

Numerički model promjene stabilnosti odlagališta uslijed promjene sastava otpada

Jezidžić, Helena

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:169:921068>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**



Repository / Repozitorij:

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



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

**NUMERIČKI MODEL PROMJENE STABILNOSTI ODLAGALIŠTA USLIJED
PROMJENE SASTAVA OTPADA**

Diplomski rad

Helena Jezidžić

R4301

Zagreb, 2024.



KLASA: 602-01/24-01/101
URBROJ: 251-70-11-24-2
U Zagrebu, 20.9.2024

Helena Jezidžić, studentica


RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/101, URBROJ: 251-70-11-24-1 od 24.06.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

NUMERIČKI MODEL PROMJENE STABILNOSTI ODLAGALIŠTA USLIJED PROMJENE SASTAVA OTPADA

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

Voditelj




(potpis)

doc.dr.sc. Helena Vučenović

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite:

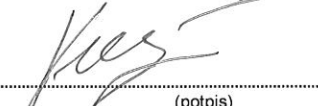


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Suvoditelj

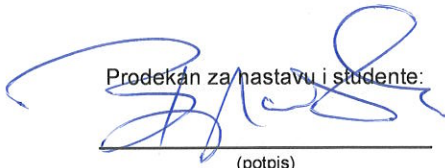


(potpis)

izv.prof.dr.sc. Želimir Veinović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)

NUMERIČKI MODEL PROMJENE STABILNOSTI ODLAGALIŠTA USLIJED PROMJENE SASTAVA
OTPADA

Helena Jezidžić

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

Sažetak

U radu je prikazan utjecaj različitih udjela kuhinjskog otpada na stabilnost odlagališta. Stabilnost odlagališta ovisi o brojnim faktorima kao što su sastav, svojstva i starost otpada, nagib odlagališta, razina filtrata, klimatski uvjeti i dr. Nacrt odlagališta napravljen je u AutoCAD-u, a analiza stabilnosti provedena je u programskom paketu GeoStudio u programu SLOPE/W. Analizirano je sedam modela odlagališta sa nagibom pokosa od 20°, te su provedene još dvije analize za odlagalište s nagibom od 10° i 19°. Nakon provedenih analiza utvrđeno je kako povećanje udjela kuhinjskog otpada utječe na stabilnost odlagališta.

Ključne riječi: kuhinjski otpad, stabilnost, odlagalište

Završni rad sadrži: 39 stranica, 8 tablica, 39 slika i 17 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Doc.dr.sc. Helena Vučenović
Izv. prof. dr. sc. Želimir Veinović

Ocjenjivači: Doc.dr.sc. Helena Vučenović
Izv. prof. dr. sc. Želimir Veinović
Izv. prof. dr. sc. Dubravko Domitrović
Izv. prof. dr. sc. Dario Perković
Izv. prof. dr. sc. Karolina Novak Mavar

NUMERICAL MODEL OF LANDFILL STABILITY VARIATION DUE TO CHANGES IN WASTE
COMPOSITION

Helena Jezidžić

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

Abstract

In this thesis, the impact of different proportions of kitchen waste on landfill stability is presented. The stability of a landfill depends on numerous factors such as the composition, properties, and age of the waste, the slope of the landfill, the level of leachate, climatic conditions, and others. The landfill design was created in AutoCAD, and the stability analysis was performed using the GeoStudio software package in the SLOPE/W program. Seven landfill models with a slope inclination of 20° were analyzed, and two additional analyses were conducted for landfills with slope inclinations of 10° and 19°. Once the analyses had been completed, it was determined how an increase in the proportion of kitchen waste affects the stability of the landfill.

Keywords: kitchen waste, stability, landfill

Thesis contains: 39 pages, 8 tables, 39 figures i 17 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Assistant Professor Helena Vučenović, PhD
Associate Professor Želimir Veinović, PhD

Reviewers: Assistant Professor Helena Vučenović, PhD
Associate Professor Želimir Veinović, PhD
Associate professor Dubravko Domitrović, PhD
Associate professor Dario Perković, PhD
Associate professor Karolina Novak Mavar, PhD

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. SVOJSTVA OTPADA	2
2.1. Geotehnička svojstva otpada	2
2.2. Utjecaj sastava otpada na geotehnička svojstva	3
3. STABILNOST ODLAGALIŠTA OTPADA	8
3.1. Uzroci nestabilnosti na odlagalištima otpada.....	8
3.2. Utjecaj sastava otpada na stabilnost odlagališta Prudinec i pregled klizišta...	11
4. NUMERIČKA ANALIZA STABILNOSTI ODLAGALIŠTA	16
4.1. Teoretske osnove	16
4.2. Opis materijala i vrijednosti parametara	17
4.3. Analiza stabilnosti.....	19
5. ANALIZA REZULTATA.....	31
6. ZAKLJUČAK.....	37
7. LITERATURA	38

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Rezultati ispitivanja izravnim posmikom (Cho et al., 2011)	4
Slika 2-2. Rezultati Proctorovog ispitivanja (Singh i Uchimura, 2023).....	6
Slika 2-3. Rezultati izravnog posmika za a) papir, b) plastiku, c) organski otpad (Singh i Uchimura, 2023).....	7
Slika 3-1. Karakteristični nastanci klizne plohe u odlagalištu.....	9
Slika 3-2. Odlagalište Maoershan, Kina (Zhang et al., 2020)	9
Slika 3-3. Odlagalište Meethotamula, Šri Lanka (Zhang et al., 2020)	10
Slika 3-4. Odlagalište Xiaping, Kina (Zhang et al., 2020)	10
Slika 3-5. Razvoj radova na odlagalištu Prudinec (Kovačević-Zelić et al., 2002).....	11
Slika 3-6. Numerički model stabilnosti odlagališta sa 10%, 30% i 60% kuhinjskog otpada (Vučenović et al., 2024)	12
Slika 3-7. Promjena vrijednosti faktora sigurnosti sa promjenom udjela kuhinjskog otpada i kuta unutarnjeg trenja (Vučenović et al., 2024)	13
Slika 3-8. Klizište na odlagalištu Prudinec, studeni 2023.godine (Mitrović, 2023).....	13
Slika 3-9. Klizište na odlagalištu Prudinec, studeni 2023.godine (Mitrović, 2023).....	14
Slika 3-10. Klizište na odlagalištu Prudinec, prosinac 2023.godine (Karakaš Jakubin et al., 2023).....	15
Slika 3-11. Fotografija odlagališta Prudinec u kolovozu 2024. godine (Ćorić Brunović, 2024)	15
Slika 4-1. Prikaz podjele klizne plohe na lamele (Szavits-Nossan, 2015)	16
Slika 4-2. Parametri za analizu stabilnosti	17
Slika 4-3. Sučelje programa GeoStudio	19
Slika 4-4. KeyIn Analyses, Limit Equilibrium.....	20
Slika 4-5. KeyIn Analyses, Morgenstern-Price	20
Slika 4-6. Units and Scale.....	21
Slika 4-7. Nacrt odlagališta otpada u AutoCAD-u	22
Slika 4-8. Nacrt odlagališta otpada u GeoStudiu.....	22
Slika 4-9. KeyIn Materials	23
Slika 4-10. Draw Materials.....	23
Slika 4-11. Definiranje potencijalne klizne plohe	24
Slika 4-12. Analiza stabilnosti za 10% kuhinjskog otpada	24
Slika 4-13. Prikaz svih kliznih ploha.....	25

Slika 4-14. Analiza stabilnosti za 30% kuhinjskog otpada	26
Slika 4-15. Analiza stabilnosti za 60% kuhinjskog otpada	26
Slika 4-16. Analiza stabilnosti za 0% kuhinjskog otpada	27
Slika 4-17. Analiza stabilnosti za 40% kuhinjskog otpada	27
Slika 4-18. Analiza stabilnosti za 58% kuhinjskog otpada	28
Slika 4-19. Analiza stabilnosti za 80% kuhinjskog otpada	28
Slika 4-20. Nacrt odlagališta otpada s nagibom kosine od 19°	29
Slika 4-21. Nacrt odlagališta otpada s nagibom kosine od 10°	29
Slika 4-22. Analiza stabilnosti za odlagalište s 60% kuhinjskog otpada.....	30
Slika 4-23. Analiza stabilnosti za odlagalište s 80% kuhinjskog otpada.....	30
Slika 5-1. Usporedba faktora sigurnosti iz Plaxisa i GeoStudia.....	33
Slika 5-2. Usporedba rezultata.....	36

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Sastav otpada uzoraka miješanog komunalnog otpada (Cho et al., 2011).....	4
Tablica 2-2. Sastav uzoraka (Singh i Uchimura, 2023).....	5
Tablica 4-1. Parametri za analizu stabilnosti dobiveni analitičkim metodama	18
Tablica 4-2. Parametri za analizu stabilnosti dobiveni laboratorijskim ispitivanjima.....	18
Tablica 5-1. Rezultati analize stabilnosti s parametrima dobivenim analitičkom metodom	31
Tablica 5-2. Rezultati analize stabilnosti s parametrima dobivenim laboratorijskim ispitivanjem	32
Tablica 5-3. Rezultati analize stabilnosti za odlagališta s različitim nagibom kosine za odlagalište s 60% kuhinjskog otpada	34
Tablica 5-4. Rezultati analize stabilnosti za odlagališta s različitim nagibom kosine za odlagalište s 80% kuhinjskog otpada	35

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
γ	kN/m^3	jedinična težina
τ	Pa	posmično naprežanje
τ	Pa	posmična čvrstoća
φ	°	kut unutarnjeg trenja
c	Pa	kohezija
F_s	-	faktor sigurnosti

1. UVOD

U zadnjih nekoliko desetljeća, nagli porast stanovništva, urbanizacija, gospodarski razvoj i promjene kupovnih navika potrošača dovele su do povećanja proizvodnje otpada. Povećane količine otpada stvaraju probleme u velikim gradovima, kapaciteti postojećih odlagališta često su iscrpljeni, a mogućnosti za širenje ili otvaranje novih odlagališta su ograničene. Kako bi se smanjile količine otpada koje završavaju na odlagalištima, tijekom godina počelo se promovirati načelo 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*, hrv. *smanji, ponovo koristi, recikliraj*), ali ipak, određene količine otpada i dalje moraju biti odložene na odlagališta. Poticanjem recikliranja, dolazi do izdvajanja određenih komponenti iz miješanog komunalnog otpada, kao što su papir, plastika, metal i biootpad. Zbog izdvajanja određenih komponenti iz miješanog komunalnog otpada, došlo je do promjene sastava otpada koji se odlaže na odlagališta. Ove promjene u sastavu otpada izravno utječu na njegova fizikalna, mehanička i kemijska svojstva. Ukoliko dođe do promjene u fizikalnim i mehaničkim svojstvima otpada, mijenjaju se parametri čvrstoće, što izravno utječe na stabilnost odlagališta (Vučenović et al., 2024; Zhang et al., 2020).

U ovom radu napravljena je analiza stabilnosti površinskog odlagališta s različitim udjelima kuhinjskog otpada. Analiza je provedena u programu GeoStudio (SLOPE/W) kako bi se utvrdio utjecaj različitog sastava otpada na stabilnost odlagališta.

2. SVOJSTVA OTPADA

Sastav komunalnog otpada izrazito je raznolik i uglavnom se sastoji od hrane, papira, plastike, stakla i drugih materijala. Ovisno o udjelu pojedine komponente, svojstva otpada (fizikalna, mehanička, kemijska i biološka) mogu značajno varirati.

2.1. Geotehnička svojstva otpada

Otpad je heterogeni skup materijala i tvari koji predstavlja inženjerski „materijal“ čija se mehanička svojstva trebaju uključiti prilikom projektiranja i izgradnje odlagališta. Određivanje mehaničkih svojstava otpada temelji se na spoznajama i pravilima klasične mehanike tla. Otpad je specifičan materijal i znatno se razlikuje od tla te je njegov sastav promjenjiv s vremenom (Ivšić et al., 2004; Jones i Dixon, 2003; König i Jessberger, 1997). Postoji više klasifikacija otpada za različite svrhe, primjer jedne klasifikacije dalo je Njemačko geotehničko društvo gdje se otpad dijeli na dvije skupine:

- otpad sličan tlu,
- otpad različit od tla.

U prvoj skupini otpad je čestični materijal (jalovina, građevinski materijal, mulj i dr.) te su na njega primjenjive metode ispitivanja i proračuna stabilnosti kakvi se koriste u mehanici tla, dok je u drugoj skupini otpad materijal (zeleni otpad, voluminozni otpad i dr.) na kojeg su ograničeno ili nisu uopće primjenjiva načela mehanike tla. Drugu skupinu otpada moguće je karakterizirati postupkom koji obuhvaća razvrstavanje prema sastavnica (papir, mulj, metali, minerali, drvo, tvrda i meka sintetika), određivanje veličine zrna za frakcije manje od 120 mm, geometriju sastavnica (zrna, vlakna, folije, kutije) te određivanje udjela organske komponente i vlažnosti (Ivšić et al., 2004; König i Jessberger, 1997).

Jedinična težina (γ) otpada važan je parametar za stabilnost odlagališta jer predstavlja konstantno opterećenje koje uzrokuje deformacije (slijeganja) i normalnim naprezanjima aktivira čvrstoće mjerodavnih materijala na kliznim plohama ili temeljnoj plohi. Vrijednost volumenske težine ovisi o zbijenosti pri ugradnji, težini nadsloja, starosti otpada, načinu ugradnje i raznolikosti sastavnica otpada. Zbog navedenih čimbenika, vrijednosti volumenske težine imaju široki raspon od 3 do 20 kN/m³. Ova varijabilnost ukazuje kako bi se trebalo standardizirati zbijanje otpada prilikom ugradnje zbog povećanja dugotrajne stabilnosti odlagališta otpada (Ivšić et al., 2004).

Kako bi analize stabilnosti bile pouzdane, potrebno je odrediti parametre čvrstoće duž kliznih ploha na odlagalištu. Čvrstoća otpada određuje se pomoću Coulombova kriterija

čvrstoće. Prirast čvrstoće s normalnim naprezanjem prikazuje kut unutarnjeg trenja (Φ), a odsječak na osi posmičnih naprezanja prikazuje „prividnu koheziju“(c). Posmična čvrstoća otpada ovisi o njegovom sastavu i uspoređuje se s ponašanjem armiranog tla (König i Jessberger, 1997). Otpad se promatra kao materijal koji se sastoji od dvije komponente: čestica manjih od 120 mm, koje se ponašaju kao tlo, te vlaknastih sastavnica (papir, karton, plastika i dr.) koje predstavljaju „armaturu“. Iako ova idealizacija pojednostavljuje heterogenost otpada, omogućuje procijenu komponenti posmične čvrstoće u laboratoriju (Ivšić et al., 2004).

Osim čvrstoće otpada potrebno je poznavati i parametre čvrstoće na kontaktima brtvenih slojeva. Brtveni slojevi najčešće se sastoje od geosintetika ili kombinacije geosintetika s mineralnim materijalima. Na kontaktima različitih materijala postoji velika mogućnost pojave kliznih ploha, stoga je potrebno odrediti čvrstoću na kontaktu geosintetika i kontaktu geosintetika s mineralnim materijalima. Čvrstoća brtvenih slojeva također je definirana Coulombovim kriterijem čvrstoće (Ivšić et al., 2004).

Navedene parametre potrebno je poznavati radi izvođenja uspješnih analiza stabilnosti odlagališta. Zbog heterogenog sastava otpada, vrijednosti parametara značajno variraju, što otežava procjenu stabilnosti na odlagalištima.

2.2. Utjecaj sastava otpada na geotehnička svojstva

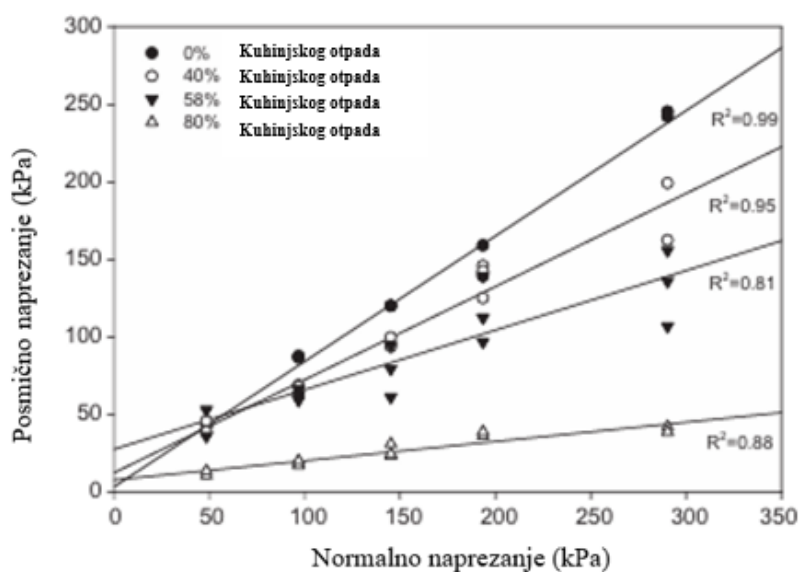
Sastav otpada ovisi o geografskom položaju, kulturološkim značajkama i godišnjem dobu te značajno može varirati u različitim državama. U SAD-u, udio kuhinjskog otpada u miješanom komunalnom otpadu iznosi 12,5%, dok je u Kini 73% (Cho et al., 2011). Istraživanje promjene vrijednosti kuta unutarnjeg trenja s promjenom udjela kuhinjskog otpada ispitano je na velikom broju uzoraka koji su prikupljeni u Kini i sadržavali su 0-80% kuhinjskog otpada u ukupnoj masi (Cho et al., 2011).

Kuhinjski otpad sastojao se od mesa, riže, voća, povrća i ulja, odnosno hrana koja se baca, a udjeli ostalih sastavnica otpada u uzorcima prikazani su u tablici 2-1.

Tablica 2-1. Sastav otpada uzoraka miješanog komunalnog otpada (Cho et al., 2011)

Komponenta	Udio (%) u vlažnoj masi			
Kuhinjski otpad	0.0	40.0	57.6	80.0
Papir	24.0	14.4	10.2	4.8
Plastika	22.3	13.4	9.5	4.6
Metal	4.0	2.4	1.7	0.8
Drvo	11.2	6.7	4.7	2.2
Staklo	6.2	3.7	2.6	1.2
Tekstil	8.7	5.2	3.7	1.7
Pepeo	23.7	14.2	10.0	4.7

Uzorci su ispitani u uređaju za izravni posmik, a rezultati ispitivanja su prikazani na slici 2-1.



Slika 2-1. Rezultati ispitivanja izravnim posmikom (Cho et al., 2011)

Mohr-Coulombov kriterij sloma prikazuje kako se smanjenjem udjela kuhinjskog otpada povećava posmična čvrstoća uzoraka. Osim toga, povećanjem udjela kuhinjskog otpada s 0% na 40% kut trenja se smanjio s 39° na 31°, a povećanjem udjela kuhinjskog otpada s 40% na 80%, kut trenja se smanjio na 7° (Cho et al., 2011).

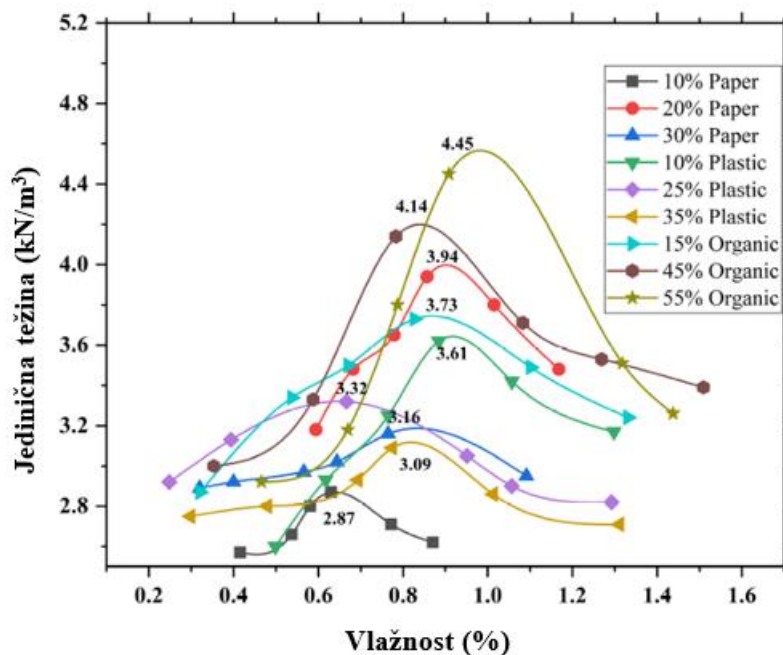
Osim utjecaja kuhinjskog otpada, različite komponente komunalnog otpada, kao što su plastika, papir, organski otpad i drugi materijali, također imaju značajan utjecaj na geotehnička svojstva otpada. Istraživanje Singha i Uchimure (2023) fokusiralo se na utjecaj različitih komponenti materijala na gustoću i posmičnu čvrstoću otpada iz Indije. Istraživanje je provedeno na 9 uzoraka različitog sastava (tablica 2-2).

Tablica 2-2. Sastav uzoraka (Singh i Uchimura, 2023)

Komponenta	Maseni udio svake komponente (%)				
	SW-01	SW-02	SW-03	SW-04	SW-05
Papir	21.20	10	30	22.42	18.69
Metal	5.10	5.81	4.52	5.39	4.50
Vrtni otpad	2	2.28	1.77	2.12	1.76
Drvo	6	6.83	5.32	6.35	5.29
Karton	4.10	4.67	3.63	4.34	3.61
Tlo	4	4.55	3.55	4.23	3.53
Plastika	15.10	17.19	13.39	10	25
Tekstil	3.65	4.15	3.24	3.86	3.22
Organski otpad	30.00	34.15	26.60	31.73	26.44
Pijesak	9	10.24	7.98	9.52	7.93
Komponenta	SW-06	SW-07	SW-08	SW-09	
Papir	16.20	25.68	16.61	13.60	
Metal	3.90	6.18	4	3.27	
Vrtni otpad	1.53	2.42	1.57	1.28	
Drvo	4.59	7.27	4.70	3.85	
Karton	3.13	4.97	3.21	2.63	
Tlo	3.06	4.85	3.13	2.57	
Plastika	35	18.29	11.83	9.69	
Tekstil	2.79	4.42	2.86	2.34	
Organski otpad	22.93	15	45	55	
Pijesak	6.88	10.90	7.05	5.77	

Sastav uzorka SW-01 imitira sastav komunalnog otpada, dok uzorci SW-02 i SW-03 prikazuju utjecaj papira na mehanička svojstva otpada. Uzorci SW-04, SW-05 i SW-06 opisuju na koji način plastika utječe na mehanička svojstva otpada, a uzorci SW-07, SW-08 i SW-09 prikazuju utjecaj organskog otpada (Singh i Uchimura, 2023).

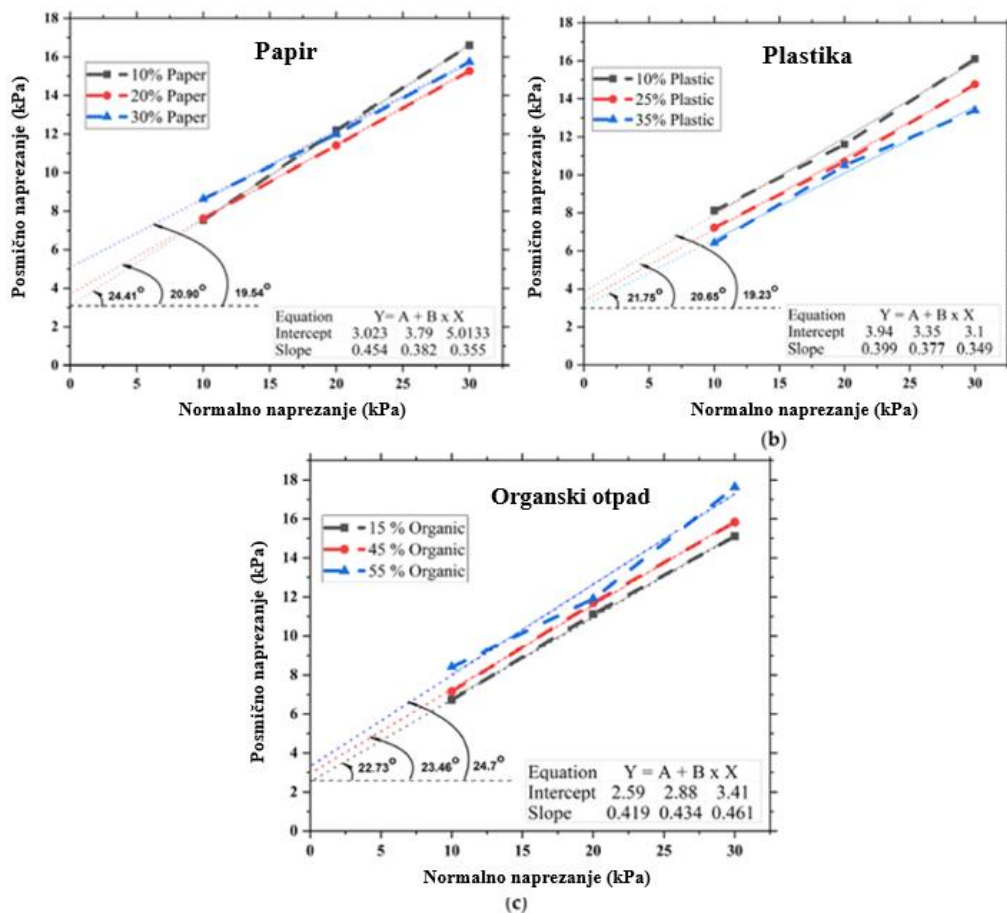
Modificiranim Proctorovim pokusom određena je maksimalna suha gustoća i optimalna vlažnost uzoraka, rezultati su prikazani na slici 2-2.



Slika 2-2. Rezultati Proctorovog ispitivanja (Singh i Uchimura, 2023)

Dobiveni rezultati u usporedbi sa drugim objavljenim ispitivanjima daju nešto niže vrijednosti jedinične težine od uobičajenog raspona vrijednosti. Autori navode kako treba uzeti u obzir činjenicu da uzorci simuliraju komunalni otpad te se od njega osim po nekim sastavnicama razlikuju i po vlazi. Osim toga, komunalni otpad se na odlagalištu zbija pod vlastitom težinom i prelaskom kompaktora, što uzrokuje povećanje jedinične težine otpada. U laboratoriju se koristi uređaj za zbijanje uzoraka koji ne može u potpunosti replicirati proces zbijanja na odlagalištu pa su zbog toga vrijednosti jediničnih težina nešto manje od uobičajenih (Singh i Uchimura, 2023).

Također je ispitana posmična čvrstoća uzoraka, a rezultati su prikazani slikom 2-3.



Slika 2-3. Rezultati izravnog posmika za a) papir, b) plastiku, c) organski otpad (Singh i Uchimura, 2023)

Iz rezultata se može zaključiti kako:

- povećanjem sadržaja papira, raste i kohezija, a kut unutarnjeg trenja se smanjuje,
- povećanjem sadržaja plastike, povećava se vrijednost kohezije, a vrijednost kuta unutarnjeg trenja se smanjuje,
- povećanjem sadržaja organskog otpada, rastu vrijednosti kohezije i kuta unutarnjeg trenja.

Rezultati istraživanja za vrijednosti kuta unutarnjeg trenja odgovaraju komunalnom otpadu, dok je vrijednost kohezije nešto niža od stvarne vrijednosti. Vrijednosti posmične čvrstoće značajno variraju ovisno o sastavu otpada, što zahtijeva precizno određivanje sastava otpada za točne inženjerske procjene stabilnosti odlagališta otpada (Singh i Uchimura, 2023).

3. STABILNOST ODLAGALIŠTA OTPADA

Odlagališta otpada su nasute građevine koje trebaju osigurati dugotrajno, kontrolirano i sigurno odlaganje otpada. Sastoje se od višestrukih barijera koje minimaliziraju štetan utjecaj na okoliš i tijela odlagališta koje je izrađeno od otpada i slojeva za (dnevno) prekrivanje otpada. Jedna od najvažnijih stvari koja se treba pratiti tijekom rada odlagališta i nakon njegovog zatvaranja je stabilnost pokosa.

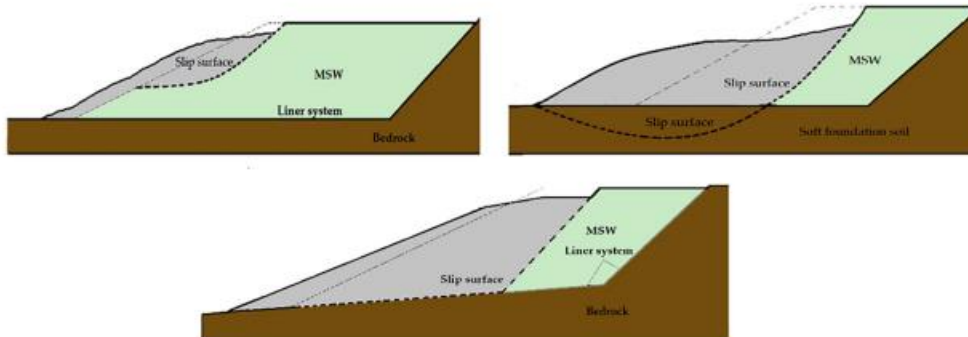
3.1. Uzroci nestabilnosti na odlagalištima otpada

Autori Zhang et al. (2020) izradili su studiju o pojavama nestabilnosti na 62 odlagališta u 22 različite države, kroz zadnjih 40 godina. Prema istraživanju postoji 5 glavnih uzroka nestabilnosti na odlagalištima:

1. Visoke razine procjernih tekućina (filtrata) uzrokuju povećanje tlaka vode u porama i smanjenje vrijednosti posmične čvrstoće. Uzroci visokih razina filtrata su velike količine oborina, visok udio organskog otpada u ukupnom sastavu otpada, akumulacija plina i plastike.
2. Nedovoljno zbijanje otpada dovodi do diferencijalnih slijeganja koja smanjuju stabilnost odlagališta. Pravilnim zbijanjem otpada minimaliziraju se slijeganja i povećava se stabilnost odlagališta.
3. Nedovoljna nosivost temeljnog tla karakterizirana je niskom posmičnom čvrstoćom i sklonosti deformacijama, ne može podržati opterećenje odlagališta te zbog toga dolazi do sloma.
4. Niska posmična čvrstoća geomembrane može uzrokovati klizanje ili slom duž cijele duljine odlagališta, u drenažnom sloju.
5. Odlagališni plin povećava tlak u porama otpada, nakon prevelike akumulacije energije dolazi do njegovog otpuštanja, što uzrokuje onečišćenje zraka, mogućnost pojave eksplozije i nestabilnosti u odlagalištu

Slom u odlagalištu može se dogoditi u samom tijelu odlagališta, nakon formiranja klizne plohe pojaviti će se klizište, što može rezultirati velikim razaranjem i destabilizacijom odlagališta. Osim toga, do sloma može doći i u samom temeljnom tlu zbog prevelikog opterećenja i sile posmika otpada, klizna ploha prolazi kroz tijelo odlagališta i temeljno tlo te ga gura prema van. Treća vrsta sloma događa se na kontaktu drenažnog sloja i

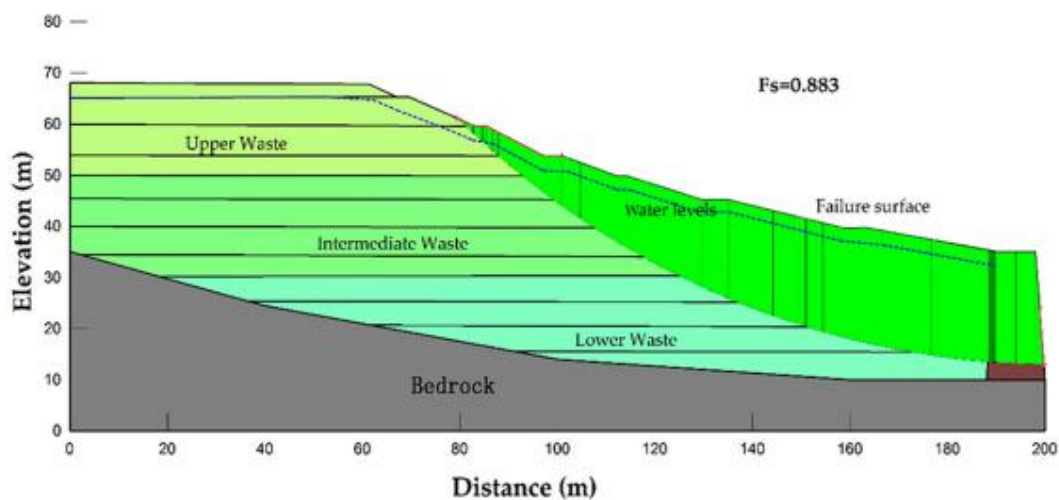
otpada, zbog smanjenja posmične čvrstoće, što može uzrokovati prodiranje filtrata u podzemne vode. Sve tri vrste sloma prikazane su na slici 3-1. (Zhang et al., 2020).



Slika 3-1. Karakteristični nastanci klizne plohe u odlagalištu

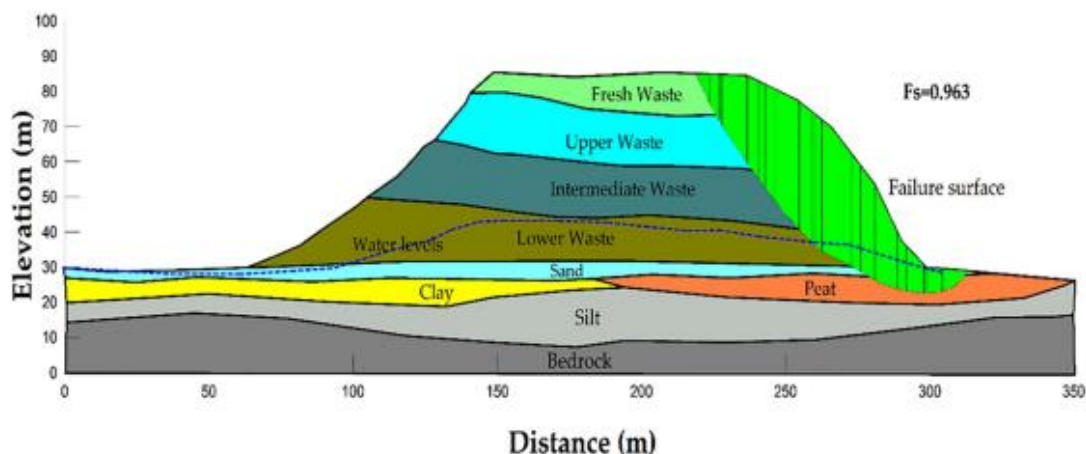
Kako bi se detaljnije opisale mogućnosti nastanka klizišta, provedene su analize stabilnosti za tri slučaja, svaki s različitim kliznom plohom.

Numerički model (slika 3-2) prikazuje klizište na odlagalištu Maoershan u Kini, koje se pojavilo 2013. godine. Odlagalište je sadržavalo oko 2 milijuna metara kubnih otpada. Analizom je utvrđeno da je zbog obilnih oborina znatno narasla razina filtrata unutar odlagališta, te je došlo do smanjenja posmične čvrstoće potporne konstrukcije. Tako je došlo do nastanka klizne plohe unutar tijela odlagališta i pojave klizanja (Zhang et al., 2020).



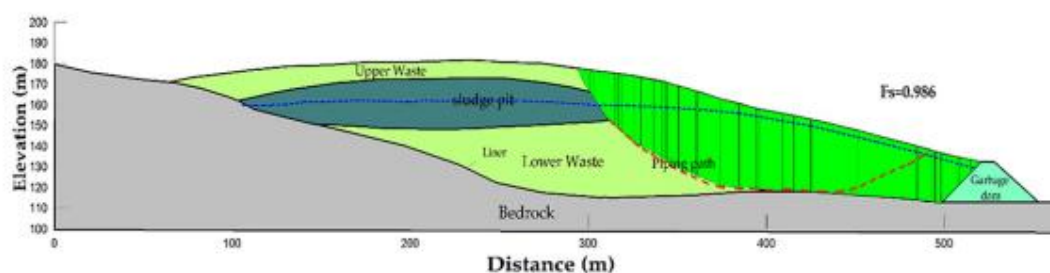
Slika 3-2. Odlagalište Maoershan, Kina (Zhang et al., 2020)

Klizište na odlagalištu Meethotamula, Šri Lanka dogodilo se 2017. godine (slika 3-3). Klizna ploha razvila se od tijela odlagališta do temeljnog tla. Primarni uzrok razvoja klizišta je mala nosivost temeljnog tla, koje nije moglo podnijeti opterećenje otpada. Razvoju klizišta dodatno su doprinijele velike oborine i nekontrolirano odlaganje otpada (Zhang et al., 2020).



Slika 3-3. Odlagalište Meethotamula, Šri Lanka (Zhang et al., 2020)

Treći slučaj, prikazan na slici 3-4. prikazuje klizište iz 2009. godine na odlagalištu Xiaping u Kini. Klizište je pokrenulo nekontrolirano kretanje mulja kroz cijevi, koje je pokrenulo kretanje čvrstog otpada. Klizna ploha se razvila na kontaktu otpada s drenažnim slojem (Zhang et al., 2020)..

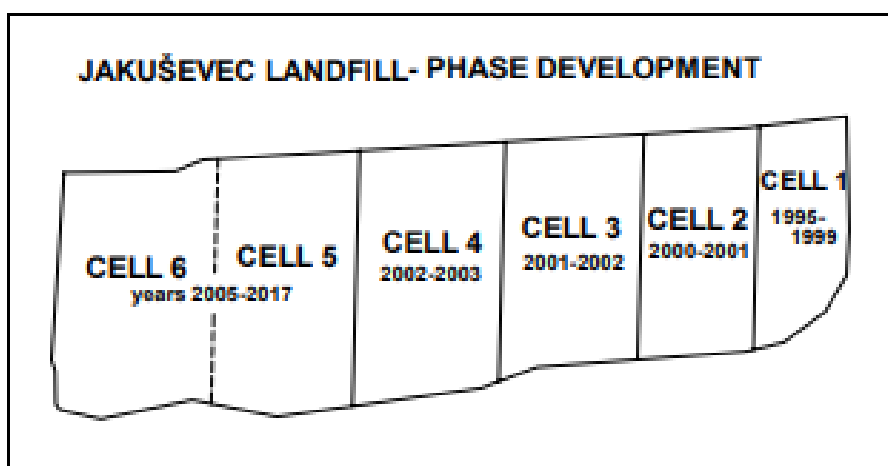


Slika 3-4. Odlagalište Xiaping, Kina (Zhang et al., 2020)

3.2. Utjecaj sastava otpada na stabilnost odlagališta Prudinec i pregled klizišta

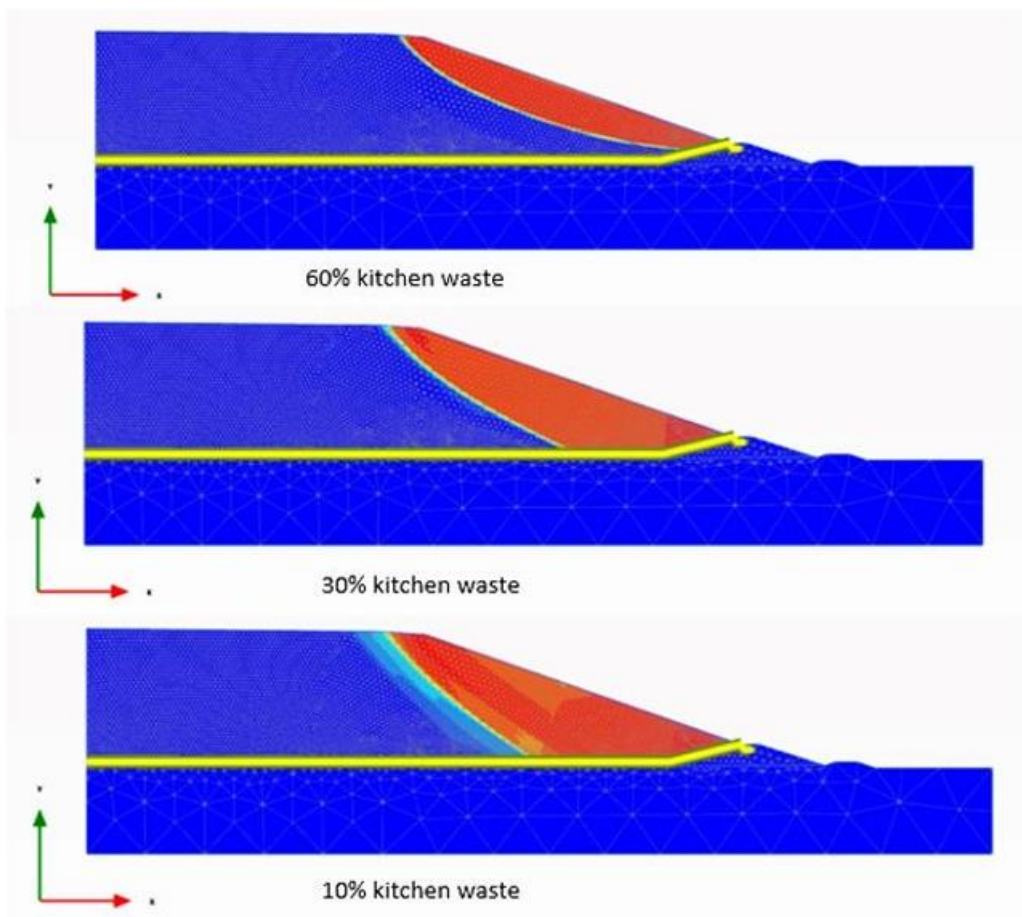
Odlagališta komunalnog otpada predstavljaju jedan od ekonomski najisplativijih načina odlaganja komunalnog otpada u kontroliranim uvjetima, iako suvremeno upravljanje otpadom smanjuje njegovu količinu kroz načelo 3R. Na starim odlagalištima otpada dolazi do značajne izmjene u sastavu otpada obzirom da se u posljednje vrijeme zaprima materijal s manjim udjelom plastike, stakla i biorazgradivih tvari. Takva promjena u sastavu otpada značajno utječe na mehanička svojstva otpada i na stabilnost samih odlagališta (Vučenović et al., 2024; Gomes et al., 2013; Singh i Uchimura, 2023).

Odlagalište komunalnog otpada Prudinec (Jakuševac), u Zagrebu, započelo je sa radom 1995. godine. Odlagalište ima ukupnu površinu od 57 ha, a podijeljeno je na 6 radnih ploha (slika 3-5). Duljina odlagališta iznosi oko 1400 m, a širina oko 450 m. Do 2003. godine, odlagalište je primalo stari otpad, s lokacija obližnjih nesanitarnih odlagališta, kao i novi otpad. Uvođenjem nove politike gospodarenja otpadom u Zagrebu, 2002. godine započelo je odvojeno prikupljanje plastike, papira, stakla, metala i tekstila. Početkom 2018. godine donesena je odluka o zajedničkom prikupljanju metala i plastike, dok je 2022. godine uvedeno pravilo da se miješani komunalni otpad odlaže u „plave vrećice“. S vremenom se sastav otpada promijenio, u miješanom komunalnom otpadu počeo se povećavati udio kuhinjskog otpada, dok se postepeno smanjivao udio drugih sastavnica (papir, staklo, metal, plastika i tekstil) (Vučenović et al., 2024).



Slika 3-5. Razvoj radova na odlagalištu Prudinec (Kovačević-Zelić et al., 2002)

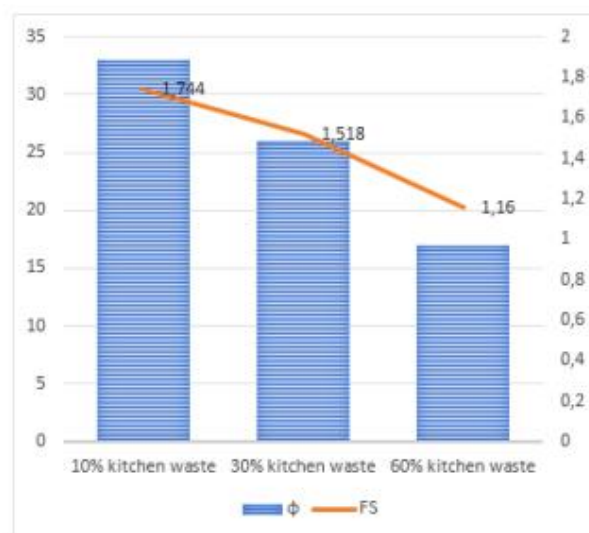
Kako bi se bolje shvatio utjecaj sastava otpada na stabilnost odlagališta, provedena je numerička analiza stabilnosti u programu Plaxis za 10%, 30% i 60% kuhinjskog otpada u sastavu materijala (slika 3-6.) (Vučenović et al., 2024).



Slika 3-6. Numerički model stabilnosti odlagališta sa 10%, 30% i 60% kuhinjskog otpada (Vučenović et al., 2024)

Rezultati numeričke analize pokazuju kako se faktor sigurnosti smanjuje s povećanjem udjela kuhinjskog otpada, a klizna ploha je sve dublja. Kod modela s 60% kuhinjskog otpada veća je vjerojatnost da će se klizna ploha razviti u samom tijelu odlagališta, dok kod modela s 10% i 30% kuhinjskog otpada, klizna ploha prolazi kroz donji brtveni sloj (Vučenović et al., 2024).

Promjena vrijednosti faktora sigurnosti s promjenom udjela kuhinjskog otpada i kuta unutarnjeg trenja prikazana je grafom na slici 3-7.



Slika 3-7. Promjena vrijednosti faktora sigurnosti sa promjenom udjela kuhinjskog otpada i kuta unutarnjeg trenja (Vučenović et al., 2024)

Krajem 2023. godine, u studenom i prosincu, došlo je do klizišta na odlagalištu Prudinec. Aktivirano klizište nastalo je na zapadnoj strani odlagališta, na radnoj plohi 6, a klizna ploha je dubine nekoliko desetaka metara (slika 3-8 i 3-9).



Slika 3-8. Klizište na odlagalištu Prudinec, studeni 2023.godine (Mitrović, 2023)



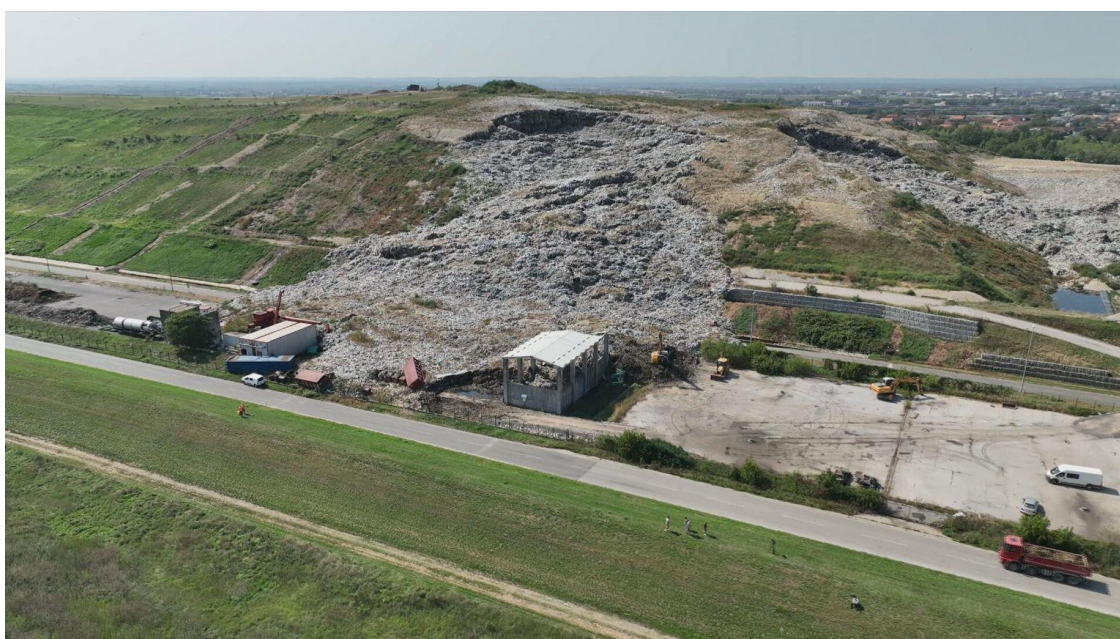
Slika 3-9. Klizište na odlagalištu Prudinec, studeni 2023.godine (Mitrović, 2023)

Nekoliko tjedana nakon prvog klizišta, točnije 4. prosinca 2023. godine, aktiviralo se i drugo klizište (slika 3-10). Novo klizište je nastalo u blizini klizišta iz studenog 2023. godine. Smatra se kako su klizišta nastala zbog prekomjernog odlaganja biootpada i velikih oborina u tom vremenskom periodu. Iako službena informacija o stvarnom uzroku klizišta nije objavljena, rezultati prikazane numeričke analize ukazuju na to da promjena sastava otpada značajno utječe na stabilnost odlagališta.

Slika 3-11. prikazuje stanje na odlagalištu u kolovozu 2024. godine.



Slika 3-10. Klizište na odlagalištu Prudinec, prosinac 2023.godine (Karaklaš Jakubin et al., 2023)



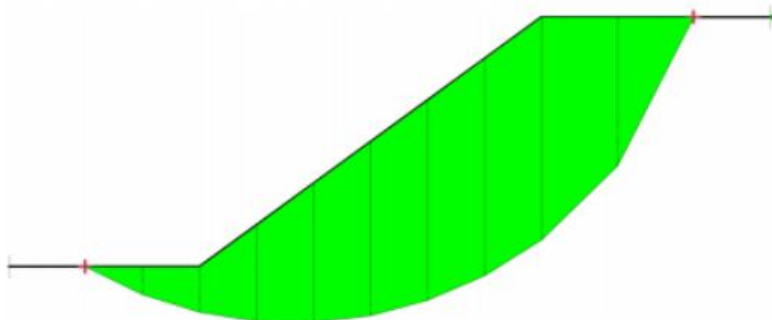
Slika 3-11. Fotografija odlagališta Prudinec u kolovozu 2024. godine (Ćorić Brunović, 2024)

4. NUMERIČKA ANALIZA STABILNOSTI ODLAGALIŠTA

Za izradu modela i proračune stabilnosti korišten je programski paket Geostudio, odnosno program SLOPE/W.

4.1. Teoretske osnove

Proračun stabilnosti pokosa u praksi se najčešće provodi metodom granične ravnoteže. Uglavnom se stvarna ili zamišljena klizna ploha podijeli na nekoliko vertikalnih lamela na kojima se računaju normalna i posmična naprezanja koja su potrebna za izračun ukupnog naprezanja duž klizne plohe (slika 4-1). Kod statičke ravnoteže lamela zanemaruje se utjecaj međulamelarnih sila i momenata (Albataineh, 2006).



Slika 4-1. Prikaz podjele klizne plohe na lamele (Szavits-Nossan, 2015)

Rezultat je vrijednost faktora sigurnosti:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (4-1)$$

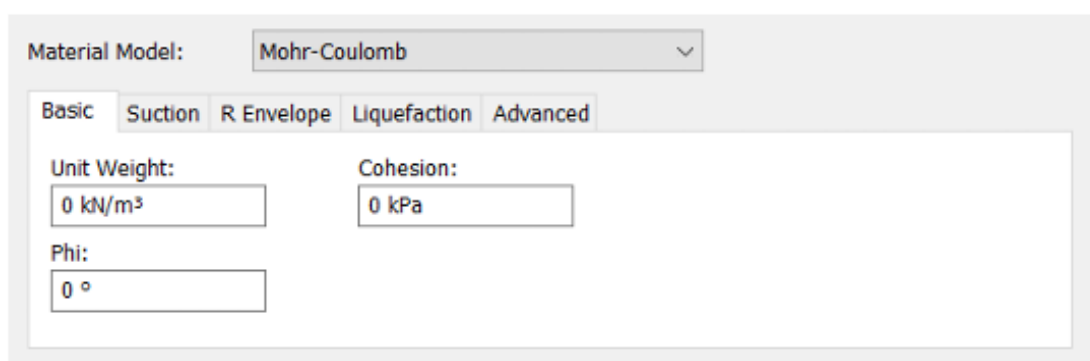
Faktor sigurnosti (F_s) je omjer posmične čvrstoće (τ_f) i mobiliziranih posmičnih naprezanja (τ_m) na kliznoj plohi, mobiliziranog s ciljem očuvanja stabilnosti pokosa (Berisavljević et al., 2015). Ukoliko je vrijednost $F_s < 1$, stanje je nestabilno, a za $F_s > 1$, stanje je stabilno. U slučaju kad je $F_s = 1$, dolazi do sloma.

Postoji više metoda granične ravnoteže, a u ovom radu korištena je Morgenstern-Price metoda. Morgenstern-Price metoda jedna je od najdetaljnijih metoda granične ravnoteže, uzima u obzir utjecaj međulamelarnih sila i zadovoljava sve tri jednadžbe ravnoteže

(jednadžbu sila u horizontalnom i vertikalnom smjeru, te jednadžbu ukupnog momenta sile) (Duncan i Wright, 2005).

4.2. Opis materijala i vrijednosti parametara

Numerički model odlagališta otpada, temeljen na radu grupe autora Vučenović et al. (2024), sastoji se od: temeljnog tla, drenažnog sloja, nasipa, otpada i brtvenog sloja. Za svaki materijal u programskom paketu SLOPE/W, za 2D analizu Morgenstern i Price metodom potrebno je odabrati vrijednosti za jediničnu težinu (*Unit Weight*; kN/m³), koheziju (*Cohesion*; kPa) i kut unutarnjeg trenja (*Phi*; °) (slika 4-2.).



The image shows a software interface for defining material parameters. At the top, 'Material Model:' is set to 'Mohr-Coulomb'. Below this, there are five tabs: 'Basic', 'Suction', 'R Envelope', 'Liquefaction', and 'Advanced'. The 'Basic' tab is active. Under the 'Basic' tab, there are 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 4-2. Parametri za analizu stabilnosti

S obzirom da je analiza stabilnosti napravljena u svrhu utvrđivanja utjecaja različitog sastava otpada na stabilnost odlagališta, vrijednosti parametara za otpad mijenjale su se u svakoj analizi i preuzete su od autora Vučenović et al. (2024) i Cho et al. (2011) Dok su vrijednosti parametara ostalih navedenih materijala (temeljnog tla, temeljnog sloja, drenažnog sloja, nasipa i pokrovnog sloja) konstantne u svim analizama i preuzete su iz literature (Vučenović et al. 2024; Vukelić et al., 2004; Kovačević Zelić et al. 2002).

Preuzeti parametri od autora Vučenović et al. (2024) omogućili su usporednu analizu rezultata iz dva različita programa Plaxisa i GeoStudia (SLOPE/W). Autori su vrijednosti za jediničnu težinu, koheziju i kut unutarnjeg trenja preuzeli iz literature (tablica 4-1), dok su ostali korišteni parametri od Cho et al. dobiveni laboratorijskim ispitivanjima (tablica 4-2). Provedene su analize stabilnosti za miješani komunalni otpad s različitim udjelima kuhinjskog otpada od 0%, 10%, 30%, 40%, 58%, 60% i 80%.

Tablica 4-1. Parametri za analizu stabilnosti dobiveni analitičkim metodama

Parametri	Jedinična težina (kN/m ³)	Kut unutarnjeg trenja (°)	Kohezija (kPa)
Temeljno tlo	18	32	10
Temeljni sloj	19	21	24
Drenažni sloj	18	30	0.3
Pokrovni sloj	19	20	10
Nasip	19	24	15
Kuhinjski otpad 10%	8	33	5
Kuhinjski otpad 30%	9	26	6
Kuhinjski otpad 60%	10	17	7

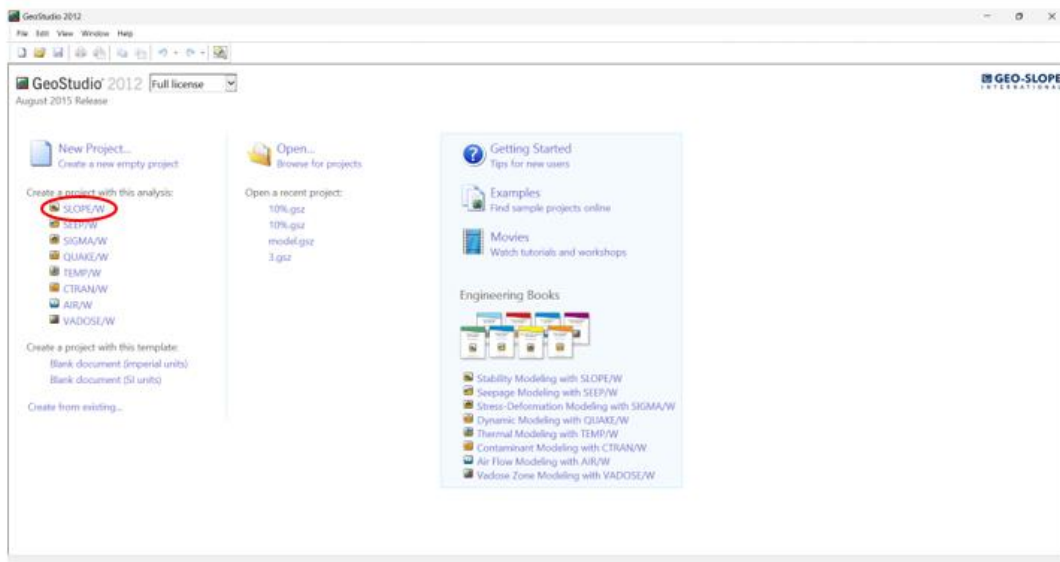
Tablica 4-2. Parametri za analizu stabilnosti dobiveni laboratorijskim ispitivanjima

Parametri	Jedinična težina (kN/m ³)	Kut unutarnjeg trenja (°)	Kohezija (kPa)
Temeljno tlo	18	32	10
Temeljni sloj	19	21	24
Drenažni sloj	18	30	0.3
Pokrovni sloj	19	20	10
Nasip	19	24	15
Kuhinjski otpad 0%	7	39	3
Kuhinjski otpad 40%	9	30	13
Kuhinjski otpad 58%	10	18	31
Kuhinjski otpad 80%	11	7	8

4.3. Analiza stabilnosti

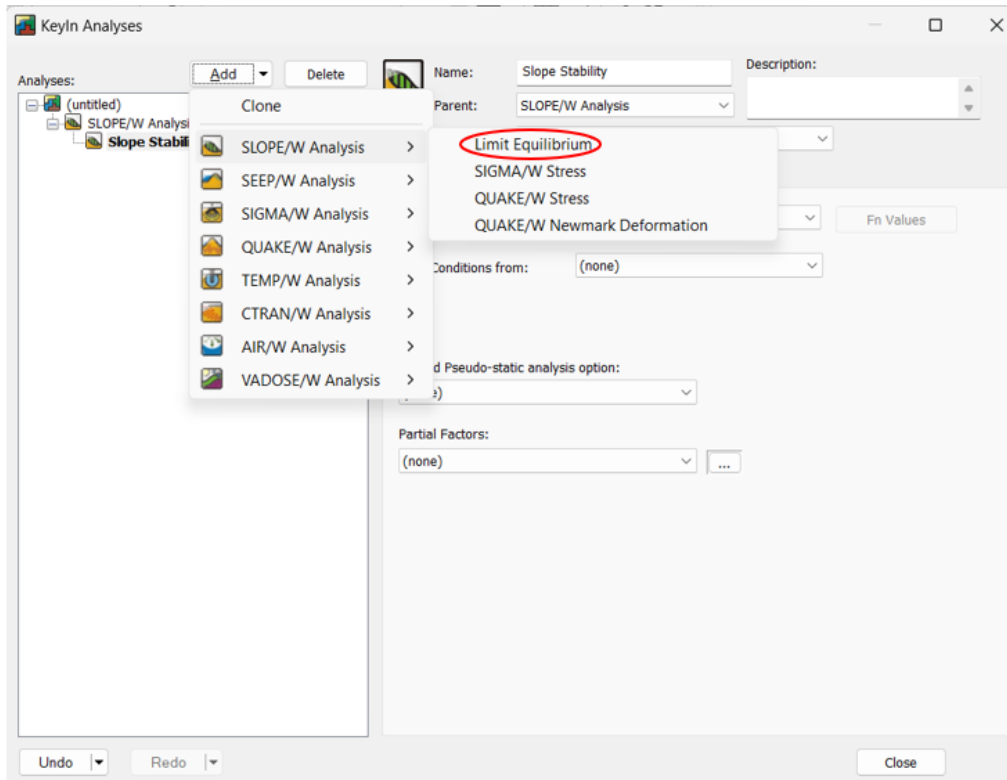
- Analiza stabilnosti s analitički dobivenim parametrima

Izrada modela u GeoStudiu započinje otvaranjem programa i odabirom programskog paketa SLOPE/W (slika 4-3).

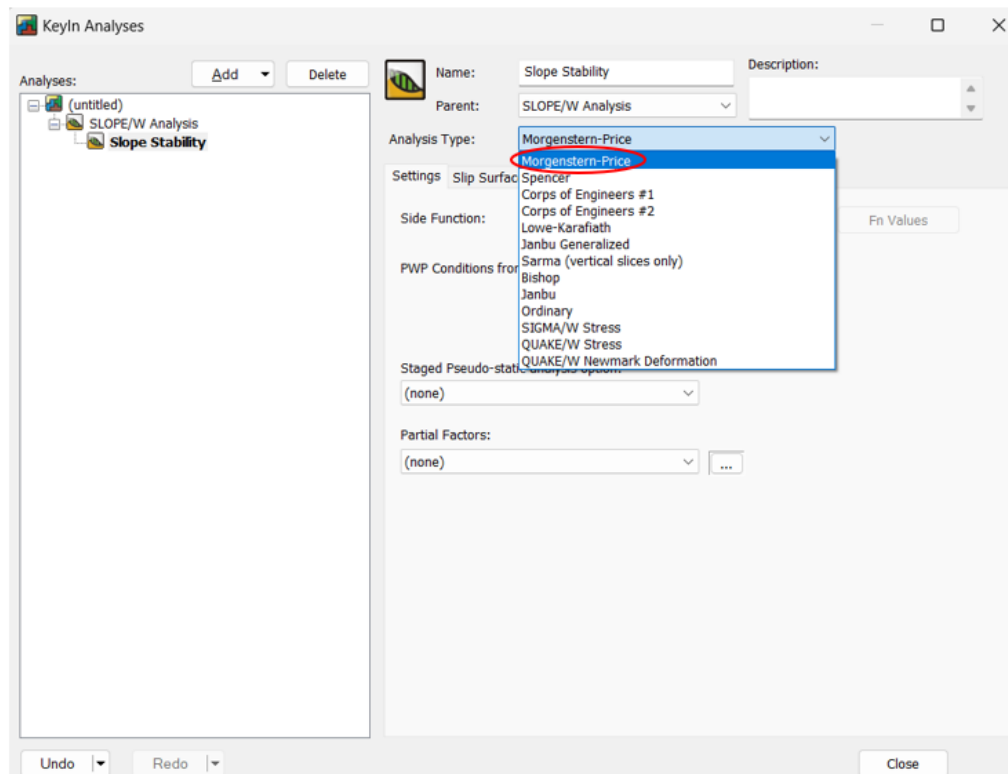


Slika 4-3. Sučelje programa GeoStudio

Otvaranjem prozora *KeyIn Analyses* potrebno je odabrati *Limit Equilibrium* (slika 4-4.) i *Morgenstern-Price* metodu (slika 4-5), dok uvjete podzemne vode- *PWP Conditions* ne uzimamo u obzir.

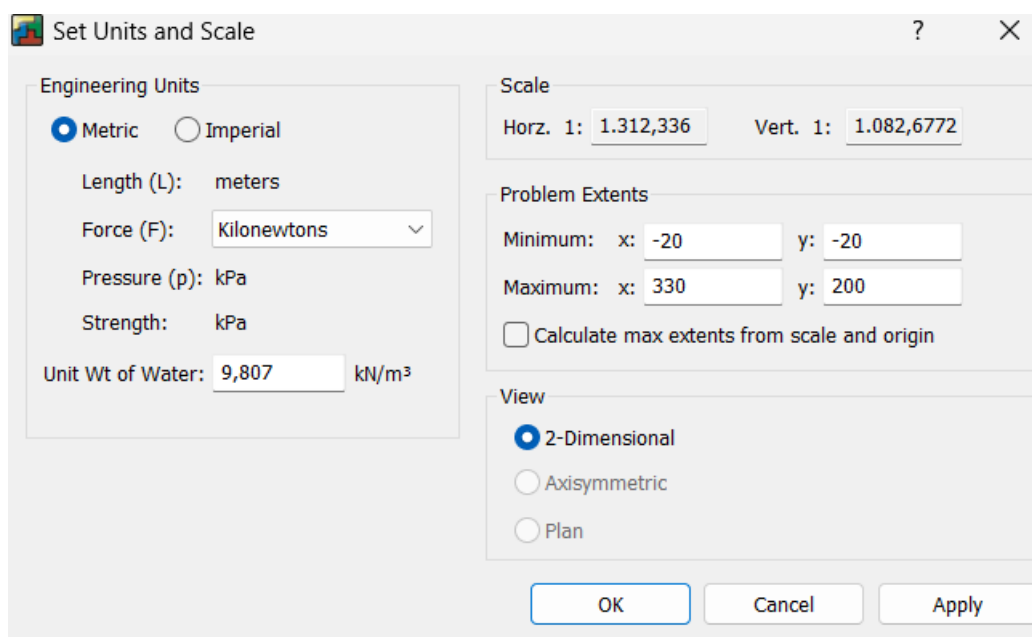


Slika 4-4. KeyIn Analyses, Limit Equilibrium



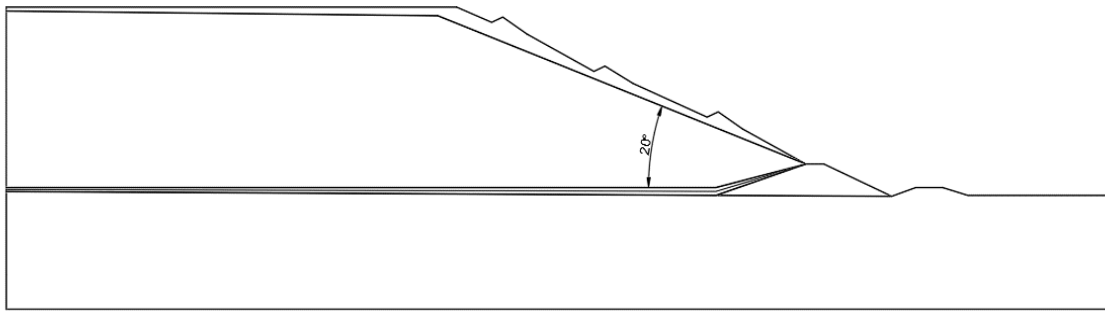
Slika 4-5. KeyIn Analyses, Morgenstern-Price

U sučelju programa GeoStudio također je potrebno odabrati sustav jedinica u kojem će se prikazivati rezultati proračuna stabilnosti- u ovom slučaju koristi se metarski sustav jedinica. Pod opcijom *Set* otvara se padajući izbornik u kojemu se odabere *Units and Scale*, a nakon otvaranja dijaloškog okvira (slika 4-6) potrebno je odabrati da se duljina prikazuje u metrima (m), sila u kilonjutnima (kN), tlak u kilopaskalima (kPa) i jedinična težina u kilonjutnima po metru kubičnom (kN/m³). Osim mjernih jedinica, potrebno je odabrati veličinu prostora u kojem se crta model, a vrijednosti za horizontalnu i vertikalnu os upisuju se s desne strane dijaloškog okvira, ispod natpisa *Scale*.

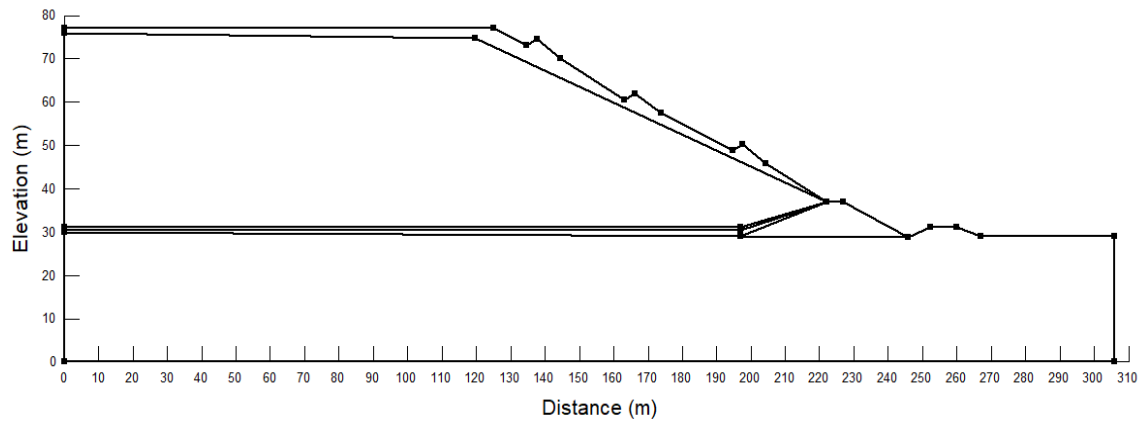


Slika 4-6. Units and Scale

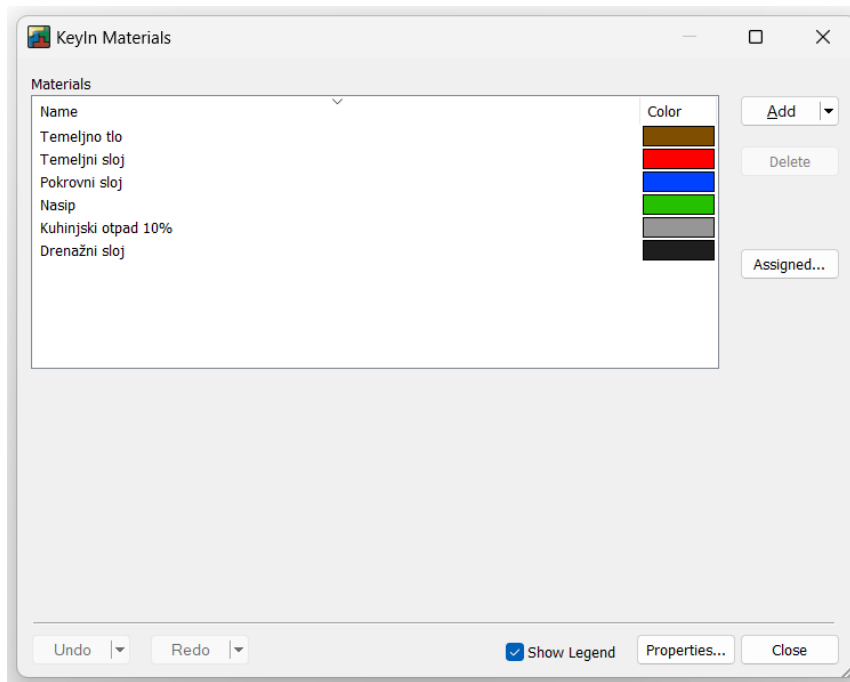
Nakon odabira parametara, učitana je skica nacrt (slika 4-7) iz AutoCAD-a pomoću naredbe *File-Import Regions* i nacrtane su x i y os naredbom *Sketch-Axes* (slika 4-8). Dimenzije modela su: visina 77 m, duljina 306 m, a nagib 20°. Model je podijeljen na regije s tim da zasebne regije sa zasebnim parametrima čini temeljno tlo, temeljni sloj, nasip i dr. Za svaku regiju potrebno je unijeti vrijednosti za jediničnu težinu (*Unit Weight*), koheziju (*Cohesion*) i kut unutarnjeg trenja (*Phi*) pomoću naredbe *KeyIn-Materials* (slika 4-9). Naredbom *Draw-Materials* svakoj regiji pridružujemo odgovarajuće parametre (slika 4-10).



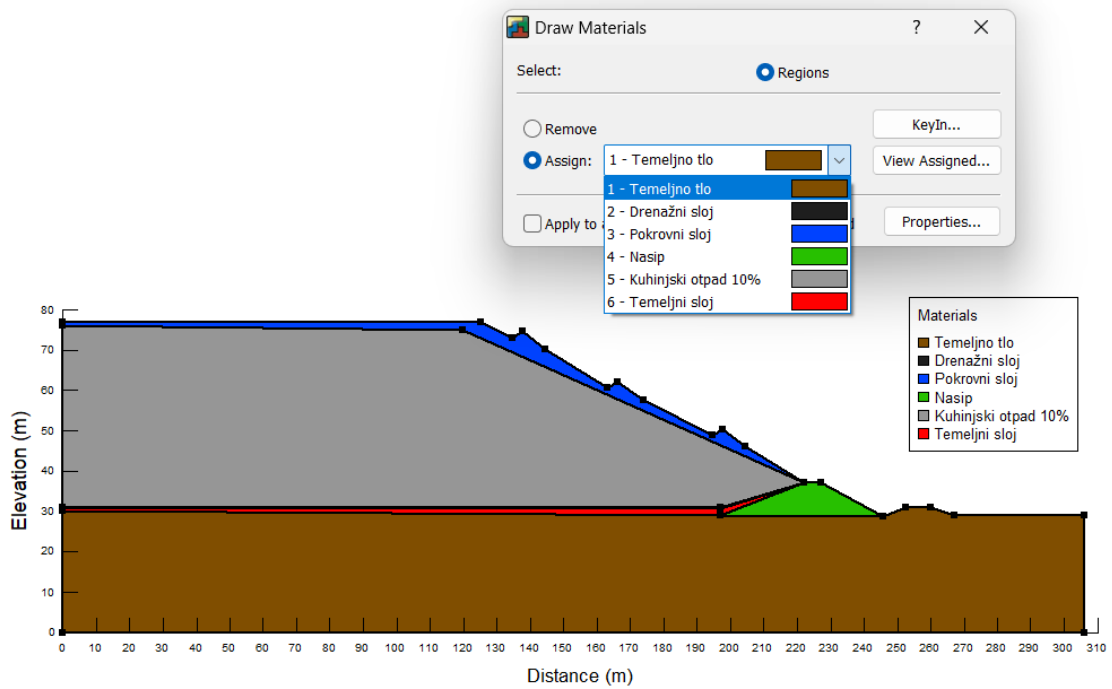
Slika 4-7. Nacrt odlagališta otpada u AutoCAD-u



Slika 4-8. Nacrt odlagališta otpada u GeoStudiu

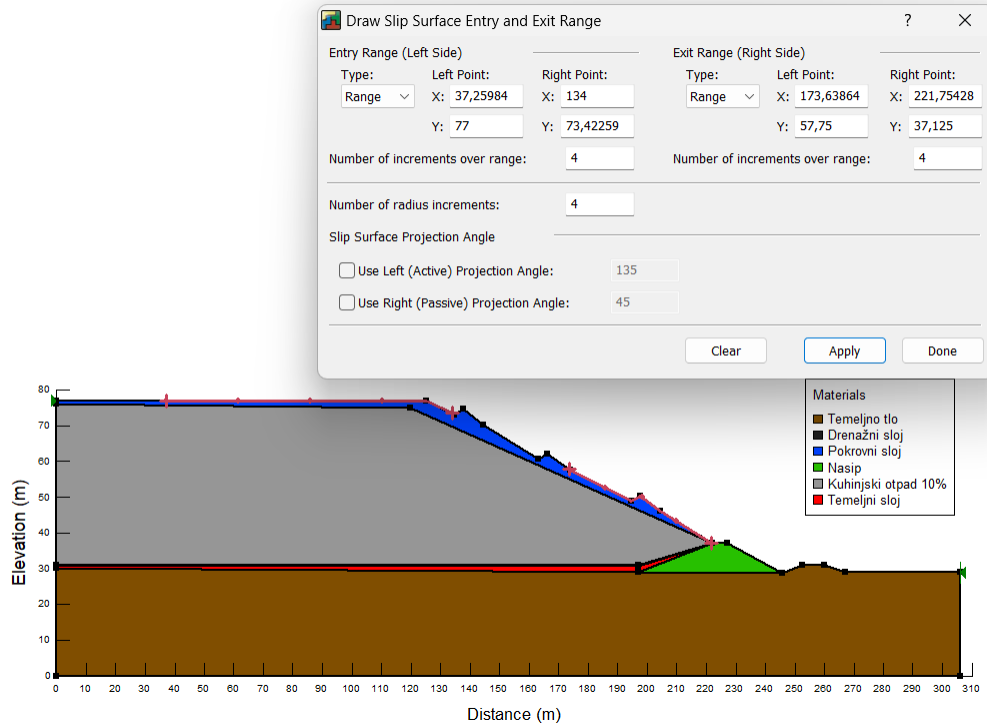


Slika 4-9. KeyIn Materials



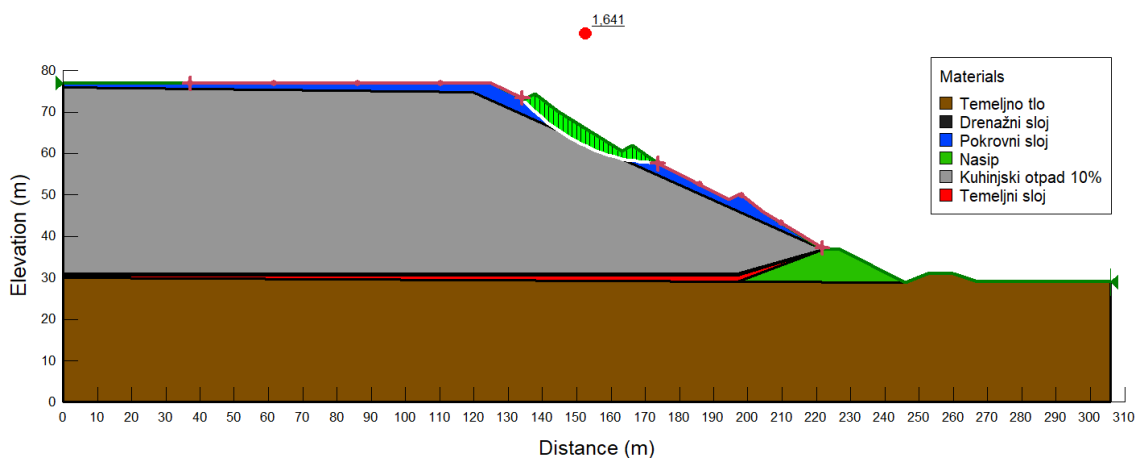
Slika 4-10. Draw Materials

Prije pokretanja analize stabilnosti, potrebno je odrediti položaj mogućih kliznih ploha pomoću naredbe *Draw-Slip Surface-Entry and exit* (slika 4-11).



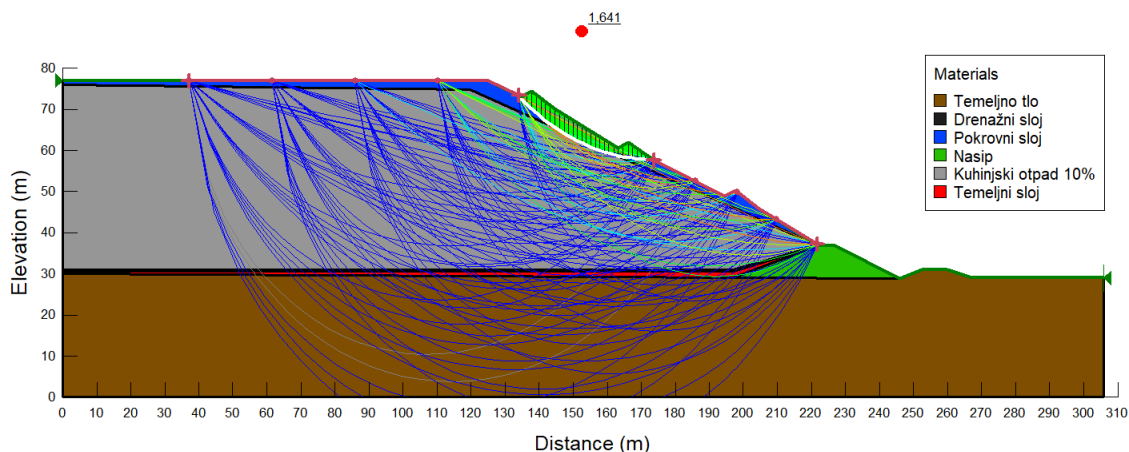
Slika 4-11. Definiranje potencijalne klizne plohe

Nakon crtanja modela, definiranja regija, parametara materijala i ostalih parametara potrebnih za analizu stabilnosti, potrebno je pokrenuti analizu. Analiza se pokreće u pomoćnom prozoru *Solve Manager*.



Slika 4-12. Analiza stabilnosti za 10% kuhinjskog otpada

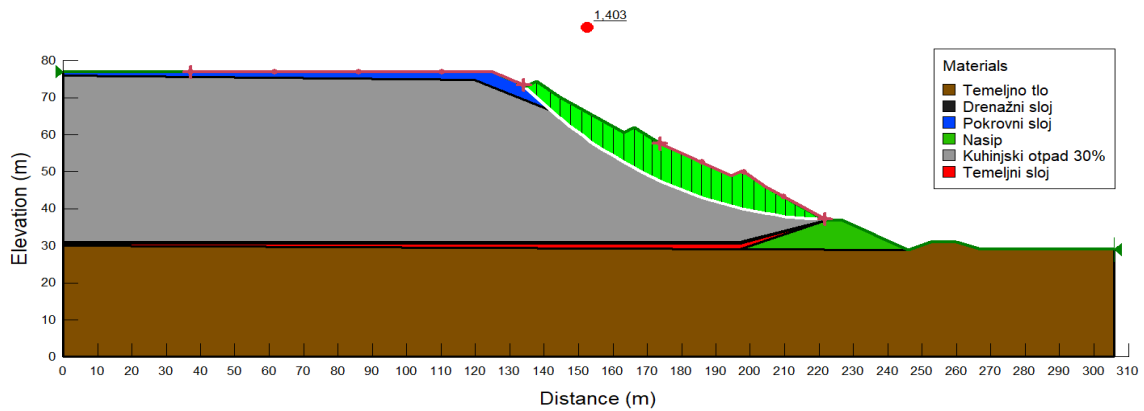
Nakon što program obradi podatke, prikazat će se kritična klizna ploha sa pripadajućim faktorom sigurnosti (slika 4-12). Osim kritične klizne plohe, naredbom *Draw-Slip Surface Color Map-Show all* moguće je prikazati sve klizne plohe (slika 4-13).



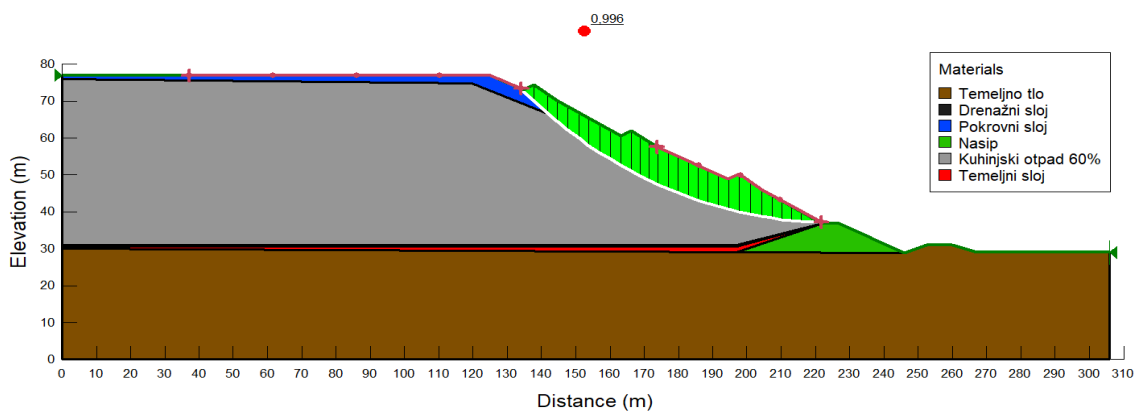
Slika 4-13. Prikaz svih kliznih ploha

Faktor sigurnosti za odlagalište miješanog komunalnog otpada koje u svom sastavu ima 10% kuhinjskog otpada, iznosi 1,641. Ovaj faktor sigurnosti ukazuje na relativno dobru stabilnost odlagališta. Kritična klizna ploha je plitka te prolazi kroz brtveni sloj i tijelo odlagališta.

Zatim su provedene analize stabilnosti za miješani komunalni otpad sa udjelom kuhinjskog otpada od 30% i 60%. Model odlagališta otpada i svi parametri su ostali isti, osim vrijednosti za jediničnu težinu, koheziju i kut unutarnjeg trenja za kuhinjski otpad od 30% i 60%. Njihove vrijednosti su unesene pomoću naredbe *KeyIn Materials* i dodane su odgovarajućoj regiji naredbom *Draw Materials*. Nakon unosa odgovarajućih parametara, pokrenuta je analiza stabilnosti u pomoćnom prozoru *Solve Manager*. Rezultati su prikazani slikama 4-14. i 4-15.



Slika 4-14. Analiza stabilnosti za 30% kuhinjskog otpada

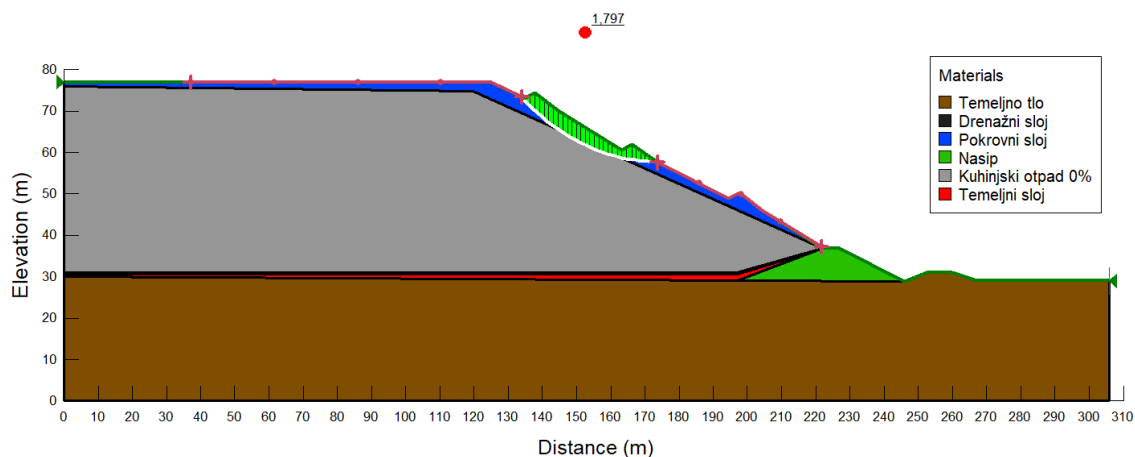


Slika 4-15. Analiza stabilnosti za 60% kuhinjskog otpada

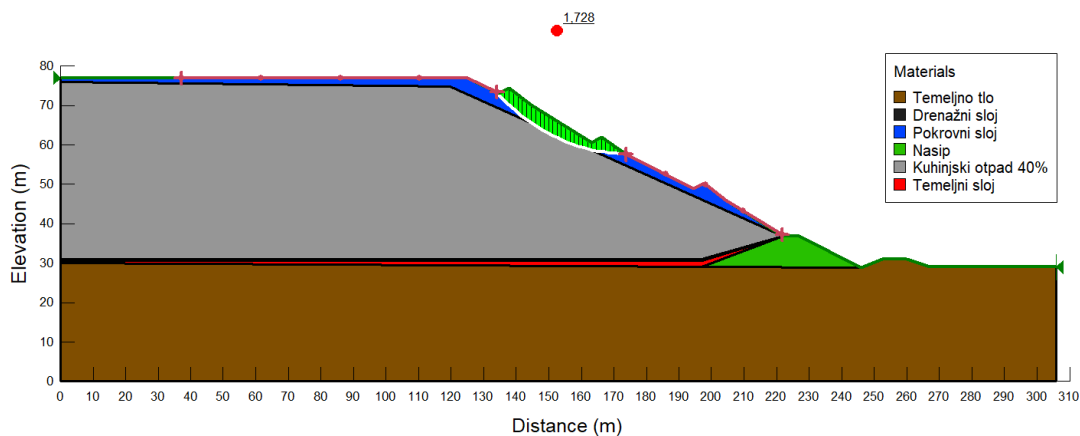
Faktor sigurnosti se smanjio sa povećanjem udjela kuhinjskog otpada, a klizna ploha je sve dublja. U slučaju 30%-tnog udjela kuhinjskog otpada iznosi 1,403, a kod 60% udjela kuhinjskog otpada iznosi 0,996. Odlagalište s 60% kuhinjskog otpada je nestabilno, odnosno faktor sigurnosti je manji od 1.

- **Analiza stabilnosti s parametrima dobivenim laboratorijskim ispitivanjima**

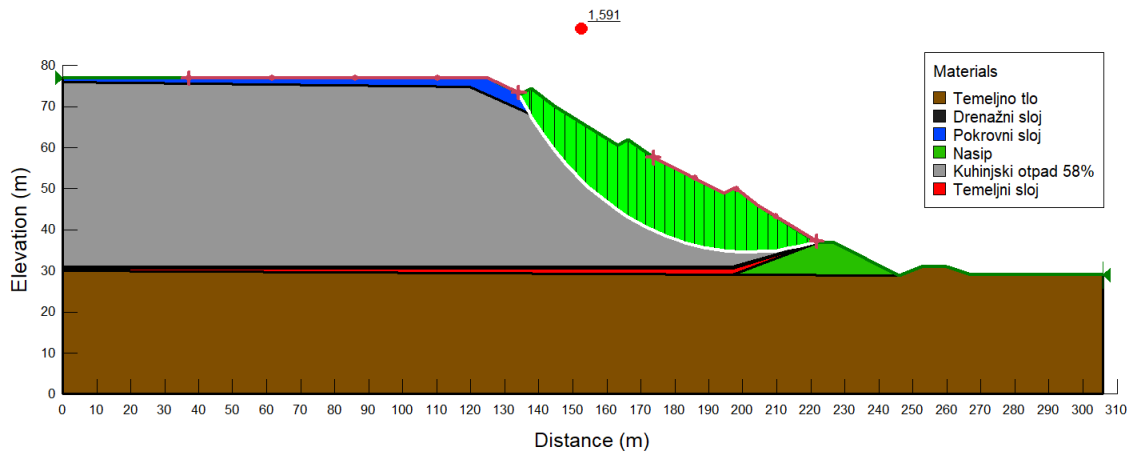
Model odlagališta za parametre dobivene laboratorijskim ispitivanjima ostao je isti. Očekuje se smanjenje faktora sigurnosti s povećanjem udjela kuhinjskog otpada, te bi rezultati trebali približno odgovarati prethodnim analizama stabilnosti. Pokretanjem programa dobiveni su rezultati prikazani slikama 4-16., 4-17., 4-18. i 4-19.



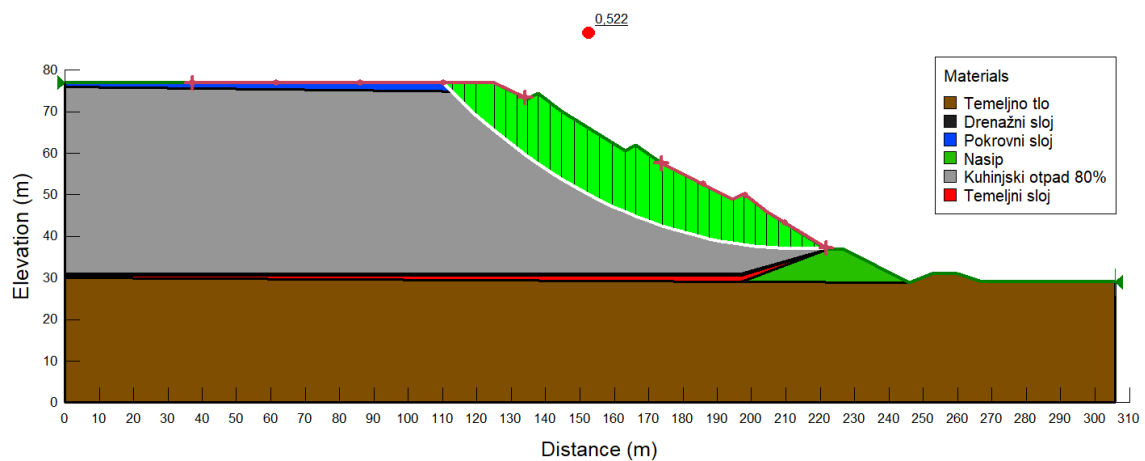
Slika 4-16. Analiza stabilnosti za 0% kuhinjskog otpada



Slika 4-17. Analiza stabilnosti za 40% kuhinjskog otpada



Slika 4-18. Analiza stabilnosti za 58% kuhinjskog otpada

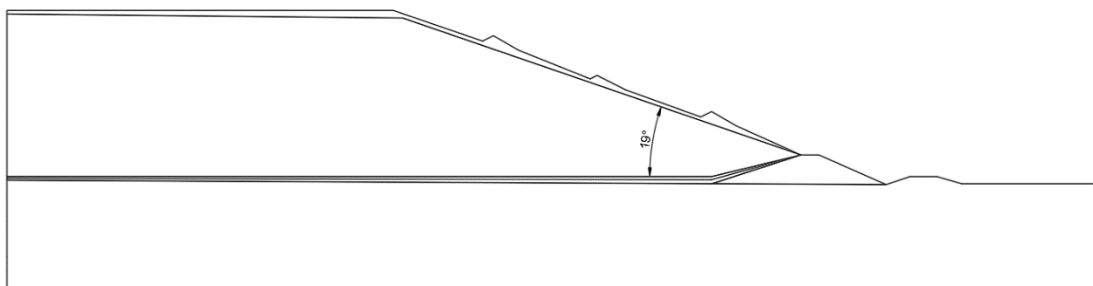


Slika 4-19. Analiza stabilnosti za 80% kuhinjskog otpada

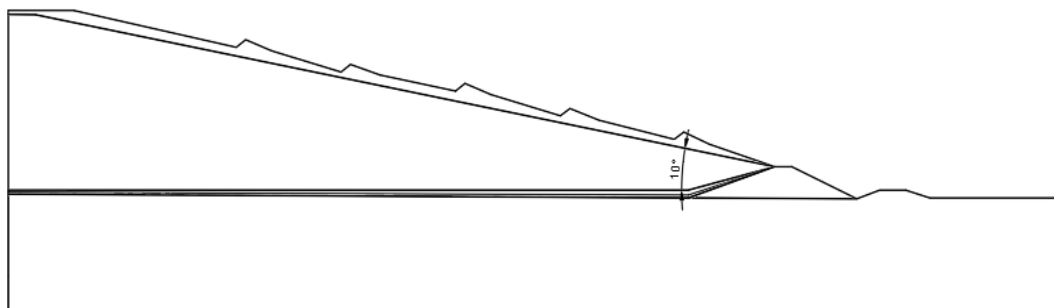
Odlagalište s 0% kuhinjskog otpada ima najviši faktor sigurnosti od 1,797, zatim slijedi odlagalište s 40% kuhinjskog otpada čiji faktor sigurnosti iznosi 1,728. S povećanjem udjela kuhinjskog otpada na 58%, faktor sigurnosti se smanjio na 1,591. Najmanji faktor sigurnosti iznosi 0,522 za odlagalište s 80% kuhinjskog otpada. Odlagalište s 80% udjela kuhinjskog otpada je nestabilno, odnosno faktor sigurnosti je manji od 1. Klizna ploha najdublja je kod odlagališta s 58% udjela kuhinjskog otpada te prolazi kroz tijelo odlagališta i djelomično kroz drenažni sloj.

- **Utjecaj smanjenja nagiba na stabilnost odlagališta s 60% i 80% kuhinjskog otpada**

Provedene analize stabilnosti za odlagališta s 60% i 80% udjela kuhinjskog otpada dale su nizak faktor sigurnosti, odnosno faktor sigurnosti manji od 1. Zbog toga su provedene nove analize stabilnosti gdje je nagib odlagališta 19° za sastav od 60% kuhinjskog otpada, a 10° za odlagalište s 80% kuhinjskog otpada (slika 4-20 i 4-21).

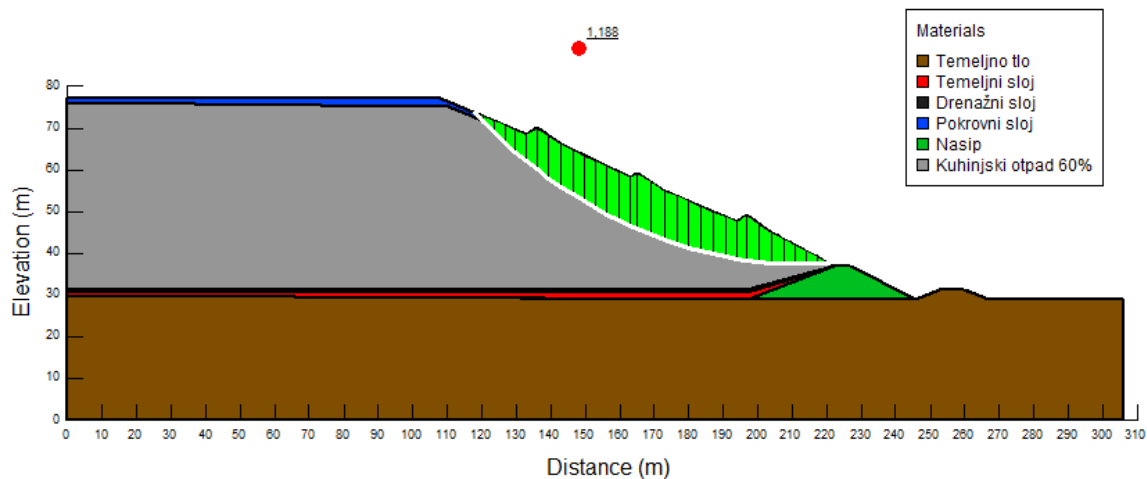


Slika 4-20. Nacrt odlagališta otpada s nagibom kosine od 19°

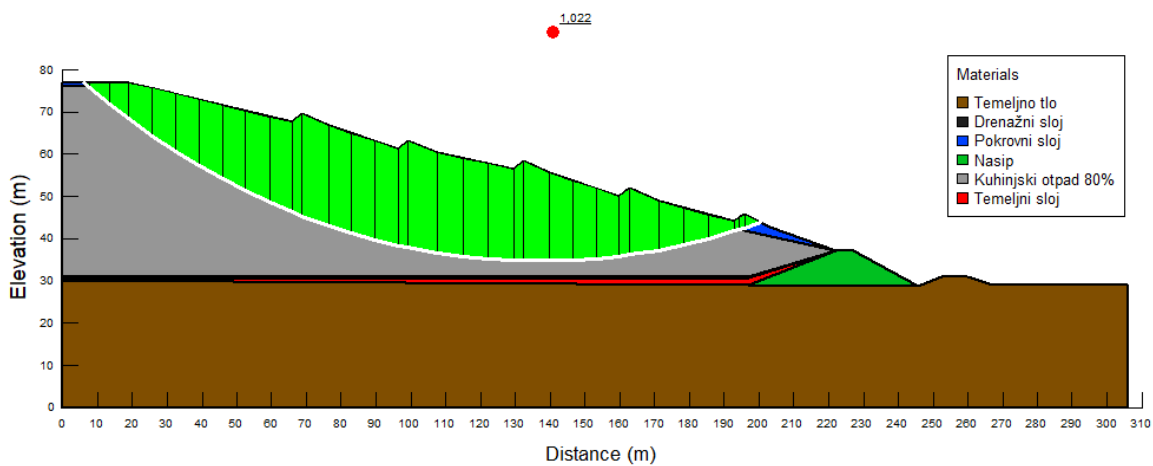


Slika 4-21. Nacrt odlagališta otpada s nagibom kosine od 10°

Nacrti su iz AutoCAD-a učitani u SLOPE/W pomoću *File-Import Regions*. Ponovljen je cijeli postupak modeliranja koji je prethodno opisan. Prije pokretanja analize definirana je klizna ploha naredbom *Draw-Slip Surface-Entry and exit*. Analiza je pokrenuta u pomoćnom prozoru *Solve Manager*.



Slika 4-22. Analiza stabilnosti za odlagalište s 60% kuhinjskog otpada



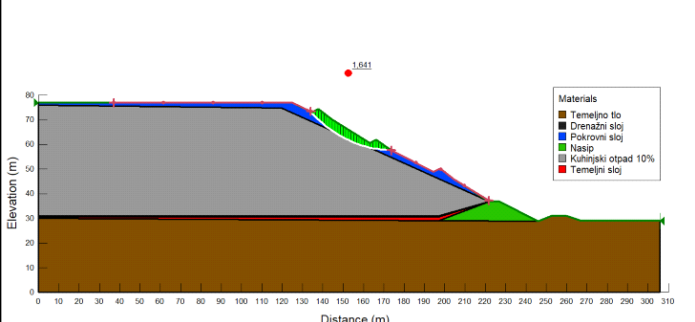
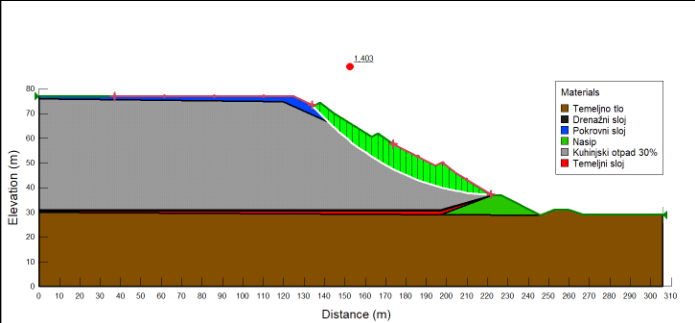
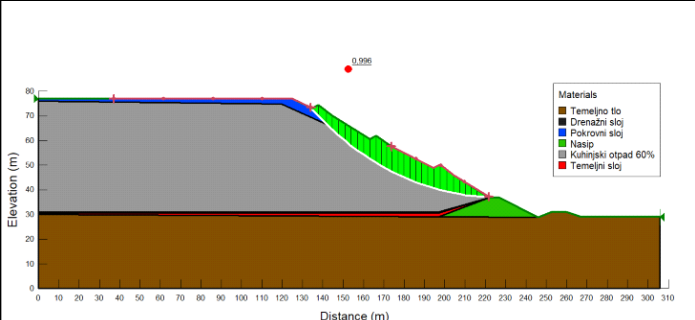
Slika 4-23. Analiza stabilnosti za odlagalište s 80% kuhinjskog otpada

Nakon provedenih analiza (slika 4-22 i 4-23), faktori sigurnosti za odlagališta s nagibom od 10° i 19° su se povećali. Kod analize stabilnosti odlagališta s udjelom kuhinjskog otpada od 60% iznosi 1,188, a za odlagalište s 80% kuhinjskog otpada iznosi 1,022.

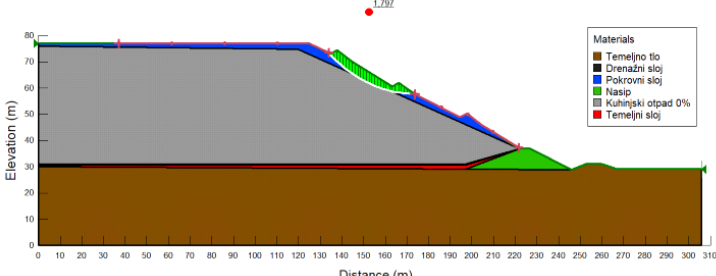
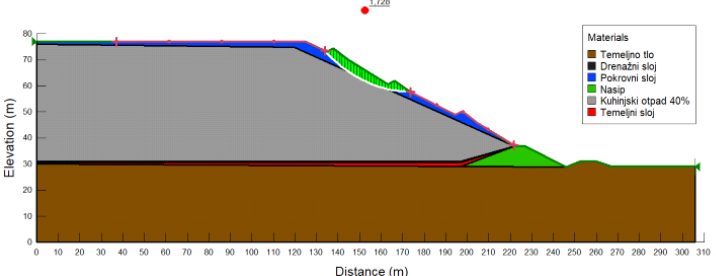
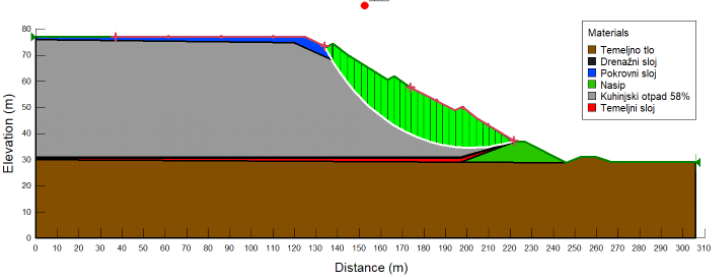
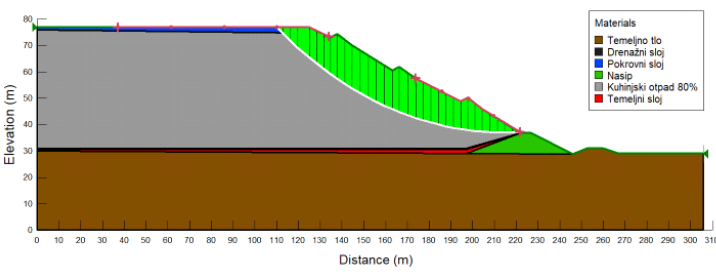
5. ANALIZA REZULTATA

Pregled rezultata analize stabilnosti prikazan je u tablici 5-1. i tablici 5-2. U tablici 5-1. su prikazane analize stabilnosti odlagališta s 10%, 30% i 60% udjela kuhinjskog otpada. Rezultati pokazuju da se s povećanjem udjela kuhinjskog otpada u odlagalištu smanjuje faktor sigurnosti. Za odlagalište s 60% udjela kuhinjskog otpada, faktor sigurnosti manji je od 1, što ukazuje na nestabilno stanje. Ovaj trend ukazuje na negativan utjecaj većih udjela kuhinjskog otpada na stabilnost odlagališta. Također, s povećanjem udjela kuhinjskog otpada dolazi do povećanja dubine klizne plohe. Klizna ploha je najplića za sastav odlagališta s 10% kuhinjskog otpada, a najdublja za sastav s 60% udjela kuhinjskog otpada.

Tablica 5-1. Rezultati analize stabilnosti s parametrima dobivenim analitičkom metodom

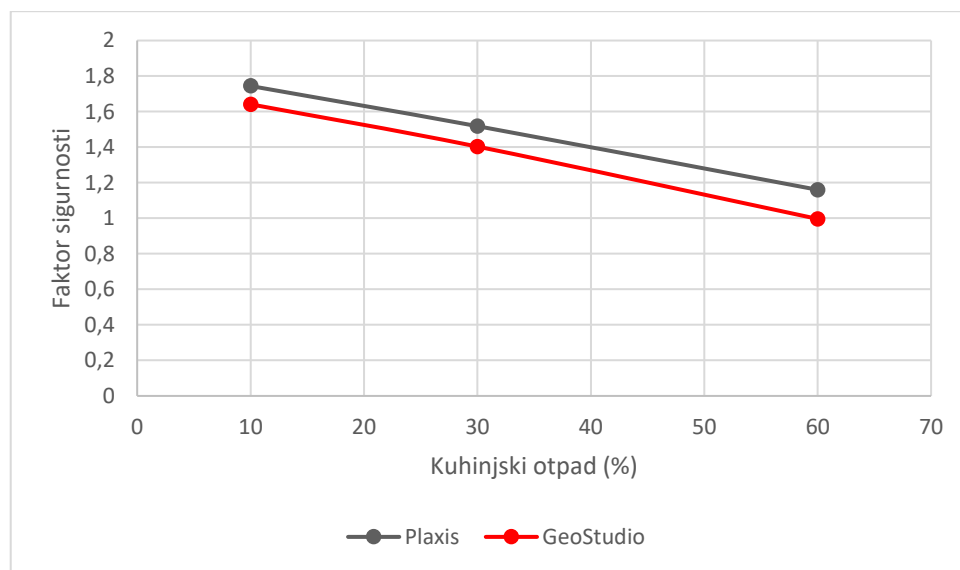
UDIO KUHINJSKOG OTPADA	ANALIZA STABILNOSTI	FAKTOR SIGURNOSTI
10%		1,641
30%		1,403
60%		0,996

Tablica 5-2. Rezultati analize stabilnosti s parametrima dobivenim laboratorijskim ispitivanjem

UDIO KUHNJSKOG OTPADA	ANALIZA STABILNOSTI	FAKTOR SIGURNOSTI
0%		1,797
40%		1,728
58%		1,591
80%		0,522

Rezultati iz tablice 5-2. prikazuju analize stabilnosti odlagališta s različitim udjelima kuhinjskog otpada: 0%, 40%, 58% i 80%. U ovoj analizi također je došlo do smanjenja faktora sigurnosti s povećanjem udjela kuhinjskog otpada. Dubina klizne plohe povećavala se do odlagališta s 58% udjela kuhinjskog otpada, a nakon toga se smanjila. Razlog za ovu promjenu može biti smanjenje vrijednosti kohezije i kuta unutarnjeg trenja, čije su vrijednosti kod 80% kuhinjskog otpada znatno manje od vrijednosti kod 40% i 58% kuhinjskog otpada. Također, faktor sigurnosti kod odlagališta s 80% kuhinjskog otpada smanjuje se ispod 1, što ukazuje na nestabilno stanje i povećan rizik od klizanja.

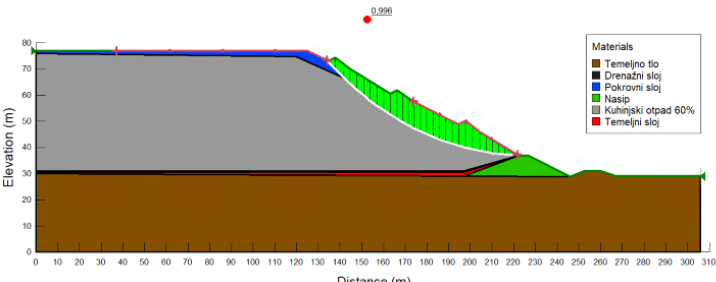
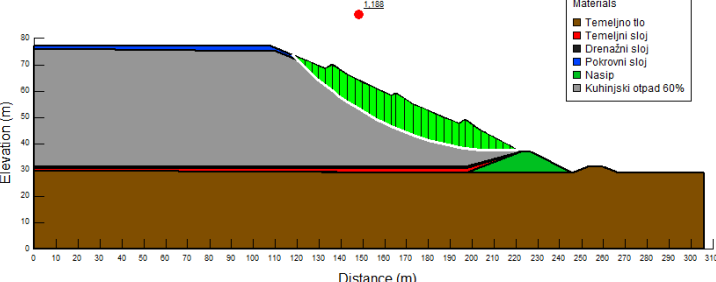
Grafikon (slika 5-1) prikazuje usporednu analizu za isti model odlagališta izrađen u Plaxisu (slika 3-7) prema istraživanju grupe autora Vučenović et al. (2024), te model izrađen u GeoStudiu. Vrijednosti faktora sigurnosti iz oba programa su vrlo slične, što potvrđuje pouzdanost analiza stabilnosti iz različitih programa.



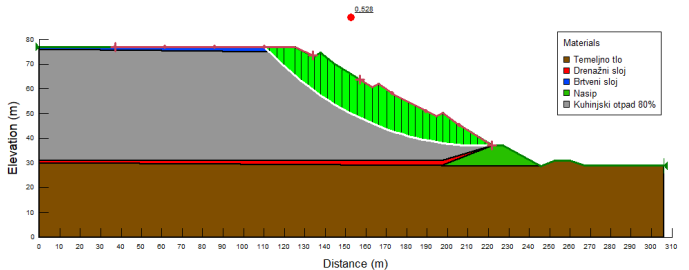
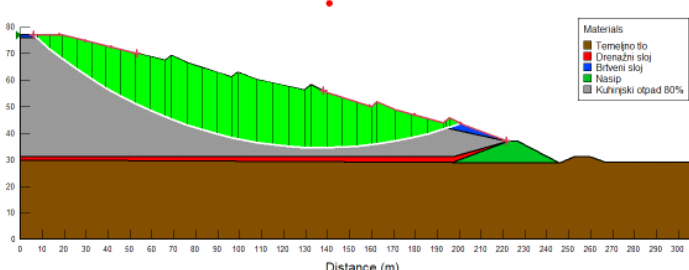
Slika 5-1. Usporedba faktora sigurnosti iz Plaxisa i GeoStudia

Zbog niskih faktora sigurnosti za odlagališta s 60% i 80% udjela kuhinjskog otpada, promijenjeni su nagibi kako bi se dobio faktor sigurnosti koji je veći od 1. Iz tablica 5-3. i 5-4. može se zaključiti kako manji kut nagiba kosine daje veći faktor sigurnosti. Faktor sigurnosti se kod odlagališta s 60% kuhinjskog otpada povećao iznad 1 smanjenjem nagiba za 1°. Kod odlagališta s 80% kuhinjskog otpada, nagib je duplo manji nego u prvotnoj analizi, geometrija modela odlagališta se znatno promijenila, što je utjecalo i na izgled klizne plohe. Klizna ploha kod odlagališta s nagibom od 20° je plića u odnosu na plohu odlagališta s nagibom od 10°. Iako je faktor sigurnosti kod odlagališta s manjim nagibom nešto veći od 1, što je uglavnom dovoljno za osnovnu stabilnost, ipak se ne može govoriti o visokoj stabilnosti kosine. Promjenom geometrije modela, kod odlagališta s nagibom od 10° znatno se smanjila površina za odlaganje otpada, te ova opcija nije poželjna ukoliko se trebaju odlagati veće količine otpada.

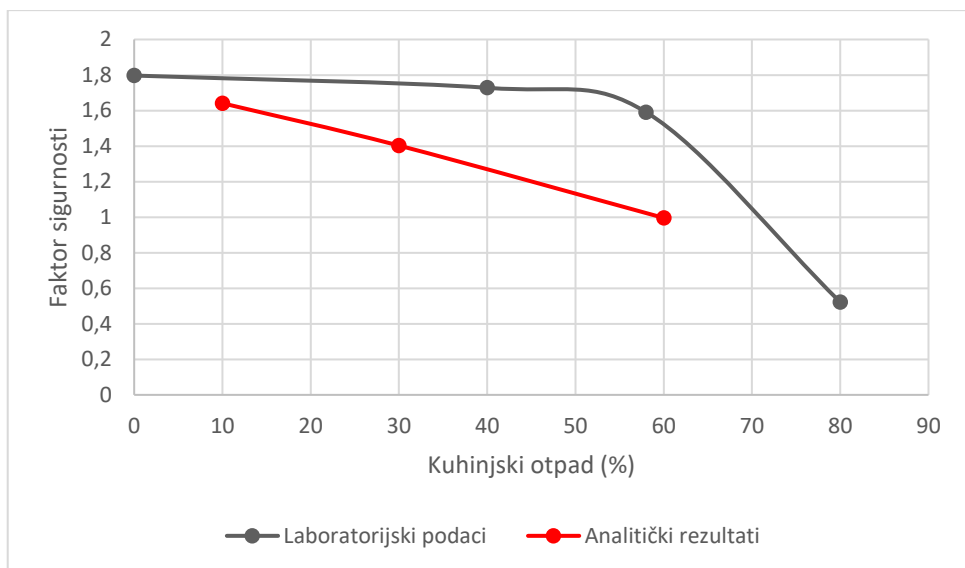
Tablica 5-3. Rezultati analize stabilnosti za odlagališta s različitim nagibom kosine za odlagalište s 60% kuhinjskog otpada

NAGIB KOSINE	ANALIZA STABILNOSTI	FAKTOR SIGURNOSTI
20°		0,996
19°		1,188

Tablica 5-4. Rezultati analize stabilnosti za odlagališta s različitim nagibom kosine za odlagalište s 80% kuhinjskog otpada

NAGIB KOSINE	ANALIZA STABILNOSTI	FAKTOR SIGURNOSTI
20°		0,528
10°		1,042

Usporedbom rezultata iz tablice 5-1. i tablice 5-2. može se zaključiti kako povećanje udjela kuhinjskog otpada značajno utječe na stabilnost odlagališta (slika 5-2). Obje analize stabilnosti prate isti trend smanjenja faktora sigurnosti s povećanjem udjela kuhinjskog otpada. Ipak, faktori sigurnosti iz tablice 5-1. za slične sastave otpada u tablici 5-2. daju nešto niže vrijednosti. Razlog tome su različite vrijednosti parametara koje su korištene u analizama. U tablici 5-1. su prikazani rezultati stabilnosti kosine gdje su korištene vrijednosti jedinične težine, kuta unutarnjeg trenja i kohezije dobivene analitičkim metodama, dok su za proračun stabilnosti kosina iz tablice 5-2. korišteni parametri dobiveni laboratorijskim ispitivanjima. Najviši faktor sigurnosti pripada odlagalištu s 0% udjela kuhinjskog otpada, a najniži s 80% udjela kuhinjskog otpada.



Slika 5-2. Usporedba rezultata

6. ZAKLJUČAK

Uvođenjem novih pravila u gospodarenju otpadom, mijenja se sastav otpada koji pristiže na odlagališta, što značajno utječe na mehanička svojstva otpada. Mehanička svojstva otpada, kao što su jedinična težina, posmična čvrstoća i kohezija, iznimno su važna za proračune stabilnosti kosina na odlagalištima. Iako se odvojenim sakupljanjem smanjuju količine otpada na odlagalištima, izdvajanjem određenih komponenti značajno se mijenja sastav otpada, što utječe na partamtere čvrstoće i geometriju odlagališta, a može utjecati i na stabilnost odlagališta.

Analize stabilnosti provedene su kako bi se utvrdio utjecaj sastava otpada na stabilnost odlagališta. Promjenom udjela kuhinjskog otpada u mješanom komunalnom otpadu, može se zaključiti kako se povećanjem udjela kuhinjskog otpada smanjuje faktor sigurnosti. Faktori sigurnosti su bili zadovoljavajući za sastave s udjelima kuhinjskog otpada do 58%, dok su za udio kuhinjskog otpada od 60% i 80% dobiveni izrazito niski faktori sigurnosti. Faktor sigurnosti manji od 1 ukazuje na moguće formiranje klizne plohe u odlagalištu i aktivacije klizišta. Smanjenjem nagiba odlagališta na 10° i 19°, dobiveni su zadovoljavajući faktori sigurnosti, ali odlagalište s nagibom od 10° ima znatno manje kapacitete u odnosu na ono sa kutom nagiba kosine od 20°. Analize koje su provedene nisu uzimale u proračun djelovanje filtrata u tijelu odlagališta, zbog čega se dobiveni faktori sigurnosti trebaju uzeti s oprezom. Također, parametri (jedinična težina, kohezija i kut unutarnjeg trenja) za otpad koji su korišteni u analizi, mogu se značajno razlikovati u različitim literaturnim izvorima, što predstavlja veliki izazov u ovakvim istraživanjima.

Kako bi se omogućila dugotrajna stabilnost odlagališta u budućnosti, potrebno je redovito ispitivati sastav otpada koji pristiže na odlagališe, pratiti razinu filtrata i provoditi monitoring stabilnosti kosina.

7. LITERATURA

ALBATAINEH, N. 2006. *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*. Diplomski rad. The University of Akron, Akron, Ohio.

BERISAVLJEVIĆ, Z., BERISAVLJEVIĆ, D., ČEBAŠEK, V. I RAKIĆ, D. 2015. *Analize stabilnosti pokosa metodama granične ravnoteže i smanjenja parametara čvrstoće*. Građevinar 67, 975-983

CHO, Y. M., KO, J. H., CHI, L., i TOWNSEND, T. G. 2011. *Food waste impact on municipal solid waste angle of internal friction*. Waste Manage., 31(1), 26–32.

ĆORIĆ BRUNOVIĆ, M. 2024. *Započela je sanacija najvećeg brda smeća u Hrvatskoj, radnici u strahu, a iz udruge tvrde: "To je igrokaz"*. URL: <https://dnevnik.hr/> (29.08.2024.)

DUNCAN, J., WRIGHT, S.G. 2005. *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

GOMES, C, LURDES LOPES, M. VENDA OLIVEIRA, P. J. (2013). *Municipal solid waste shear strength parameters defined through laboratorial and in situ tests*, Journal of the Air & Waste Management Association, 63(11), 1352-1368

JONES, D. R. V.; DIXON, N. 2003. *Stability of Landfill Lining Systems: Report No. 1 – Literature Review* (R&D Technical Report P1 385/TR1), Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD

KARAKAŠ JAKUBIN, H., KRNIĆ, IV, JUREŠKO HINA, G. 2023. *Radnik Čistoće ostao bez ruke; Tomašević: Tražim hitan sastanak u Vladi, odlaganje smeća ovdje je suspendirano*. URL: <https://www.jutarnji.hr/> (18.08.2024.)

KÖNIG, D.; JESSBERGER, H. L. 1997. *Waste Mechanics*, ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, pp. 35-76

KOVAČEVIĆ-ZELIĆ, B.; KVASNIČKA, P.; DOMITROVIĆ, D. 2002. *Stability Analysis for the Landfill Jakusevec*, Proceedings of the 12TH; Danube-European Conference, Passau, 27-28, pp. 503-506

IVŠIĆ, T., PETROVIĆ, I. i VERIĆ, F. 2004. *Overview of parameters for stability analysis on waste disposal sites*. Građevinar, 56 (11.).

MITROVIĆ, M. 2023. *VIDEO Golemo klizište urušilo pola Jakuševca: 'Netko je mogao poginuti'!*. URL: <https://www.vecernji.hr/> (18.08.2024.)

VUČENOVIĆ, H., HERCEG, K., DOMITROVIĆ, D., i VEINOVIĆ, Ž. 2024. *Parametric study of stability in landfills due to changes in waste composition*. Proceedings of the XVIII European Conference On Soil Mechanics and Geotechnical Engineering in Lisbon

VUKELIĆ, A., KOVAČEVIĆ ZELIĆ, B., DRNJEVIĆ, B. (2004): *Landslide at Jakuševac landfill*. Geotechnical Engineering with Geosynthetics, eds. Floss, R., Brau, G., Nussbaumer, M. and Laackmann, K.. München, DGGT, 2004. 87-9

SINGH, V., UCHIMURA, T. 2023. *Effect of Material Composition on Geotechnical Properties—Study on Synthetic Municipal Solid Waste*. Geotechnics 3(2):397-415

SZAVITS-NOSSAN, V., 2015. *Stabilnost kosina*. Mehanika tla i stijena – predavanje, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet Zagreb

ZHANG, Z., WANG, Y., FANG, Y., PAN, X., ZHANG, J., XU, H. 2020. *Global study on slope instability modes based on 62 municipal solid waste landfills*. Waste Management and Research, 38(12), 1389-1404