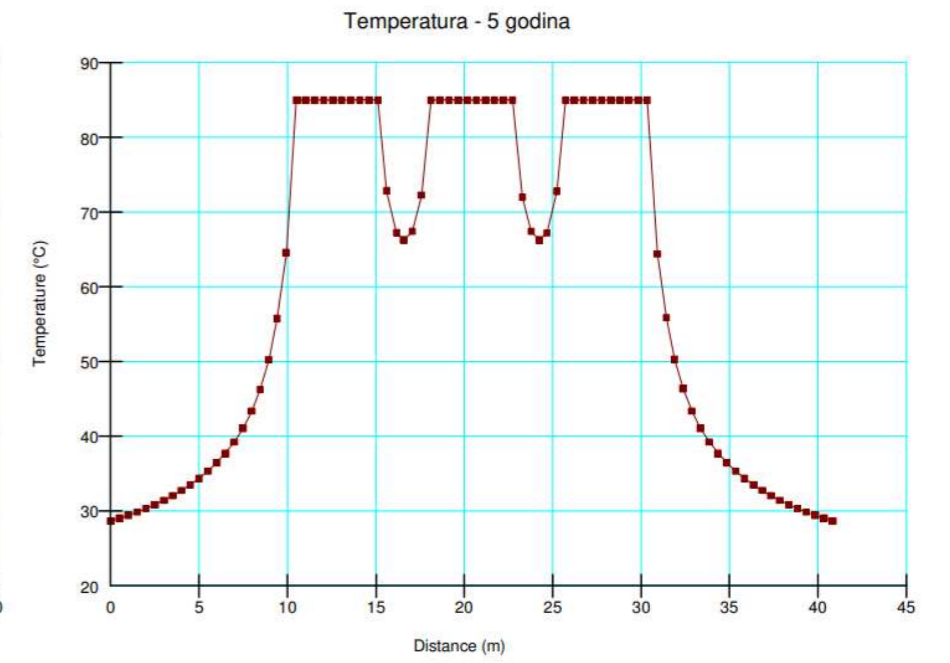
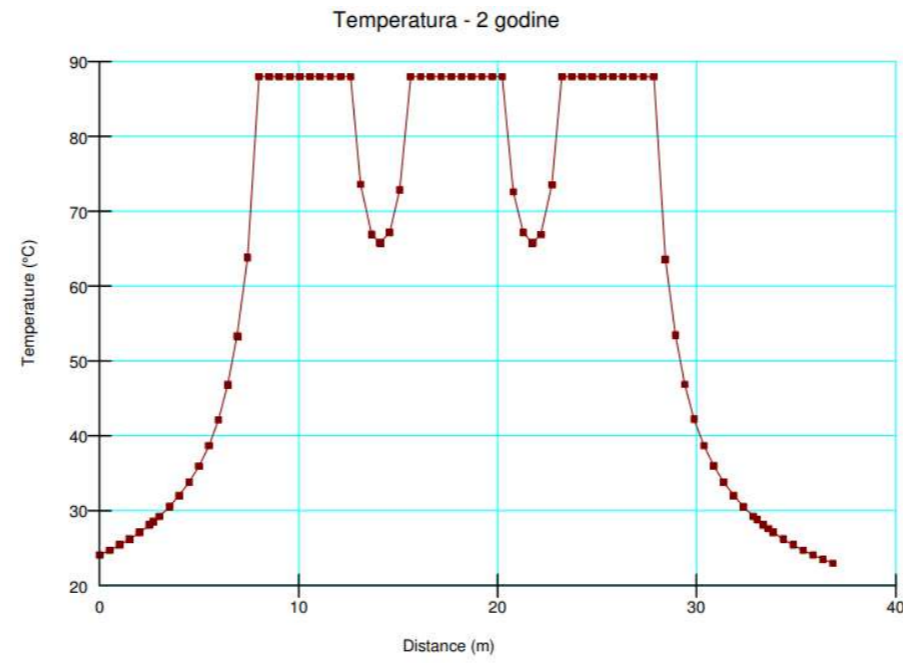
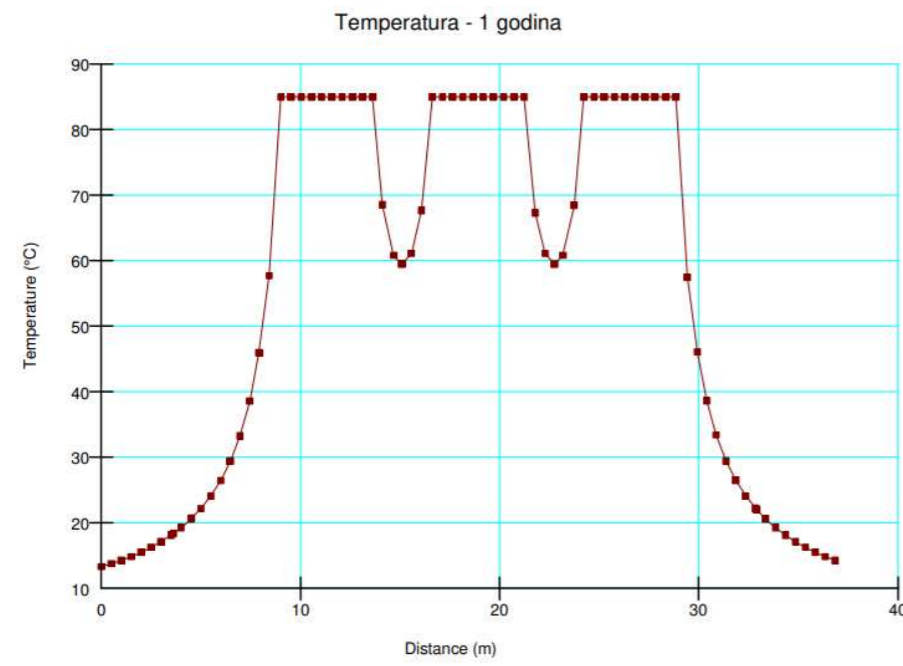
Slika 4-55 Model širenja topline – toplinski tok (x i y smjer) kroz stijenu.



Slika 4-56 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura 25 godina nakon ugradnje.



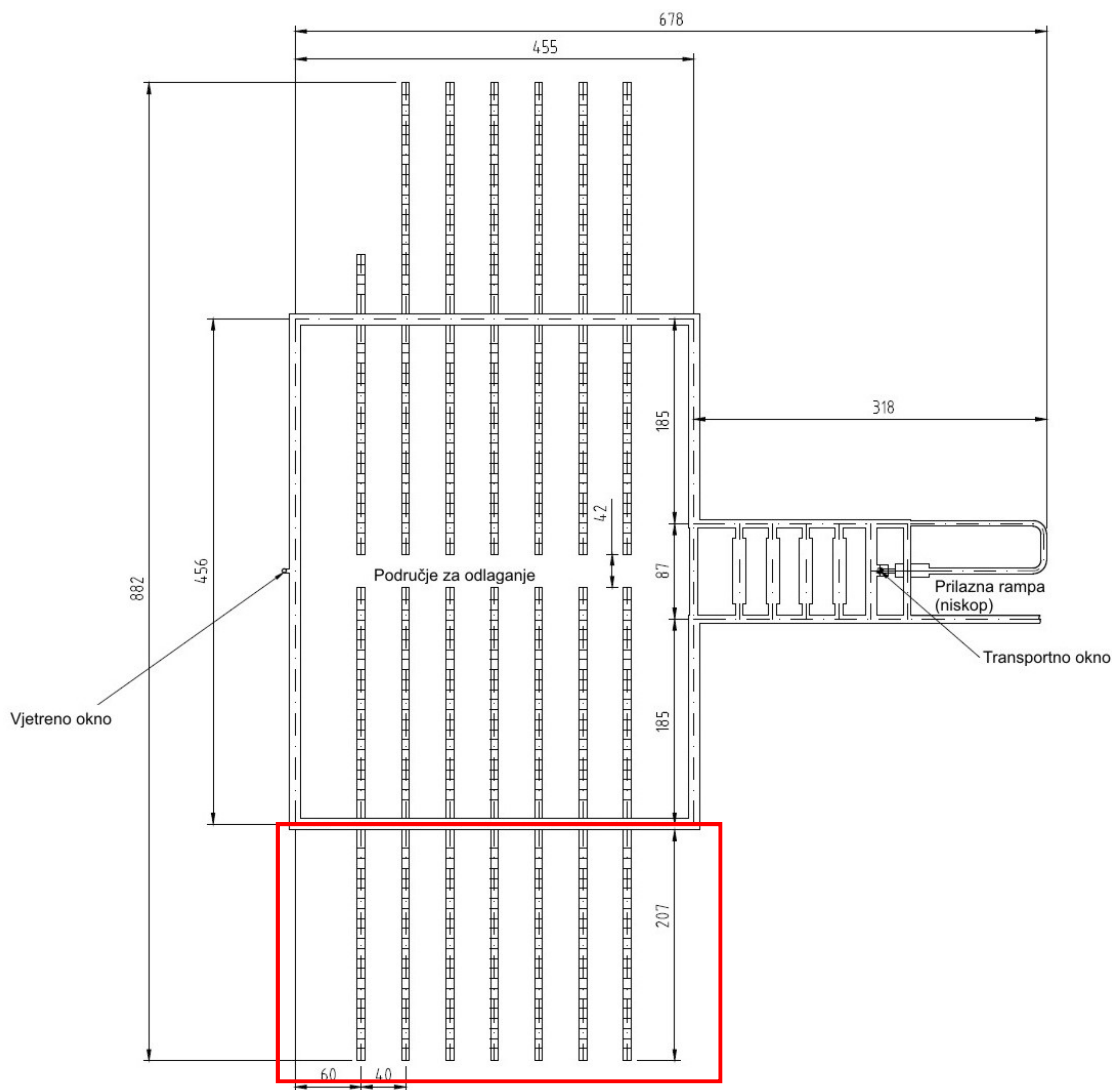
Slika 4-57 Model s vidljivom mrežom konačnih elemenata s označenim odabranim točkama (profil) po kojima je dan pregled promjena temperature prema fazama kroz vremenske periode 1, 2, 5, 10, 15 i 25 godina (na slici 4-58).



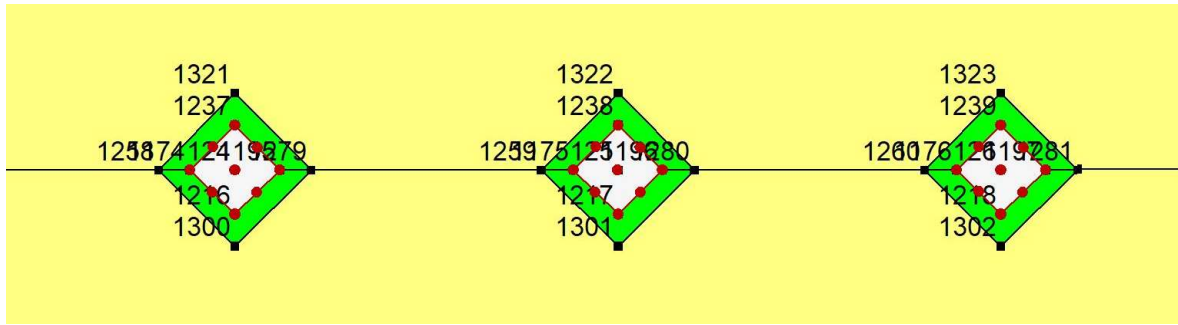
Slika 4-58 Promjene temperatura po profilu (slika 4-57), kroz vrijeme.

5. RASPRAVA REZULTATA

Pokušaj simulacije THM-a na modelu koji bi se izradio kao presjek kroz središnji dio svih spremnika i prikazao sva četiri panela u KBS-3V modelu nije bio izvediv – simulacija se „rušila“, jer je broj točaka, regija i konačnih elemenata prešao maksimalni mogući koji se može zadati. Čak i model sa samo jednim panelom (slika 5-1) i maksimalno pojednostavljenim elementima/regijama gdje su presjeci kroz spremnike predstavljeni s kvadratima umjesto kružnicama (slika 5-2), kako bi se smanjio broj točaka, odnosno regija, a time i elemenata, nije bilo moguće provesti u GeoStudiju ni na jednom raspoloživom računalu.

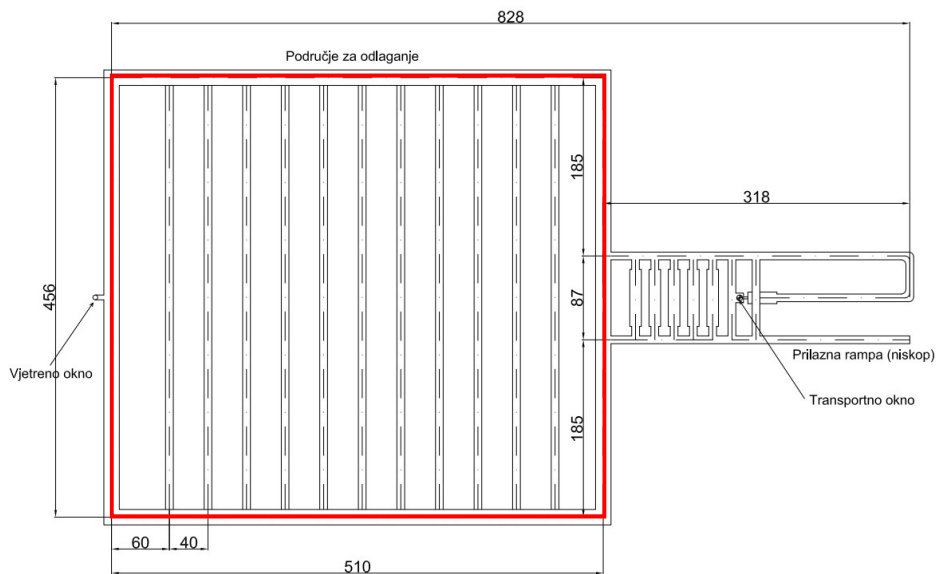


Slika 5-1 Crvenim pravokutnikom označeno područje jednog panela za koji se pokušalo provesti simulaciju, s obzirom da za cijelu površinu odlagališta (sva četiri panela) model nije bio provediv.



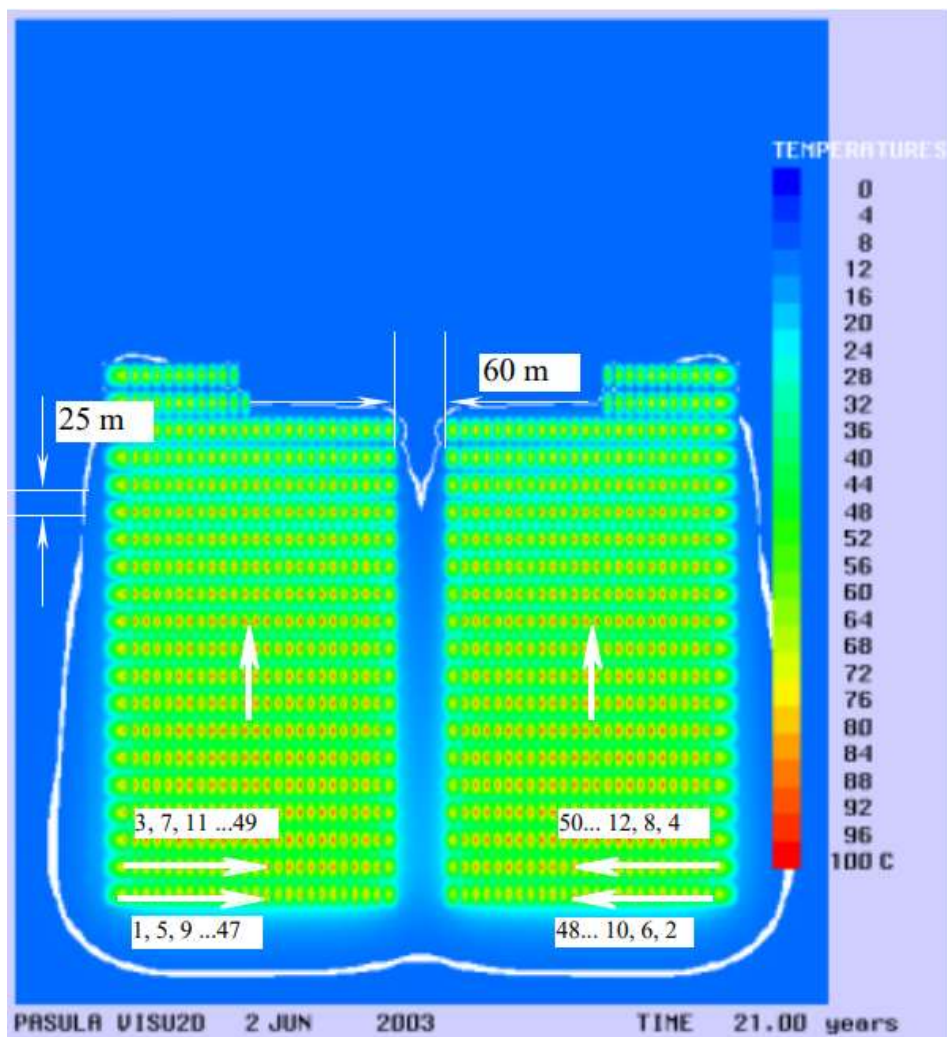
Slika 5-2 Maksimalno pojednostavljeni elementi/regije gdje su presjeci kroz spremnike predstavljeni s kvadratima umjesto kružnicama.

Isto se ponovilo nakon pokušaja izrade modela na kojem bi presjek prolazio kroz sredine aksijalno u tunelu postavljenih spremnika za Koncept-4 (slika 5-3). Simulaciju nije bilo moguće provesti.



Slika 5-3 Crvenim pravokutnikom označeno područje za koje se pokušalo provesti simulaciju.

Na slici 5-4 prikazan je rezultat numeričke analize distribucije temperatura dva susjedna panela odlagališnih tunela nakon 21 godine (po odlaganju) – tlocrt, za finski model (Ikonen, 2003). Kao što je ranije rečeno, 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.

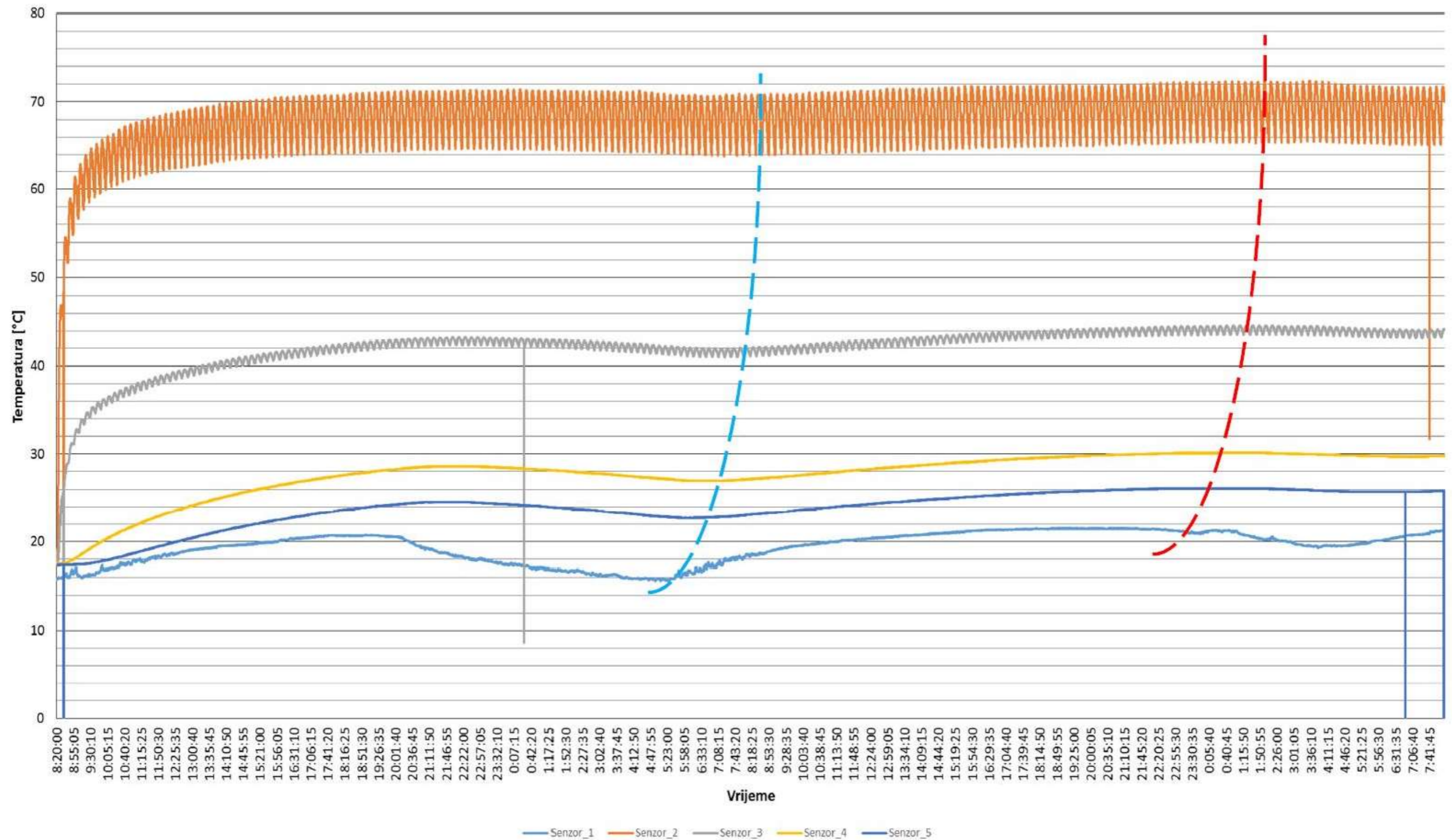


Slika 5-1 Rezultat numeričke analize distribucije temperatura dva susjedna panela odlagališnih tunela nakon 21 godine (po odlaganju) – tlocrt, simulacija za Olkiluoto (Ikonen, 2003).

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

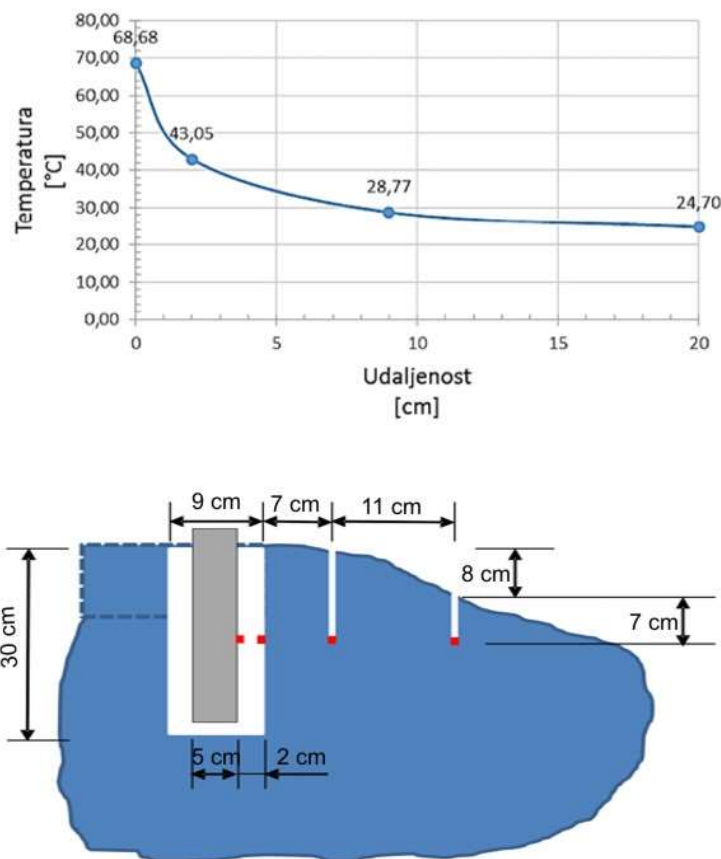
Očita je sličnost rezultata (vizualno predočjenje širenja topline) između modela u ovom radu i finskog modela, uz primjedbu kako je stijena u Finskoj i Švedskoj daleko hladnija od pretpostavljene stijene u Hrvatskoj ili Sloveniji (11-14 °C u odnosu prema 25-30 °C, prema ARAO, 2019) tako da do drastične 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 5-2 dan je rezultat mjerenja zagrijavanja magmatske stijene, prema shemi sa slike 5-3.



Slika 5-2 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 stijenci 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. Crtkana plava krivulja označava minimume s pomakom u vremenu, a crvena maksimume, s obzirom da je promjena temperature ovisila o vremenu i udaljenosti, odnosno toplinskoj vodljivosti materijala.

Rezultat mjerenja pokazuje da pri temperaturi spremnika od 80 °C⁸ i pri prosječnoj temperaturi okoline od oko 15 °C, nema jakog zagrijavanja stijene (slika 5-33 grafikon) te da se razlika temperatura ustalila na $\Delta T \approx 42$ °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 5-3 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.

⁸ Električni grijač u fizičkom eksperimentu, kontroliran termostatom, dao je na senzoru koji se nalazio naslonjen na stijenku grijača raspon temperature 64-72 °C, prosječna srednja od ≈ 68 °C.

6. 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 ispunje (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 (KBS-3V) je primjenjiv na odabranu stijenu;
2. parametri iskopa stijene (geometrija podzemnih prostorija) su dobro odabrani – pretpostavka o pojavi najvećih naprezanja 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;

8. pokazano je kako je **Koncept-4 jednostavnije i također funkcionalno rješenje koje zadovoljava tražene parametre, a predstavlja rješenje s manjim brojem (dužinom) tunela**, što ukazuje na **mogućnost primjene ove tehnologije umjesto koncepta KBS-3V**.

Osobiti doprinos dosadašnjim istraživanjima ovog tipa (numeričko modeliranje termičko-hidro-mehaničkih promjena i efekata) je u:

1. **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;
2. **dokazu kako je jednostavniji i, vjerojatno, jeftiniji (manje tunela i podzemnih radova) Koncept-4 također primjenjiv za obrađeni slučaj odlaganja ING-a**.

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. Razlog zašto se odustalo od korištenja programa CODE BRIGHT, kao i programa HEAT2 bilo je pomanjkanje vremena za razradu modela i provedbu simulacija, kao i to što CODE BRIGHT osim skupe verzije punog programa nudi samo mjesec dana „*trial*“ (probne) verzije, što ne bi bilo dovoljno za izradu modela, provođenje simulacija i verifikaciju podataka. Također, obim rada bi se praktički udvostručio.
- 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 simulacije na modelu koji uključuje presjek kroz cijelo odlagalište – sve spremnike, što bi pokazalo stvarni stupanj utjecaja zagrijavanja matične stijene.
- Trebalo bi provesti usporedna ispitivanja više različitih geometrija rješenja (različiti razmaci između bušotina za odlaganje (spremnika), 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. 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 implementation - 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.

BALTIĆ, V., BALTIĆ, M. 2007. Nikola Tesla discovered „very special radiation“ or X-radiation. Arch Oncol 2007;15(3-4):100-5.

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.

BROWNE, M. E. 1998. Physics for Engineering and Science. Schaum's outline series. 3rd edition. New York: McGraw-hill.

BÖRGESSON, L., SANDÉN, T., JOHANNESON, L. E., AUTIO, J., PINTADO, X., SMITH, P. 2017. KBS-3H Summary Report Design of Buffer and Filling Components. Report P-16-18. SKB.

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.

FRIES, T., CLAUDEL, A., WEBER, H., JOHNSON, L., LEUPIN, O. 2008. The Swiss concept for the disposal of spent fuel and vitrified HLW. International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository 16-18 June 2008, Prague. Czech Republic: Ceske vysoke uceni technicke, Fakulta stavebni. p. 346.

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.
- GILL, R. (2010). Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK. p. 428.
- GRALAND, W.J., SAUNDERS, F. 1998 Decay Heat Estimates for MNR. Technical report 1998-03. Hamilton, Ontario.
- Haldar, S.K., Tišljarić, J. 2014. Introduction to Mineralogy and Petrology, Elsevier, Oxford.
- HOFFMANN, C., ALONSO, E.E., ROMERO, E. 2007. Hydro-mechanical behaviour of bentonite pellet mixtures. *Physics and Chemistry of the Earth* 32 (2007) 832–849
- HAUSMANNOVÁ, L., VAŠÍČEK, R., ŠTÁSTKA, J. 2012. Sprayed clay technology for the deep repository of high-level radioactive waste. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik Vol. 24 str. 29-33* Zagreb.
- HEP 2011. Studija o utjecaju na okoliš zahvata Rekonstrukcije TE Plomin – zamjena postojeće TE Plomin 1 u cilju modernizacije i poveanja kapaciteta, Hrvatska elektroprivreda, d.d. Zagreb.
- IAEA 1993. Strategies for the back end of the nuclear fuel cycle. IAEA-TECDOC-839. Vienna. Austria.
- 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.

KORKIALA-TANTTU. L., 2009. Finite Element Modelling of Deformation of Unsaturated Backfill Due to Swelling of the Buffer. Posiva. Working Report 2009-88.

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.

MEDAKOVIĆ, S. 2016. Prijedlog Nacionalnog programa provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva. Predavanje u sklopu radionice „Informiranje o zbrinjavanju radioaktivnog otpada u RH“. 12.04.2016. Fond NEK. Zagreb.

MÜLLER, H. R., GARITTE, B., VOGT, T., KÖHLER, S., SAKAKI, T., WEBER, H., SPILLMANN, T., HERTRICH, M., BECKER, J. K., GIROUD, N., CLOET, V., DIOMIDIS, N., VIETOR, T. 2017. Implementation of the full-scale emplacement (FE) experiment at the Mont Terri rock laboratory. *Swiss J Geosci* 110:287–306.

NAGRA 2002. Project Opalinus Clay. Safety Report. Nagra Technical Report NTB 02-05. Nagra: Wettingen.

NAGRA 2009. The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland. Technical Report 09-06. Nagra: Wettingen.

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.

Jonny Rutqvist • Liange Zheng • Fei Chen • Hui-Hai Liu • Jens Birkholzer 2014 Modeling of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes with Links to Geochemistry Associated with Bentonite-Backfilled Repository Tunnels in Clay Formations *Rock Mech Rock Eng* (2014) 47:167–186 DOI 10.1007/s00603-013-0375-x

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.

THOMAS, A. M. K., BANERJEE, A. K. 2013. The History of Radiology. Oxford University Press. Oxford, UK.

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.

VEINOVIĆ, Ž., PERKOVIĆ, D., MOSTEČAK, A., SHARMA, I., SURIĆ MIHIĆ, M., PRLIĆ, I. 2018 Gospodarenje reziduima u Republici Hrvatskoj. XV. MEĐUNARODNI SIMPOZIJ GOSPODARENJE OTPADOM ZAGREB 2018. / Anić Vučinić, Aleksandra (ur.). Zagreb: Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2018. str. 39-39

VUČEVIĆ, D., ĐORĐEVIĆ, D., RADOSAVLJEVIĆ, T. 2016. Nikola Tesla and medicine: 160th anniversary of the birth of the genius who gave light to the world - part I. Med Pregl. 2016 Nov;69 (11-12):391-401.

WIECZOREK, K., MIEHE, R., GARITTE, B. 2011 Measurement of Thermal Parameters of the HE-E Buffer Materials. DELIVERABLE (D-N^o: 2.2-5) PEBS (Contract Number: FP7 249681). EURATOM. EU.

WHO 2004. Basics of radiation protection: how to achieve ALARA, Working tips and guidelines. World Health Organisation. p. 92.

Zakonski dokumenti

NARODNE NOVINE br. 141/13. Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Zagreb: Narodne novine d.d.

NARODNE NOVINE br. 125/14. Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva. Zagreb: Narodne novine d.d.

NARODNE NOVINE br. 39/15. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Zagreb: Narodne novine d.d.

NARODNE NOVINE br. 130/17. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Zagreb: Narodne novine d.d.

NARODNE NOVINE br. 118/18. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Zagreb: Narodne novine d.d.

NARODNE NOVINE br. 100/18. 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). Zagreb: Narodne novine d.d.

NARODNE NOVINE br. 12/18. Pravilnik o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora. Zagreb: Narodne novine d.d.

NARODNE NOVINE br. 40/18. Pravilnik o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu. Zagreb: Narodne novine d.d.

Official Gazette of the Republic of Slovenia. 2016. RESOLUTION On the National Programme for Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel Management for the 2016–2025 Period (ReNPRRO16–25) (No. 31/16). Ljubljana.

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%202.pdf> (19.04.2019.)

Online sadržaj

DGU. Geoportal, <https://geoportal.dgu.hr/> (19.04.2019.)

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. 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.)

MIRION TECHNOLOGIES. Radiation safety basics. <https://www.mirion.com/learning-center/radiation-safety-basics/what-is-radiation>. (17.05.2019.)

MNT – Muzej Nikole Tesle. 2019. Dokument br. MNT, VI/II, 122. <http://radiographics.rsna.org/content/28/4/1189.full> (17.05.2019.)

NAPY1KENOBI - Own work based on: Strahlenarten.png i Strahlenarten en.png by User:Juergen Bode and User:HPaul, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3936812> (17.05.2019.)

NEK <https://www.nek.si/hr/o-nek-u/proizvodnja>. (17.05.2018.)

WORLD NUCLEAR NEWS. 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.)

ROLL-STONE. 2009. Gesägte und polierte Probe aus Hauzenberger Granodiorit. <https://de.wikipedia.org/wiki/Granodiorit#/media/Datei:Hauzenberger-Granit.jpg> (12.06.2019.)