

Proračun stabilnosti pripovršinskog odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada

Rožman, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:826395>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**



Repository / Repozitorij:

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



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

**PRORAČUN STABILNOSTI PRIPOVRŠINSKOG ODLAGALIŠTA NISKO I
SREDNJE RADIOAKTIVNOG OTPADA**

Diplomski rad

Ivana Rožman
GI2079

Zagreb, 2021.

PRORAČUN STABILNOSTI PRIPOVRŠINSKOG ODLAGALIŠTA NISKO I SREDNJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

Ivana Rožman

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U radu je prikazano osmišljeno konstruktivno rješenje odlagališta koji predstavlja novi koncept pripovršinskog odlagališta povećane sigurnosti za nisko i srednje radioaktivni otpad (NSRAO). Novi koncept odlagališta NSRAO poboljšava i optimizira njegovu funkciju i sigurnost te predstavlja ozbiljno unaprjeđenje u odnosu na postojeća rješenja u svijetu. Novi koncept odlagališta uključuje pokrovni i temeljni zaštitni sustav slojeva čime se osigurava dodatna i konkretna zaštita tla, vode i biote. Analiza stabilnosti provedena je u programskom paketu GeoStudio u programu SLOPE/W, a pomoćni nacrti s dimenzijama za lakše modeliranje u GeoStudiu, napravljeni su u AutoCAD softveru. Analizirano je sveukupno šest modela odlagališta, od čega su tri površinskog tipa i tri ukopanog tipa. Na svakom tipu odlagališta proveden je proračun stabilnosti za tri različita kuta nagiba, 50°, 45° i 40°. Nakon analize i interpretacije rezultata odabran je najprihvatljiviji model NSRAO s dovoljno trajnom stabilnošću pokosa.

Ključne riječi: odlagalište, nisko i srednje radioaktivni otpad, proračun stabilnosti

Diplomski rad sadrži: 54 stranice, 5 tablica, 62 slike, 20 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Dr. sc. Želimir Veinović, izv. prof. RGNF

Dr. sc. Helena Vučenović dipl. ing. RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Želimir Veinović, izv. prof. RGNF

Dr. sc. Dario Perković, izv. prof. RGNF

Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Datum obrane: 10. prosinca 2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

STABILITY CALCULATION OF NEAR-SURFACE REPOSITORY FOR LOW AND INTERMEDIATE LEVEL RADIOACTIVE WASTE

Ivana Rožman

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department for mining and geotechnics
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

In this thesis it has been devised constructive solution of new concept of near-surface repository for low and intermediate level radioactive waste (LILW). New concept of repository for LILW improves and optimizes it's function and safety and presents serious improvement comparing to existing worldwide solutions. New concept of repository for LILW includes fundamental and cover layer protection system which provide additional and major protection of soil, water and biota. Stability analysis was made in Geostudio software in SLOPE/W software. Auxiliary drafts was made in AutoCAD software. Drafts helped in modeling in software GeoStudio. Six repository models were analyzed. Three of six were surface type of repositories and three were buried type of repositories. Each type of repository model and it's stability were analyzed with three different slope angle (50°, 45°, 40°). After analysis and interpretation of results, the most acceptable model of LILW repository was selected. That repository model has sufficiently lasting slope stability.

Keywords: repository, low and intermediate level radioactive waste, stability calculation

Thesis contains: 54 pages, 5 tables, 62 figures, 20 references

Original in: Croatian

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

Supervisors: PhD Želimir Veinović, assoc. prof.

PhD Helena Vučenović

Reviewers: PhD Želimir Veinović, assoc. prof

PhD Dario Perković, assoc. prof,

PhD Dubravko Domitrović, asst. Prof.

Defence date: December 10th, 2021., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Želimiru Veinoviću i mentorici dr. sc. Heleni Vučenović koji su svojim znanstvenim i stručnim savjetima oblikovali ideju i pomogli mi u izradi ovog diplomskog rada te potpori tijekom izrade rada.

Također, zahvaljujem se obitelji i Filipu koji su me podupirali tokom mog školovanja i poticali moju želju k ostvarenju viših ciljeva.

Na kraju se želim zahvaliti kolegama koji su mi provedeno vrijeme na fakultetu uljepšali svojim prisustvom i pomogli da to vrijeme smatram najljepšim dijelom svog života.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ODLAGALIŠTE NISKO I SREDNJE RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	2
2.1. RADIOAKTIVNI OTPAD	2
2.2. ODLAGALIŠTA RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	4
2.3. ODLAGANJE NSRAO U SVIJETU	5
3. TEHNIČKO RJEŠENJE	14
3.1. NAČIN ODLAGANJA NSRAO.....	14
3.2. ZAŠTITNI SUSTAV ODLAGALIŠTA	15
4. ANALIZA STABILNOSTI.....	21
4.1. TEORETSKE OSNOVE	21
4.2. MATERIJALI I NAČIN PROVEDBE ANALIZE STABILNOSTI	22
4.3. PRORAČUN STABILNOSTI PPO	24
4.4. PRORAČUN STABILNOSTI UPO.....	35
5. ANALIZA REZULTATA.....	45
6. ZAKLJUČAK.....	52
7. LITERATURA.....	53

POPIS TABLICA

Tablica 1. Popis materijala, parametara i pripadajućih vrijednosti.	23
Tablica 2. Prikaz rezultata proračuna stabilnosti prve i druge faze UPO.....	45
Tablica 3. Prikaz rezultata analize stabilnosti na modelima PPO.	47
Tablica 4. Prikaz rezultata analize stabilnosti na modelima UPO.....	48
Tablica 5. Prikaz rezultata proračuna stabilnosti kosine pri iskopu temeljnog tla s rezultatima proračuna stabilnosti prve i druge faze UPO.....	49

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Dubine odlagališta RAO s obzirom na količinu radioaktivnosti: nisko i srednje radioaktivni otpad – pripovršinska, dugoživući otpad – plitka, visokoradioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo – duboka geološka odlagališta.).....	3
Slika 2.2. Grafički prikaz sastavnica procjene sigurnosti	5
Slika 2.3. Odlagalište El Cabril u Španjolskoj (Bergström et al 2011).....	5
Slika 2.4. 28 betonskih kaseti. Sjeverni plato (crveno zaokruženo) sa 16 kaseti i Južni plato (plavo zaokruženo) sa 14 kaseti (tecnatom.es).	7
Slika 2.5. Punjenje betonske kasete s kockama (enresa.es).....	7
Slika 2.6. Prikaz inženjerskih barijera odlagališta El Cabril, način pakiranja otpada u betonske kocke, način slaganja betonskih kocaka u betonsku kasetu, mobilni krov, kontrolna galerija i pokrovni zaštitni sustav slojeva (enresa.es).....	8
Slika 2.7. Odlagalište l'Aube u Francuskoj (Bergström et al 2011).....	8
Slika 2.8. Način pakiranja otpada u čelične bačve ili betonske/čelične kocke i način slaganja u betonske kasete (andra.fr).....	9
Slika 2.9. Betonske kasete i njihov raspored u odlagalištu (andra.fr).....	9
Slika 2.9. Prikaz presjeka odlagališta l'Aube, betonskih kaseti napunjenih otpadom i zatvorenim betonskim poklopcem, drenažni sloj za odvodnju oborinskih voda te konačno zatrpane kasete s debelim slojem gline (andra.fr).	10
Slika 2.10. Odlagalište Rokkashu (jnfl.co.jp)	11
Slika 2.11. Prvi dio odlagališta s prikazanim dimenzijama odlagališnih jedinica i načinom slaganja otpada. Prikaz debljine pokrovnog sloja i debljine smjese bentonita (Rokkasho, 2021).....	12
Slika 2.12. Drugi dio odlagališta s prikazanim dimenzijama odlagališnih jedinica i načinom slaganja otpada. . Prikaz debljine pokrovnog sloja i debljine smjese bentonita koje su nešto veće nego u prvom dijelu odlagališta (Rokkasho, 2021)	12
Slika 2.13. Prikaz slojeva zaštitnih sustava na tri primjera odlagališta NSRAO (debljine slojeva nisu u točnim omjerima).	13
Slike 3.1. Betonske kocke i način slaganja.	14
Slika 3.2. Dimenzija betonske kasete i pogled na raspored kaseti odozgo.	15
Slika 3.3. Raspored kocaka u jednoj kaseti.....	15
Slika 3.4. Površinska odlagališta s različitim kutom nagiba kosine, prikazana samo kao materijal ispune (smjesa bentonitne gline i pijeska) s kasetama za odlaganje bez zaštitnih slojeva.....	16
Slika 3.5. Ukopana odlagališta s različitim kutom nagiba kosine, prikazana samo kao materijal ispune (smjesa bentonitne gline i pijeska) s kasetama za odlaganje bez zaštitnih slojeva.....	16

Slika 3.5. Prikaz slojeva pokrovnog zaštitnog sustava u presjeku s vrstom materijala i debljinom slojeva.....	17
Slika 3.6. Prikaz slojeva temeljnog zaštitnog sustava u presjeku s vrstom materijala i debljinom slojeva.....	18
Slika 3.7. Presjeci kroz odlagališta u obliku stupova.....	19
Slika 3.8. Izgled površinskog odlagališta u presjeku.	20
Slika 3.9. Izgled ukopanog odlagališta u presjeku.....	20
Slika 4.1. Potrebni parametri za provedbu analize stabilnosti.	22
Slika 4.2. Geomreža Lotrak® 20/20S proizvođača Don&Low i način ugradnje (externalworksindex.co.uk	23
Slika 4.3. GeoStudio, prozor Kelyn Analyses.	25
Slika 4.4. GeoStudio, prozor Unit and Scale.	25
Slika 4.5. GeoStudio, prozor Keyln Materials (lijevo) i legenda materijala (desno).....	26
Slika 4.6. GeoStudio, Entry-Exit	26
Slika 4.7. GeoStudio, prikaz kritične klizne plohe.	27
Slika 4.8. GeoStudio, prikaz prozora Slip Surface i svih kliznih ploha.....	27
Slika 4.9. Nacrt simetričnog presjeka PPO s kutom nagiba 50°	28
Slika 4.10. Druga faza PPO s kutom nagiba 50° i Entry-Exit intervali.	28
Slika 4.11. Kritična klizna ploha s pripadajućim faktorom sigurnosti za odlagalište s kutom nagiba 50° i dva paketa slojeva.....	29
Slika 4.12. Nacrt simetričnog presjeka PPO s kutom nagiba 45°	30
Slika 4.13. Prva faza PPO s kutom nagiba 45° i Entry-Exit intervali.	30
Slika 4.14. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, prva faza PPO s kutom nagiba 45°	31
Slika 4.15. Druga faza PPO s kutom nagiba 45° i Entry-Exit intervali.	31
Slika 4.16. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, druga faza PPO s kutom nagiba 45°	32
Slika 4.17. Nacrt simetričnog presjeka PPO s kutom nagiba 40°	33
Slika 4.18. Prva faza PPO s kutom nagiba 40° i Entry-Exit intervali.	33
Slika 4.19. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, prva faza PPO s kutom nagiba 40°	34
Slika 4.20. Druga faza PPO s kutom nagiba 40° i Entry-Exit intervali.	34
Slika 4.21. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, druga faza PPO s kutom nagiba 40°	35
Slika 4.22. Nacrt simetričnog presjeka UPO s kutom nagiba 50°	36

Slika 4.23. Kritična klizna ploha i faktor sigurnosti za kosinu nagiba 50° pri iskopu temeljnog tla.	36
Slika 4.24. Prva faza UPO s kutom nagiba 50° i Entry-Exit intervali.	37
Slika 4.26. Druga faza UPO s kutom nagiba 50° i Entry-Exit intervali.....	38
Slika 4.27. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, druga faza UPO s kutom nagiba 50°	38
Slika 4.28. Nacrt simetričnog presjeka UPO s kutom nagiba 50°	39
Slika 4.29. Kritična klizna ploha i faktor sigurnosti za kosinu nagiba 45° pri iskopu temeljnog tla.	39
Slika 4.30. Prva faza UPO s kutom nagiba 45° i Entry-Exit intervali.	40
Slika 4.31. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, prva faza UPO s kutom nagiba 45°	40
Slika 4.33. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, druga faza UPO s kutom nagiba 45°	41
Slika 4.34. Kritična klizna ploha i faktor sigurnosti za kosinu nagiba 40° pri iskopu temeljnog tla.	42
Slika 3.35. Prva faza UPO s kutom nagiba 40° i Entry-Exit intervali.	43
Slika 3.36. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, prva faza UPO s kutom nagiba 40°	43
Slika 3.37. Druga faza UPO s kutom nagiba 40° i Entry-Exit intervali.	44
Slika 3.38. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, druga faza UPO s kutom nagiba 40°	44
Slika 5.1. Prikaz rezultata proračuna stabilnosti kosine pri iskopu temeljnog tla.....	49
Slika 5.2. Najpovoljniji model novog koncepta odlagališta NSRAO. Ukopano pripovršinsko odlagalište s kutom nagiba 40°	51

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Značenje	Mjerna jedinica
γ	jedinična težina	kN/m ³
σ	normalno naprezanje	Pa
σ	tlačna čvrstoća	Pa
τ	posmično naprezanje	Pa
τ	posmična čvrstoća	Pa
φ	kut	°
φ	kut unutrašnjeg trenja	°
c	kohezija	Pa
F	sila	N
P	tlak	Pa
l	duljina	m
V	volumen	m ³
A	površina	m ²
Fs	faktor sigurnosti	-
K	koeficijent propusnosti	m/s

1.UVOD

Nuklearna energija danas je važna sastavnica svjetske opskrbe električnom energijom, a o tome govori i činjenica kako trideset i pet država svijeta proizvodi električnu energiju u nuklearnim elektranama (Foronuclear, 2021). Osim u proizvodnji električne energije, ionizirajuće zračenje i radioaktivne tvari imaju i druge primjene poput medicine, poljoprivrede ili industrije. Većina navedenih aktivnosti kao posljedicu ima nastanak radioaktivnog otpada (RAO) koji, ukoliko se njime pravilno ne gospodari, predstavlja opasnost za ljude i okoliš.

Zadatak ovog diplomskog rada je osmisliti, konstruirati i provesti numeričku analizu stabilnosti pripovršinskog odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada (NSRAO). Konstruktivno rješenje odlagališta (njegov dizajn) predstavlja novi koncept – pripovršinsko odlagalište otpada povećane sigurnosti.

Cilj izrade novog koncepta odlagališta NSRAO je poboljšati i optimizirati njegovu funkciju i sigurnost. Kako bi se ti ciljevi ispunili, dizajniran je novi tip odlagališta koji predstavlja ozbiljno unapređenje u odnosu na postojeća rješenja u svijetu. Dosadašnja praksa izgradnje odlagališta NSRAO nije uključivala cjelovit temeljni zaštitni sustav, već samo pokrovni. Institucije i nadležna tijela odobrila su izradu i upotrebu takvih odlagališta, pa se ona koriste i danas. Novi koncept/dizajn odlagališta znači ozbiljno unapređenje po pitanju sigurnosti, kao i napredak po pitanju prihvatljivosti od strane dionika. Temeljni zaštitni sustav slojeva osigurati će dodatnu i konkretnu zaštitu tla, vode i biote, kroz dugi vremenski period.

Postupak proračuna stabilnosti proveden je u programskom paketu GeoStudio u programu SLOPE/W koji služi za analizu pokosa od tla i stijene. Konstrukcija i dimenzioniranje modela napravljena je u AutoCAD softveru. U proračun je uključeno šest modela odlagališta. Tri modela površinskog pripovršinskog odlagališta s tri različita kuta nagiba i tri modela ukopanog pripovršinskog odlagališta s tri različita kuta nagiba. Proračun svakog modela izveden je u dvije faze. Prva faza sa samo jednim paketom slojeva i druga faza s oba paketa slojeva. Nakon analize rezultata, odabran je najprihvatljiviji model odlagališta NSRAO. Numeričkom analizom predstavljenom u radu dokazano je kako novi koncept odlagališta predstavlja objekt s dovoljnom trajnom stabilnošću pokosa.

2. ODLAGALIŠTE NISKO I SREDNJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

Osnovni cilj odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada (NSRAO) je osigurati dugotrajnu izolaciju radionuklida na način da se spriječi njihova migracija u okoliš do trenutka kada njihova aktivnost ne padne na zanemarivo malu razinu (Radioaktivni otpad, 2021). Kako bi se osigurala dugotrajna izolacija, potrebno je uzeti u obzir lokaciju odlagališta zadovoljavajućih uvjeta i izgradnju odlagališta sa sigurnosnim tehničkim rješenjem temeljenom na sustavu višestrukih inženjerskih barijera.

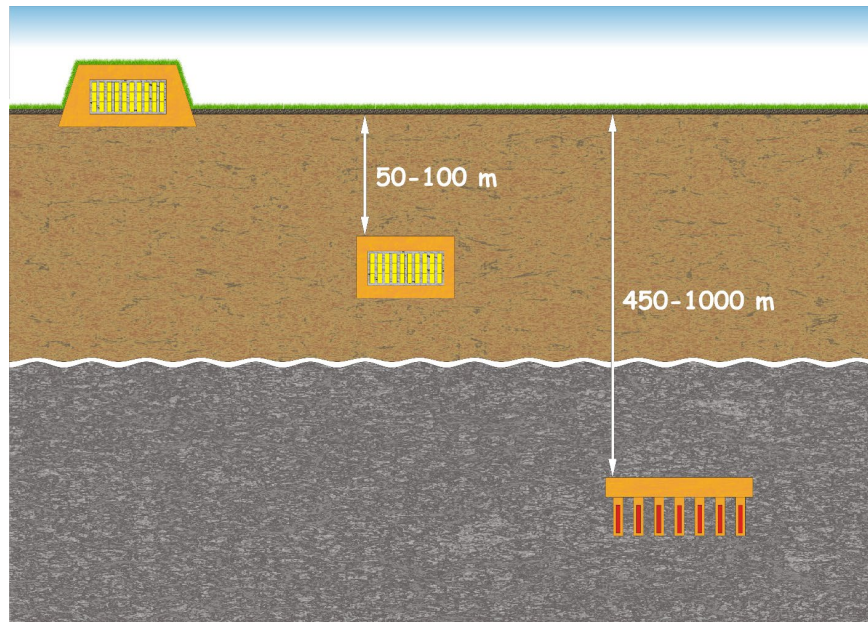
2.1. RADIOAKTIVNI OTPAD

Međunarodna agencija za atomsku energiju (International Atomic Energy Agency- IAEA) (IAEA, 2009), radioaktivni otpad (RAO) definira kao materijal koji sadrži ili je onečišćen radionuklidima u takvim koncentracijama da je nivo radioaktivnosti veći od minimalne dozvoljene i za koji ne postoji uporaba. Radioaktivni otpad proizlazi iz proizvodnje električne energije u nuklearnim elektranama, iz ciklusa nuklearnog goriva i iz aktivnosti u kojima se koristi radioaktivni materijal. Također proizlazi iz aktivnosti i procesa u kojima se radioaktivni materijal prirodnog podrijetla koncentrira u otpadnom materijalu. Radioaktivni otpad može nastati u širokom rasponu aktivnosti, od djelatnosti u bolnicama do nuklearnih elektrana, rudnika ili industrijskim postrojenjima (IAEA, 2009).

Prema klasifikaciji IAEA-e postoji šest osnovnih vrsta radioaktivnog otpada; IRAO- izuzeti radioaktivni otpad (EW – exempt waste); VKRAO - vrlo kratkoživi radioaktivni otpad (VSLW – very short lived waste); VNRAO - vrlo nisko radioaktivni otpad (VLLW very low level waste); NRAO – nisko radioaktivni otpad (LLW – low level waste); SRAO - srednje radioaktivni otpad - (ILW – intermediate level waste); VRAO - visoko radioaktivni otpad - (HLW – high level waste) (IAEA, 2009).

IRAO je otpad koji ispunjava kriterije za izuzimanje ili otpuštanje iz regulatorne kontrole zaštite od zračenja. VKRAO je otpad koji se može skladištiti do nekoliko godina tijekom raspada radionuklida, a nakon toga se otpušta iz regulatorne kontrole. VNRAO je otpad koji ne ispunjava nužno uvjete VKRAO-a, ali koji ne zahtijeva visoku razinu izolacije. VNRAO je prikladan za odlaganje u pripovršinska odlagališta. NRAO je otpad koji je iznad razine izuzimanja, ali s ograničenih količinama dugoživućih radionuklida. NRAO zahtijeva jaču izolaciju i zbrinjavanje u razdoblju do nekoliko stotina godina. NRAO je prikladan za odlaganje u pripovršinskim odlagalištima. SRAO sadrži i dugoživuće radionuklide, pa

zahtijeva veći stupanj kontrole i izolacije. SRAO zahtijeva odlaganje u plitkim odlagalištima, nekoliko desetaka metara do nekoliko stotina metara dubine. VRAO 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. VRAO se odlaže u duboke, stabilne geološke formacije, na dubinama od nekoliko stotina metara ili više. Na slici 2.1. prikazane su dubine odlagališta RAO.



Slika 2.1. Dubine odlagališta RAO s obzirom na količinu radioaktivnosti: nisko i srednje radioaktivni otpad – pripovršinska, dugoživući otpad – plitka, visokoradioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo – duboka geološka odlagališta.).

Dugogodišnja praksa zbrinjavanja radioaktivnog otpada u svijetu, rezultirala je međunarodnim dogovorom koji naglašava dva osnovna pristupa odlaganja RAO; površinsko ili pripovršinsko odlaganje u posebno izgrađene odlagališne jedinice, na površini ili plitko ukopane za NSRAO; duboka geološka odlagališta u geološko prikladnim formacijama na dubinama većim od 500 m za VRAO. Kako bi se spriječilo širenje radioaktivnosti, odlagališta moraju biti izgrađena na način da se usklade geološke i inženjerske barijere (IAEA, 2011).

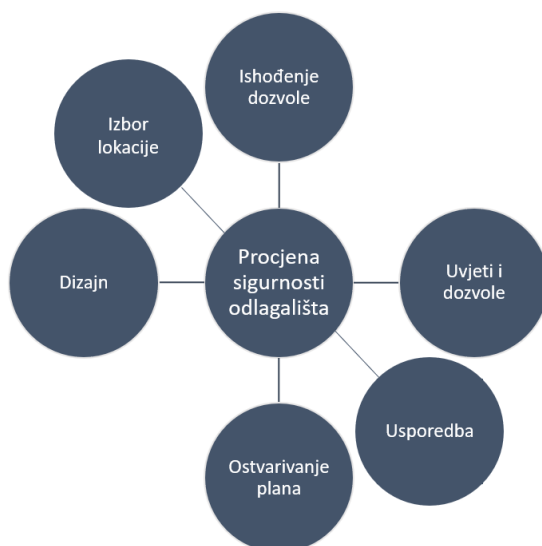
Pripovršinska odlagališta mogu biti napravljena na površini terena i plitko ukopana (do 10 metara). Odlagališne jedinice u takvom tipu odlagališta sadrže betonske kasete u koje se odlaže otpad. Takav tip odlagališta koristi se za odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada (NSRAO).

2.2. ODLAGALIŠTA RADIOAKTIVNOG OTPADA

RAO se odlaže u odlagališta trajno do trenutka kad se većina radionuklida iz otpada raspala do razine propisane regulativom, obično do razine bliske pozadinskoj radijaciji na lokaciji. Međutim, u svrhu dodatne sigurnosti i jednostavnijeg prihvaćanja odlagališta na lokalnoj razini, redovito se planira institucionalni nadzor odlagališta dok je aktivnost otpada najveća.

Kako bi se opasnost od širenja radionuklida izvan odlagališta svela na najmanju razinu, međunarodni sigurnosni standardi pružaju podršku državama u ispunjavanju njihovih obveza prema općim načelima međunarodnog prava, poput onih koja se odnose na zaštitu ljudi i okoliša. Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) je s ciljem osiguranja i zaštite ljudi i okoliša od učinka ionizirajućeg zračenja utvrdila sigurnosna načela i mjere za kontrolu zračenja ljudi i ispuštanje radioaktivnih materijala u okoliš, kako bi ograničila događaje koji bi mogli dovesti do gubitka kontrole nad nuklearnim aktivnostima, uključujući gospodarenje radioaktivnim otpadom (IAEA, 2011). IAEA je u Načelima gospodarenja radioaktivnim otpadom utvrdila devet temeljnih načela koja moraju biti ispoštovana u okviru gospodarenja radioaktivnim otpadom svake države.

Dugoročne procjene sigurnosti odlagališta RAO u velikoj se mjeri oslanjaju na analize na temelju matematičkih modela i korištenja velike količine podataka, uključujući i hidrogeološke. Procjene sigurnosti sadrže opise sustava i pratećih baza podataka, analize scenarija, analize posljedica, analize osjetljivosti i nesigurnosti i usporedbu procjene izvedbe s institucionalnim zahtjevima. Kako bi se ocijenila izvedba odlagališta, mora se procijeniti buduće stanje inženjerskih barijera i prirodnih uvjeta koji uzimaju u obzir sve relevantne značajke, događaje i procese (Features, Events and Processes- FEP). Procjena sigurnosti je kontinuirani alat tijekom čitavog životnog vijeka odlagališta, od njegovog planiranja i studije pa sve do zatvaranja (Slika 2.2.) (IAEA, 2011).



Slika 2.2. Grafički prikaz sastavnica procjene sigurnosti

2.3. ODLAGANJE NSRAO U SVIJETU

Primjeri postojećih pripovršinskih površinskih odlagališta u svijetu su El Cabril u Španjolskoj i l'Aube u Francuskoj, a od plitkog ukopanog Rokkasho u Japanu.

Odlagalište niskoradioaktivnog otpada El Cabril u Španjolskoj (Slika 2.3.), izgrađeno je na prostoru nekadašnjeg rudnika uranija. Lokacija odlagališta povoljna je zbog male gustoće naseljenosti i aridne klime što je važan čimbenik sigurnosti u odlaganju radioaktivnog otpada (Bergström et al., 2011).



Slika 2.3. Odlagalište El Cabril u Španjolskoj (Bergström et al., 2011)

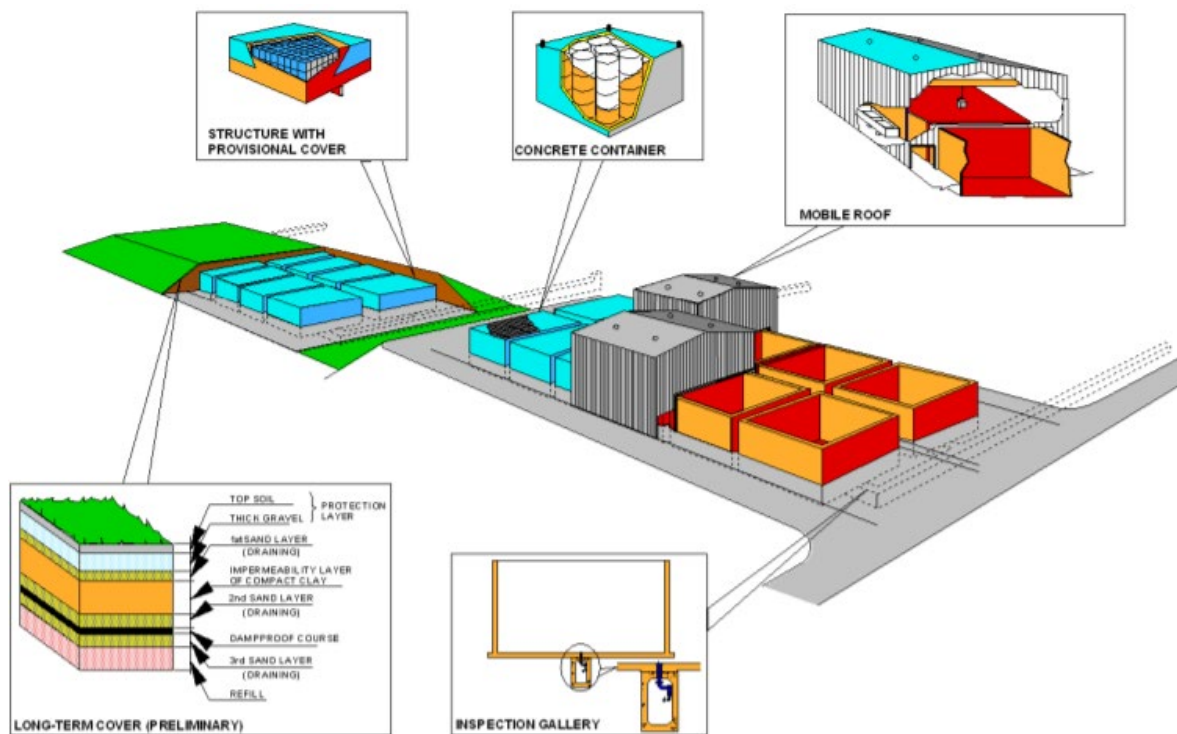
Kako bi se postigla potpuna izolacija radioaktivnog otpada, odlagalište El Cabril projektirano je na način da se zaštitni sustav sastoji od tri inženjerske barijere. Prva barijera je kondicionirani otpad i spremnik, druga barijera je inženjerska struktura u kojoj se nalazi otpad i treća barijera je prirodni teren/tlo na kojoj se odlagalište nalazi. Inženjersku strukturu (drugu barijeru) čini 28 betonskih kasete iznad površine terena (Slika 2.4.). Dimenzija jedne betonske kasete je 22,5 m x 18 m x 9 m (Slika 2.4. i Slika 2.5.). Zidovi i baze betonskih kasete napravljene su od betona debljine 0.5 m. Najvažniji dio betonske kasete je njezina baza, a ona je prekrivena nepropusnim slojem poliuretana i slojem poroznog betona debljine 10-20 cm. Drenažni sustav kontrolira se pomoću tzv. „kontrolnih galerija“ koje se nalaze ispod betonskih svodova (Slika 2.6.). Kako bi se spremišta zaštitila od vanjskih utjecaja tijekom odlaganja otpada, iznad njih se nalaze pomične metalne konstrukcije (Slika 2.6.). Nakon završetka odlaganja, izgradit će se višeslojni pokrov koji će služiti za preusmjeravanje kišnice i za pružanje dugotrajne zaštite spremišta, kao i za osiguranje njihove trajnosti. Ukupni kapacitet odlagališta El Cabril je 37,000 m³. Otpad koji se odlaže pakiran je najčešće u čelične bačve volumena 200 l i/ili 1.3 m³ metalne kutije (1,3 m³) koje se odlažu u veća betonska spremišta (2,2 x 2,2 x 2,2 m) formirajući završno pakiranje od 11 m³. Kada se betonska spremišta napune otpadom, njihov međuprostor se popuni mortom ili cementom promiješanim s institucionalnim tekućim otpadom ili kontaminiranim pepelom. Napunjena spremišta se tada presele u odlagališne jedinice (kasete). Jedna odlagališna jedinica (kasete) može prihvatiti 320 betonskih spremišta (Slika 2.5.) čiji se međuprostor popunjava šljunkom i zatvara završnom pločom. Nakon popunjavanja odlagališta, kasete se pokrivaju slojevima zemlje i gline kako bi se postigla izolacija otpada od biosfere. Završni sloj se sastoji od pokrovnog tla, debelog sloja šljunka, prvog sloja pijeska, nepropusnog sloja (glina), drugog sloja pijeska, sloja otpornog na vlagu i trećeg sloja pijeska (Slika 2.6.) (Bergström et al., 2011).



Slika 2.4. 28 betonskih kaset. Sjeverni plato (crveno zaokruženo) sa 16 kaseti i Južni plato (plavo zaokruženo) sa 14 kaseti (TECNATOM, Nuclear sector).



Slika 2.5. Punjenje betonske kasete s kockama (Enresa, El Cabril Disposal Facility)



Slika 2.6. Prikaz inženjerskih barijera odlagališta El Cabril, način pakiranja otpada u betonske kocke, način slaganja betonskih kocaka u betonsku kasetu, mobilni krov, kontrolna galerija i pokrovni zaštitni sustav slojeva (Enresa, El Cabril Disposal Facility).

Odlagalište Centre de l'Aube u Francuskoj (Slika 2.7.) služi za zabrinjavanje NSRAO iz nuklearnih elektrana, bolnica i sveučilišnih laboratorija (Bergström et al., 2011).



Slika 2.7. Odlagalište l'Aube u Francuskoj (Bergström et al., 2011).

Odlagalište je izgrađeno na terenu sedimentnog sastava, a podloga se sastoji od sloja pijeska i gline niske propusnosti. Sloj pijeska omogućava drenažu oborinskih voda prema rijeci

Noues d'Amance koja se nalazi nizvodno od odlagališta. Sloj gline čini prirodnu barijeru koja onemogućava propuštanje radioaktivnih elemenata u podzemnu vodu i na taj način onemogućava njihovo raspršivanje u okoliš. Kako bi odlagalište bilo sigurno za okoliš, vodilo se računa o nekoliko faktora, o načinu pakiranja otpada, konstrukciji jedinica u koje se otpad odlaže i geologiji područja koja je dugoročna prirodna barijera. Otpad je pakiran u čelične bačve i betonske ili čelične kutije, a ugrađen je s betonskim matriksom (Slika 2.8.). Odlagalište može primiti 1,000,000 m³ otpada. Otpad se odlaže u ojačane betonske kasete čiji su zidovi 30 cm debljine (Slika 2.9.). Jedinice unutar kasete su dimenzije 5 x 5 x 8 m. Cijelo odlagalište ima oko 400 kasete i ovisno o tipu otpada, one se zapunjavaju šljunkom ili betonom, zatvaraju s betonskom pločom i zapečaće nepropusnim premazom. Svaka kasete može primiti 2,000-3,500 m³ otpada. Na kraju se sve odlagališne jedinice prekrivaju slojem gline od nekoliko metara kako bi se osigurala dugoročna izolacija otpada (Slika 2.9.) (Bergström et al., 2011).



Slika 2.8. Način pakiranja otpada u čelične bačve ili betonske/čelične kocke i način slaganja u betonske kasete (Andra, Nuclear waste in France).



Slika 2.9. Betonske kasete i njihov raspored u odlagalištu (Andra, Nuclear waste in France)



Slika 2.9. Prikaz presjeka odlagališta l'Aube, betonskih kaset napunjenih odpadom i zatvorenim betonskim poklopcem, drenažni sloj za odvodnju oborinskih voda te konačno zatrpane kasete s debelim slojem gline (Andra, Nuclear waste in France).

Odlagalište Rokkasho u Japanu namijenjeno je za odlaganje niskoradioaktivnog otpada (Slika 2.10.).



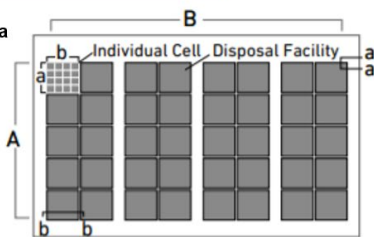
Slika 2.10. Odlagalište Rokkasho (Japan nuclear fuel Limited)

Područje na kojem se nalazi odlagalište je brežuljkasti teren, ali samo odlagalište smješteno je na marinskoj terasi (30-60 m.n.m.). Temeljne stijene su terciarni pješčenjaci i tuf. Kvartarne naslage (pijesak, vulkanska prašina, riječni nanosi) istaložene su na marinskim terasama u debljini od 3 metra. Podzemna voda je visoka, nalazi se 2 metra ispod razine tla, a na godišnjoj razini oscilira do 2 metra, ovisno o količini padalina. Zbog nepovoljnih uvjeta, sigurnost je osigurana višestrukim barijerama. Odlagališne jedinice napravljene su u stijenama tercijarne starosti. Odlaganje se odvija na dva mjesta, a svako dio ima kapacitet od 40,000 m³. U prvom dijelu popunjava se 40 jedinica (24 x 24 x 24 m) koje su napravljene od ojačanog betona (Slika 2.11.). Svaka jedinica je odijeljena na još 16 odlagališnih jedinica (6 x 6 x 6 m), a svaka ta jedinica može primiti 320 bačvi s otpadom (Slika 2.11.). Drugi dio je drugačiji, on se sastoji od 16 jedinica (36 x 37 x 37 m) koje su podijeljene na 36 odlagališne jedinice (6 x 6 x 7 m) (Slika 2.12.). Svaka odlagališna jedinica prima 320 bačvi s otpadom koji je pretežito metal ili plastika. Unutrašnjost odlagališta obložena je poroznim betonom koji drenira vodu prije nego li ona dođe u kontakt s otpadom. Kada se odlagališna jedinica napuni bačvama s otpadom, poklopi se s privremenim poklopcem i međuprostor se zapuni žbukom. Kontrolni tuneli nalaze se oko odlagališta radi prikupljanja i praćenja vode (Slika 2.11. i 2.12.). Kako bi što manje vode ušlo u odlagalište, tijekom odlaganja se iznad odlagališne jedinice povuče pomični krov. Kada se odlagalište napuni otpadom, betonske jame se zatrpaju smjesom bentonitne gline i pijeska. Završni sloj je zbijeno tlo koje je manje propusnosti od okolnog tla (Bergström et al., 2011).

Odlagalište broj 1

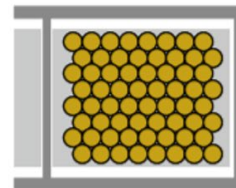
• Cjelokupna struktura

- A: 132m
- B: 231m
- a: 24m
- b: 24m

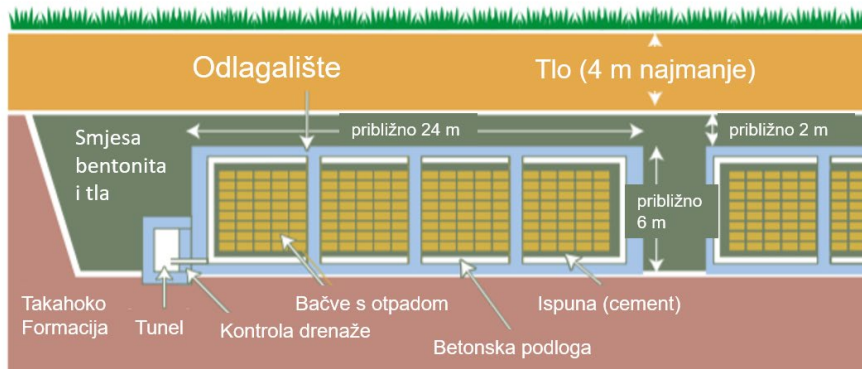


Poprečni presjek jedinice

Bačve su poslagane u 5 redova, po 8 komada u svakom redu



Poprečni presjek odlagališta

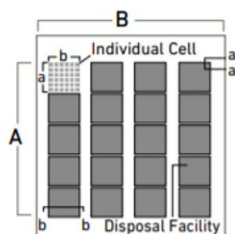


Slika 2.11. Prvi dio odlagališta s prikazanim dimenzijama odlagališnih jedinica i načinom slaganja otpada. Prikaz debljine pokrovnog sloja i debljine smjese bentonita (Rokkasho Energy Human Future)

Odlagalište broj 2

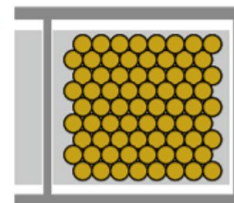
• Cjelokupna struktura

- A: 152m
- B: 191m
- a: 36m
- b: 37m

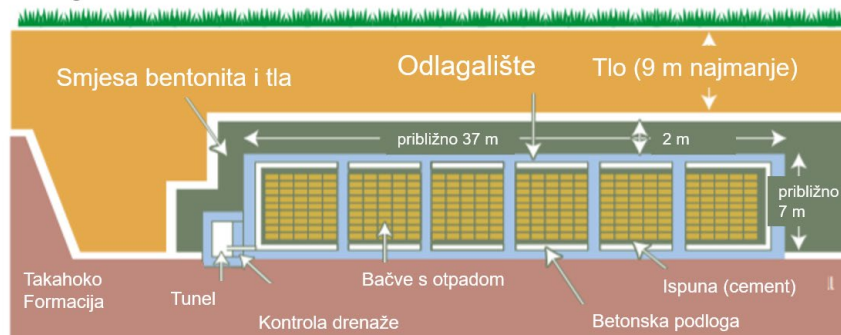


Poprečni presjek jedinice

Bačve su poslagane u 6 redova po 8 komada

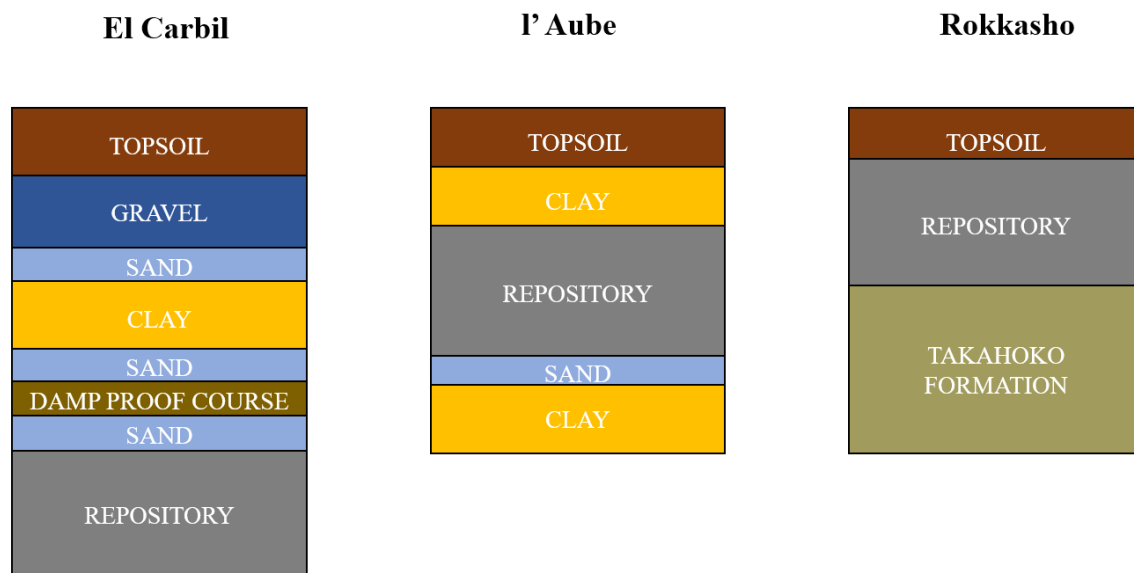


Poprečni presjek odlagališta



Slika 2.12. Drugi dio odlagališta s prikazanim dimenzijama odlagališnih jedinica i načinom slaganja otpada. Prikaz debljine pokrovnog sloja i debljine smjese bentonita koje su nešto veće nego u prvom dijelu odlagališta (Rokkasho Energy Human Future)

Na slici 2.13. prikazani su svi slojevi zaštitnog sustava u stupu svakog odlagališta kako bi se mogli lakše usporediti s novim konceptom odlagališta i njegovim zaštitnim sustavom slojeva.



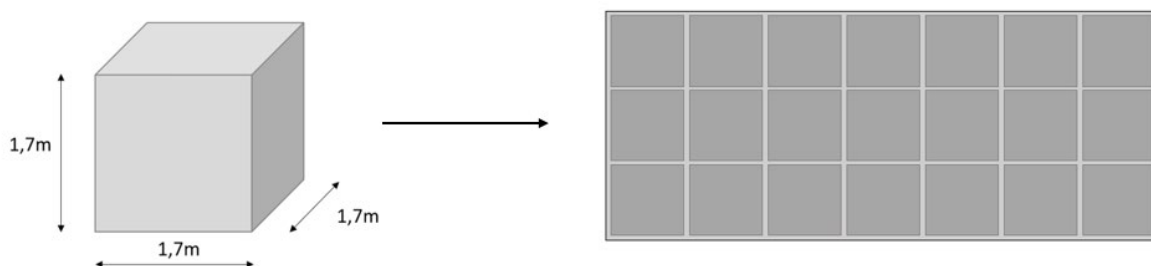
Slika 2.13. Prikaz slojeva zaštitnih sustava na tri primjera odlagališta NSRAO (debljine slojeva nisu u točnim omjerima).

3. TEHNIČKO RJEŠENJE

Kako bi se odabrao najprihvatljiviji model odlagališta NSRAO, analizirana su dva tipa pripovršinskog odlagališta. Prvi model je „površinsko pripovršinsko“ odlagalište (PPO), a drugi model je ukopano pripovršinsko odlagalište (UPO). Glavna razlika je što se u PPO tipu odlagališta betonske kasete, tj. odlagališne jedinice, nalaze na površini terena, dok su kod UPO modela betonske kasete smještene u ukopan teren. Oba tipa odlagališta imaju četiri inženjerske barijere. Prva inženjerska barijera je kondicionirani otpad i spremnik, druga je betonska kasete, treća su zaštitni sustavi odlagališta i četvrta barijera je temeljno tlo.

3.1. NAČIN ODLAGANJA NSRAO

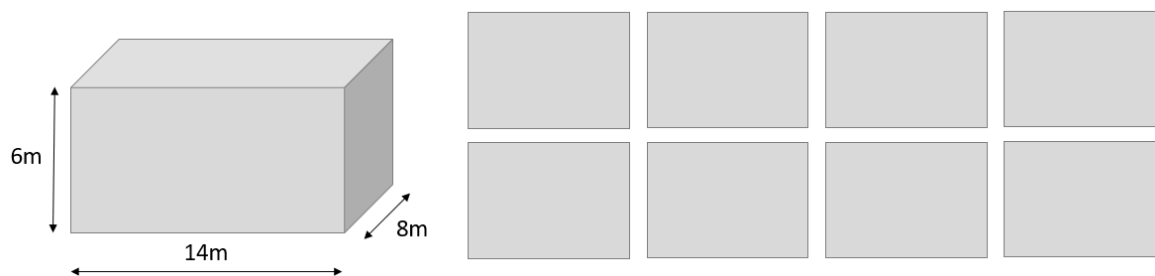
Odlagalište je dizajnirano na način da se NSRAO, koji se na odlagalište doprema u odgovarajućim čeličnim bačvama, skladišti u betonske kocke dimenzija 1,7m x 1,7m x 1,7m (Slika 3.1.).



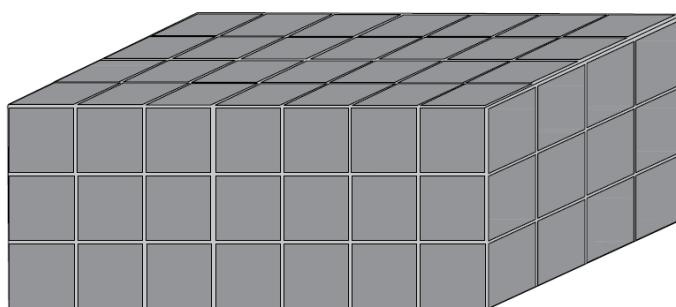
Slika 3.1. Betonske kocke i način slaganja.

Kada se kocka napuni, zalijeva se betonom i dodatno zatvara betonskim poklopcem. U jednoj betonskoj kaseti može se odložiti ukupno 84 kocaka. Kada se betonska kasete popuni kockama, njihov međuprostor se popunjava betonom.

Jedna betonska kasete dimenzija je 6m x 8m x 14m (Slika 3.2.). Po širini se može odložiti 7 kocaka, po dubini 4 kocke i po visini 3 kocke (Slika 3.3.). Betonske kasete izrađene su od ojačanog, armiranog betona sa zidovima debljine 10 cm, a dnom debljine 12,5 cm. U odlagalištu se nalazi ukupno osam betonskih kasete, a ukupni volumen odlagališnog prostora odlagališta je 5376 m³. Kasete su prenosive dizalicom.



Slika 3.2. Dimenzija betonske kasete i pogled na raspored kasete odozgo.



Slika 3.3. Raspored kocaka u jednoj kaseti.

Kada se zadnja kasete u odlagalištu napuni i zatvori, slijedi zatrpavanje kasete. Materijal koji se koristi je smjesa bentonitne gline i pijeska (bentonit-pijesak).

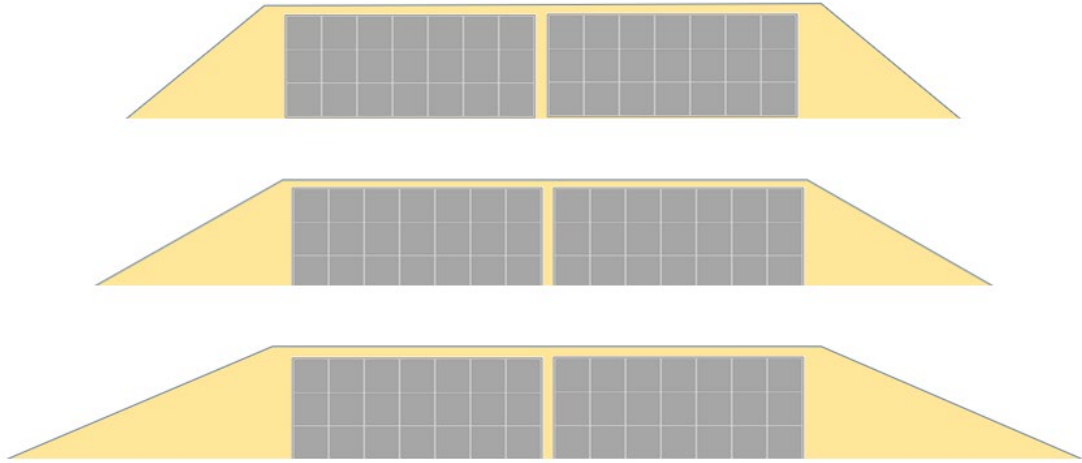
3.2. ZAŠTITNI SUSTAV ODLAGALIŠTA

Budući da je jedan od ciljeva novog koncepta odlagališta NSRAO poboljšati i optimizirati njegovu funkciju i sigurnost, glavnu ulogu u tome imaju zaštitni sustavi odlagališta. Novi koncept predstavlja ozbiljno unaprjeđenje u odnosu na dosadašnja rješenja odlagališta NSRAO jer novi koncept sadrži cjelovit temeljni i pokrovni zaštitni sustav slojeva.

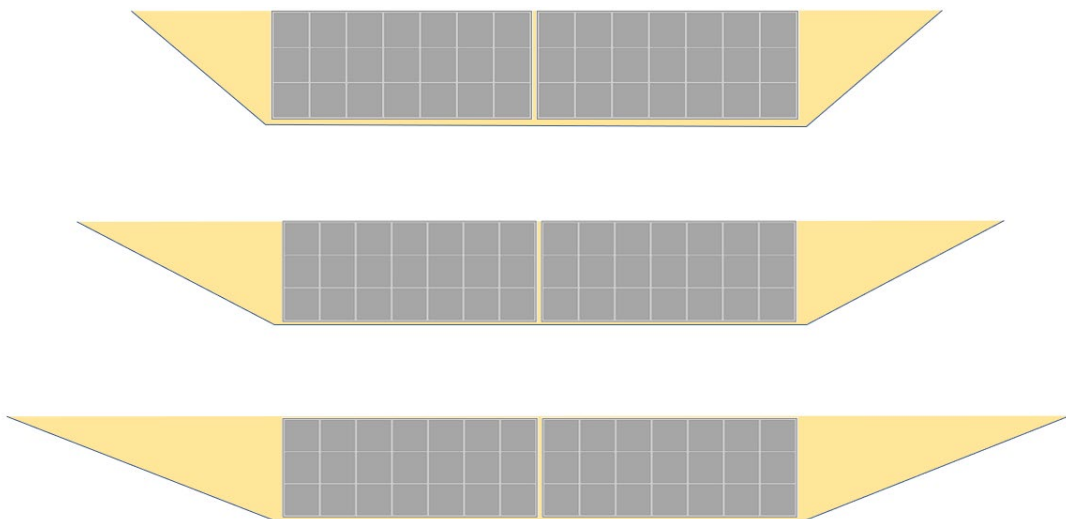
Prema Sharma i dr. smjesa bentonit-pijesak ključan je materijal za sustav odlagališta i upravlja cjelokupnim ponašanjem sustava barijera odlagališta, a smjesa se može smatrati i puferskim materijalom.

Smjesa bentonit-pijesak ugrađuje se pod određenim kutom nagiba, a određen kut nagiba pratiti će i zaštitni sustavi odlagališta. Kut nagiba odlagališta bitan je faktor u proračunu stabilnosti i bitno je odrediti onaj najpovoljniji. Najpovoljniji nagib kosina odlagališta biti

će određen nakon proračuna stabilnosti. Kutovi koji će se promatrati su 50° , 45° i 40° , kako za površinsko (Slika 3.4.) tako i za ukopano odlagalište (Slika 3.5.).



Slika 3.4. Površinska odlagališta s različitim kutom nagiba kosine, prikazana samo kao materijal ispune (smjesa bentonitne gline i pijeska) s kasetama za odlaganje bez zaštitnih slojeva.



Slika 3.5. Ukopana odlagališta s različitim kutom nagiba kosine, prikazana samo kao materijal ispune (smjesa bentonitne gline i pijeska) s kasetama za odlaganje bez zaštitnih slojeva.

Zaštitni sustav odlagališta sastoji se od pokrovnog zaštitnog sustava (Slika 3.5.) i temeljnog zaštitnog sustava (Slika 3.6.). Oba sustava sadrže iste materijale u istim debljinama, ali u nešto drugačijem rasporedu.

Pokrovni zaštitni sustav sastoji se od jednog sloja glina, dva sloja pijeska i dva sloja šljunka. Gledajući odozdo prema gore slijed slojeva je: pijesak, šljunak, glina, šljunak, pijesak i tlo (rekultivirajući sloj) (Slika 3.5.).

Temeljni zaštitni sustav sastoji se od dva sloja gline, dva sloja pijeska i dva sloja šljunka. Gledajući odozdo prema gore slijed slojeva je: glina, šljunak, pijesak, glina, šljunak, pijesak (Slika 3.6.).

Pokrovni zaštitni sustav slojeva



Slika 3.5. Prikaz slojeva pokrovnog zaštitnog sustava u presjeku s vrstom materijala i debljinom slojeva.

Temeljni zaštitni sustav slojeva



Slika 3.6. Prikaz slojeva temeljnog zaštitnog sustava u presjeku s vrstom materijala i debljinom slojeva.

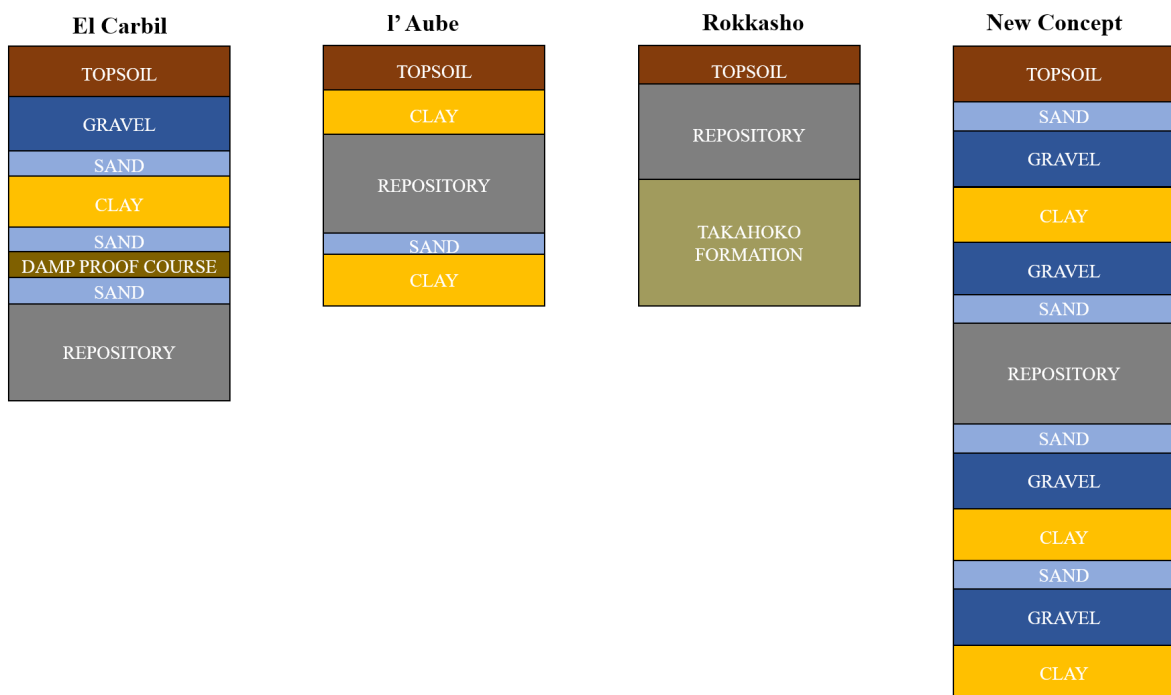
Brtvene barijere su slojevi gline debljine 50 cm koji se ugrađuju u slojevima debljine oko 15-20 cm. Zbijanjem gline trebao bi se postići koeficijent propusnosti od najmanje 10^{-9} m/s. Glinoviti materijal koji se ugrađuje u brtveni sloj mora imati slijedeća svojstva: granicu tečenja između 25 i 30%, indeks plastičnosti veći od 15%, sadržavati preko 50% čestica promjera većeg od 0,074 mm i sadržavati preko 25% čestica promjera manjeg od 0,002 mm.

Temeljni drenažni sustav sastoji se od tri osnovna dijela: drenažnog sloja, filtarskog sloja i perforirane drenažne cijevi (Veinović i Kvasnička, 2007) .

Drenažni slojevi u odlagalištu su sloj za dreniranje oborinske vode, filtrata i kontrolni sloj u temeljnom zaštitnom sustavu. Svaki drenažni sustav sastoji se od drenažnog sloja, filtarskog sloja i drenažne cijevi. Drenažni slojevi su slojevi šljunka debljine 30 cm, a koeficijent propusnosti šljunka mora biti veća od 1×10^{-4} m/s. Debljina drenažnog sloja u prostoru drenažnih cijevi treba biti veća proporcionalno promjeru cijevi. Za kretanje tekućine prema drenažnim cijevima, drenažni slojevi se moraju ugraditi pod nagibom od najmanje 2%. Filtarski slojevi su slojevi finog pijeska debljine 20 cm. Vrijednost koeficijenta propusnosti pijeska treba biti od 10^{-5} do 10^{-3} m/s, koji će osigurati istovremeno dovoljnu propusnost i sposobnost zadržavanja čestica.

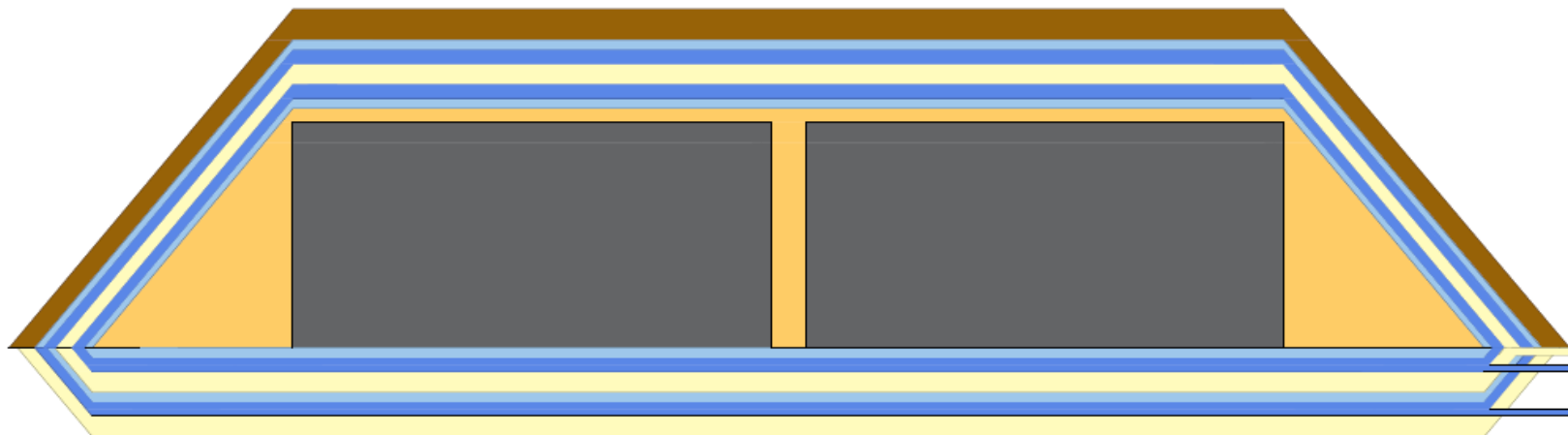
Rekultivirajući sloj je zadnji sloj u pokrovnom zaštitnom sustavu i zadaća mu je ublažiti vizualno oštećenje krajolika i zaštititi sloj za dreniranje oborinskih voda u slučaju niskih temperatura zraka (Veinović i Kvasnička, 2007). Budući da se u prosjeku tlo može zamrznuti između 0,5 i 1,5 metara dubine, rekultivirajući sloj u modelima je debljine 80 cm. U modelima je rekultivirajućem sloju dodana vrijednost parametara temeljnog tla, jer je poželjno da se pokrovno tlo pri izgradnji odlagališta odloži na stranu i ponovno upotrijebi za ugradnju.

Usporedba presjeka kroz odlagališta (u obliku stupova) El Cabril, l'Aube i Rokkasho s novim konceptom odlagališta NSRAO prikazana je na slici 3.7.

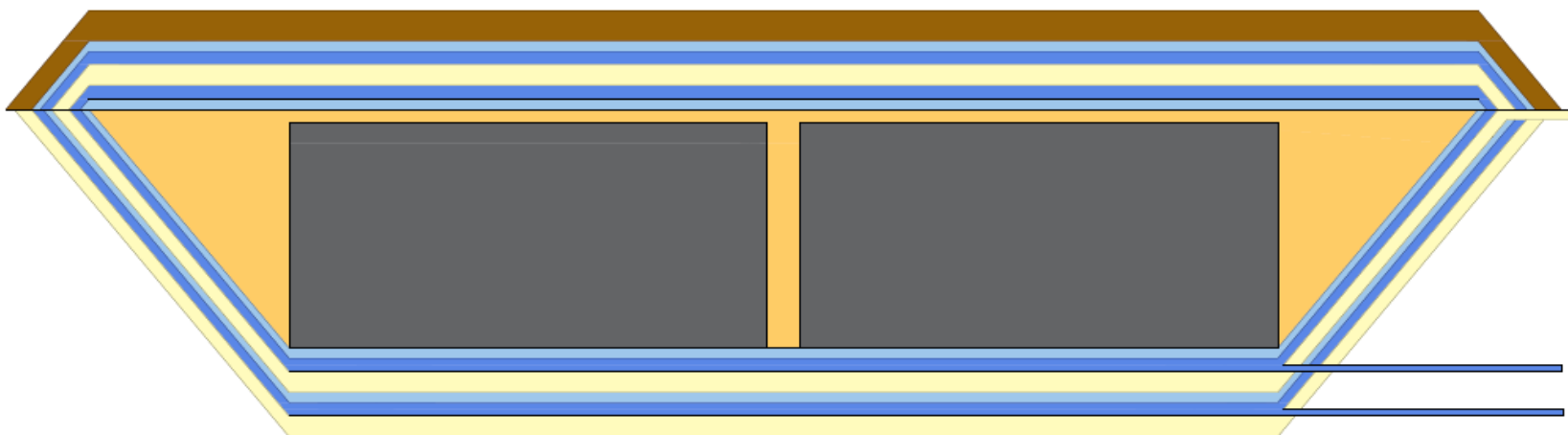


Slika 3.7. Presjeci kroz odlagališta u obliku stupova.

Konačni izgled površinskog odlagališta, sa svim zaštitnim sustavima prikazan je slici 3.8., a konačni izgled ukopanog odlagališta prikazan je na slici 3.9.



Slika 3.8. Izgled površinskog odlagališta u presjeku.



Slika 3.9. Izgled ukopanog odlagališta u presjeku.

4. ANALIZA STABILNOSTI

Proračun stabilnosti i izrada modela provedena je u programskom paketu GeoStudio u programu SLOPE/W koji služi za analizu pokosa od tla i stijene. Koristi se metoda granične ravnoteže, 2D analiza (Morgernstern-Price metoda).

4.1. TEORETSKE OSNOVE

Metode granične ravnoteže baziraju se na mehanici potpuno krutih tijela uz uvođenje više ili manje proizvoljnih pretpostavki kojima se uklanja statička neodređenost sustava (Albataineh, 2006). Ova metoda služi za analiziranje stabilnosti stvarnog ili zamišljenog kliznog tijela koje se nalazi u kontaktu s okolinom preko klizne plohe, pri čemu se klizno tijelo razdjeli na niz lamela na čijim se osnovicama računa veličina posmičnog i normalnog naprezanja kako bi se izračunalo ukupno naprezanje duž klizne plohe, dok se statička ravnoteža lamela postiže zanemarivanjem djelovanja međulamelarnih sila kao i momenata (Albataineh, 2006).

Metoda Morgensterna i Pricea je jedna od detaljnijih i točnijih metoda prilikom proračunavanja stabilnosti kosina i uspješno je implementirana u računalne programe (Duncan & Wright, 2005). Točnost ove metode se temelji na postojanosti sila između susjednih lamela i zadovoljava sve tri jednadžbe ravnoteže: jednadžbe sila u horizontalnome i vertikalnome smjeru, kao i jednadžbu ukupnoga momenta sile, te na taj način najrealnije opisuje stvarno stanje (Duncan i Wright, 2005).

Prema Szavits-Nossan, stupanj stabilnosti, u metodama se granične ravnoteže utvrđuje usporedbom posmične čvrstoće i posmičnog naprezanja duž klizne plohe. Za mjeru stupnja stabilnosti koristi se faktor sigurnosti (F_s), koji se izrazi se kao omjer posmičnog naprezanja koji se može ostvariti i onoga koji se stvarno događa u promatranoj potencijalnoj kliznoj plohi, primjenjujući Mohr-Coulombov zakon:

$$(4-1) \quad F_s = \tau_f / \tau = (\sigma \operatorname{tg} \varphi + c) / \tau$$

Iz ove definicije faktora sigurnosti slijedi da na kliznoj plohi nije došlo do sloma tla, ako je $F > 1$, a slom nastupa za slučaj $F = 1$. Iz analiza ponekad može slijediti i vrijednost $0 \leq F < 1$ ali taj rezultat, zbog činjenice da je najveća moguća vrijednost posmičnog naprezanja upravo posmična čvrstoća, ukazuje da na promatranoj lameli nisu uspostavljeni uvjeti ravnotežne. Dakle, općenito se može pisati:

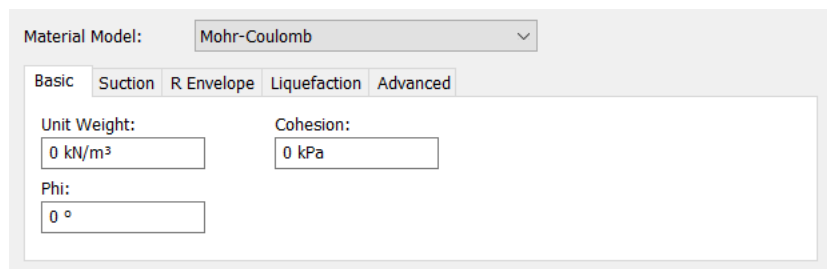
$F > 1$ – stabilno stanje

$F = 1$ – stanje sloma, nestabilno stanje

$F < 1$ – neravnotežno stanje

4.2. MATERIJALI I NAČIN PROVEDBE ANALIZE STABILNOSTI

Materijali i vrijednosti njihovih parametara jednaki su za oba tipa odlagališta. Parametri koji su bili potrebni za računanje u SLOPE/W, 2D analizi i metodi Morgensterna i Pricea su jedinična težina (kN/m^3), kohezija (kPa) i unutarnji kut trenja ($^\circ$) (Slika 4.1.).



The image shows a software interface for defining material properties. At the top, a dropdown menu is set to 'Mohr-Coulomb'. Below it, there are five tabs: 'Basic', 'Suction', 'R Envelope', 'Liquefaction', and 'Advanced'. The 'Basic' tab is active, displaying three input fields: 'Unit Weight' with a value of '0 kN/m³', 'Cohesion' with a value of '0 kPa', and 'Phi' with a value of '0 °'.

Slika 4.1. Potrebni parametri za provedbu analize stabilnosti.

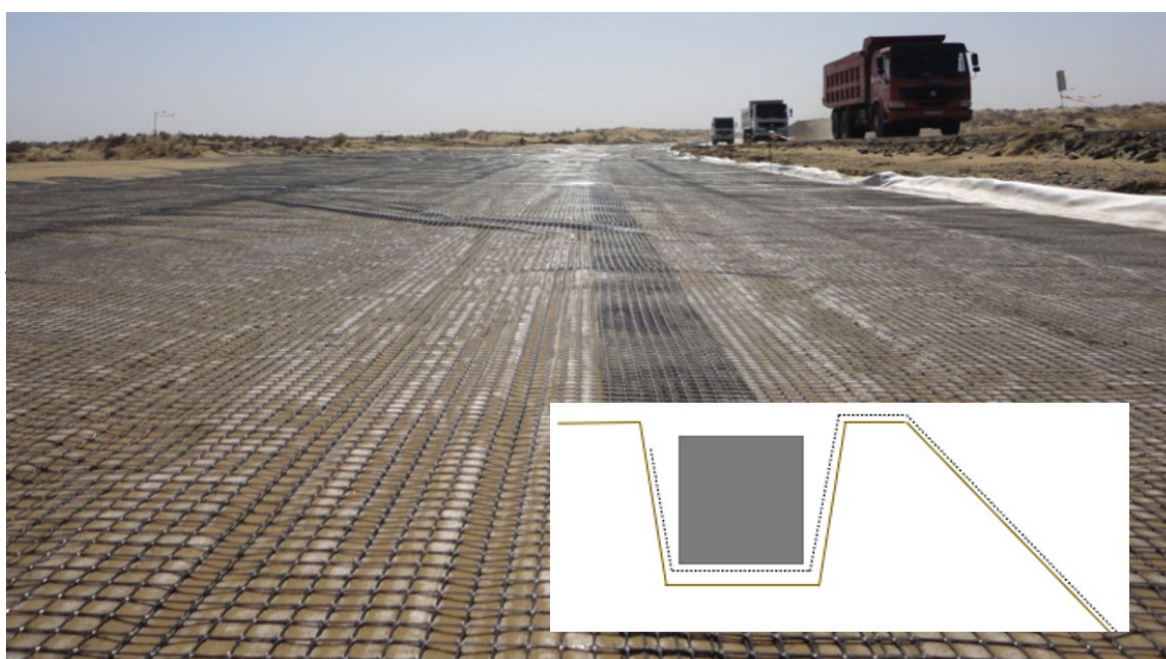
GeoStudio koristi osnu simetriju pri crtanju. Materijali koji su uneseni u program i koji su uvršteni u analizu su: glina, pijesak, šljunak, rekultivirajući sloj (tlo), temeljno tlo, smjesa bentonit-pijesak i beton.

Prema J. Yang i dr (2018.) vrijednosti parametara za beton, kada je sadržaj (Cc) cementa u smjesi 40 kg/m^3 , prikazani su u Tablici 1. Za smjesu bentonit-pijesak vrijednosti parametara preuzeti su iz rada L.K. Sharma i dr. i to kada je sadržaj bentonita u pijesku 40% (Tablica 1.). Vrijednosti parametara materijala za glinu, pijesak, šljunak i tlo su preuzeti iz *Geotech data* (Geotech data, 2018.). To su tipične vrijednosti kohezije, kuta unutrašnjeg trenja i jedinične težine za tipove tla po USCS-u u normalno konsolidiranim uvjetima (Tablica 1). Ove vrijednosti koriste se kao smjernice za geotehničke probleme, a za odgovarajući izbor geotehničkih parametara potrebno je razmotriti specifičan sastav svakog inženjerskog problema (geotechdata.info). Prema Jedinstvenoj klasifikaciji (USCS klasifikaciji), za glinu je odabrana glina visoke plastičnosti (CH), za pijesak je odabran dobro graduiran pijesak (SW), za šljunak je odabran dobro graduirani šljunak (GW).

Tablica 1. Popis materijala, parametara i pripadajućih vrijednosti.

SLOJ	Jedinična težina (kN/m ³)	Kohezija (kPa)	Kut trenja (°)
Tlo	15	10	28
Šljunak	21	0	35
Pijesak	21	0	31
Glina	20	20	24
Beton	24,5	405	39
Smjesa bentonit – pijesak	20	81	19,2

Između svakog sloja materijala postavlja se geomreža. U programu SLOPE/W nije moguće definirati geomrežu i uključiti ju u proračun stabilnosti. Stoga je rezultate potrebno uzeti s dozom rezerve, pretpostavljajući kako će stabilnost kosine s geomrežom biti još veća. Tip geomreže koji je odabran za novi koncept odlagališta je Lotrak[®] 20/20S proizvođača Don&Low Ltd (Slika 4.2.). To je biaksijalna mreža dizajnirana za stabilizaciju i ojačanje tla. Visoka čvrstoća u kombinaciji s malim rastezanjem osigurava učinkovito pojačanje, a dizajn otvora geomreže omogućuje spajanje agregata i potiče raspršivanje tereta (Don & Low member of thrace group, 2020).



Slika 4.2. Geomreža Lotrak[®] 20/20S proizvođača Don&Low i način ugradnje (externalworksindex.co.uk)

Kako bi geomreža ostala na mjestu ugradnje i obnašala svoju funkciju, pri ugrađivanju će se iskopati jarak u koji se stavlja završetak geomreže i na nju postavlja veliki betonski blok (Slika 4.2).

Kako bi se mogla detaljnije proučiti analiza stabilnosti, modeliranje je napravljeno u dvije faze. U prvoj fazi modeliranja, odlagališta su osmišljena tako da se temeljni zaštitni sustav i pokrovni zaštitni sustav sastoje od jednog skupa slojeva (glina, pijesak, šljunak). U drugoj fazi modeliranja, odlagališta imaju još jedan skup slojeva, što čini dva skupa slojeva, a na završni pokrov dodan je i rekultivirajući sloj.

Prva faza analize poslužila je samo kao pomoć u interpretaciji kritične klizne plohe i faktora sigurnosti i ne smatra se mogućim idejnim rješenjem novog koncepta odlagališta.

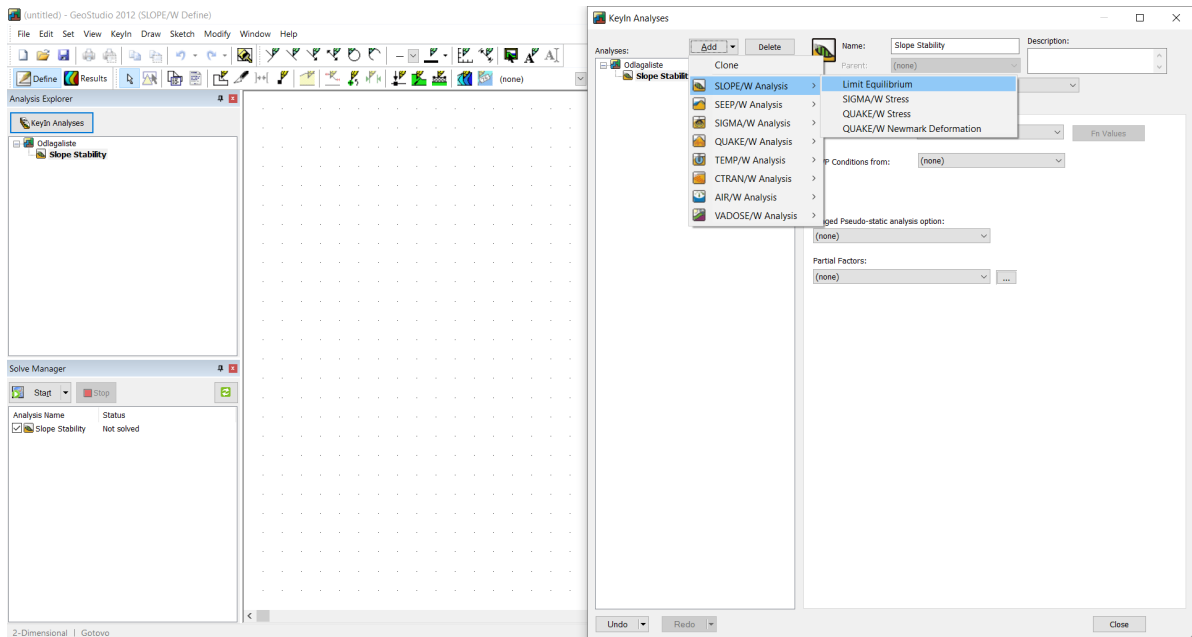
Kutovi nagiba kosine koji su uzeti u proračun su 40° , 45° i 50° . Za najmanji kut kosine, u novom konceptu odlagališta, određen je kut od 40° . To je kut koji bi po ideji dao rezultate najveće stabilnosti odlagališta ali zauzeo najviše prostora.

4.3. PRORAČUN STABILNOSTI PPO

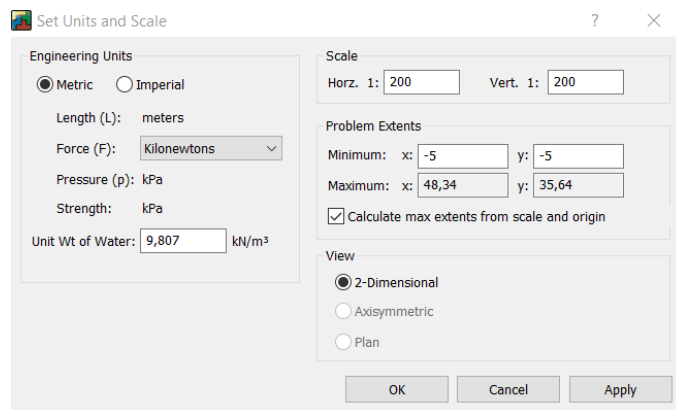
- PPO s kutom nagiba 50°

Prvi model površinskog odlagališta napravljen je s najpovoljnijim kutom nagiba (50°) u kontekstu zauzimanja prostora.

Modeliranje u GeoStudiu započinje izradom novog projekta i otvaranjem prozora *KeyIn Analyses* (Slika 4.3.). Za analizu stabilnosti koristi se potprogram *SLOPE/W Analyses* i metoda granične ravnoteže- *Limit Equilibrium* po *Morgenstern-Priceu*. Uvjeti podzemne vode- *PWP Conditions* se ne uzimaju u obzir. Rezultati proračuna stabilnosti prikazati će se u metarskom sustavu jedinica. Duljina je izražena u metrima (m), sila u kilonjutnima (kN), tlak u kilopaskalima (kPa) i jedinična težina u kilonjutnima po metru kubičnom (kN/m^3) (Slika 4.4.).

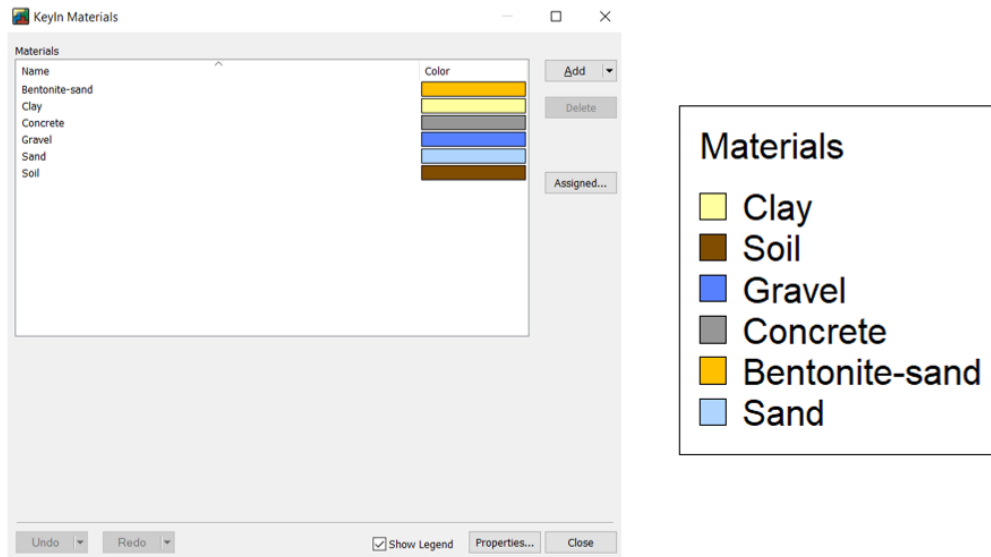


Slika 4.3. GeoStudio, prozor Kelyn Analyses.

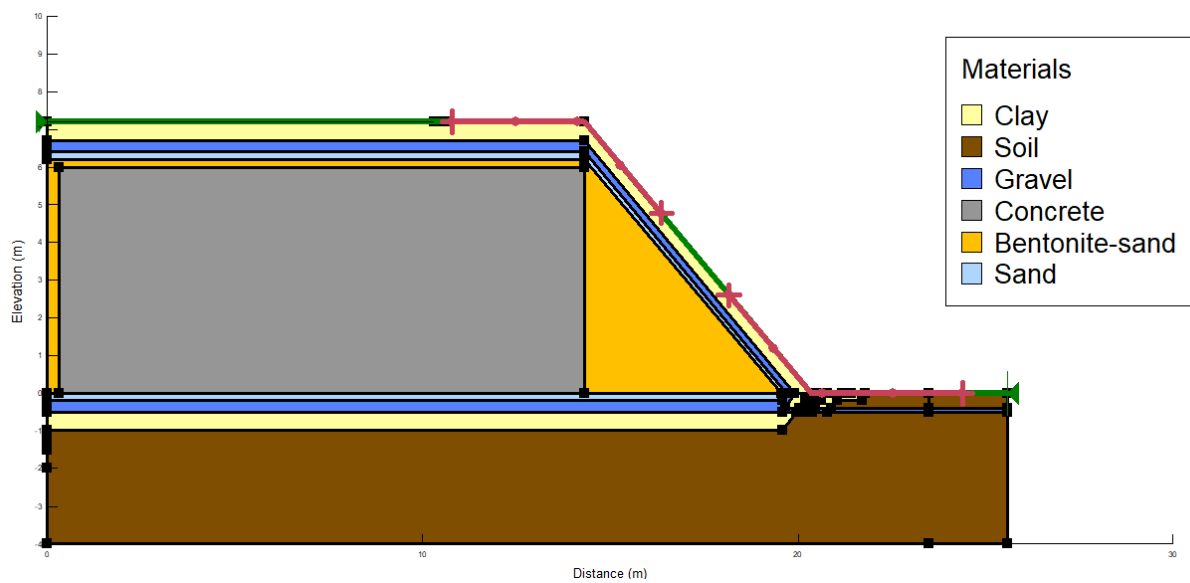


Slika 4.4. GeoStudio, prozor Unit and Scale.

Nakon što se odrede jedinice, počinje se sa crtanjem modela. Pomoću naredbe *Draw-Regions-Polygon* nacrtane su sastavnice (regije) odlagališta po nacrtu iz AutoCAD-a (Slika 4.9.). Regije se crtaju odvojeno, jedan sloj pijeska je jedna regija, sloj šljunka je druga regija, itd. Parametri materijala unose se pomoću naredbe *KeyIn-Materials* u *Mohr-Coulombovom* obliku kako bi se unijele vrijednosti za jediničnu težinu (*Unit Weight*), koheziju (*Cohesion*) i kut unutrašnjeg trenja (*Phi*). Na taj način dodano je šest materijala (tlo, pijesak, šljunak, glina, bentonit, beton) (Slika 4.5.). Položaj mogućih kliznih ploha odredi se naredbom *Draw-Slip Surface- Entry and exit* (Slika 4.6.).

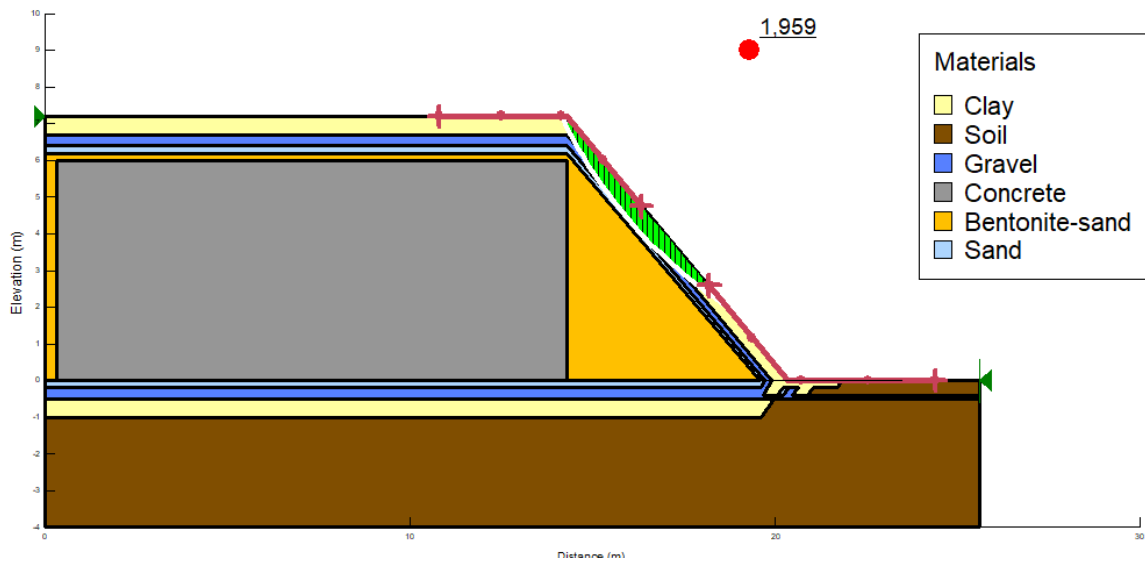


Slika 4.5. GeoStudio, prozor KeyIn Materials (lijevo) i legenda materijala (desno).



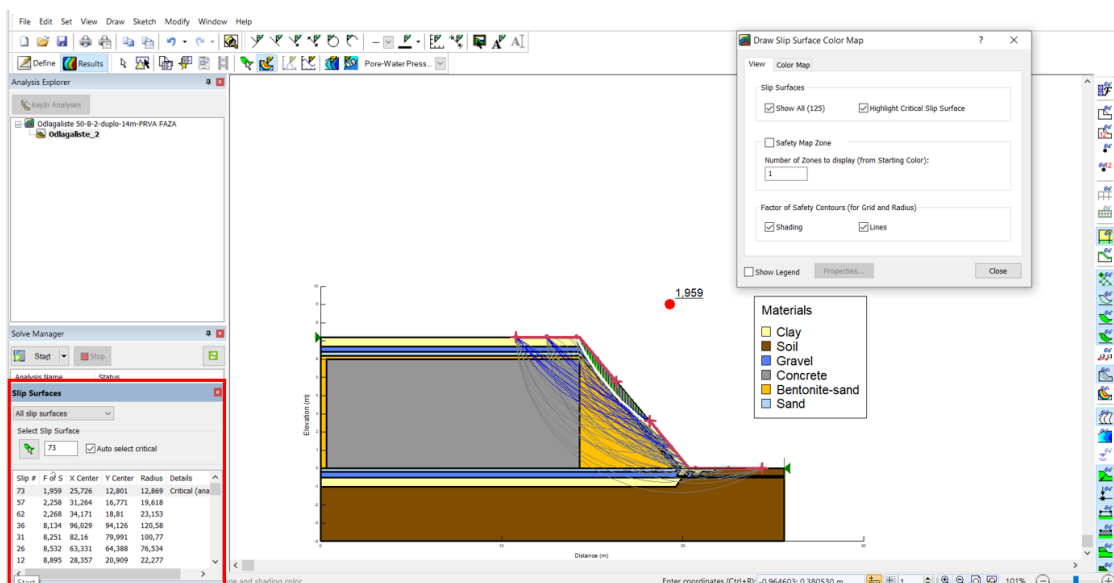
Slika 4.6. GeoStudio, Entry-Exit

Nakon crtanja regija, definiranja materijala, dodjeljivanja parametara materijala i određivanja ostalih parametara, preostaje pokrenuti program. Program se pokreće u pomoćnom prozoru *Solve Manager*. Nakon završetka obrade podataka, u glavnom prozoru, na modelu će se prikazati klizna ploha, i to kritična klizna ploha s pripadajućim faktorom sigurnosti (Slika 4.7.).



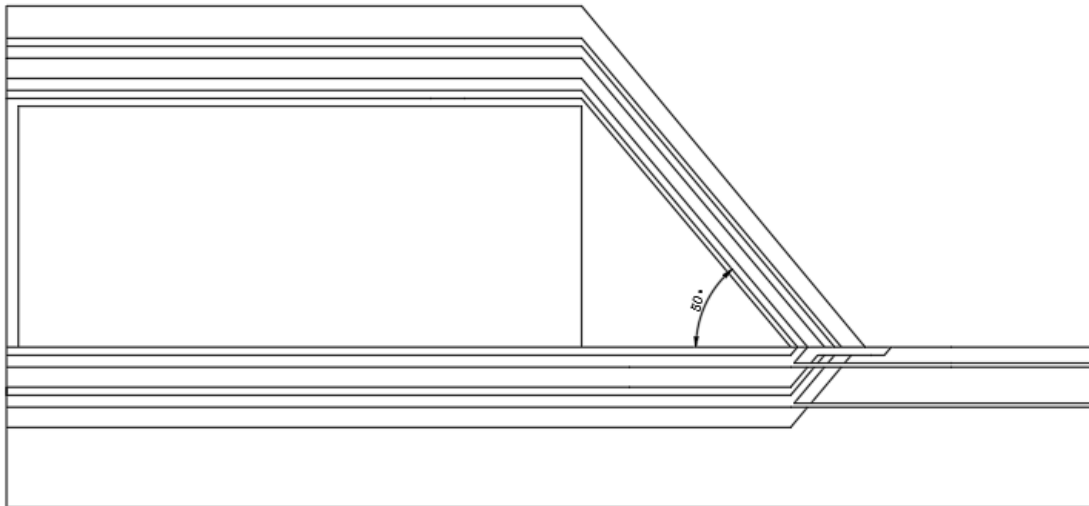
Slika 4.7. GeoStudio, prikaz kritične klizne plohe.

Nakon prikazivanja rezultata, u prozoru *Solve Manager*, pojavi se i prozor *Slip Surface* u kojem je moguće odabrati bilo koju kliznu plohu i vidjeti ju na modelu, a pomoću naredbe *Draw- Slip Surface Color Map*, prikazati će se sve klizne plohe (Slika 4.8.).



Slika 4.8. GeoStudio, prikaz prozora Slip Surface i svih kliznih ploha.

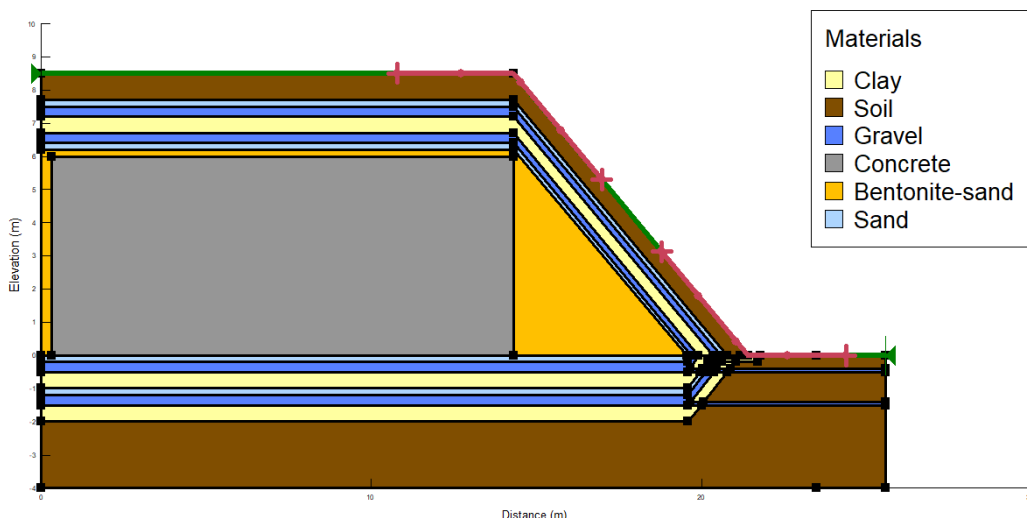
Faktor sigurnosti dobiven nakon analize stabilnosti u modelu odlagališta s kutom nagiba 50° , u prvoj fazi modeliranja je visok i iznosi 1,959. Iz toga se da zaključiti kako relativno velik kut nagiba daje prihvatljive rezultate u vidu stabilnosti pokosa. Kritična klizna ploha prolazi kroz slojeve gline, šljunka i pijeska, dok smjesu bentonit-pijesak ne dodiruje.



Slika 4.9. Nacrt simetričnog presjeka PPO s kutom nagiba 50°.

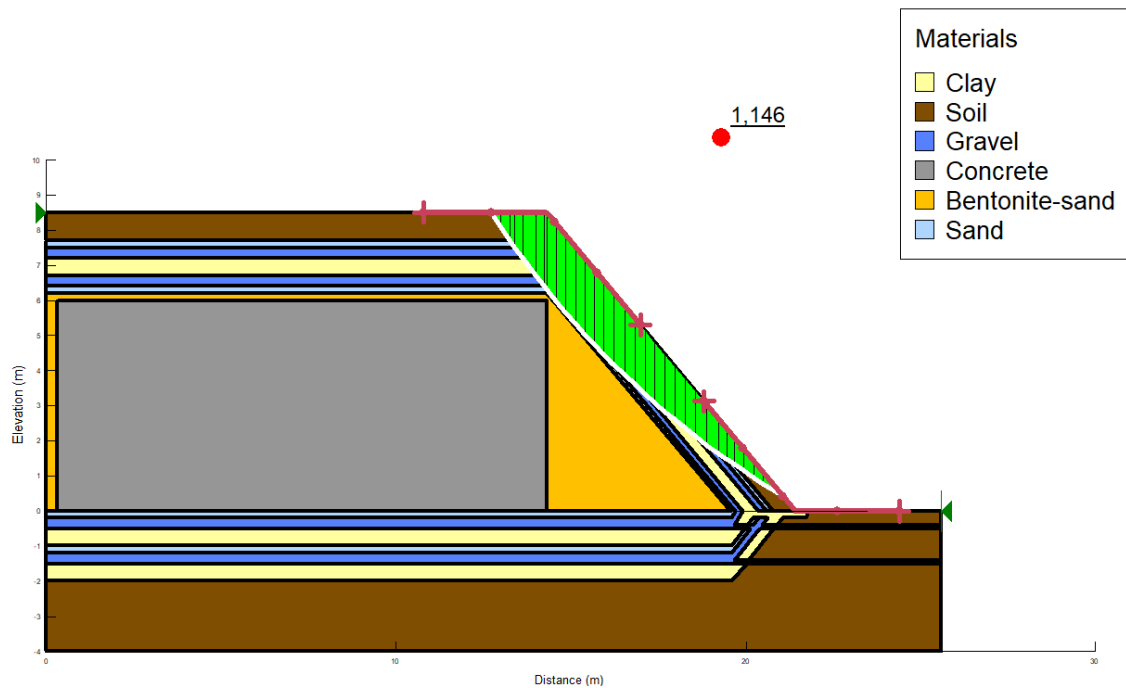
U drugoj fazi dodan je još jedan paket slojeva s rekultivirajućim slojem u pokrovnom zaštitnom sustavu. Drenažne cijevi simulirane su tankim slojem šljunka, a glinena ploha služi za odvajanje različitih slojeva u razini površine tla.

Naredbom *Draw-Regions-Polygon* nacrtan je još jedan paket slojeva, a naredbom *Draw-Materials*, regijama su dodane vrijednosti određenih materijala (Slika 4.10.). Pri crtanju slojeva u GeoStudiju važno je paziti na kut nagiba i debljine slojeva jer nema alata za crtanje kutova. Stoga modeli nacrtani u AutoCAD-u olakšavaju crtanje jer su točke regija poznate.



Slika 4.10. Druga faza PPO s kutom nagiba 50° i Entry-Exit intervali.

Nakon pokretanja programa dobiveni su rezultati, kritična klizna ploha s pripadajućim faktorom sigurnosti (Slika 4.11.).



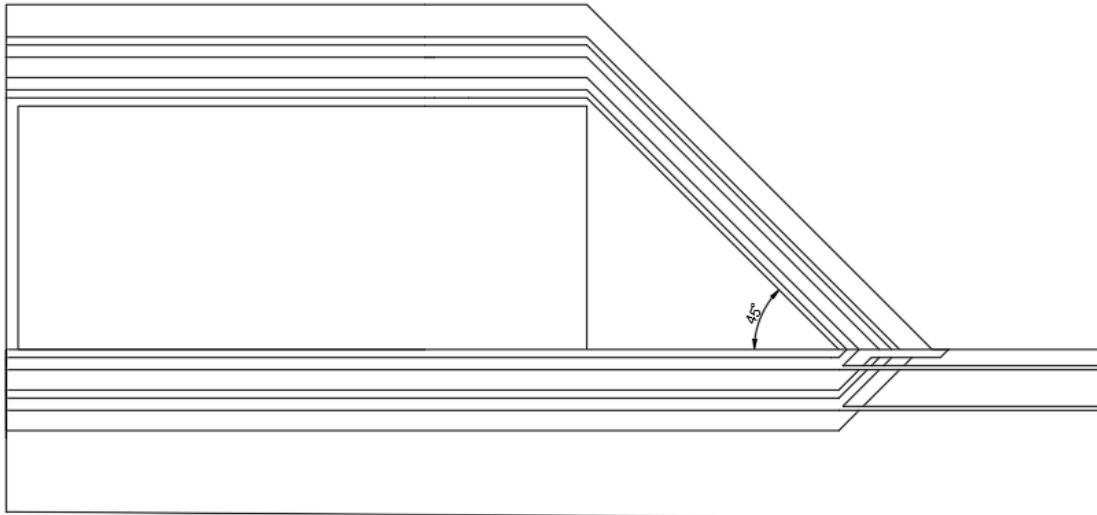
Slika 4.11. Kritična klizna ploha s pripadajućim faktorom sigurnosti za odlagalište s kutom nagiba 50° i dva paketa slojeva.

Dobiveni faktor sigurnosti nakon analize stabilnosti je zadovoljavajući jer iznosi više od 1. Očekivan je manji faktor sigurnosti od prve faze zbog dodavanja rekultivirajućeg sloja koji ima koheziju nešto manju od sloja gline koja je u prethodnoj fazi predstavljala zadnji (pokrovni) sloj. Kritična klizna ploha prolazi kroz sve slojeve pokrovnog zaštitnog sustava i ne ulazi u cjelinu smjese bentonit-pijesak.

- PPO s kutom nagiba 45°

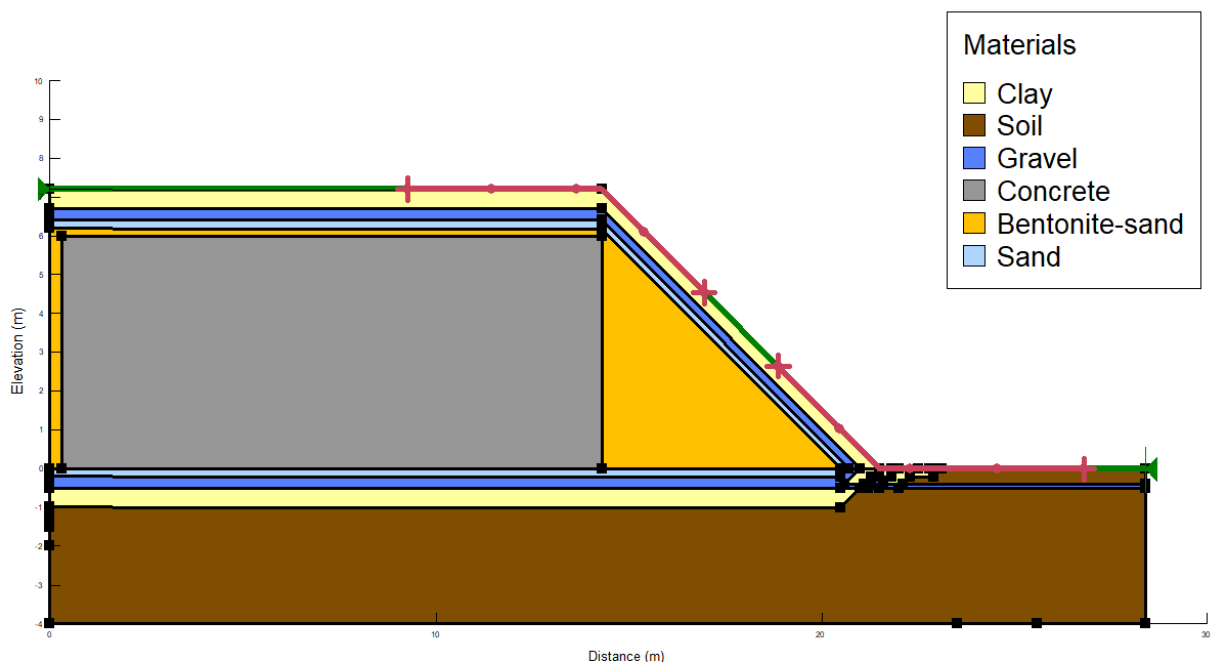
Modeliranje sljedećeg PPO-a radi se na isti način kao i prethodno opisano. Kut nagiba koji će se uzeti u ovaj proračun biti će 45° . Očekuje se nešto veći faktor sigurnosti jer je kut nagiba kosine manji i stabilnost kosine bi trebala biti veća. Analiza ovog odlagališta provodi se također u dvije faze.

Dimenzioniranje modela u GeoStudiu modeliran je po uzoru na model nacrtan u AutoCAD softveru prikazan na slici 4.12.



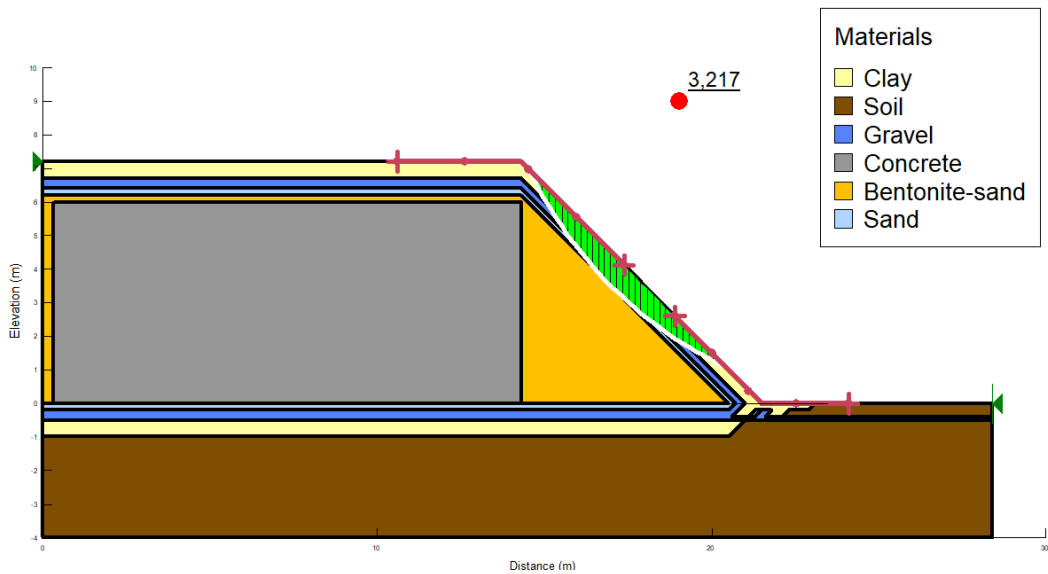
Slika 4.12. Nacrt simetričnog presjeka PPO s kutom nagiba 45°.

Koristeći jednake naredbe kao i kod prvog modela odlagališta dobivena je situacija prikazana na slici 4.13.



Slika 4.13. Prva faza PPO s kutom nagiba 45° i Entry-Exit intervali.

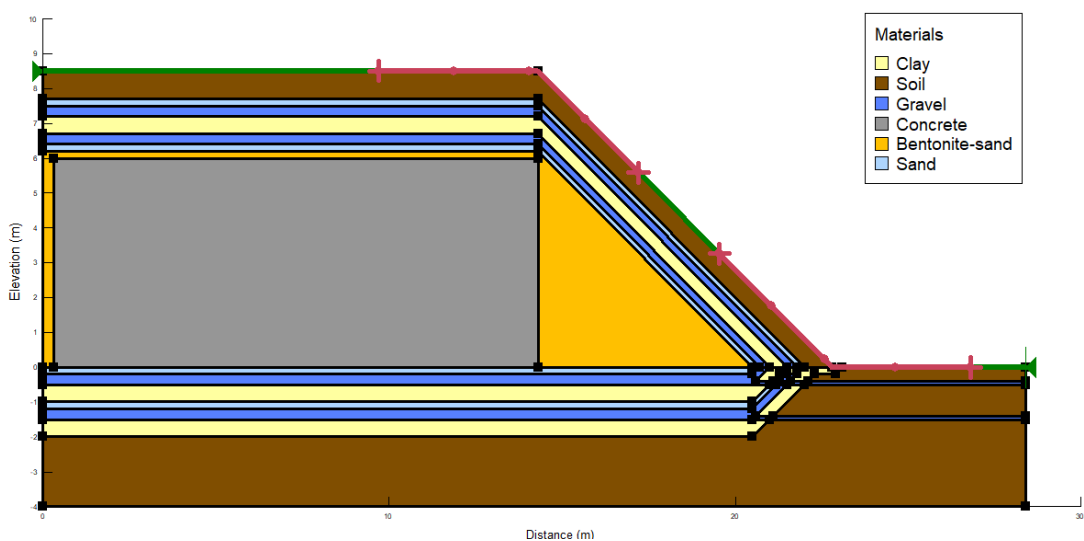
Nakon pokretanja programa dobiveni su rezultati, kritična klizna ploha s pripadajućim faktorom sigurnosti (Slika 4.14.).



Slika 4.14. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, prva faza PPO s kutom nagiba 45°.

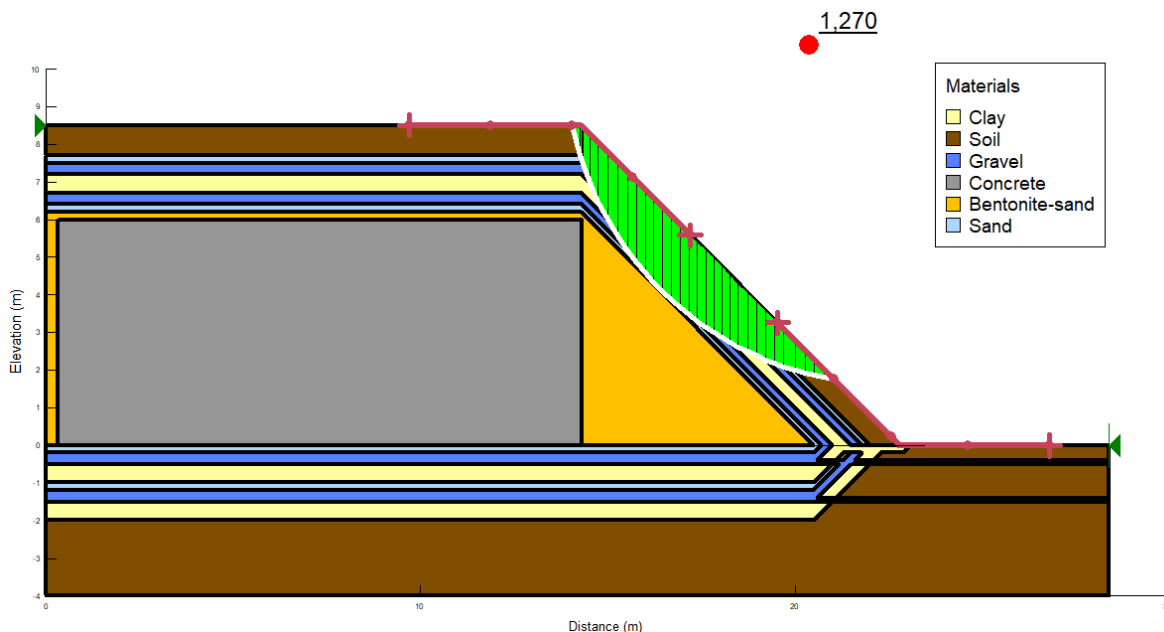
Faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu PPO s kutom nagiba 45° plohu iznosi 3,217. To je visoki faktor sigurnosti i on pokazuje kako je kosina stabilna. U ovom modelu, rezultati prve faze analize su puno veći od rezultata prve faze modeliranja prošlog modela s kutom nagiba 50°. To nam govori o utjecaju nagiba kosine na stabilnost pokosa. Kritična klizna ploha prolazi kroz slojeve gline, šljunka i pijeska, ne dodirujući smjesu bentonit-pijesak.

U drugoj fazi modeliranja PPO s kutom nagiba 45° dodan je još jedan paket slojeva i rekultivirajući sloj. Nakon crtanja slojeva i pridruživanja vrijednosti materijala pojedinim regijama (slojevima), dobivena je situacija prikaza na slici 4.15.



Slika 4.15. Druga faza PPO s kutom nagiba 45° i Entry-Exit intervali.

Pokretanjem programa dobivena je kritična klizna ploha, s pripadajućim faktorom sigurnosti, prikazana na slici 4.16.



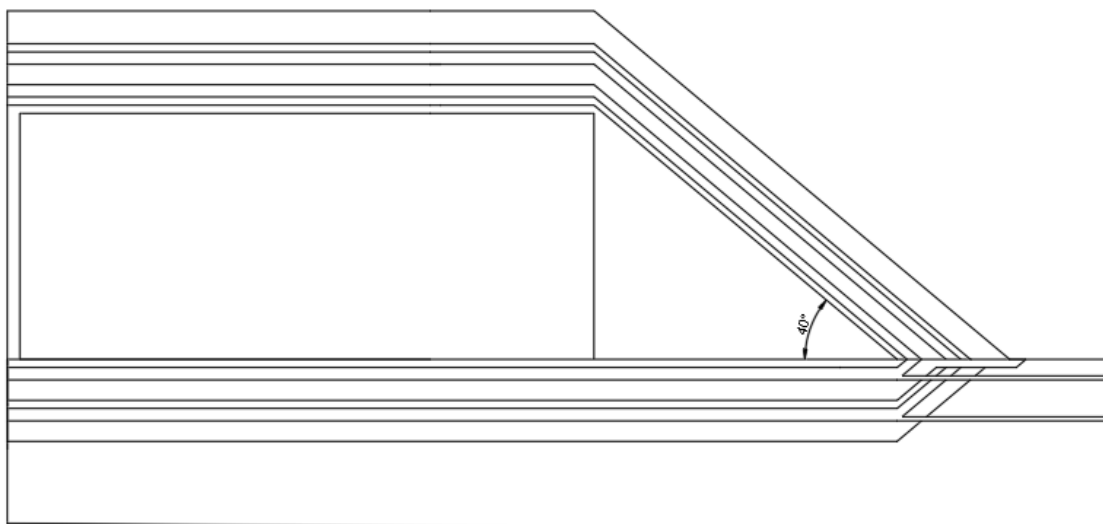
Slika 4.16. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, druga faza PPO s kutom nagiba 45°.

Faktor sigurnosti dobiven nakon pokretanja programa i analize modela PPO s kutom nagiba 45° je 1,270. Uspoređujući s rezultatom prve faze (Slika 4.14.), jasno je kako je sada faktor sigurnosti za više od 1 manji. Takav rezultat nam govori o velikom utjecaju rekultivirajućeg sloja na stabilnost kosine. Kritična klizna ploha prolazi kroz sve slojeve pokrovnog zaštitnog sustava.

- PPO s kutom nagiba 40°

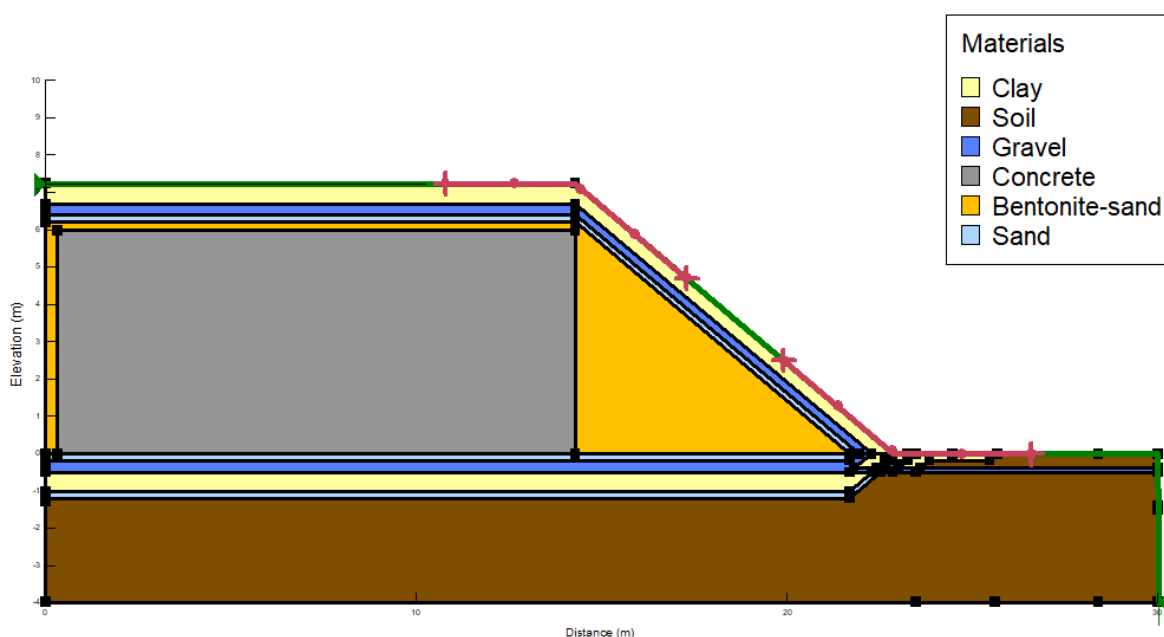
Zadnji model PPO je s kutom nagiba 40°. To je zadnja varijanta PPO koja je uzeta u proračun stabilnosti ovog rada. Kod ovog modela s kutom nagiba 40°, očekuje se najveći faktor sigurnosti. Međutim, ovakav model zauzeti će najviše prostora zbog blago položenih kosina slojeva zaštitnih sustava odlagališta. Analiza ovog modela PPO provodi se u dvije faze.

Primjenom naredbi koje su korištene u modeliranju prethodnih modela PPO, modelira se odlagalište s kutom nagiba 40°. Kako bi se olakšalo dimenzioniranje modela odlagališta u GeoStudiju, regije su konstruirane prema točkama očitanim u AutoCAD nacrtu (Slika 4.17.).



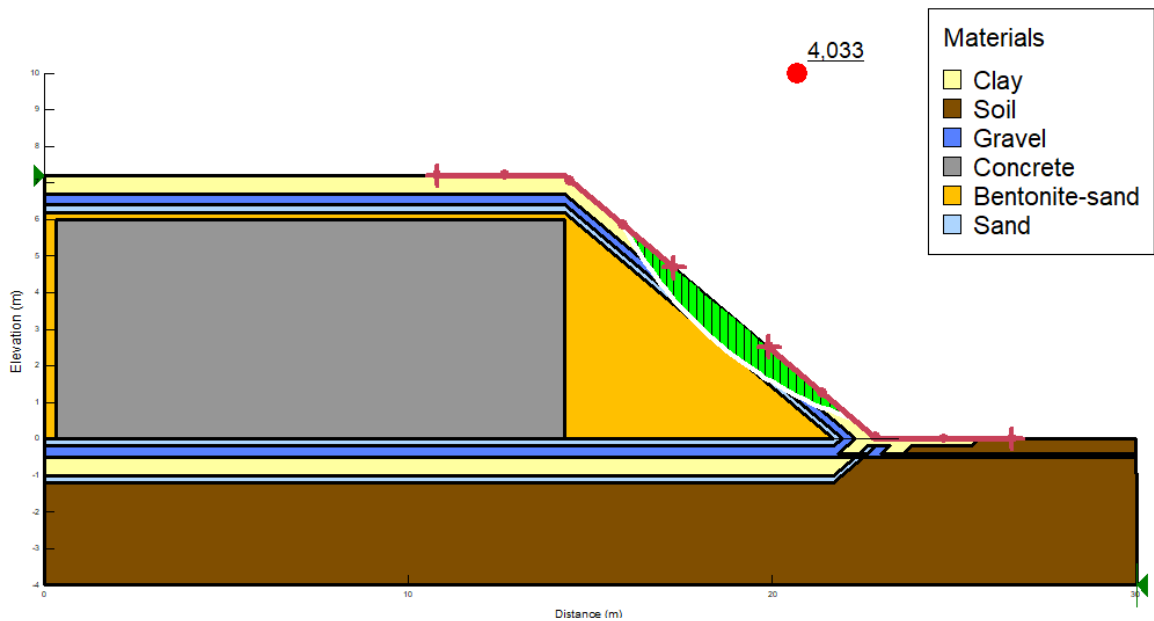
Slika 4.17. Nacrt simetričnog presjeka PPO s kutom nagiba 40°.

Koristeći jednake naredbe u GeoStudiu kao i kod modeliranja prvog modela PPO s kutom nagiba 50°, modelira se PPO s kutom nagiba 40°. Nakon ucrtavanja regija i pridruživanja vrijednosti materijala, te određivanja intervala moguće klizne plohe (*Entry-Exit*), modelirano odlagalište prikazano je na slici 4.18.



Slika 4.18. Prva faza PPO s kutom nagiba 40° i Entry-Exit intervali.

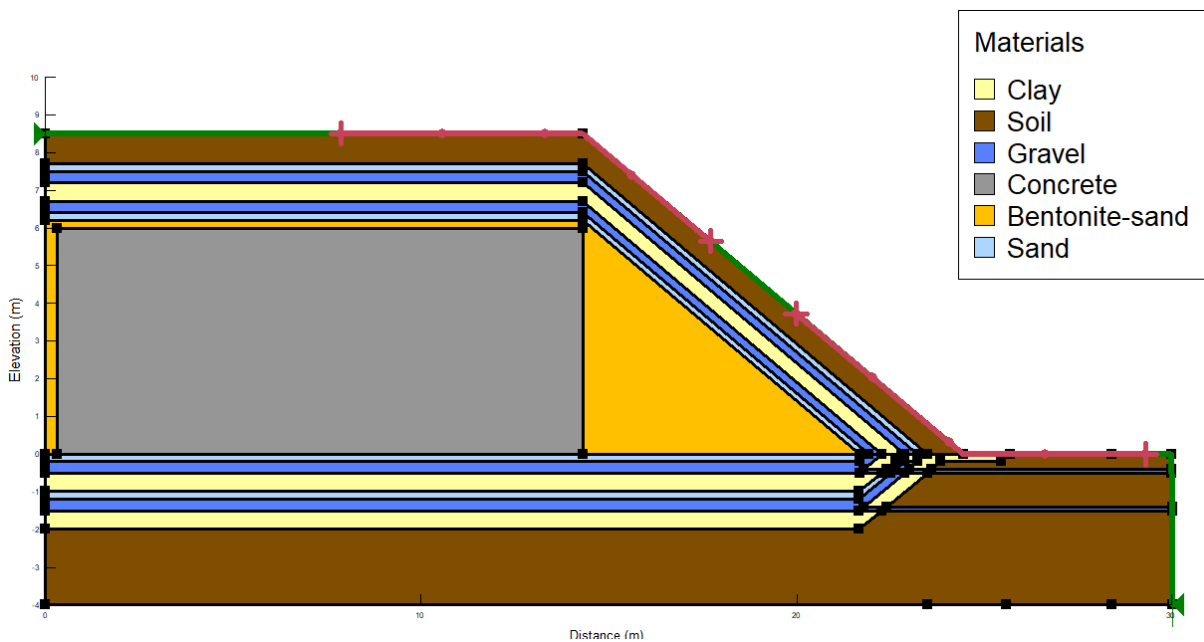
Nakon pokretanja programa, dobiveni su rezultati prve faze analize za PPO s kutom nagiba 40° te su prikazani na slici 4.19.



Slika 4.19. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, prva faza PPO s kutom nagiba 40°.

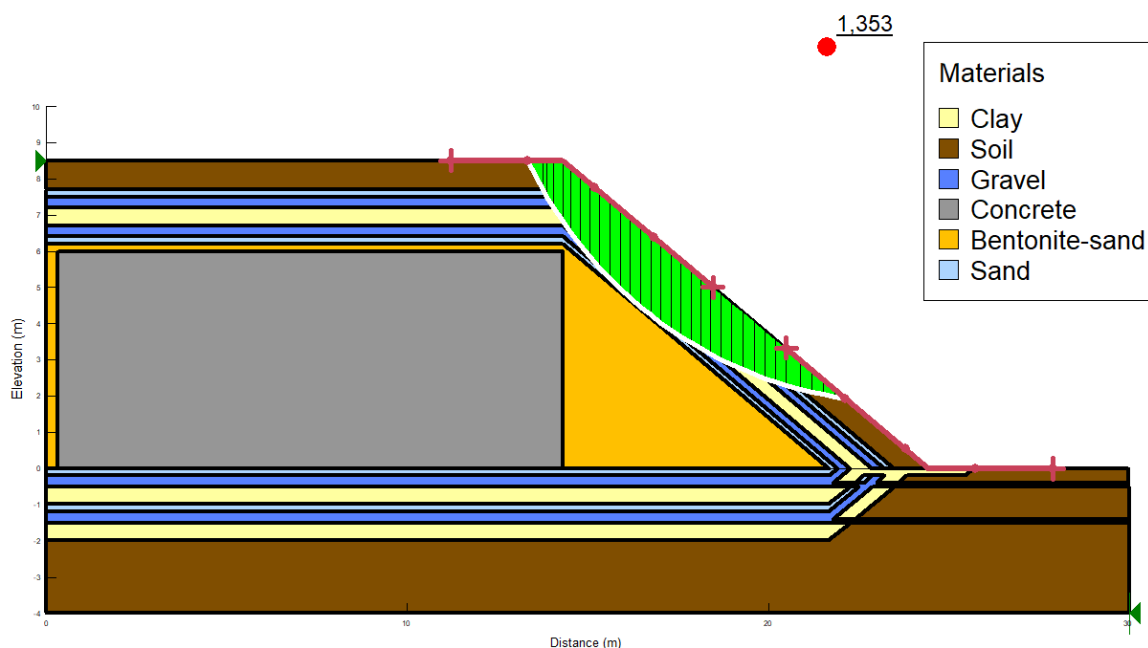
Faktor sigurnosti za prvu fazu PPO s kutom nagiba 40° iznosi 4,033. To je najveći faktor sigurnosti od svih rezultata prve faze analize. Kritična klizna ploha prolazi kroz sloj gline, šljunka, pijeska i jedinice bentonit-pijesak.

U drugoj fazi modeliranja PPO s kutom nagiba 40°, dodan je još jedan paket slojeva i rekultivirajući sloj, model PPO prikazan je na slici 4.20.



Slika 4.20. Druga faza PPO s kutom nagiba 40° i Entry-Exit intervali.

Dobiveni rezultati proračuna stabilnosti PPO s kutom nagiba 40°, prikazani su na slici 4.21.



Slika 4.21. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, druga faza PPO s kutom nagiba 40°.

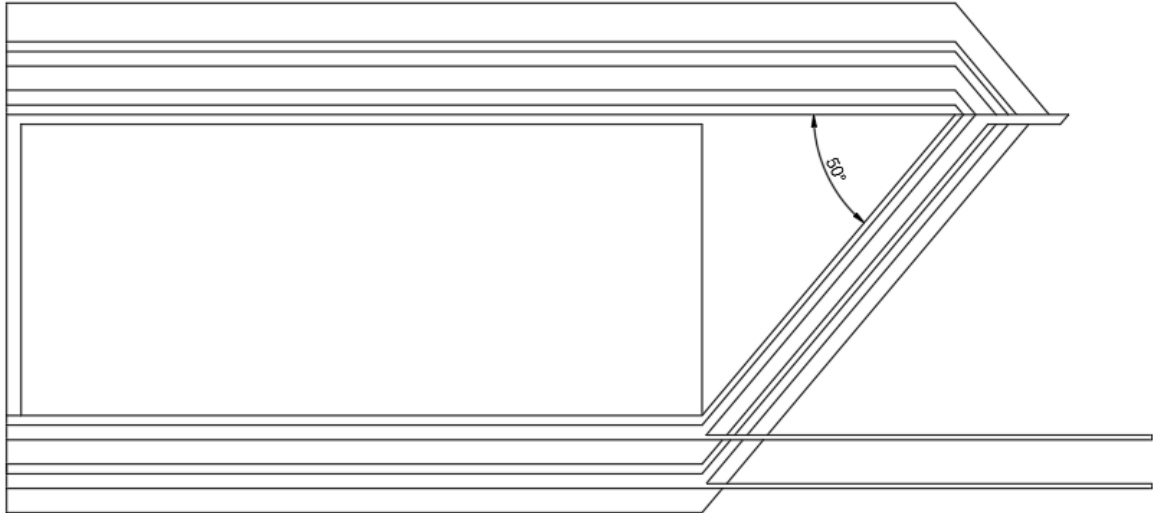
Faktor sigurnosti kritične klizne plohe u drugoj fazi modela PPO s kutom nagiba 40° je 1,353. Zanimljivo je primijetiti veliku razliku u rezultatima u prvoj fazi i drugoj fazi modeliranja. Razlika u iznosu faktora sigurnosti je više od 2,6. Također, primjećuje se kako kritična klizna ploha u prvoj fazi ulazi u smjesu bentonit-pijesak dok u drugoj fazi to nije slučaj. Nakon dobivenih rezultata prve faze modeliranja, dalo se naslutiti kako će rezultati u drugoj fazi biti nešto veći faktor sigurnosti. Međutim, to nije slučaj.

4.4. PRORAČUN STABILNOSTI UPO

Prilikom modeliranja UPO, u programu GeoStudio u proračun nije uvršten materijal bentonit-pijesak i beton. Pri analizi stabilnosti računa se stabilnost unutarnje klizne plohe. Naime, pri gradnji odlagališta prvo je potrebno napraviti iskop temeljnog tla, a zatim se postavljaju temeljni zaštitni sustavi slojeva. Proračun stabilnosti biti će napravljen na zaštitnim sustavima slojeva (kao kod PPO) i dodatno na iskopu temeljnog tla. Kao i kod PPO, drenažne cijevi prikazane su tankim slojem šljunka.

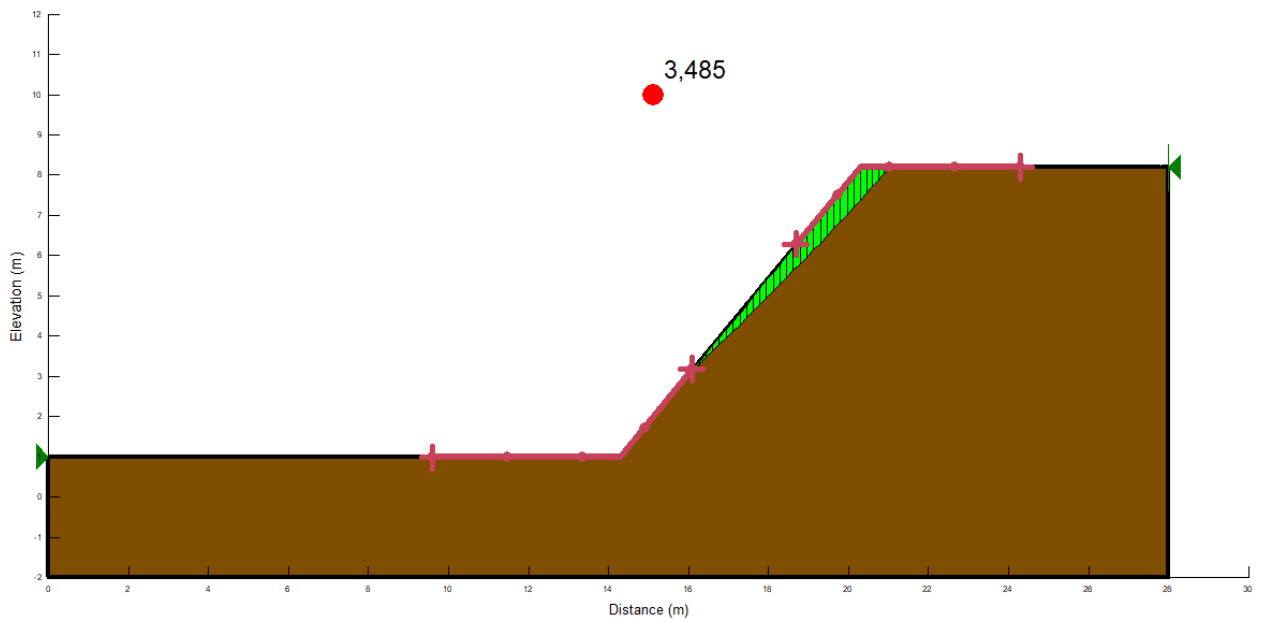
- UPO s kutom nagiba 50°

Prvi model UPO na kojem će se provesti analiza stabilnosti je UPO s kutom nagiba kosina 50°. Nacrt cijelog UPO prikazan je na slici 4.22.



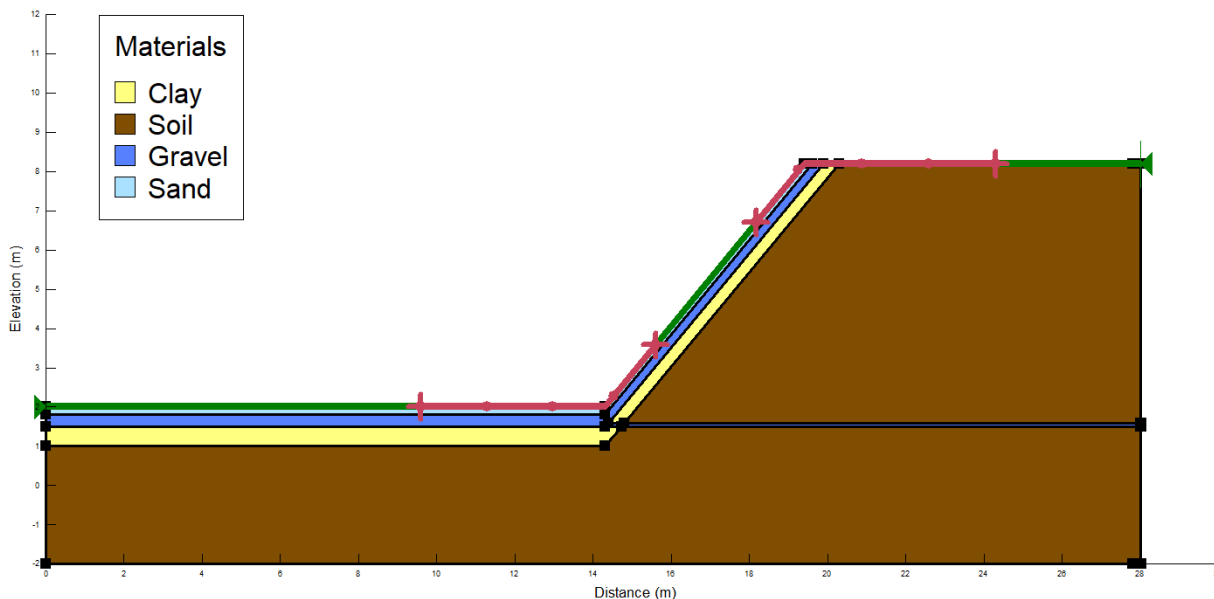
Slika 4.22. Nacrt simetričnog presjeka UPO s kutom nagiba 50°.

Za početak, napravljen je proračun stabilnosti za iskopano temeljno tlo, a dobiveni faktor sigurnosti je 3,485 i prikazan je na slici 4.23. Dubina iskopa temeljnog tla je 7,2 metara za samo jedan paket slojeva i 8,2 metara za dva paketa slojeva.



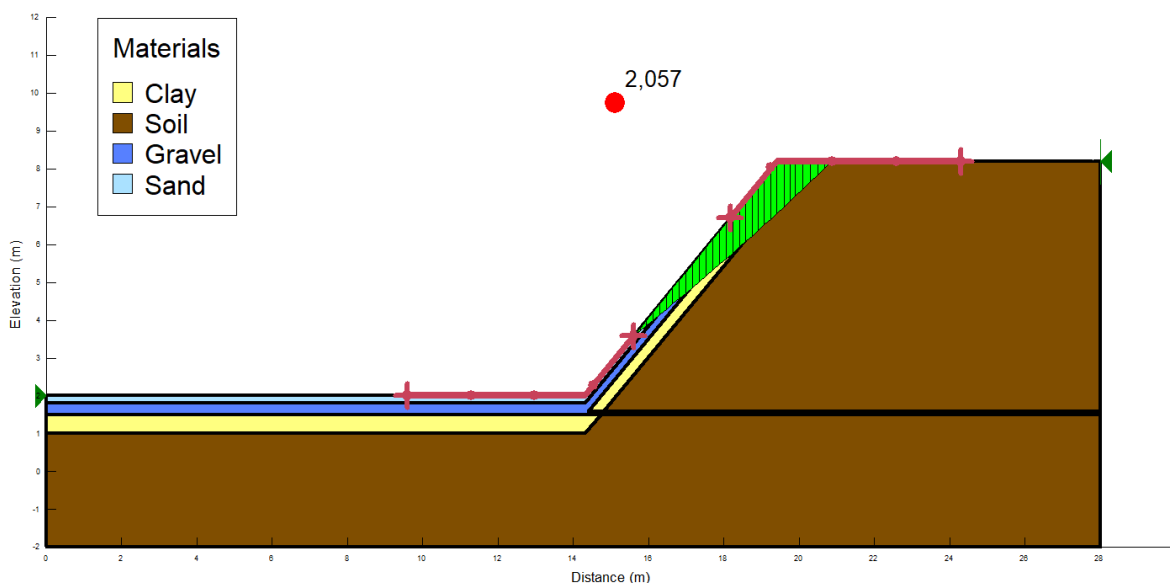
Slika 4.23. Krična klizna ploha i faktor sigurnosti za kosinu nagiba 50° pri iskopu temeljnog tla.

Situacija nakon ucrtavanja regija (slojeva) u GeoStudiu za UPO s kutom nagiba 50° u prvoj fazi, prikazana je na slici 4.24.



Slika 4.24. Prva faza UPO s kutom nagiba 50° i Entry-Exit intervali.

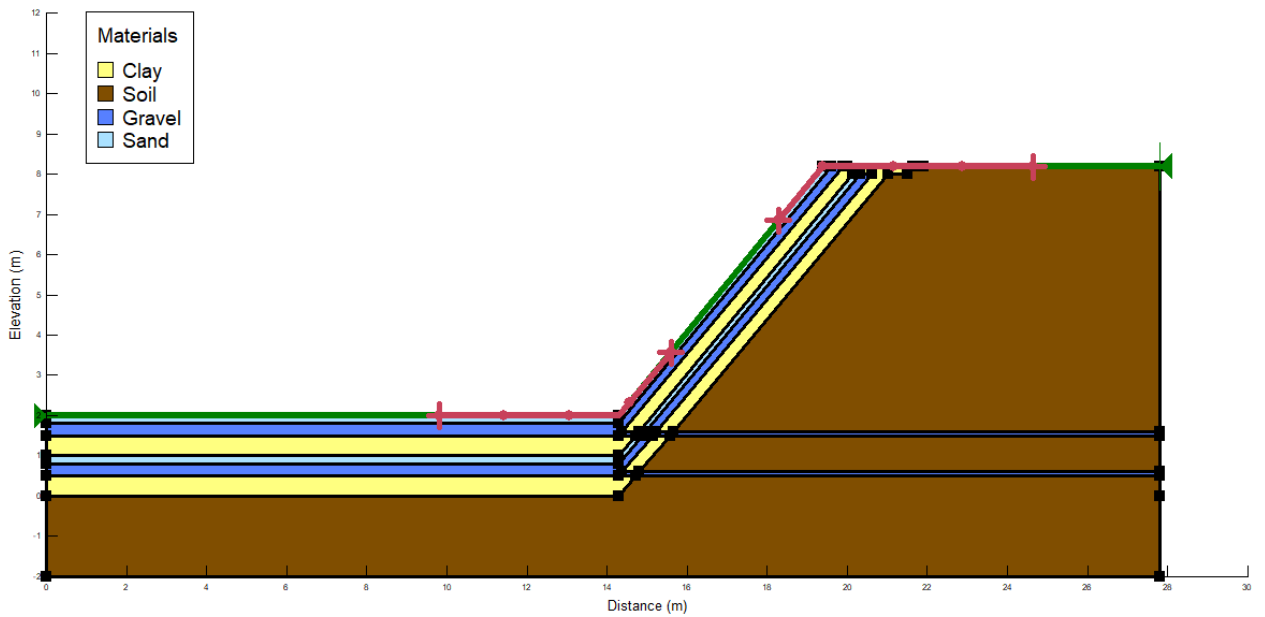
Nakon pokretanja programa, dobiveni su rezultati s kritičnom kliznom plohom i faktorom sigurnosti za UPO s kutom nagiba 50°(Slika 4.25.).



Slika 4.25. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, prva faza UPO s kutom nagiba 50°.

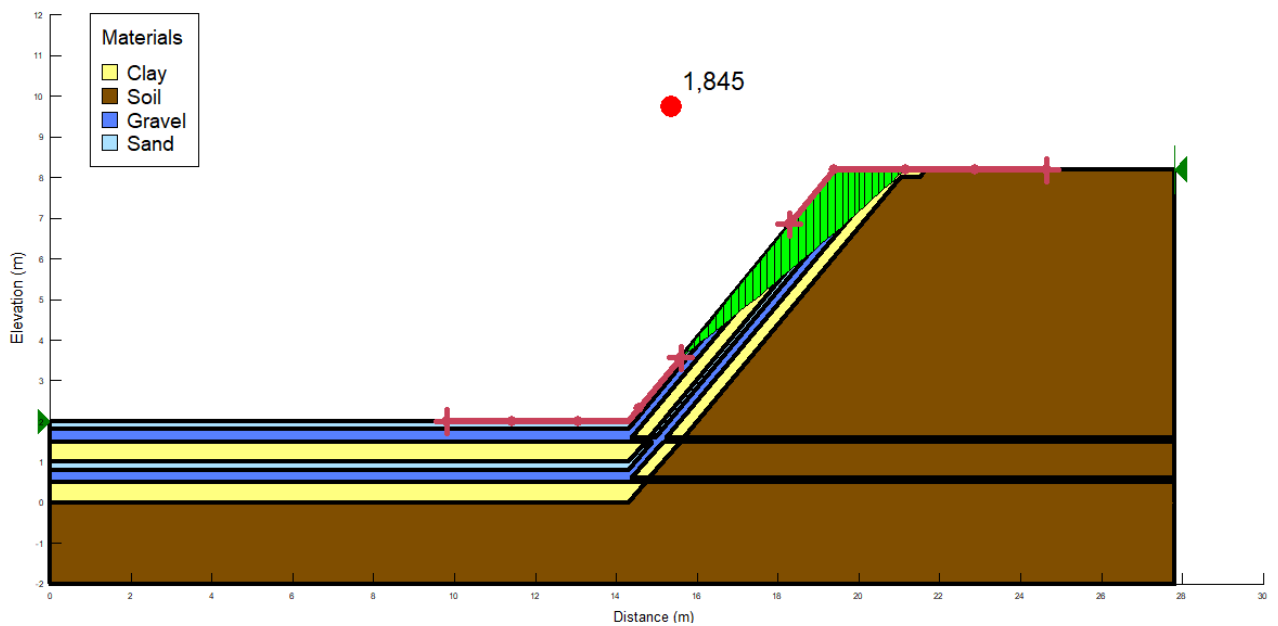
Faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu za UPO s kutom nagiba 50° iznosi 2,057. Vidljivo je kako zaštitni sustavi slojeva utječu na stabilnost kritične klizne plohe. Stabilnost pokosa je dovoljno velika.

U drugoj fazi modeliranja UPO s kutom nagiba 50°, dodan je još jedan paket slojeva. Na slici 4.26. prikazani su svi slojevi temeljnog zaštitnog sustava i intervali *Entry-Exit* za računanje kritične klizne plohe.



Slika 4.26. Druga faza UPO s kutom nagiba 50° i Entry-Exit intervali.

Nakon pokretanja programa za analizu stabilnosti, rezultat kritične klizne plohe i njen faktor sigurnosti za UPO s kutom nagiba 50° , prikazani su na slici 4.27.

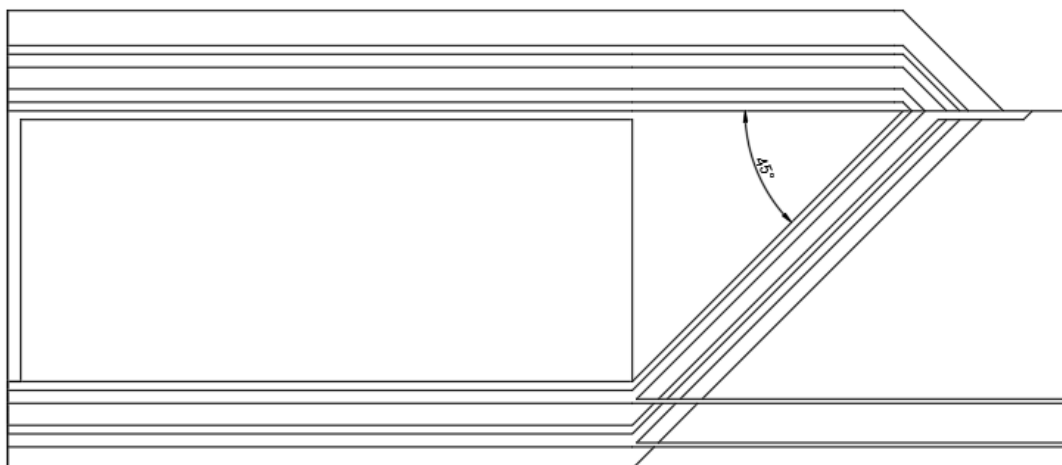


Slika 4.27. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, druga faza UPO s kutom nagiba 50° .

Faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu UPO s kutom nagiba 50° iznosi 1,845. To je manji faktor sigurnosti nego u prvoj fazi, što je očekivano kao i kod PPO-a. Za ovaj model UPO, može se reći kako je pokos odlagališta stabilan. Kritična klizna ploha prolazi kroz sve zaštitne sustave slojeva.

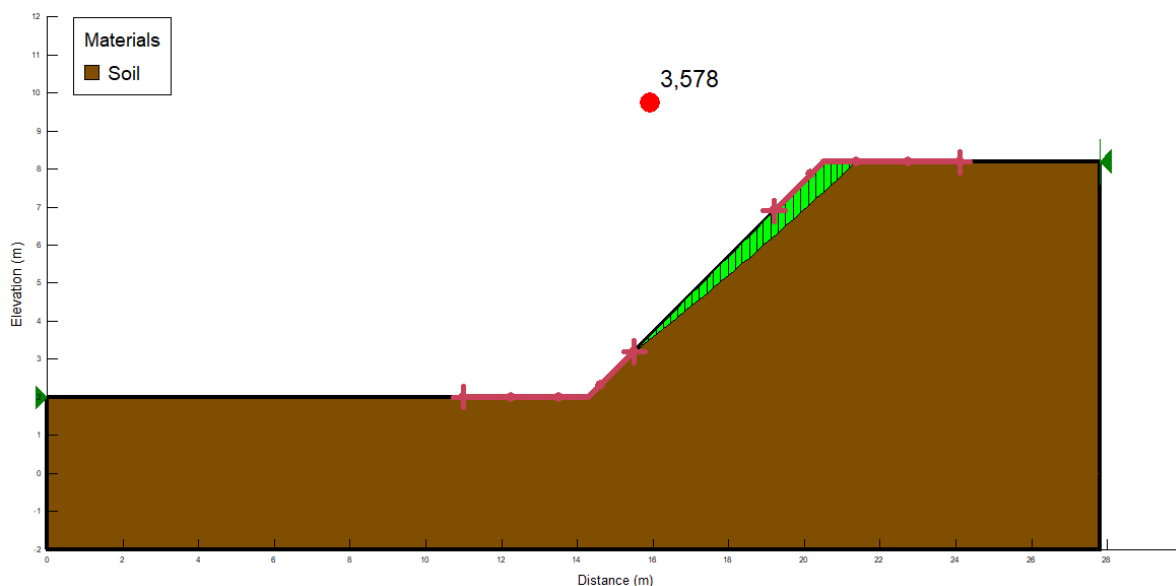
- UPO s kutom nagiba 45°

Sljedeći model UPO, na kojem je provedena analiza stabilnosti, je s kutom nagiba 45°. Na slici 4.28. prikazan je nacrt simetričnog presjeka UPO.



Slika 4.28. Nacrt simetričnog presjeka UPO s kutom nagiba 50°.

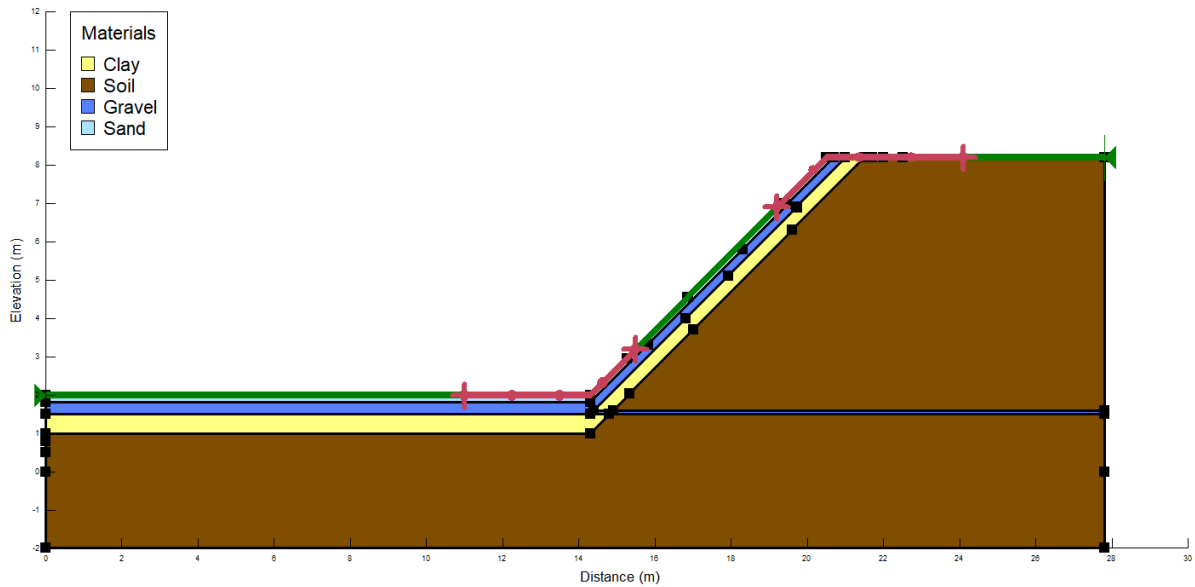
Prva analiza stabilnosti provedena je na izvedenoj kosini pri iskopu temeljnog tla. Krična klizna ploha i faktor sigurnosti te kosine prikazani su na slici 4.29.



Slika 4.29. Krična klizna ploha i faktor sigurnosti za kosinu nagiba 45° pri iskopu temeljnog tla.

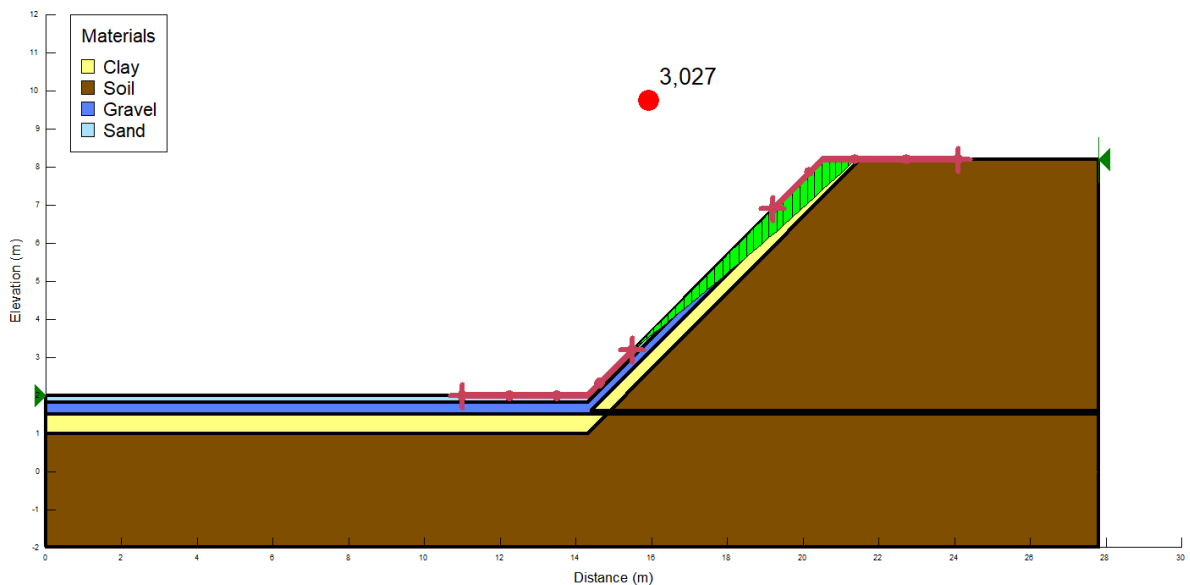
Faktor sigurnosti za kosinu nagiba 45° pri iskopu temeljnog tla iznosi 3,578. To je malo veći faktor sigurnosti od faktora sigurnosti na kosini nagiba 50°. Kosina pri iskopu temeljnog tla je vrlo sigurna.

Prva faza modeliranja UPO s kutom nagiba 45° uključuje analizu stabilnosti s jednim paketom slojeva (Slika 4.30.)



Slika 4.30. Prva faza UPO s kutom nagiba 45° i Entry-Exit intervali.

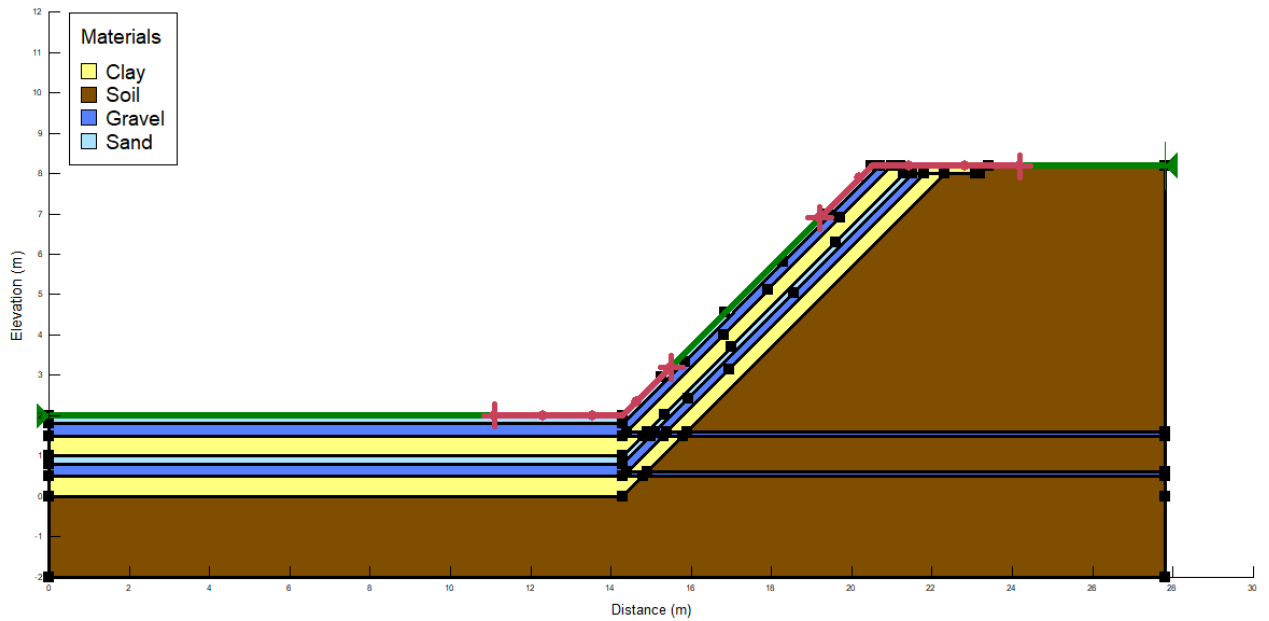
Pokretanjem programa dobivena je kritična klizna ploha i faktor sigurnosti za UPO s kutom nagiba 45° . Rezultati su prikazani na slici 4.31.



Slika 4.31. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, prva faza UPO s kutom nagiba 45° .

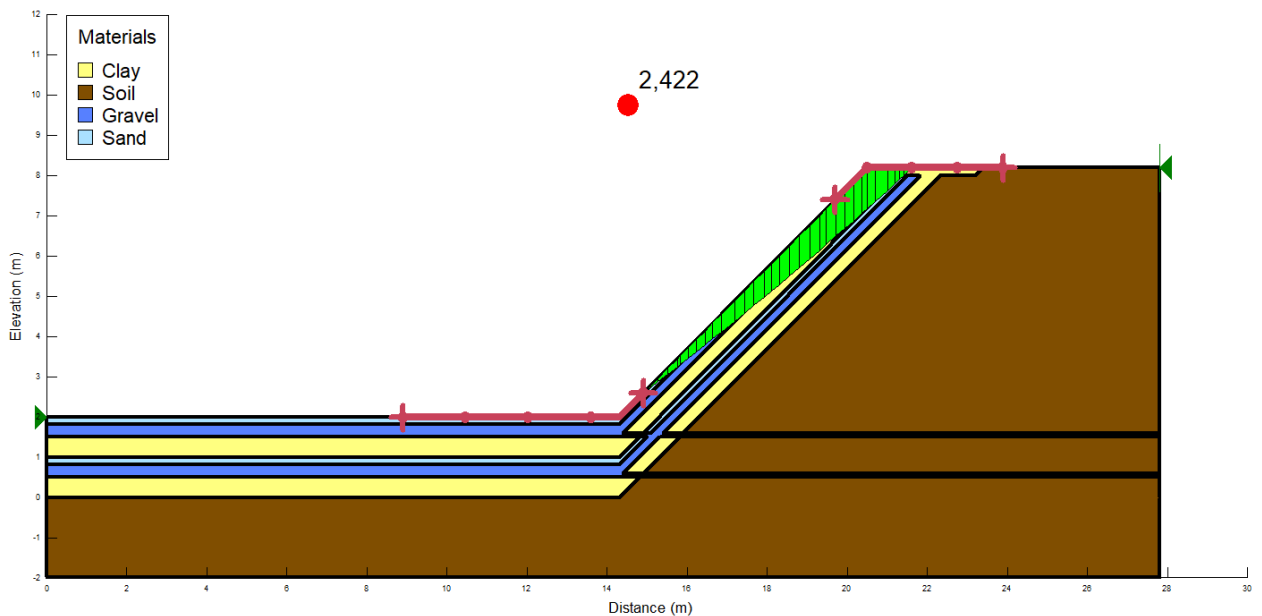
Faktor sigurnosti u prvoj fazi modeliranja iznosi 3,027. Zbog velikog iznosa faktora sigurnosti, za kosinu se može reći kako je stabilna. Kritična klizna ploha prolazi kroz sloj pijeska, šljunka i gline.

Druga faza analize izvedena je na dva paketa zaštitnih slojeva prikazanih na slici 4.32.



Slika 4.32. Druga faza UPO s kutom nagiba 45° i Entry-Exit intervali.

Pokretanjem programa, na slici 4.33., prikazana je kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti za UPO s kutom nagiba 45°.

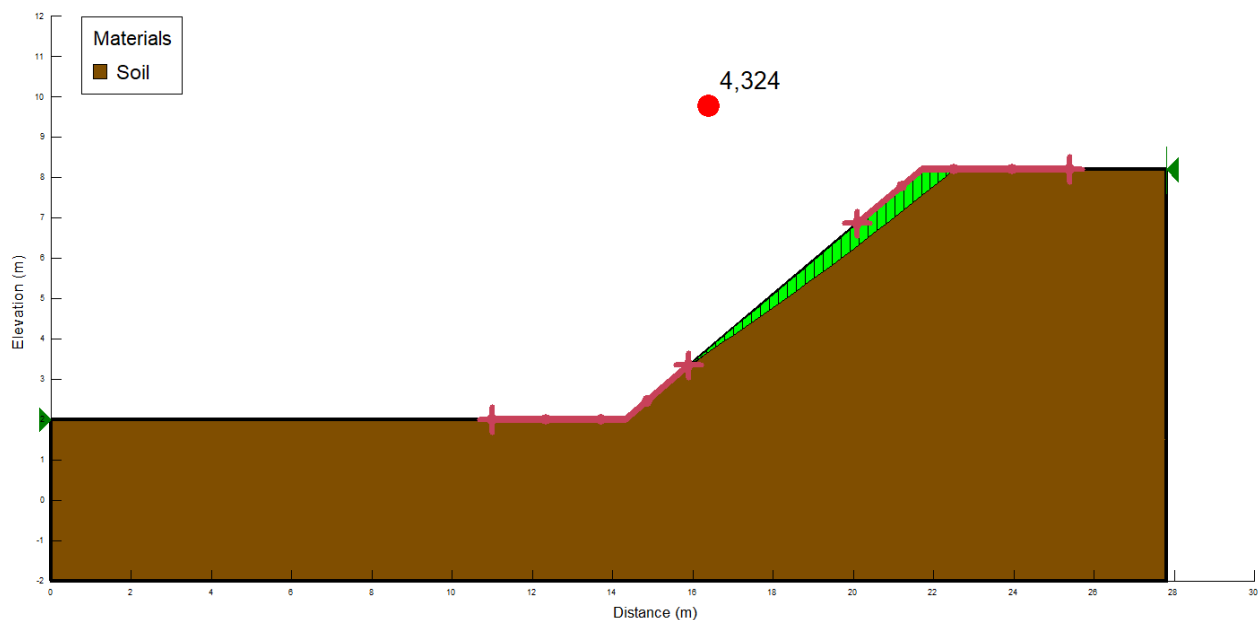


Slika 4.33. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, druga faza UPO s kutom nagiba 45°.

Izračunat faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu za UPO s kutom nagiba 45° iznosi 2,422. Kritična klizna ploha prolazi kroz dva sloja pijeska, jedan sloj šljunka i gline. Faktor sigurnosti u drugoj fazi je manji nego u prvoj.

- UPO s kutom nagiba 40°

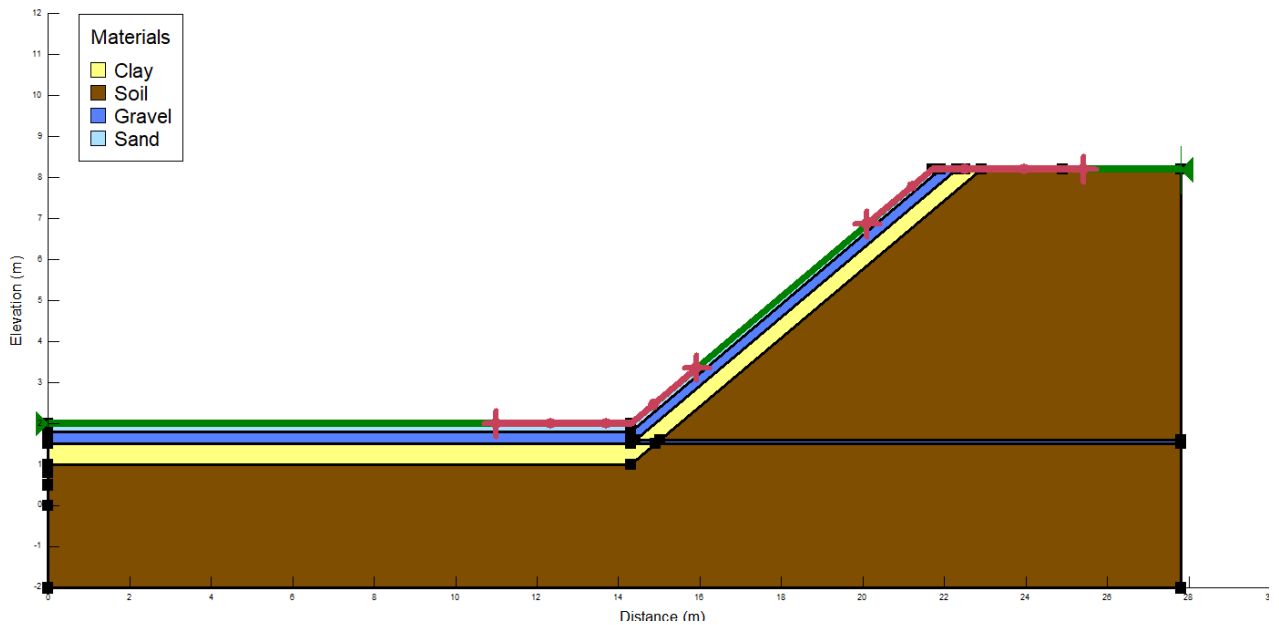
Sljedeći model UPO, na kojem je provedena analiza stabilnosti, je s kutom nagiba 40°. Prva analiza stabilnosti provedena je na kosini izvedenoj prilikom iskopa temeljnog tla (Slika 4.34.).



Slika 4.34. Kritična klizna ploha i faktor sigurnosti za kosinu nagiba 40° pri iskopu temeljnog tla.

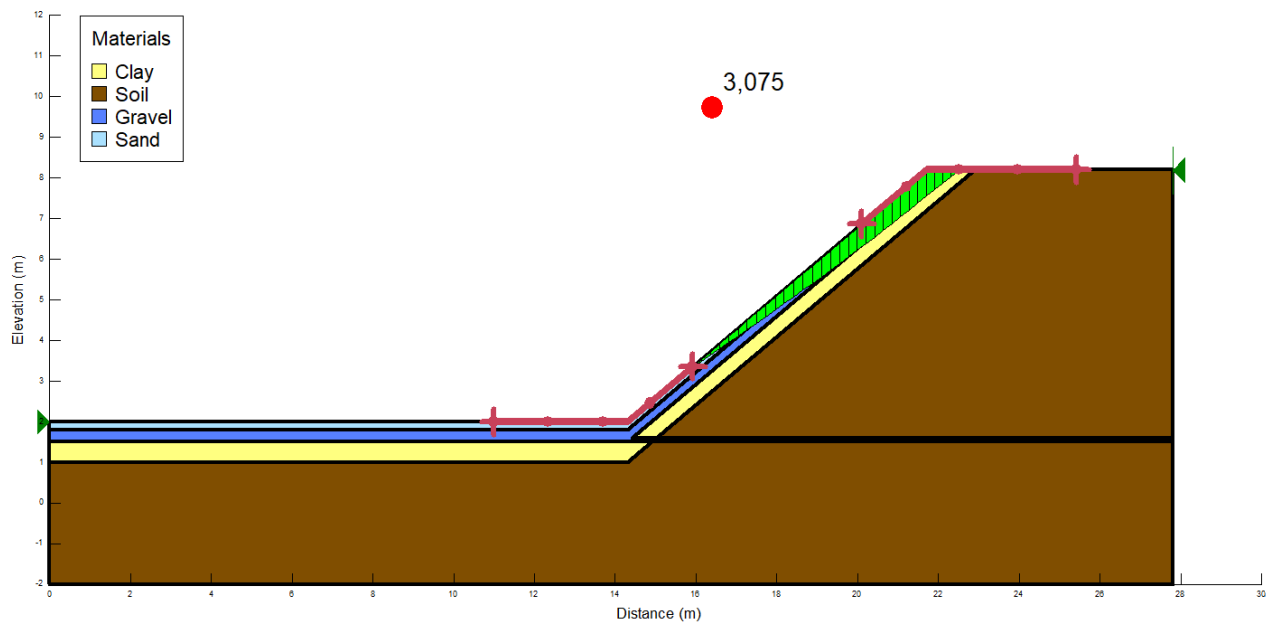
Faktor sigurnosti za kritičnu klinu plohu za kosinu pri iskopu temeljnog tla pod kutom od 40° iznosi 4,324. Budući da je faktor sigurnosti tako velik, ovaj pokos se smatra stabilnim.

Prva faza analize stabilnosti provedena je na modelu UPO pod kutom od 40° prikazanim na slici 4.35.



Slika 4.35. Prva faza UPO s kutom nagiba 40° i Entry-Exit intervali.

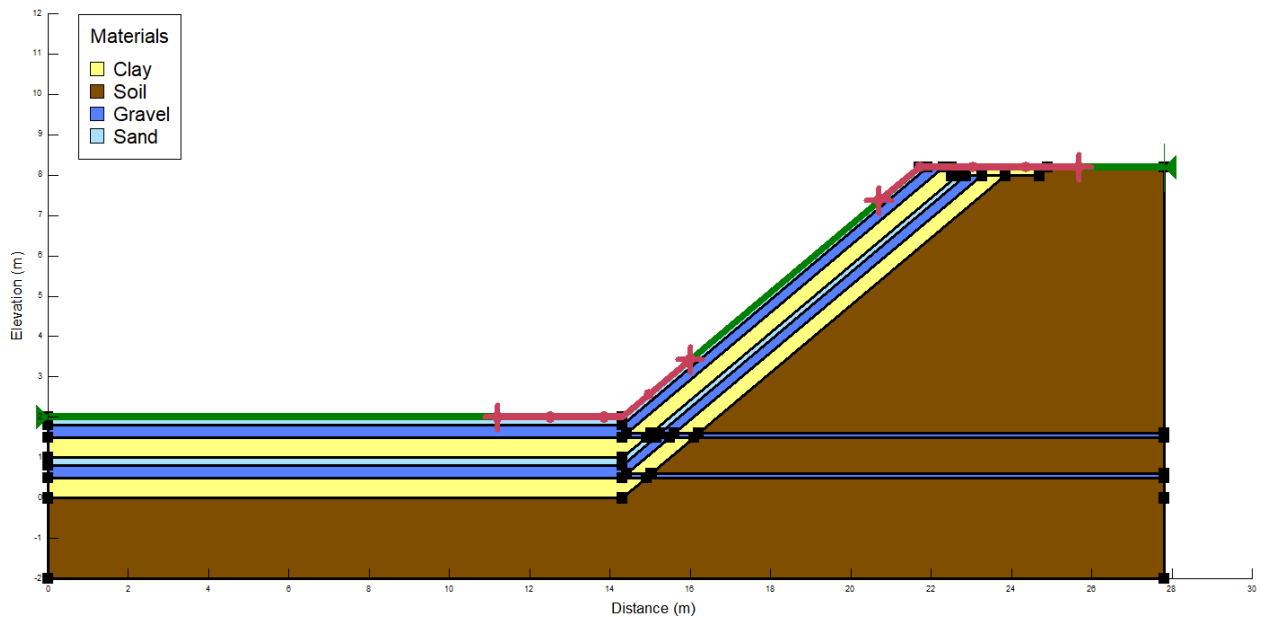
Nakon provedene analize na modelu UPO s kutom nagiba 40°, dobiveni rezultati su prikazani na slici 4.36.



Slika 4.36. Kritična klizna ploha s faktorom sigurnosti, prva faza UPO s kutom nagiba 40°.

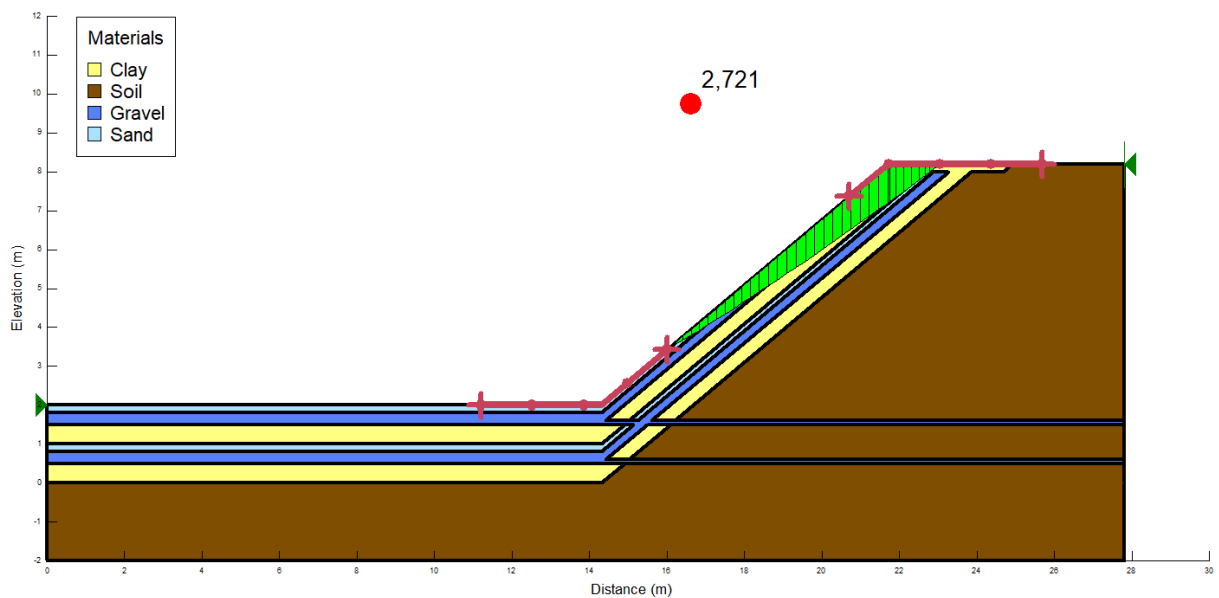
Faktor sigurnosti za UPO s kutom nagiba 40°, nakon prve faze analize iznosi 3,075. Kritična klizna ploha prolazi slojevima pijeska, šljunka i gline.

Druga faza analize stabilnosti modela UPO s kutom nagiba 40° provedena je na dva paketa slojeva (Slika 4.37.).



Slika 4.37. Druga faza UPO s kutom nagiba 40° i Entry-Exit intervali.

Nakon pokretanja programa dobiveni su rezultati druge faze modela UPO s kutom nagiba 40° . Krićna klizna ploha s faktorom sigurnosti prikazana je na slici 4.38.



Slika 4.38. Krićna klizna ploha s faktorom sigurnosti, druga faza UPO s kutom nagiba 40° .

Faktor sigurnosti krićne klizne plohe za model UPO s kutom nagiba 40° iznosi 2,721. Ponovno su rezultati iznosa faktora sigurnosti u drugoj fazi analize manji nego u prvjoj.

5. ANALIZA REZULTATA

Pregled rezultata analize stabilnosti PPO-a prikazan je u Tablici 3. i Tablici 4. za UPO-a.

Uspoređujući rezultate analize u prvoj fazi modeliranja PPO, jasno je vidljivo kako se s smanjenjem kutom nagiba kosine postignu veći faktori sigurnosti (Tablica 2.). Razlika u iznosu faktora sigurnosti više je izražena u prvoj fazi, gdje se za razliku u kutu nagiba od 5°, faktor sigurnosti povećava za gotovo cijelu jedinicu. U rezultatima prve faze kod modela PPO s kutom nagiba 45° i 50°, klizna ploha ulazi u cjelinu smjese bentonit-pijesak. To je neočekivan rezultat budući da smjesa bentonit-pijesak ima kvalitetna svojstva tj. velik iznos kohezije. Međutim, treba obratiti pažnju na iznos faktora sigurnosti. U slučajevima kada klizna ploha ulazi u cjelinu smjese bentonit-pijesak, tada je faktor sigurnosti jako velik (3,217 i 4,033) i govori o velikoj stabilnosti pokosa.

Tablica 2. Prikaz rezultata proračuna stabilnosti prve i druge faze UPO.

TIP ODLAGALIŠTA	KUT NAGIBA KOSINE	FAKTOR SIGURNOSTI (1. FAZA)	FAKTOR SIGURNOSTI (2. FAZA)
PPO	50°	1,959	1,146
PPO	45°	3,217	1,270
PPO	40°	4,033	1,353

U rezultatima druge faze analize PPO-a može se prepoznati isti trend povećanja iznosa faktora sigurnosti sa smanjenjem kuta nagiba kosine, kao i u prvoj fazi analize (Tablica 2.). Međutim, ovdje se iznos faktora sigurnosti ne povećava drastično. Niti jedna kritična ploha u drugoj fazi ne ulazi u smjesu bentonit-pijesak, već samo siječe slojeve pokrovnog zaštitnog sustava. Za svaki model faktor sigurnosti je veći od 1 i takvi rezultati se smatraju zadovoljavajućim. Najveći faktor sigurnosti postignut je u modelu PPO s kutom nagiba 40° i njegov iznos je 1,353. Iako takav model ima najveću stabilnost kosine, on zauzima najviše prostora i u tom kontekstu je najnepoželjniji ukoliko postoji prostorno ograničenje.

Kritična klizna ploha niti u jednom slučaju u drugoj (konačnoj) fazi modela ne prolazi kroz smjesu bentonit-pijesak i beton koji predstavlja betonsku kasetu s otpadom. U stvarnosti je gotovo nemoguće da u nekom slučaju sloma klizne i dio betonske kasete zbog karakteristika materijala betona koji se ponaša kao krto tijelo. Treba naglasiti važnost i ulogu smjese bentonit-pijesak, koja uz izolacijska svojstva za NSRAO, služi kao dodatna brtvena barijera

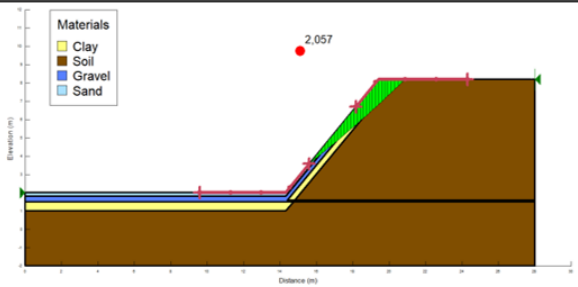
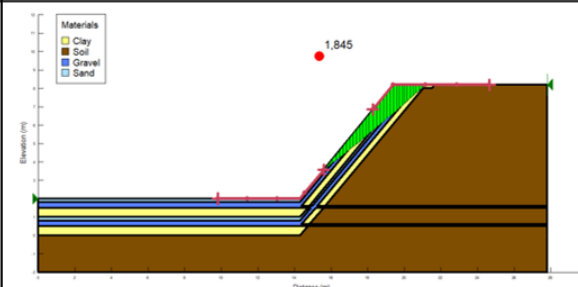
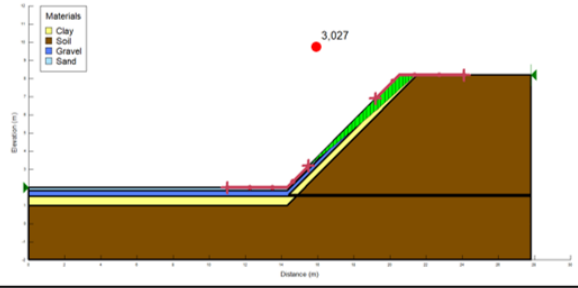
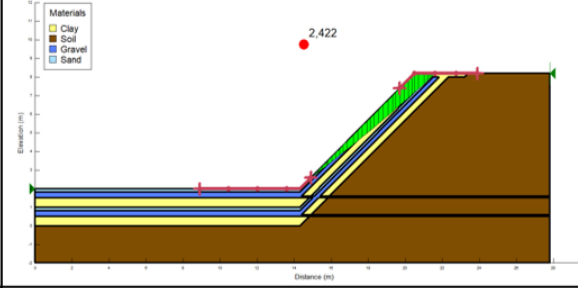
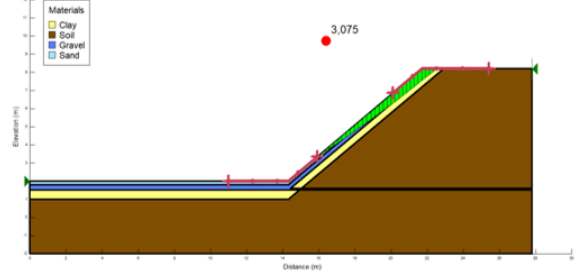
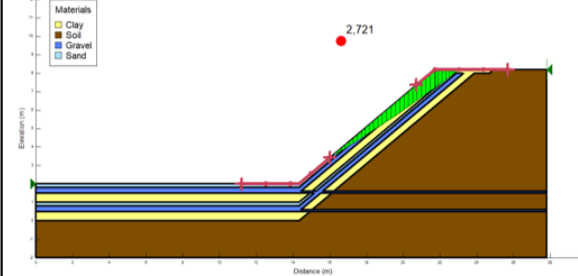
zbog specifičnih svojstava i kao zaštita za trajno skladištenje otpada. Zbog smjese bentonit-pijesak, zaštita odlagališnih jedinica od uništenja prilikom klizanja materijala je osigurana.

Primjećuje se i utjecaj rekultivirajućeg sloja na položaj kritične klizne plohe i faktor sigurnosti. Kada je u analizu stabilnosti uključen i rekultivirajući sloj (druga faza), primjećuje se nešto duža putanja i dublji prodor kritične klizne plohe. Evidentno je kako rekultivirajući sloj ima negativan utjecaj na stabilnost kosine, ali zbog njegove višestruke važnosti za odlagalište, greška je izostaviti ga. Iako je na rezultatima proračuna stabilnosti vidljiv negativan utjecaj rekultivirajućeg sloja, utjecaj je malen i on neće prouzročiti slom. Kao što je već naglašeno prije, u proračun nije bilo moguće uključiti geomrežu. Zsigurno bi takav element pridodao na kompaktnosti sustava slojeva i umanjio negativan utjecaj rekultivirajućeg sloja.

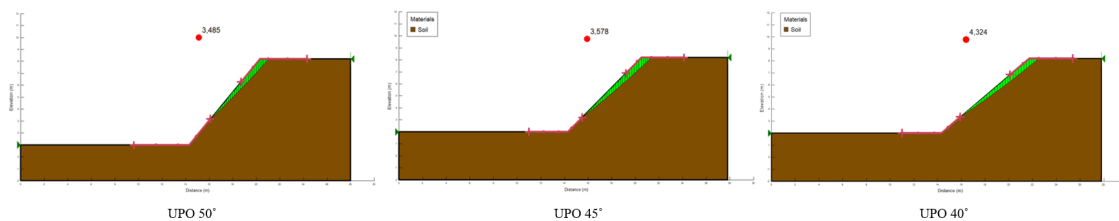
Tablica 3. Prikaz rezultata analize stabilnosti na modelima PPO.

TIP ODLAGALIŠTA	KUT NAGIBA KOSINE	1. FAZA	FAKTOR SIGURNOSTI (1. FAZA)	2. FAZA	FAKTOR SIGURNOSTI (2. FAZA)
PPO	50°		1,959		1,146
PPO	45°		3,217		1,270
PPO	40°		4,033		1,353

Tablica 4. Prikaz rezultata analize stabilnosti na modelima UPO.

TIP ODLAGALIŠTA	KUT NAGIBA KOSINE	1. FAZA	FAKTOR SIGURNOSTI (1. FAZA)	2. FAZA	FAKTOR SIGURNOSTI (2. FAZA)
UPO	50°		2,057		1,845
UPO	45°		3,027		2,422
UPO	40°		3,075		2,721

Unutar analize UPO-a, osim proračuna stabilnosti u dvije faze, dodan je još i proračun stabilnosti kosine prilikom iskopa temeljnog tla (Slika 5.1.).



Slika 5.1. Prikaz rezultata proračuna stabilnosti kosine pri iskopu temeljnog tla.

Na rezultatima je jasno vidljivo kako manji kut nagiba kosine znači veći faktor sigurnosti (Tablica 4. i Tablica 5.). Uspoređujući ove rezultate s rezultatima prve i druge faze, može se lako vidjeti kakav utjecaj imaju slojevi na stabilnost kosine.

Tablica 5. Prikaz rezultata proračuna stabilnosti kosine pri iskopu temeljnog tla s rezultatima proračuna stabilnosti prve i druge faze UPO.

TIP ODLAGALIŠTA	KUT NAGIBA KOSINE	FAKTOR SIGURNOSTI (iskop temeljnog tla)	FAKTOR SIGURNOSTI (1. FAZA)	FAKTOR SIGURNOSTI (2. FAZA)
UPO	50°	3,485	2,057	1,845
UPO	45°	3,578	3,027	2,422
UPO	40°	4,324	3,075	2,721

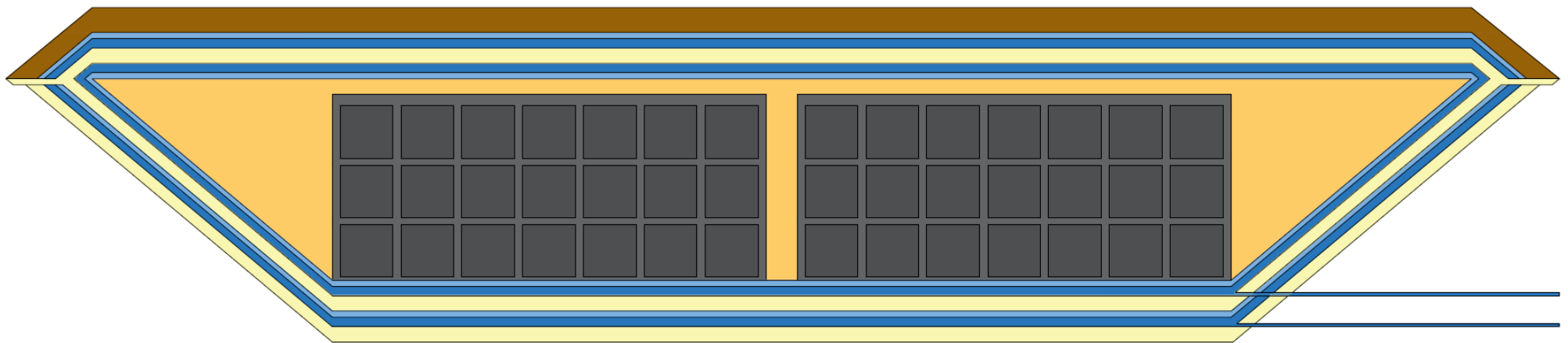
Prilikom analize stabilnosti UPO-a, u račun nije obuhvaćena smjesa bentonit-pijesak i beton zbog računanja kritične klizne plohe na unutarnjoj strani kosine odlagališta. Prateći rezultate analize prve faze stabilnosti modela UPO-a, primjećuje se jednak trend povećanja faktora sigurnosti sa smanjenjem kuta nagiba kosine odlagališta. U modelu UPO (prva faza) s kutom nagiba 50° treba primijetiti kako kritična klizna ploha, osim slojeva temeljnog zaštitnog sustava, siječe i jedinicu temeljnog tla. Takav slučaj pretpostavlja i slom u temeljnom tlu.

U modelima UPO-a s kutovima nagiba 45° i 50° u drugoj fazi analize, kritična klizna prolazi kroz drugi paket slojeva i uspoređujući s rezultatima prve faze, vidljivo je kako novi paket slojeva ima negativan utjecaj na stabilnost kosine. Iako je utjecaj negativan, rezultati su i dalje jako dobri jer je faktor sigurnosti velikog iznosa.

Korelacijom rezultata proračuna stabilnosti PPO-a i UPO-a, bolji rezultati faktora stabilnosti dobiveni su u modelima UPO-a.

Stoga, za najbolje tehničko rješenje novog koncepta odlagališta NSRAO, odabran je model UPO s kutom nagiba 40° . Na slici 5.2. prikazan je konačni model sa svim zaštitnim sustavima slojeva i betonskim kasetama.

UPO s kutom nagiba 40° ima najveće rezultate faktora stabilnosti za kritičnu kliznu plohu i iznosi 2,721. Numeričkom analizom ovog modela odlagališta dokazano je kako je to objekt s dovoljno trajnom stabilnošću pokosa.



Slika 5.2. Najpovoljniji model novog koncepta odlagališta NSRAO. Ukopano pripovršinsko odlagalište s kutom nagiba 40°.

6. ZAKLJUČAK

Konstruktivno rješenje za novi koncept pripovršinskog odlagališta omogućuje dugotrajnu i poboljšanu izolaciju NSRAO u odnosu na dosadašnja rješenja. Unaprjeđenje u zaštitnim sustavima odlagališta osigurava dodatnu zaštitu odlagališnog prostora, okoliša i biote. Cjelovit pokrovni zaštitni sustav novog koncepta odlagališta štiti od niskih temperatura i zamrzavanja, prodora oborinske vode u odlagalište i ostalih vanjskih utjecaja na tijelo odlagališta. Temeljni zaštitni sustav u potpunosti štiti tlo i podzemnu vodu od zagađenja radionuklidima. Materijali (slojevi) zaštitnih sustava odabrani su na način da efektivnost svakog sloja bude na najvišoj razini, a način pakiranja NSRAO i njegovo skladištenje predstavlja najučinkovitije rješenje po pitanju zauzimanja prostora i sigurnosti od širenja radioaktivnog zračenja.

Kako bi se provjerila tehnička izvedivost novog koncepta odlagališta, numeričkom analizom dokazano je kako novi koncept odlagališta predstavlja objekt s dovoljnom trajnom stabilnošću pokosa. Proračun stabilnosti proveden je na dva tipa pripovršinska odlagališta, PPO i UPO. Analizom rezultata utvrđeno kako je veća stabilnost pokosa u odlagalištu ukopanog tipa. Najbolji rezultati stabilnosti dobiveni su na UPO s kutom nagiba 40° .

Kao najbolje rješenje odabran je model UPO s kutom nagiba 40° . Takvo odlagalište najsigurnije je rješenje po pitanju stabilnosti pokosa. Budući da u proračun stabilnosti nije uvrštena geomreža, rezultatima analize treba pridodati i taj faktor.

Ovaj rad rezultirao je uspješno implementiranim dodatnim zaštitnim slojevima u svrhu optimiziranja njegove funkcije.

7. LITERATURA

ČLANCI I KNJIGE

Albateineh, N. 2006. Slope stability analysis using 2D and 3D methods. Master Thesis, The University of Akron, Akron, Ohio.

Duncan, J., Wright, S.G. 2005. Soil Strength and Slope Stability, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Bergström U., Pers K., Almen Y., 2011. International perspective on repositories for low level waste. Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Solna, Sweden.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY 2011. Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA, Vienna, Austria.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY 2009. Classification of Radioactive Waste. General safety guide. Vienna. Austria.

Khelukar N., Shah S., Jeswani H. 2015. A Review of Radioactive Waste Management. Sardar Patel College of Engineering. Mumbai, India.

Sharma L.K., Singh R., Ahmad M., Umrao R.K., Singh T.N. 2017. Experimental Evaluation of Geomechanical Behaviour of Bentonite-Sand Mixture for Nuclear Waste. Elsevier, Oxford.

Veinović Ž., Kvasnička P. 2007. Površinska odlagališta otpada. Interna skripta. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Yang J., Cai X., Pang Q., Guo X-w., Wu Y-l, Zhao J-I, 2018. Experimental Study on the Shear Strength of Cement-Sand-Gravel Material, China: Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering.

www izvori:

Szavits-Nossan V., Mehanika tla i stijena, 13. predavanje Stabilnost kosina.

https://www.grad.unizg.hr/download/repository/13._Predavanje_MT.pdf, 12.10.2021.

Foro Nuclear- Foro de la Industria Nuclear Espanola.

<https://www.foronuclear.org/en/>, 10.10.2021.

Zbrinjavanje radioaktivnog otpada

<https://www.radioaktivniotpad.org/>, 10.10.2021.

TECNATOM, Nuclear sector

<https://www.tecnatom.es/en/>, 10.10.2021.

Enresa, El Cabril Disposal Facility

<https://www.enresa.es/eng/index/activities-and-projects/el-cabril>, 10.10.2021.

ANDRA, Radioactive waste in France

<https://international.andra.fr/>, 10.10.2021.

Japan Nuclear Fuel Limited

<https://www.jnfl.co.jp/en/>, 10.10.2021.

Rokkasho, Energy Human Future

http://www.rokkasho.jp/index.cfm/7,308,c.html/308/rokkasho-pamf_ENG.pdf, 10.10.2021.

Geotech Data, Geoparameters

<https://www.geotechdata.info/parameter>, 15.10.2021.

Don&Low Ltd.

<https://www.donlow.co.uk/>, 17.10.2021.

External works

<https://www.externalworksindex.co.uk/>, 16.10.2021.



KLASA: 602-04/21-01/271
URBROJ: 251-70-15-21-2
U Zagrebu, 1. 12. 2021.

Ivana Rožman, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/271, URBROJ: 251-70-15-21-1 od 1. 12. 2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

PRORAČUN STABILNOSTI PRIPOVRŠINSKOG ODLAGALIŠTA NISKO I SREDNJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada izv. prof. dr. sc. Želimir Veinović nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentoricu Dr. sc. Helena Vučenović.

Mentor:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Želimir Veinović

(titula, ime i prezime)

Komentorica:

(potpis)

Dr. sc. Helena Vučenović

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc. dr. sc. Zoran Kovač

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)