

Utjecaj kuta unutarnjeg trenja na stabilnost kosine u nekoherentnom tlu

Miholić, Vinko

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:169:756296>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**



Repository / Repozitorij:

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



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

**UTJECAJ KUTA UNUTARNJEG TRENJA NA STABILNOST KOSINE U
NEKOHERENTNOM TLU**

Diplomski rad

Vinko Miholić

R251

Zagreb, 2020.



KLASA: 602-04/20-01/256
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 07.12.2020.

Vinko Miholić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/256, UR. BROJ: 251-70-03-20-1 od 23.11.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

UTJECAJ KUTA UNUTARNJEG TRENJA NA STABILNOST KOSINE U NEKOHERENTNOM TLU

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu doc. dr. sc. Dubravko Domitrović, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditeljica dr. sc. Karolina Herceg.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko
Domitrović

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva
za završne i diplomske
ispite**

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Suvoditeljica

(potpis)

Dr. sc. Karolina Herceg

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

UTJECAJ KUTA UNUTARNJEG TRENJA NA STABILNOST KOSINE U NEKOHERENTNOM TLU

Vinko Miholić

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

Sažetak

Kosine su sastavan dio rudarske i geotehničke struke. U svrhu analize sigurnosti istih tokom godina su osmišljene mnoge metode proračuna. Metode se jedna od druge razlikuju u mogućnosti primjene i složenosti. Jasno je da će rezultati proračuna prvenstveno ovisiti o ulaznim podacima. Jedan od najvažnijih ulaznih podataka proračuna stabilnosti je kut unutarnjeg trenja. Iako postoji mnogo metoda za procjenu kuta unutarnjeg trenja niti jedna od njih nije posve prilagođena za ispitivanje šljunaka. Kako se u posljednjih par desetljeća šljunak sve više koristi u geotehničkim radovima sve više je potrebije saznanje o ponašanju ovog materijala. U ovom radu će se kroz analizu stabilnosti kosine koristeći program PLAXIS 2D ustvrditi povezanost kuta unutarnjeg trenja šljunka s faktorom sigurnosti.

Ključne riječi: kosina, faktor sigurnosti, šljunak, kut unutarnjeg trenja, PLAXIS 2D
Završni rad sadrži: 83 stranice, 19 tablica, 56 slika i 33 reference.
Jezik izvornika: Hrvatski
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb
Voditelj: Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Suvoditelj: Dr.sc. Karolina Herceg, poslijedoktorand RGNF
Ocjenjivači: Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Tomislav Korman, docent RGNF

INFLUENCE OF INTERNAL FRICTION ANGLE ON SLOPE STABILITY IN INCOHERENT SOIL

Vinko Miholić

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

Abstract

Slopes are an integral part of the mining and geotechnical profession. To analyze their safety, many calculation methods have been devised over the years. These calculation methods differ one from the other in their applicability and complexity. The results of such a calculation will primarily depend on the input data. One of the most important input datums in a stability calculation is the internal friction angle. Although there are many methods of estimating the internal friction angle, none of them is completely adapted to gravel. As gravel has been used increasingly in geotechnical works in the last few decades, it is becoming necessary to learn about its behaviour. In this paper, the stability of slopes will be analyzed using the PLAXIS 2D program to determine the relationship between the internal friction angle of gravel and the safety factor.

Keywords: slope, safety factor, gravel, internal friction angle, PLAXIS 2D

Thesis contains: 83 pages, 19 tables, 56 figures and 33 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Assistant Professor Dubravko Domitrović, PhD

Cosupervisor: Senior Assistant Karolina Herceg, PhD

Reviewers: Assistant Professor Dubravko Domitrović, PhD
Full Professor Biljana Kovačević Zelić, PhD
Assistant Professor Tomislav Korman, PhD

Defence date: December 11, 2020, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KLIZANJE - PADINE I KOSINE.....	2
2.1. Stabilnost kosina - osnove	3
2.2. Metoda granične ravnoteže	5
2.3. Metode konačnih elemenata.....	11
2.3.1. Diskretizacija modela.....	12
2.3.2. Naprezanja.....	12
2.3.3. Deformacije	14
2.4. Modeli tla i stijena.....	14
2.4.1. Elastični model	15
2.4.2. Mohr-Coulombov linearno elastični savršeno plastični model.....	16
2.4.3. Model ojačanog tla.....	18
2.4.4. Ostali korisni modeli.....	21
2.4.5. Odabir modela	22
2.5. Faktor sigurnosti MKE	24
3. EUROKOD.....	25
3.1. Osnove projektiranja prema Eurokodu, EN 1990	25
3.1.1. Stanje granične nosivosti i uporabljivosti	26
3.1.2. Projektne situacije.....	26
3.1.3. Varijable	27
3.1.4. Metoda parcijalnih faktora	28
3.2. Geotehničko projektiranje prema Eurokod 7	30
3.3. Stabilnost kosina prema Eurokod 7.....	34
4. STABILNOST KOSINE U NEKOHERENTNOM TLU	35
4.1. Izrada presjeka.....	35
4.2. Priprema presjeka za rad u PLAXIS 2D.....	44
4.3. Prijenos geometrije i formiranje regija	44
4.4. Obrada i implementacija rezultata laboratorijskih ispitivanja	46
4.5. Modeliranje željezničke pruge i ceste	51
4.6. Projektni pristupi unutar PLAXIS 2D	53
4.7. Proračun	54
4.7.1. Početna faza.....	55

4.7.2.	Faze iskopa	56
4.7.3.	Faze izgradnje ceste	56
4.7.4.	Faza izgradnje pruge	57
4.7.5.	Faze proračuna stabilnosti	57
4.8.	Rezultati proračuna i analiza	59
5.	ZAKLJUČAK	69
	LITERATURA	70

POPIS SLIKA

Slika 2–1 Vrste kliznih ploha (Maksimović, 2008)	2
Slika 2–2 Sile na karakterističnoj lameli (Nonveiller, 1987)	8
Slika 2–3 Trokutasti elementi (PLAXIS, 2016).....	12
Slika 2–4 Generalni prikaz trodimenzionalnog sustava naprezanja (PLAXIS, 2016)	12
Slika 2–5 Savršeno elastični modeli (Basan, 2016)	15
Slika 2–6 Dijagram naprezanje-deformacije linearno elastičnog, idealno plastičnog modela (PLAXIS, 2016).....	17
Slika 2–7 Očvršćivanje elastoplastičnog modela (Basan, 2016)	18
Slika 2–8 Hiperbola HS modela (PLAXIS, 2016)	20
Slika 4–1 Situacijska karta s označenim karakterističnim presjecima	35
Slika 4–2 Primjer popunjene tablice Location Details	36
Slika 4–3 Primjer popunjene tablice Field Geological Descriptions	36
Slika 4–4 Inženjerskogeološki presjek bušotine - prvih 3,8 metara.....	37
Slika 4–5 Polje bušotina, uvećanje 5	38
Slika 4–6 Bušotina BH01, uvećanje 5	38
Slika 4–7 Polje bušotina s granicama između slojeva.....	39
Slika 4–8 Navigacija do naredbe Extract Solids from Surface	39
Slika 4–9 Primjer izrade sloja šljunaka (G)	40
Slika 4–10 3D model tla s bušotinama	40
Slika 4–11 Situacijska karta nadopunjena 3D modelom tla, žičani prikaz.....	41
Slika 4–12 3D model tla s preuzetim linijama presjeka	41
Slika 4–13 Presjeci 3D modela tla 1-1 i 2-2	42
Slika 4–14 Presjeci tla ukomponirani sa situacijskim presjecima.....	43
Slika 4–15 Konture kosine presjeka 1-1	44
Slika 4–16 Geometrija presjeka 1-1 unutar programa PLAXIS 2D.....	45
Slika 4–17 Detalj geometrije modela unutar programa PLAXIS 2D.....	45
Slika 4–18 Granulometrijske krivulje.....	46
Slika 4–19 Dijagram procjene odnosa statičkog i sekantnog modula (Obrzud & Truty, 2018)	48
Slika 4–20 Definiranje HS modela za pjeskoviti šljunak	49
Slika 4–21 Definiranje MC modela za glinu	50
Slika 4–22 Definiranje HS modela za prašnasti pijesak.....	51

Slika 4–23 Presjek 1-1 s pridodanim modelima tla.....	51
Slika 4–24 Modelirana željeznička pruga s opterećenjima	52
Slika 4–25 Modelirana cesta s opterećenjem.....	53
Slika 4–26 Detalj potpuno definiranog modela kosine s okolnom infrastrukturom	53
Slika 4–27 Projektni pristup 3 unutar PLAXIS 2D.....	54
Slika 4–28 Generiranje mreže elemenata	54
Slika 4–29 Diskretiziran model.....	55
Slika 4–30 Stablo faza proračuna.....	55
Slika 4–31 Aktivni poligoni početne faze.....	56
Slika 4–32 Aktivni poligoni - iskop 2	56
Slika 4–33 Aktivni poligoni faza izgradnje ceste.....	57
Slika 4–34 Izuzeti površinski slojevi kosine proračuna stabilnosti.....	58
Slika 4–35 Odabir točke za izračun lokalnog faktora sigurnosti	58
Slika 4–36 Ukupna efektivna vertikalna naprezanja početne faze (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°).....	59
Slika 4–37 Detalj korišten za izračun efektivnih vertikalnih naprezanja	60
Slika 4–38 Ukupni pomaci plastičnih faza (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)	61
Slika 4–39 Inkrementalni pomaci SF 1 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)	62
Slika 4–40 Inkrementalni pomaci SF 2 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)	62
Slika 4–41 Inkrementalni pomaci SF 3 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)	63
Slika 4–42 Inkrementalna smična naprezanja SF 1 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°).....	63
Slika 4–43 Inkrementalna smična naprezanja SF 2 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°).....	64
Slika 4–44 Inkrementalna smična naprezanja SF 3 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°).....	64
Slika 4–45 Dijagram faktora sigurnosti u ovisnosti o ukupnim pomacima vršne točke (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)	65
Slika 4–46 Očitane vrijednosti faktora sigurnosti SF 1, SF 2 i SF 3 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°).....	66
Slika 4–47 Zone ojačanog tla plastičnih analiza (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)	66
Slika 4–48 Dijagram faktora sigurnosti pri različitim kutovima unutarnjeg trenja	68

POPIS TABLICA

Tablica 2–1 Broj nepoznanica i jednadžbi lamele (Nonveiller, 1987).....	9	
Tablica 2–2 Karakteristike numeričkih metoda granične ravnoteže (Gotić & Zidar, 1997)	10	
Tablica 2–3 Odabir modela prema materijalu (PLAXIS, 2016).....	22	
Tablica 2–4 Odabir modela prema primjeni (PLAXIS, 2016)	23	
Tablica 2–5 Odabir modela prema dominantnom opterećenju (PLAXIS, 2016).....	23	
Tablica 3–1 Struktura EN Eurokoda.....	25	
Tablica 3–2 Provjera graničnih stanja metodom parcijalnih faktora	29	
Tablica 3–3 Provjera stabilnosti prema EN 1997-1 (Lebo, 2014).....	30	
Tablica 3–4 Parcijalni faktori za EQU (EN 1997-1).....	31	
Tablica 3–5 Parcijalni faktori za UPL (EN 1997-1)	32	
Tablica 3–6 Parcijalni faktori za HYD (EN 1997-1)	32	
Tablica 3–7 Projektni pristupi za STR i GEO (EN 1997-1).....	33	
Tablica 3–8 Parcijalni faktori za STR i GEO (EN 1997-1).....	33	
Za iste je provedena granulometrijska analiza sijanja čiji prosječni rezultati su prikazani tablicom 4-1. i slikom 4-18. Tablica 4–1 Granulometrijska analiza sijanja.....		46
Tablica 4–2 Korekcijski parametri za određivanje kuta unutarnjeg trenja krupnozrnatih materijala (Brinch Hansen & Lundgren, 1958)		48
Tablica 4–3 Parametri za modeliranje praga, tampona, zastorne prizme i donjeg nosivog sloja (Jiang & Nimbalkar, 2019)		52
Tablica 4–4 Podaci za izračun efektivnih vertikalnih naprezanja		60
Tablica 4–5 Faktori sigurnosti za šljunak kuta unutarnjeg trenja u rasponu od 33° do 41°		67
Tablica 4–6 Razlike faktora sigurnosti s promjenom kuta unutarnjeg trenja.....		67

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
c	kN/m^2	kohezija, odsječak na ordinati dijagrama τ/σ
σ_n	kPa	ukupna naprezanja na pojedinim točkama plohe sloma
φ	$^\circ$	kut unutarnjeg trenja
f	kN/m^2	čvrstoća na smicanje
τ_m	kN/m^2	mobilizirana tangencijalna naprezanja
σ'	kN/m^2	efektivna naprezanja
u	kN/m^2	naprezanja vode u porama
c'	kN/m^2	kohezija za efektivna naprezanja
φ'	$^\circ$	kut unutarnjeg trenja za efektivna naprezanja
V_1	m^3	volumen klizne mase iznad razine vode
g	m/s^2	ubrzanje sile teže
ρ	kg/m^3	gustoća
γ	kN/m^3	jedinična težina
ρ_s	kg/m^3	gustoća čestica tla
n		relativni porozitet
ρ_w	kg/m^3	gustoća vode
S_r		stupanj zasićenja
γ_w	kN/m^3	jedinična težina vode
h_c	m	idealna visina kapilarnog dizanja
h'	m	visina zone otvorene kapilarne vode
V_2	m^3	volumen klizne mase ispod razine vode
γ'	kN/m^3	uronjena jedinična težina, rezultanta težine jediničnog volumena tla i uzgona na isti volumen
A i B		parametri utvrđeni mjerenjem promjene pornog tlaka pri mijenjanju opterećenja u troosnoj ćeliji u nedreniranim pokusima smicanja
i		hidraulički gradijent
ΔH	m	razlika potencijala
l	m	duljina puta koji voda prođe
b	m	širina lamele
l	m	duljina plohe sloma lamele
W_i	kN/m^3	težina materijala lamele

E_i	kN/m ²	rezultante efektivnih naprezanja u tlu između susjednih lamela
v_i	m	položaj rezultanti E_i međulamelarnih sila
ϑ_i	°	kut djelovanja sile E_i
U_i	kN/m ²	hidrostatski tlak na granicama lamela i na plohi sloma
h_i	m	razina tlaka vode na plohi sloma
Q_i	kN/m ²	rezultanta efektivnih naprezanja na plohi sloma
ψ_i	°	kut djelovanja sile Q_i
a	m	ekscentricitet sile Q_i
λ		multiplikator plastičnosti
α		parametar korišten za promjenu ponašanja tla iz elastičnog u plastično ponašanje
E_0^{ref}	kN/m ²	referentna vrijednost modula
σ^{ref}	kN/m ²	referentno naprezanje
m_i		parametar koji povezuje stanje naprezanja s veličinama krutosti materijala
E_i	kN/m ²	početna krutost dana odnosom E_{50} i R_f
E_{50}	kN/m ²	modul opterećenja pri dreniranom troosnom opterećenju
R_f		kriterij sloma dan kao odnos q_f i q_a
q_f	kN/m ²	smična čvrstoća izvedena iz Mohr-Coulombovog kriterija čvrstoće
q_a	kN/m ²	asimptotska vrijednost smične čvrstoće
ν_{ur}		Poissonov koeficijent pri rasterećenju i ponovnom opterećenju
γ_r	m/m	akumulirane plastične smične deformacije
ψ_m	°	mobiliziran kut dilatancije
φ_m	°	mobilizirani kut trenja prema Mohr-Coulombovom kriteriju
φ_{cm}	°	kut trenja kritičnog stanja
GSI		indeks čvrstoće,
D		distribucijski faktor
s		konstanta materijala
a		konstanta materijala
σ_{ci}	kN/m ²	jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene
M_{sf}		stabilni multiplikator redukcije čvrstoće čija vrijednost se uzima kao faktor sigurnosti F_{msf}

γ_f parcijalni faktor djelovanja koji uzima u obzir nepoželjno, negativno odstupanje vrijednost djelovanja od reprezentativne vrijednosti

η pretvorni faktor koji uzimaju u obzir skalirajuće efekte i efekte vlage, temperature i ostalih parametara

γ_m parcijalni faktor za svojstva materijala koji uzima u obzir nepoželjno, negativno odstupanje vrijednosti svojstva materijala od karakteristične vrijednosti

Δa_m odstupanje od geometrijske savršenosti uzimajući u obzir nepoželjno, negativno odstupanje vrijednosti geometrijske veličine od nominalne

γ_{sd} parcijalni faktor učinaka djelovanja koji uzima u obzir nepouzdanosti prilikom modeliranja djelovanja,

γ_{Rd} parcijalni faktor otpora koji uzima u obzir nepouzdanosti modela otpornosti i geometrijskih veličina

1. UVOD

U ovom radu je kroz analizu stabilnosti kosine koristeći program PLAXIS 2D analizirana povezanost kuta unutarnjeg trenja šljunka s faktorom sigurnosti. Provedena je analiza utjecaja okolne infrastrukture na stabilnost kosine što nam zapravo definira tri različite kosine: kosinu bez infrastrukture, kosinu s cestom i cestovnim prometom i kosinu s cestom, prugom i željezničkim opterećenjem. Za svaku od tih kosina provedeni su proračuni pri različitim kutovima unutarnjeg trenja te su tako na temelju dobivenih podataka analizirani rezultati i doneseni zaključci.

U prvom dijelu pokriveno su teorijske osnove mehanizama klizanja i metode proračuna stabilnosti. Iako PLAXIS 2D proračun stabilnosti koristi metodu konačnih elemenata opisane su i metode granične ravnoteže pošto su iste baza za shvaćanje problematike kosina.

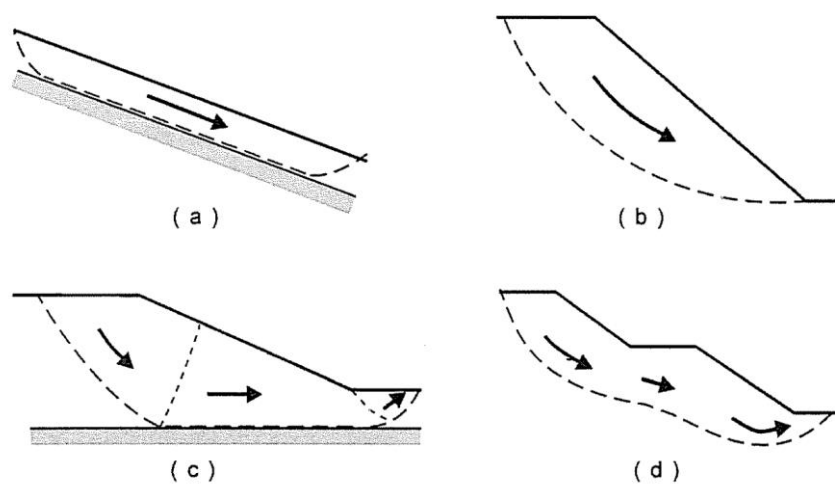
Od početaka pregovora za ulazak u Europsku Uniju, Hrvatska se obvezala na europsku standardizaciju. Tako se u Hrvatskoj od 2008. godine koriste Eurokodovi. Eurokodovi su skup europskih pravila za proračune konstrukcija zgrada i inženjerskih građevina te je tako, u drugom dijelu rada, opisana stabilnost kosina kroz pravila Eurokoda.

U trećem dijelu rada opisani su koraci proračuna stabilnosti kosine. Od izrade presjeka u programu AutoCAD, analize bušotinskih i laboratorijskih mjerenja pa do samog proračuna stabilnosti i analize rezultata.

2. KLIZANJE - PADINE I KOSINE

Nestabilnost masa na nagnutim terenima je prirodna pojava (Nonveiller, 1987). Kada površina tla nije horizontalna pojavljuje se komponenta gravitacijske sile koja teži pomaknuti masu niz nagib. Toj prirodnoj tendenciji odupiru se naprezanja unutar mase tla; otpori (Maksimović, 2008). Do pomicanja masa tada može doći zbog promjene bilance sila pri nepromijenjenoj bilanci otpora ili zbog promjena bilance otpora pri nepromijenjenoj bilanci sila (Terzaghi et al., 1929). Konačni rezultat oba scenarija nazivamo klizanje, a isto može biti uzrok ozbiljnim posljedicama kao što su: ugroza sigurnosti prometa i njegov prekid, ugroza, oštećenje ili uništenje pojedinih zgrada, naselja, zemljišta, šuma i riječnih korita, poplavama te ljudskim stradavanjima (Nonveiller, 1987).

Nestabilnosti zemljanih i stijenskih masa mogu se pojaviti u velikom broju raznovidnih oblika, a ovdje će se razmatrati grupa problema nestabilnosti koja spada u područje mehanike tla. Ista se grupa može opisati kao klizanje po jednoj ili više kliznih ploha gdje se masa tla kreće kao cjelina ili kao skup nekoliko pojedinačnih masa, lamela, u međusobnom kontaktu. Oblici klizanja mase tla se tada mogu, prema obliku klizne plohe, grupirati u tri osnovne vrste prikazane na slici 2-1. Ravne klizne plohe (slika 2-1-a), kružno cilindrične klizne plohe (slika 2-1-b) i složene klizne plohe (slika 2-1-c i 2-1-d).



Slika 2-1 Vrste kliznih ploha (Maksimović, 2008)

U geotehničkom pogledu; nagnute površine, bilo da su one formirane u tlu ili stijenskoj masi, mogu biti padine ili kosine. Padinama nazivamo prirodno oblikovane nagibe, a kosinama stručno projektirane nagibe nastale nasipavanjem ili iskopavanjem. Zajednička odlika padina i kosina jest utvrđivanje njihove stabilnosti (Ibrahimović, 2014). Iako postoje

i trodimenzionalne metode proračuna stabilnosti kosina, zbog svoje jednostavnosti i raširenosti u praksi ovdje će se razmatrati samo dvodimenzionalne metode proračuna.

2.1. Stabilnost kosina - osnove

Proračun stabilnosti kosina prikazuje da li, u nekom području, opterećenja mogu izazvati slom ili velike deformacije (Gotić & Zidar, 1997).

Čvrstoća zemljanih materijala na smicanje izražena Mohr-Coulombovim zakonom glasi:

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad (2.1-1)$$

gdje su:

- c - kohezija, odsječak na ordinati dijagrama τ/σ ,
- σ_n - ukupna naprezanja na pojedinim točkama plohe sloma,
- φ - kut unutarnjeg trenja.

Stabilnost kosina definiramo faktorom sigurnosti, odnosom između sila koje sprečavaju klizanje i sila koje uzrokuju klizanje tj. odnosom između čvrstoće na smicanje i naprezanja na smicanje mobiliziranih za održavanje ravnoteže (Gotić & Zidar, 1997):

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (2.1-2)$$

gdje su:

- τ_f - čvrstoća na smicanje,
- τ_m - mobilizirana tangencijalna naprezanja.

Prethodno prikazani oblik jednadžbe pokazao se nepouzdanim u određivanju parametara čvrstoće materijala male propusnosti. Tek je Terzaghi oko 1920. spoznao da je čvrstoća na smicanje povezana s naprežanjem što djeluje među česticama tla, a ne s ukupnim normalnim naprežanjem. Jer, dio naprežanja preuzima voda u porama i taj dio ne pridonosi otporu smicanju (Nonveiller, 1987).

$$\sigma' = \sigma_n - u \quad (2.1-3)$$

gdje su:

- σ' - efektivna naprežanja,
- u - naprežanja vode u porama.

Mohr-Coulombov zakon tada glasi:

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad (2.1-4)$$

gdje su:

c' - kohezija za efektivna naprezanja,

φ' - kut unutarnjeg trenja za efektivna naprezanja,

te je faktor sigurnosti:

$$F_s = \frac{c' + \sigma'_n \cdot \tan \varphi'}{\tau_m} \quad (2.1-5)$$

Općenito, faktor sigurnosti je broj koji predstavlja rezervu sigurnosti protiv klizanja (Gotić & Zidar, 1997):

$F_s > 1$ – kosina je stabilna

$F_s = 1$ – kosina je u stanju granične ravnoteže

$F_s < 1$ – dolazi do klizanja.

Iako bitan, faktor sigurnosti nije jedini rezultat proračuna stabilnosti. Ponekad je osim provjeravanja stabilnosti padina ili nastalih klizišta bitnije odrediti utjecaj što ga imaju promjene oblika, opterećenje ili sanacijske mjere na iznos faktora sigurnosti. Dodatno, proračunom stabilnosti kosina dimenzioniramo nagibe kosina kako bi ustanovili koji nagib zadovoljava uvjet potrebne sigurnosti od klizanja (Nonveiller, 1987).

Za točno rješenje proračuna stabilnosti kosina moraju biti zadovoljeni ovi uvjeti (Nonveiller, 1987):

1. u svakoj točki mora biti ispunjen uvjet sloma materijala;

$$\tau_m \leq c' + \tan \varphi' \quad (2.1-6)$$

2. diferencijalne jednadžbe ravnoteže;
3. naprezanja unutar mase tla moraju biti u ravnoteži s vanjskim silama što na nju djeluju;
4. specifične deformacije u točki moraju biti povezane s napreznjima preko odgovarajućeg odnosa;
5. specifična deformacija u svakoj točki mora biti kompatibilna s onom u okolnim točkama.

Pronalazak egzaktnog rješenja uz potpuno zadovoljene uvjete temelji se na prikladnom odnosu između naprezanja i deformacija.

Pojednostavljenjem matematičkih modela svojstava tla i uzimajući u obzir prvi i treći uvjet razvile su se razne varijante računa stabilnosti koje pripadaju grupi metoda granične ravnoteže. Unutar metoda granične ravnoteže materijal u kosini smatramo idealno plastičnim, a isti zadovoljava Mohr-Coulombov kriterij sloma (Nonveiller, 1987).

Metode teorije plastičnosti također polaze od ideje da je materijal idealno plastičan, a obuhvaćaju prvi, drugi i treći od spomenutih uvjeta. Unutar metode teorije plastičnosti dano je rješenje za nelinearni odnos otpora smicanja. Spomenute metode pružaju samo približna rješenja; jedna i druga metoda daju samo neke od mogućih raspodjela naprezanja na graničnoj plohi ili u plastificiranoj zoni u stanju sloma (Nonveiller, 1987).

Svi se prethodno spomenuti uvjeti mogu zadovoljiti jedino primjenom metode konačnih elemenata za materijal s nelinearnim odnosom između naprezanja i deformacija. Rezultati računa provedenih metodom konačnih elemenata su toliko realni koliko su realni osnovni odnosi materijala u cijeloj promatranoj domeni na kojoj se temelji proračun. Jasno je da se odnosi za cijeli promatrani prostor teško mogu utvrditi dovoljno točno pa se točnost računa metode konačnih elemenata ne može do kraja iskoristiti. Upravo zbog spomenute činjenice danas u praksi još općenito primjenjujemo račun stabilnosti kosina po metodi granične ravnoteže (Nonveiller, 1987).

Kako bi se pobliže objasnile teorijske osnove proračuna stabilnosti kosina u narednom poglavlju su opisane metode granične ravnoteže.

2.2. Metoda granične ravnoteže

Proračuni stabilnosti metodom granične ravnoteže mogu se podijeliti na metode lamela, kružne metode i eliptične metode. Metode koje koriste lamele bazirane su na analizi statičke stabilnosti pojedinih lamela i opće statičke stabilnosti cijele klizne mase dok kružne i eliptične metode razmatraju samo opću statičku stabilnost cijele klizne mase. Upravo zbog jednostavnosti modela koji koriste, kružne i eliptične metode rijetko primjenjujemo (Albataineh, 2006). Specijalistički računalni programi za proračun stabilnosti kosina najčešće su bazirani na metodi lamela te će se zbog toga u nastavku razmatrati samo metode lamela.

U analizama stabilnosti najčešće se primjenjuje obračun sila i opterećenja nastalih djelovanjem gravitacije, uzgona, hidrodinamičkih sila i pornog pretlaka (Nonveiller, 1987).

Težina vlastite zapremine odnosno mase kliznog tijela računata na 1 m' širine klizišta (Ibrahimović, 2014):

$$W = V_1 \cdot g \cdot \rho = V_1 \cdot \gamma \quad (2.2-1)$$

gdje su:

V_1 - volumen klizne mase iznad razine vode,

g - ubrzanje sile teže = 9,81 m/s²,

ρ - gustoća,

γ - jedinična težina.

Jedinična težina se može povezati s ostalim jediničnim veličinama na sljedeći način (Kvasnička & Domitrović, 2007):

$$\gamma = [\rho_s \cdot (1 - n) + \rho_w \cdot S_r \cdot n] \cdot g \quad (2.2-2)$$

gdje su:

ρ_s - gustoća čestica tla,

n - relativni porozitet,

ρ_w - gustoća vode,

S_r - stupanj zasićenja.

Tada, za zapreminsku težinu suhog tla za dijelove kosine iznad razine vode možemo napisati:

$$W_1 = V_1 \cdot \rho_s \cdot (1 - n) \cdot g \quad (2.2-3)$$

Dok za zapreminsku težinu vlažnog tla za dijelove kosine iznad razine vode možemo napisati (Nonveiller, 1987):

$$W_1' = V_1 \cdot [\rho_s \cdot (1 - n) + \rho_w \cdot S_r \cdot n] \cdot g \quad (2.2-4)$$

Ista jednadžba opisuje povećanje težine u području otvorene i zatvorene kapilarne vode gdje vrijednost stupnja zasićenja za zatvorenu kapilarnu vodu poprima vrijednost 1, a za otvorenu kapilarnu vodu vrijednosti manje od 1. Za područje otvorene kapilarne vode tlak koji se javlja usred kapilarnog dizanja dan je izrazom:

$$u'_c = \gamma_w \cdot h_c \quad (2.2-5)$$

gdje su:

γ_w - jedinična težina vode,

h_c - idealna visina kapilarnog dizanja.

Tada je idealna visina kapilarnog dizanja (Ibrahimović, 2014):

$$h_c = \frac{1+S_r}{2} \cdot h' \quad (2.2-6)$$

gdje je:

h' - visina zone otvorene kapilarne vode.

Ispod nivoa vode, na uronjene čestice tla, osim gravitacije djeluje i tlak po Arhimedovu zakonu. Pošto sila uzgona djeluje na potopljeni dio klizne mase uzima se da je potopljena zapreminska težina (Zlatović, 2006):

$$W_2 = V_2 \cdot \gamma' \quad (2.2-7)$$

gdje su:

V_2 - volumen klizne mase ispod razine vode,

γ' - uronjena jedinična težina, rezultanta težine jediničnog volumena tla i uzgona na isti volumen.

Dodatna gravitacijska sila je sila vanjskog opterećenja koja se računa putem Newtonovog zakona gibanja.

Promjenom opterećenja što djeluje na površini kosine nastaju promjene volumena pora. Povećanjem opterećenja u slabo propusnom materijalu povećava se tlak vode u porama. Konsolidacijom se taj porni tlak smanjuje pa se uzgon i hidrodinamičke sile na kraju tog procesa vraćaju na početno stanje. To prijelazno stanje može biti nepovoljno za stabilnost kosine. Pri rasterećenju dijela kosine primjećujemo sličnu pojavu gdje dolazi do smanjenja pornog tlaka uslijed ekspanzije, gdje rastom pornog tlaka taj dio kosine s vremenom postaje nestabilniji. Promjene pornog tlaka zbog promjene opterećenja izračunavaju se iz promjene glavnih naprezanja $\Delta\sigma_3$ i $\Delta\sigma_1$ pomoću Skemptonovih parametara A i B (Nonveiller, 1987):

$$\Delta u = B(\Delta\sigma_3 + A \cdot \Delta\sigma_1) \quad (2.2-8)$$

gdje su:

A i B - parametri utvrđeni mjerenjem promjene pornog tlaka pri mijenjanju opterećenja u troosnoj ćeliji u nedreniranim pokusima smicanja.

U slučaju strujanja vode kroz tlo javljaju se strujni tlakovi. Isto tečenje jest uzrok pojave kose komponente koja skreće silu mase svakog dijela zapremnine tla, a time i rezultante od vertikalnog do nekog kosog položaja (Ibrahimović, 2014). Za praktične probleme dovoljno je da se strujni tlak na jedinični volumen izračunava kao (Zlatović, 2006):

$$s = i \cdot \gamma_w \quad (2.2-9)$$

gdje je:

i - hidraulički gradijent.

Tada je hidraulički gradijent:

$$i = \frac{\Delta H}{l} \quad (2.2-10)$$

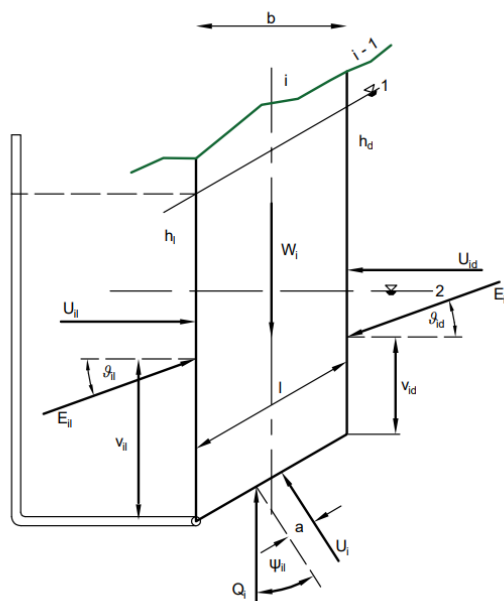
gdje je:

ΔH - razlika potencijala,

l - duljina puta koji voda prođe.

Tečenje kroz tlo je brže, što je razlika potencijala veća, a duljina puta manja (Kvasnička & Domitrović, 2007).

Segment iznad plohe sloma u proračunu stabilnosti dijelimo na vertikalno presječene segmente; lamele. Granice između lamela odabiru se tako da klizna ploha u svakoj lameli prolazi kroz jednu vrstu materijala i da se klizna ploha na duljini lamele može zamijeniti pravcem (Nonveiller, 1987). Broj lamela tada iznosi n , a broj međulamelarnih vertikalnih presjeka $n-1$. Slika 2-2 prikazuje karakterističnu lamelu i sve sile koje na nju djeluju.



Slika 2-2 Sile na karakterističnoj lameli (Nonveiller, 1987)

gdje su:

b - širina lamele,

l - duljina plohe sloma lamele,

W_i - težina materijala lamele,

E_i - rezultante efektivnih naprezanja u tlu između susjednih lamela (rezultante međulamelarnih horizontalnih sila X_i i međulamelarnih vertikalnih sila Y_i),

v_i - položaj rezultanti E_i međulamelarnih sila,

ϑ_i - kut djelovanja sile E_i ,

U_i - hidrostatski tlak na granicama lamela i na plohi sloma,

h_i - razina tlaka vode na plohi sloma (označeno 1),

Q_i - rezultanta efektivnih naprezanja na plohi sloma (rezultanta normalne sile P i tangencijalne sile T),

ψ_i - kut djelovanja sile Q_i ,

a - ekscentricitet sile Q_i .

Za svaku lamelu mogu se napisati tri uvjeta ravnoteže i uvjet sloma. Odnos sustava jednadžbi i nepoznanica za svaku lamelu prikazan je u tablici 2-1.

Tablica 2–1 Broj nepoznanica i jednadžbi lamele (Nonveiller, 1987)

Nepoznanice	Broj	Uvjeti	Broj
sile E_i	$n-1$	$\sum V_i = 0$	n
kutovi ϑ_i	$n-1$	$\sum H_i = 0$	n
visine v_i	$n-1$	$\sum M_i = 0$	n
reakcija Q_i	n	$\tau_f = \tau(c_i, \varphi_i)$	n
ekscentricitet a	n		
kutovi ψ_i	n		
faktor sigurnosti F_s	1		
$6n-2$		$4n$	

Iz tablice zaključujemo kako je sustav višestruko neodređen i rješiv jedino uvođenjem $2n-2$ uvjeta, npr. $n-1$ kutova ϑ_i i $n-1$ položaja Q_i , $n-1$ položaja Q_i i $n-1$ visina v_i i sl.. Kako bi rješenje ostalo u realističnim granicama uvode se ograničenje:

$$\vartheta_i \leq \arctan \left(\frac{\tan \varphi'}{F} + \frac{c'}{F} \cdot \frac{h}{E_i \cos \vartheta_i} \right) \quad (2.5-11)$$

Jednadžba (2.5-11) osigurava da hvatište sile E_i ostaje unutar visine lamele. Dodatno ograničenje je da hvatište reakcije Q_i bude približno oko sredine lamele, osim na prvoj i posljednjoj lameli gdje je isto oko 2/3 širine od kraja plohe sloma (Nonveiller, 1987).

Pretpostavka svih metoda granične ravnoteže je da tlo možemo podijeliti na lamele i da duž svih lamela postoji zajednički faktor sigurnosti. Isto povlači daljnje pretpostavke o smjerovima i iznosima sila međudjelovanja između tih lamela. Pretpostavke o smjerovima i iznosima sila su glavna obilježja prema kojima razlikujemo razne metode granične ravnoteže (Griffiths & Lane, 2016). Pretpostavke, zadovoljene jednadžbe ravnoteže i ograničenja klizne plohe za razne metode proračuna prikazane su unutar tablice 2-2.

Tablica 2–2 Karakteristike numeričkih metoda granične ravnoteže (Gotić & Zidar, 1997)

Metoda proračuna	Pretpostavke	Zadovoljene jednadžbe ravnoteže	Oblik klizne plohe
Fellenius	Rezultanta međulamelarnih sila je paralelna bazi lamele.	Ukupnih momenata	kružni
Opća Bishop	Rezultanta međulamelarnih sila je horizontalna. Tangencijalne međulamelarne sile su jednake i suprotne.	Moment lamela Ukupnih momenata Vertikalnih sila Horizontalnih sila	kružni
Pojednostavljena Bishop	Rezultanta međulamelarnih sila je horizontalna. Rezultante tangencijalnih međulamelarnih sila su zanemarene.	Ukupnih momenata Vertikalnih sila	kružni
Opća Janbu	Promjenjiv nagib međulamelarnih sila (promjenjiv po lamelama). Unaprijed pretpostavljen položaj rezultanti međulamelarnih sila.	Moment lamela Ukupnih momenata Vertikalnih sila Horizontalnih sila	opći
Pojednostavljena Janbu	Međulamelarne sile su horizontalne. Tangencijalne međulamelarne sile su jednake nuli.	Vertikalnih sila Horizontalnih sila	opći
Spencer	Rezultante međulamelarnih sila su međusobno paralelne.	Moment lamela Ukupnih momenata Vertikalnih sila Horizontalnih sila	opći
Morgenstern i Price	Promjenjiv nagib međulamelarnih sila (promjenjiv po lamelama). Nagib međulamelarnih sila prati jednadžbu polu-sinusne funkcije.	Moment lamela Ukupnih momenata Vertikalnih sila Horizontalnih sila	opći

2.3. Metode konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je metoda koja se temelji na diskretizaciji kontinuuma. Područje kontinuuma dijeli se na konačan broj elemenata međusobno povezanih točkama; čvorovima na konturi elementa tako tvoreći mrežu konačnih elemenata. Stanja deformacija, naprezanja i pomaka svakog elementa opisuju se interpolacijskim funkcijama. Za svaki element se izvode lokalni sustavi algebarskih jednadžbi čije su nepoznanice čvorne veličine. Nakon toga se formira globalni sustav jednadžbi za cijeli diskretizirani model u kojem su nepoznanice čvorne veličine svih elemenata. Tada, primjenom teorijskih relacija, možemo izračunati čvorne veličine i ostale veličine potrebne za analizu kontinuuma. (Sorić, 2004).

Polazeći od nekoga početnog stanja mogu se izračunati promjene naprezanja i deformacija u zadanoj domeni za gravitacijske sile i pri promjeni opterećenja (Griffiths & Lane, 2016).

Povećanjem broja elemenata postupno se približavamo točnijem rješenju sustava.

Za razliku od metoda granične ravnoteže, metode konačnih elemenata ne zahtijevaju pretpostavke o lokaciji i izgledu klizne plohe, te na taj način omogućuju izračun *prirodne* klizne plohe kao zone gdje otpori smicanju tla ne izdržavaju smična naprezanja. Također, metode konačnih elemenata ne koriste koncept zamišljenih lamela te tako ne razmatraju odnos međulamelarnih sila (Griffiths & Lane, 2016).

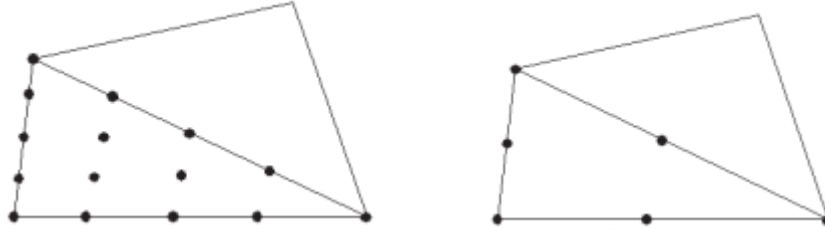
Osnovni koraci svih metoda konačnih elemenata su:

1. geometrizacija modela,
2. diskretizacija modela,
3. odabir modela ponašanja tla,
4. izračun naprezanja i deformacija,
5. prikaz rezultata; vizualizacija i interpretacija.

Zbog kompleksnosti, proračuni metodom konačnih elemenata se obavljaju elektronički posredstvom specijaliziranih računalnih programa. U nastavku će se razmatrati teorija metode konačnih elemenata korištena unutar programa PLAXIS 2D.

2.3.1. Diskretizacija modela

Diskretizacija modela se vrši podjelom geometrije modele na konačan broj trokutastih elemenata. Osnovni elementi za opis tla i stijena su trokutastih višečvorni elemenata; 15-čvorni i 6-čvorni (slika 2-3).



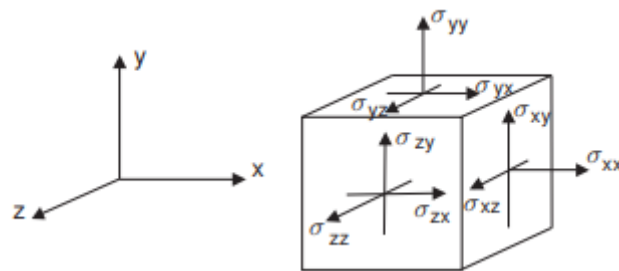
Slika 2-3 Trokutasti elementi (PLAXIS, 2016)

15-čvorni trokutasti elementi općenito daju točnija rješenja dok 6-čvorni trokutasti elementi omogućuju brži proračun (PLAXIS, 2016). Za svaki element raspisuju se stanja naprezanja i deformacija.

2.3.2. Naprezanja

Naprezanje je tenzor koji možemo prikazati matricom u Kartezijevom koordinatnom sustavu (slika 2-4):

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.3.2.-1)$$



Slika 2-4 Generalni prikaz trodimenzionalnog sustava naprezanja (PLAXIS, 2016)

Prema standardnoj teoriji deformacija vrijedi da su $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$ i $\sigma_{zx} = \sigma_{xz}$ pa naprezanja češće zapisujemo u vektorskom obliku:

$$\sigma = (\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{zx})^T \quad (2.3.2.-2)$$

Kao što je spomenuto u poglavlju 2.1. *Stabilnosti kosina* - osnove naprezanja u tlu se sastoje od efektivnih naprezanja i pornih tlakova.

$$\sigma = \sigma' + \sigma_w \quad (2.3.2.-3)$$

$$\sigma' = (\sigma'_{xx} \ \sigma'_{yy} \ \sigma'_{zz} \ \sigma'_{xy} \ \sigma'_{yz} \ \sigma'_{zx})^T \quad (2.3.2.-4)$$

$$\sigma_w = (p_w \ p_w \ p_w \ 0 \ 0 \ 0)^T \quad (2.3.2.-5)$$

Često je korisnije korištenje glavnih naprezanja nego Kartezijevih naprezanja. Glavna naprezanja su ona naprezanja za koje u koordinatnom sustavu glavnih naprezanja smična naprezanja iznose nulu. Ista određujemo iz sljedeće jednadžbe:

$$\det(\sigma' - \sigma' l) = 0 \quad (2.3.2.-6)$$

gdje su:

$\det(matrice)$ - determinanta matrice trećeg reda čije su rješenje, za kvadratnu matricu A , brojevi oblika:

$$A = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{22} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{31} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} \quad (2.3.2.-6a)$$

l - jedinična matrica.

Dobivena rješenja, glavna efektivna naprezanja ($\sigma'_i \ \sigma'_{i+1} \ \sigma'_{i+2}$), sortiramo po veličini tako da $\sigma'_1 \leq \sigma'_2 \leq \sigma'_3$, odnosno, tako da σ'_1 bude najveće tlačno glavno efektivno naprezanje, a σ'_3 bude najmanje tlačno glavno efektivno naprezanje.

Ponekad se koriste i ukupna ekvivalentna normalna naprezanja p i ukupna ekvivalentna smična naprezanja q koja ne ovise o orijentaciji koordinatnog sustava.

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (2.3.2.-7)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + (\sigma'_{yy} - \sigma'_{zz})^2 + (\sigma'_{zz} - \sigma'_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2))} \quad (2.3.2.-8)$$

Za troosna opterećenja gdje $\sigma'_2 = \sigma'_3$ ukupna ekvivalentna smična naprezanja možemo zapisati kao:

$$q = |\sigma'_1 - \sigma'_3| \quad (2.3.2.-8a)$$

2.3.3. Deformacije

Deformacije su derivacije pomaka. Slično kao i naprezanja, deformacije možemo zapisati u obliku matrice. Istu tada prema teoriji malih deformacija (*samo komplementarne Kartezijeve smične deformacije uzrokuju smična naprezanja*) možemo zapisati u vektorskom obliku:

$$\varepsilon = (\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx})^T \quad (2.3.3.-1)$$

Negativne deformacije nazivamo kompresijama, a pozitivne deformacije ekstenzijama. Također je korisno odrediti volumne deformacije ε_V i smične deformacije ε_q .

$$\varepsilon_V = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz} \quad (2.3.3.-2)$$

$$\varepsilon_q = \frac{2}{3} |\varepsilon_1 - \varepsilon_3| \quad (2.3.3.-3)$$

Kod plastičnih deformacija se razmatra samo smični dio naprezanja, jer ne dolazi do promjene volumena, nego samo do promjene oblika. Za elastoplastične modele, deformacije dodatno dijelimo na elastične i plastične:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (2.3.3.-4)$$

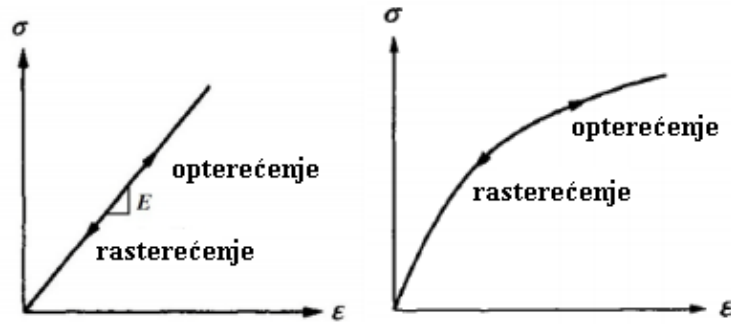
Odabir veze između naprezanja i deformacija ovisi o vrsti i svojstvima tla i stijena, a izražene su različitim modelima tla i stijena.

2.4. Modeli tla i stijena

Modeli tla i stijena su općenito matematički opisi koji daju vezu između naprezanja i deformacija. Mehanička ponašanja tla i stijena možemo modelirati s različitim stupnjem točnosti. Općenito teorije modele prema njihovom odzivu pri opterećenju klasificiramo kao kombinacije krutog, elastičnog, viskoznog, plastičnog i savršeno plastičnog ponašanja. Osnovne teorije za opis ponašanja tla su teorija elastičnosti, teorija plastičnosti i teorija viskoznog toka.

2.4.1. Elastični model

Savršeno elastični modeli mogu biti linearni i nelinearni kao što je prikazano slikom 2-5.



Slika 2-5 Savršeno elastični modeli (Basan, 2016)

Hookeov linearni model za izotropno elastično tijelo (eng. *Linear Elastic model, LE*) (PLAXIS, 2016) je najjednostavniji model ponašanja tla pošto koristi samo dva parametra: Youngov modul E' i Poissonov koeficijent ν' . Upravo je zbog svoje jednostavnosti često izbjegavan pošto ne može obuhvatiti sva kompleksna ponašanja tla i stijena. Opći oblik modela dan je jednostavnim izrazom:

$$\sigma' = E \cdot \varepsilon^e \quad (2.4.1-1)$$

Ako isti model proširimo na cijeli element dobiva se matrična jednadžba:

$$\begin{bmatrix} \sigma'_{xx} \\ \sigma'_{yy} \\ \sigma'_{zz} \\ \sigma'_{xy} \\ \sigma'_{yz} \\ \sigma'_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu') \cdot (1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (2.4.1-2)$$

Množenik deformacija zbog jednostavnosti zapisujemo kao $[D^e]$. Ovaj model koristi se kao baza mnogih drugih modela, a u praksi nalazi svoju primjenu u modeliranju dubokih masivnih matičnih stijena.

2.4.2. Mohr-Coulombov linearno elastični savršeno plastični model

Kombinacijom teorija elastičnosti i plastičnosti razvijeni su modeli elastoplastičnosti. Većina metoda konačnih elemenata, za preliminarne proračune, koristi petero komponentni model tla naziva Mohr-Coulombov model (eng. *Linear elastic perfectly plastic model with Mohr-Coulomb failure criterion*) (PLAXIS, 2016). Ovaj model opisuje tlo kao linearno elastično i savršeno plastično tijelo. Za elastično ponašanje tlo je opisano Youngovim modulom E i Poissonovim koeficijentom ν prateći Hookeov zakon (jednadžba 2.4.1.-2). Kriterij sloma je dan Mohr-Coulombovim zakonom pomoću parametara kuta unutarnjeg trenja φ' i kohezije c' .

$$[f] = \begin{bmatrix} f_{1a} \\ f_{1b} \\ f_{2a} \\ f_{2b} \\ f_{3a} \\ f_{3b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1 + \sin \varphi) & \frac{1}{2}(\sin \varphi - 1) & 0 \\ \frac{1}{2}(\sin \varphi - 1) & \frac{1}{2}(1 + \sin \varphi) & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(1 + \sin \varphi) & \frac{1}{2}(\sin \varphi - 1) \\ 0 & \frac{1}{2}(\sin \varphi - 1) & \frac{1}{2}(1 + \sin \varphi) \\ \frac{1}{2}(1 + \sin \varphi) & 0 & \frac{1}{2}(\sin \varphi - 1) \\ \frac{1}{2}(\sin \varphi - 1) & 0 & \frac{1}{2}(1 + \sin \varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \\ \sigma'_3 \end{bmatrix} \leq [c'] \cos \varphi \quad (2.4.2.-1)$$

Ako nam nisu poznate vrijednosti Youngovog modula, za modeliranje krutosti tla možemo koristiti modul smicanja G i edometarski modul E_{oed} za koje su dani sljedeći odnosi:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (2.4.2.-2)$$

i

$$E_{oed} = \frac{(1 - \nu) \cdot E}{(1 - 2\nu) \cdot (1 + \nu)} \quad (2.4.2.-3)$$

Uvodi se nova matrična jednadžba koja će opisati plastično ponašanje tla, a ista koristi kut dilatancije ψ' :

$$[g] = \begin{bmatrix} g_{1a} \\ g_{1b} \\ g_{2a} \\ g_{2b} \\ g_{3a} \\ g_{3b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1 + \sin \psi) & \frac{1}{2}(\sin \psi - 1) & 0 \\ \frac{1}{2}(\sin \psi - 1) & \frac{1}{2}(1 + \sin \psi) & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(1 + \sin \psi) & \frac{1}{2}(\sin \psi - 1) \\ 0 & \frac{1}{2}(\sin \psi - 1) & \frac{1}{2}(1 + \sin \psi) \\ \frac{1}{2}(1 + \sin \psi) & 0 & \frac{1}{2}(\sin \psi - 1) \\ \frac{1}{2}(\sin \psi - 1) & 0 & \frac{1}{2}(1 + \sin \psi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \\ \sigma'_3 \end{bmatrix} = [0] \quad (2.4.2.-4)$$

Prema teoriji plastičnosti, plastične deformacije su proporcionalne derivaciji plastičnog potencijala $[g]$ s obzirom na naprezanje.

$$\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \quad (2.4.2.-5)$$

gdje je:

λ - multiplikator plastičnosti, $\lambda > 0$, zavisi o količini plastičnih deformacija

$$\lambda = \frac{[D^e] \frac{\partial g}{\partial \sigma'}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma'} [D^e] \frac{\partial g^T}{\partial \sigma'}} \quad (2.4.2.-6)$$

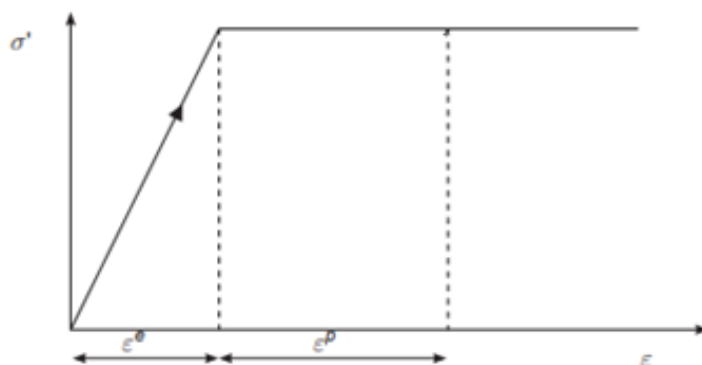
Odnos naprezanja i deformacija za ovaj model dan je izrazom:

$$\sigma' = \left([D^e] - \alpha \cdot \lambda \cdot \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} \cdot [D^e] \right) \varepsilon = \left([D^e] - \alpha \cdot \frac{[D^e] \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} [D^e]}{\frac{\partial f}{\partial \sigma'} [D^e] \frac{\partial g^T}{\partial \sigma'}} \right) \varepsilon \quad (2.4.2.-7)$$

gdje je:

α - parametar korišten za promjenu ponašanja tla iz elastičnog ($\alpha = 0$) u plastično ponašanje ($\alpha = 1$).

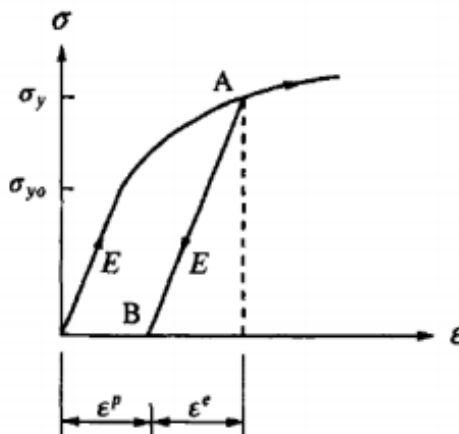
Ponašanje linearno elastičnog idealno plastičnog modela prikazano je slikom 2-6.



Slika 2-6 Dijagram naprezanje-deformacije linearno elastičnog, idealno plastičnog modela (PLAXIS, 2016)

2.4.3. Model ojačanog tla

Eksperimentima je dokazano kako plastične deformacije u tlu nastaju u ranim stadijima naprezanja za koje linearno elastični modeli nisu adekvatni. Također je dokazano kako smične deformacije utječu na ponašanje tla, odnosno izazivaju njegovo očvršćivanje (PLAXIS, 2016). Primjer očvršćivanja za linearno elastični plastični model prikazan je slikom 2-7.



Slika 2-7 Očvršćivanje elastoplastičnog modela (Basan, 2016)

Ponašanje materijala je na početku opterećenja elastično sve do vrijednosti naprezanja σ_{y0} (granica elastičnosti). Daljnji porast naprezanja uzrokuje plastične deformacije. Ako materijal tada potpuno rasteretimo od točke A do točke B i ponovno opteretimo, materijal će se ponašati elastično sve do točke A, odnosno do vrijednosti nove granice elastičnosti σ_y . Daljnji porast naprezanja uzrokuje plastične deformacije kao da se nije desio ciklus rasterećenja i opterećenja. U slučaju da je vrijednost nove granice elastičnosti veća od početne granice elastičnosti ($\sigma_y > \sigma_{y0}$) govorimo kako je došlo do očvršćivanja materijala. (Basan, 2016). Jedan od modela koji donekle simulira realno ponašanje tla je model ojačanog tla (eng. *Hardening Soil model*, HS) (PLAXIS, 2016). Krutost tla je ovdje opisana trima modulima opterećenja: modul opterećenja određen metodom sekante pri dreniranom troosnom ispitivanju E_{50} , troosni modul rasterećenja E_{ur} i edometarski modul E_{oed} . Prosječni odnosi ovih modula dani su izrazima:

$$E_{ur} \approx 3E_{50} \text{ i } E_{oed} \approx 0.8 \cdot E_{50} \quad (2.4.3.-1) \text{ i } (2.4.3.-2)$$

Ovaj model također opisuje porast modula s porastom naprezanja.

$$E(\sigma) = E_0^{ref} \cdot \left(f(\sigma, \sigma^{ref}) \right)^m \quad (2.4.3.-3)$$

gdje su:

E_0^{ref} - referentna vrijednost modula,

σ^{ref} - referentno naprezanje,

m - parametar koji povezuje stanje naprezanja s veličinama krutosti materijala (PLAXIS, 2016).

Baza formulacije modela je hiperbolična veza između vertikalnih deformacija ε_1 i smičnog naprezanja q u troosnom stanju naprezanja. Veza je dana sljedećom jednažbom:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} \cdot \frac{-q}{1 - \frac{q}{q_a}} \quad \text{za } q < q_f \quad (2.4.3.-4)$$

gdje su:

E_i - početna krutost dana odnosom E_{50} i R_f ,

$$E_i = \frac{2E_{50}}{2 - R_f} \quad (2.4.3.-5)$$

E_{50} - modul opterećenja pri dreniranom troosnom opterećenju

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c' \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c' \cos \varphi + \sigma^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (2.4.3.-6)$$

R_f - kriterij sloma dan kao odnos q_f i q_a , $R_f = 0.9$

q_f - smična čvrstoća izvedena iz Mohr-Coulombovog kriterija čvrstoće,

$$q_f = (c' \cot \varphi - \sigma'_3) \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2.4.3.-7)$$

q_a - asimptotska vrijednost smične čvrstoće.

Posebno, za ponašanje prilikom rasterećenja i novog opterećenja koristi se modul rasterećenja:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c' \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c' \cos \varphi + \sigma^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (2.4.3.-8)$$

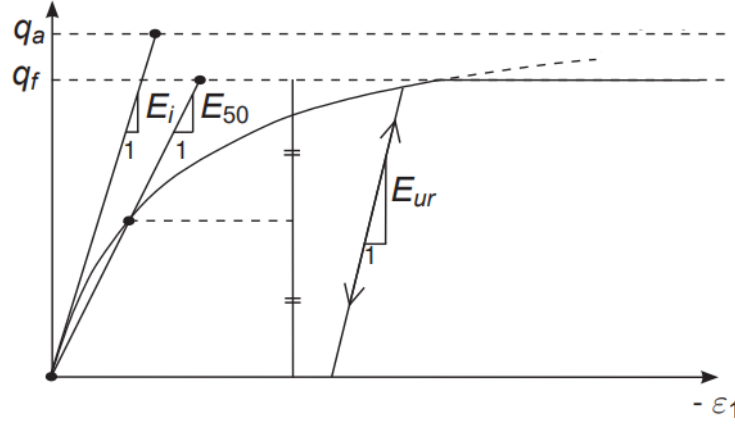
Za rasterećenje i opterećenje dan je odnos elastičnih vertikalnih deformacija i smičnog naprezanja:

$$\varepsilon_1^e = \frac{q}{E_{ur}}, \varepsilon_2^e = \varepsilon_3^e = \nu_{ur} \cdot \frac{q}{E_{ur}} \quad (2.4.3.-9) \text{ i } (2.4.3.-10)$$

gdje je:

ν_{ur} - Poissonov koeficijent pri rasterećenju i ponovnom opterećenju.

Hiperbola smicanja uslijed kompresije korištena za opis modela ojačanog tla prikazana je slikom 2-8.



Slika 2-8 Hiperbola HS modela (PLAXIS, 2016)

Koristeći jednadžbe (2.3.3.-4), (2.4.3.-4) i (2.4.3.-9) dobiva se funkcija naprezanja deformacija čiji prvi član opisuje odnos naprezanja i deformacija prilikom prvotnog opterećenja, drugi član opisuje odnos naprezanja i deformacija prilikom rasterećenja i ponovnog opterećenja, a treći član opisuje očvršćivanje (Bower et al., 2020):

$$f_s = \left(\frac{2}{E_i} \cdot \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}} \right) - \left(\frac{2 \cdot q}{E_{ur}} \right) - \gamma^p \quad (2.4.3.-11)$$

gdje je:

γ^p - akumulirane plastične smične deformacije:

$$\gamma^p = -\varepsilon_3^p = \frac{\varepsilon_v^p}{\sin \psi_m} \quad (2.4.3.-12)$$

Prethodnu složenu funkciju naprezanja i deformacija koristimo sve dok je smično naprezanje manje od smične čvrstoće definirane jednadžbom (2.3.3-7) (Schanz et al., n.d.).

Plastični potencijal je za ovaj model dan funkcijom g_s (Bower et al., 2020):

$$g_s = q + (p - c \cdot \cot \varphi) \cdot \frac{6 \sin \psi_m}{3 - \sin \psi_m} \quad (2.4.3.-13)$$

gdje su:

ψ_m - mobiliziran kut dilatancije

$$\sin \psi_m = \max \left(\frac{\sin \varphi_m - \sin \varphi_{cv}}{1 - \sin \varphi_m \cdot \sin \varphi_{cv}}, 0 \right) \quad (2.4.3.-14)$$

φ_m - mobilizirani kut trenja prema Mohr-Coulombovom kriteriju:

$$\sin \varphi_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \cdot \cot \varphi - \sigma_1 - \sigma_3} \quad (2.4.3.-14a)$$

φ_{cm} - kut trenja kritičnog stanja:

$$\sin \varphi_{cv} = \frac{\sin \varphi - \sin \psi}{1 - \sin \varphi \cdot \sin \psi} \quad (2.4.3.-14b)$$

2.4.4. Ostali korisni modeli

Modificirani *Hardening Soil model* za porast modula tla pri malim naprezanjima nazivamo *HSsmall* (PLAXIS, 2016). Uočeno je da većina tla imaju veću krutost pri malim iznosima opterećenja nego velikim proračunskim iznosima, a isto je modelirano pomoću dva dodatna parametra: modul smicanja malog naprezanja G_0^{ref} i naprezanje koje je dovelo modul smicanja malog naprezanja do sedamdeset postotne vrijednosti modula smicanja $\gamma_{0.7}$. Ovaj model daje bolje vrijednosti pomaka nego HS model.

Hoek-Brown model je elastični, savršeno plastični model korišten za opis stijena. Baziran je na Hoek-Brownovom kriteriju sloma (PLAXIS, 2016):

$$\sigma'_a = \sigma'_3 - |\sigma_{ci}| \left(m_b \frac{-\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.4.4.-1)$$

gdje su:

m_b - reducirana vrijednost parametra intaktne stijene m_i :

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right)} \quad (2.4.4.-1a)$$

GSI - indeks čvrstoće,

D - distribucijski faktor,

s - konstanta materijala:

$$s = e^{\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right)} \quad (2.4.4.-1b)$$

a - konstanta materijala:

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left[e^{\left(\frac{-GSI}{15}\right)} - e^{\left(\frac{-20}{3}\right)} \right] \quad (2.4.4.-1c)$$

σ_{ci} - jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene.

Concrete model je elastoplastični model korišten za opis betonskih struktura (PLAXIS, 2016). Opisuje vremenski ovisnu čvrstoću i krutost betona. Model koristi 25 ulaznih parametara, ali većina se može izvesti iz poznatih veličina.

Unutar programa PLAXIS dani su još mnogi modeli koji daju specijalno dobre rezultate za posebne uvjete proračuna i posebne vrste materijala.

2.4.5. Odabir modela

Prema PLAXIS (2016), odabir modela tla zavisi o vrsti tla, primjeni i vrsti naprezanja. Unutar priručnika dane su tri tablice koje nam mogu pomoći u pravilnom odabiru modela tla. Prema tablici 2-3 možemo zaključiti da su u globalu najbolji modeli za opis tla modeli ojačanog tla. Isti koriste veći broj parametara od Mohr-Coulombovog modela što znači da zahtijevaju veći broj rezultata terenskih i laboratorijskih mjerenja što često nije dostupno.

Tablica 2–3 Odabir modela prema materijalu (PLAXIS, 2016)

Model	beton	stijena	šljunak	pijesak	prah	p.k. gline	n. k. gline	treset
Linearni elastični	C	C						
Mohr-Coulombov	B	B	C	C	C	C	C	C
Hardening Soil			B	B	B	B	B	
HS small			A	A	A	A	B	
UBC3D-PLM			B	B	B			
Soft Soil Creep							A	A
Soft Soil							A	A
Jointed Rock		A						
Modificirani Cam-Clay							C	C
NGI-ADP						A	A	A
UDCAM-s						A	A	A
Hoek-Brown		A						
Concrete	A							

Unutar tablica slovom A su označeni najpovoljniji modeli za simulaciju tla, slovom B dobri modeli, a slovom C prihvatljivi modeli.

Tablica 2-4. nam daje jasno uputstvo kakove modele je preporučeno koristiti pri proračunima stabilnosti kosina.

Tablica 2–4 Odabir modela prema primjeni (PLAXIS, 2016)

Model	temelji	iskopi	tuneli	nasipi	kosine	brane	offshore	ostalo
Linearni elastični	C		C					
Mohr-Coulombov	C	C	C	C	C	C	C	C
Hardening Soil	B	B	B	B	B	B	B	B
HS small	A	A	A	A	A	A	A	A
UBC3D-PLM	B	B	B	B	B	B	B	B
Soft Soil Creep	B	B	B	A	A	B	B	B
Soft Soil	B	B	B	A	A	B	B	B
Jointed Rock	B	B	B	B	B	B	B	B
Modificirani Cam-Clay	C	C	C	C	C	C	C	C
NGI-ADP	B	B	B	A	A	B	A	B
UDCAM-s							A	
Hoek-Brown	B	B	B	B	B	B	B	B
Concrete	A	A	A	A	A	A	A	A

Tablica 2-5. nam daje uvid u odabir modela prema vrsti dominantnog opterećenja.

Tablica 2–5 Odabir modela prema dominantnom opterećenju (PLAXIS, 2016)

Model	primarna kompresija	rasterećenje opterećenje	smično	nedrenirano	cikličko	kompresija + smik	ekspanzija + smik
Linearni elastični	C	C					
Mohr-Coulombov	C	B	C	C		C	C
Hardening Soil	A	B	B	B	C	A	A
HS small	A	A	A	B	B	A	A
UBC3D-PLM	B	B	B	B	B	B	B
Soft Soil Creep	A	B	B	B	C	A	B
Soft Soil	A	B	B	B	C	A	B
Jointed Rock	B	B	B			B	B
Modificirani Cam-Clay	C	C	C	C	C	C	C
NGI-ADP	B	B	B	A	C	B	B
UDCAM-s	B	B	B	A	A	A	B
Hoek-Brown	B	B	B			B	B
Concrete	A	A	A		C	A	A

Kombiniranom analizom ovih tablica trebali bi smo biti u mogućnosti odabrati idealan model ponašanja tla. Kao što je prije spomenuto, modeli s većim brojem parametara realnije opisuju ponašanje tla no korišteni parametri, zbog obujma terenskih i laboratorijskih ispitivanja, često nisu dostupni. Isto nas često navodi na izbor manje idealnog modela.

2.5. Faktor sigurnosti MKE (Metode konačnih elemenata)

Faktor sigurnosti (PLAXIS, 2019) se određuje metodom redukcije parametara φ i c . Redukcija parametara je zasebno određena za svaki model no općenito se provodi tako da se izračunaju vrijednosti φ_{red} i c_{red} za koje će doći do sloma.

$$F_{msf} = \sum M_{sf} = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi'_{red}} = \frac{c'}{c'_{red}} \quad (2.5.-1)$$

gdje je:

M_{sf} - stabilni multiplikator redukcije čvrstoće čija vrijednost se uzima kao faktor sigurnosti F_{msf} .

Tokom proračuna sigurnosti redukcije parametara dolazi do praktički beskonačnih pomaka koji u suštini nemaju fizikalnu vrijednost već nam pružaju uvid u razvitak klizne plohe. Određivanje faktora sigurnosti bit će detaljnije objašnjeno u poglavljima 4.7.5. i 4.8.

3. EUROKOD

Prateći europsku strategiju za pametan, održiv i obuhvatan rast i razvoj standardizacija igra važnu ulogu. S ciljem ubrzanja konvergencije različitih nacionalnih i regionalnih normi unutar Europske Unije razvijen je Eurokod. EN Eurokod je serija od deset familija normi koje pružaju zajednička pravila pri dizajnu; proračunu raznih građevinskih konstrukcija, provjeravajući njihovu izdržljivost i stabilnost, tablica 3-1.

Tablica 3–1 Struktura EN Eurokoda

EN 1990	Eurokod: Osnove projektiranja
EN 1991	Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije
EN 1992	Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija
EN 1993	Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija
EN 1994	Eurokod 4: Projektiranje čelično-betonskih konstrukcija
EN 1995	Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija
EN 1996	Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija
EN 1997	Eurokod 7: Geotehničko projektiranje
EN 1998	Eurokod 8: Projektiranje konstrukcija otpornih na potres
EN 1999	Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija

Unutar Eurokoda su opisani postupci i preporuke za koje stručnjaci smatraju da odražavaju trenutačna saznanja struke i čija primjena osigurava dogovorenu razinu rizika nepovoljnih događaja. Europsko povjerenstvo za standardizaciju od 2003. godine naglašava važnost učenja i primjene Eurokodova, posebice u inženjerskim školama i fakultetima kao sastavni dio profesionalnog razvoja (Bonda et al., 2013). Eurokodom 7 nisu obuhvaćene čisto geotehničke konstrukcije kao što su kosine, ali iste možemo projektirati prateći odgovarajuće norme. Kao što je unutar tablice 3-1. označeno, za proračun stabilnosti kosina prema Eurokodu relevantna je familija normi Eurokod 7: Geotehničko projektiranje. Eurokodovi su 2008. godine usvojeni kao hrvatske norme.

3.1. Osnove projektiranja prema Eurokodu, EN 1990

Unutar EN 1990 dani su principi i zahtjevi za sigurnosti, uporabivost i izdržljivost konstrukcija isto kao i opis osnovnih metoda projektiranja. Tako prema EN 1990 sve konstrukcije moraju biti dizajnirane s naumom da zadovoljavaju sljedeće projektne kriterije:

- konstrukcija će izdržati sve zahvate izgradnje i očekivana mehanička opterećenja tijekom izgradnje i uporabe,
- konstrukcija će, za očekivana opterećenja, biti uporabiva tokom predviđenog životnog vijeka;
 - životni vijek konstrukcije definiramo kao očekivani period uporabe konstrukcije uključujući održavanje, ali ne i velike popravke,
- konstrukcija će izdržati oštećenja uzrokovana eksplozijom ili nekim drugim uzročnikom nastalim ljudskom greškom,
- konstrukcija će izdržavati oštećenja prilikom požara.

Također, EN 1990, kao bazični Eurokod objašnjava temeljne pojmove kao što su parcijalni faktori, stanje granične ravnoteže i uporabljivosti, projektne situacije i mnoge druge.

3.1.1. Stanje granične nosivosti i uporabljivosti

Provjera zahtjeva konstrukcija se prema EN 1990 temelji na konceptu graničnih stanja uporabom metode parcijalnih sigurnosnih faktora. Granična stanja su ona kod kojih konstrukcija više ne zadovoljava projektne kriterije. Tako razlikujemo stanje granične nosivosti i stanje granične uporabljivosti.

Granična stanja nosivosti (eng. *ultimate limit states*) su ona stanja koja opisuju slom i rušenje konstrukcije te direktno ugrožavaju sigurnost ljudi i konstrukcija.

Granična stanja uporabljivosti (eng. *serviceability limit states*) su ona stanja koja opisuju prestanak uporabe konstrukcije i gubitak njene funkcije, a odnose se na udobnost korištenja, prekomjerna izvijanja i napuknuća konstrukcije.

Prvi korak provjere graničnih stanja konstrukcije je odabir odgovarajuće projektne situacije.

3.1.2. Projektne situacije

Projektne situacije prema EN 1990 su fizički uvjeti, koji opisuju realna zbivanja tokom određenog vremenskog perioda, za koje se proračunski dokazuje da nisu uzrokovale dostizanje graničnih stanja. Projektne situacije prema vremenskom djelovanju mogu biti trajne, promjenjive, slučajne i potresne.

Trajne projektne situacije su one koje opisuju uvjete normalne uporabe konstrukcije.

Promjenjive projektne situacije su one koje opisuju privremene uvjete tokom izgradnje ili popravka.

Slučajne projektne situacije su one koje opisuju vanredne uvjete prilikom nesreća (požar, eksplozija, lokalni slom i sl.)

Potresne projektne situacije su one koje opisuju privremene seizmičke uvjete tokom potresa.

3.1.3. Varijable

Osnovne varijable prema EN 1990 u analizi konstrukcija su djelovanja (F), svojstva materijala (X) i geometrijski podaci (a).

Djelovanja prema vremenskom djelovanju klasificiramo jednako kao i projektne situacije. Razlikujemo trajna djelovanja (G i P), promjenjiva djelovanja (Q) i slučajna djelovanja (A i A_E). Među trajna djelovanja ubrajamo težinu konstrukcije, trajna djelovanja vode, težinu stalno prisutne opreme i prometnica, utjecaje neravnomjernog slijeganja, djelovanja prednapinjanja (P) i sl. Karakteristične vrijednosti trajnih djelovanja (G_k i P_k) statistički se izračunavaju kao srednje vrijednosti ili kao rubne vrijednosti intervala van kojih vrijednost djelovanja ne prelazi. Promjenjiva djelovanja su djelovanja uzrokovana prometom, promjenama temperature, vjetrovima, privremenim djelovanjem vode, opterećenjem snježnih nanosa i sl. Karakteristične vrijednosti promjenjivih djelovanja (Q_k) uzimaju se kao gornji limit u očekivanju da se isti ne će dostići, kao donji limit kad očekujemo da će se isti dostići ili kao nominalnu vrijednost ako nedostaju podaci za statističku analizu. Djelovanja eksplozije, udara automobila, potresa (A_E) i slično spadaju u slučajna djelovanja i njihove karakteristične vrijednosti (A_d i A_{Ed}) posebno određujemo za svaki projekt. Djelovanja se često javljaju u kombinacijama pa ih u tom slučaju izražavamo koristeći kombinacijski faktor ψ . Kombinacijski faktor zavisi o vrsti konstrukcije, broju djelovanja i vremenskom poklapanju djelovanja, a vrijednost mu je na intervalu između nula i jedan. Reprezentativna vrijednost djelovanja (F_{rep}) dobiva se množenjem kombinacijskog faktora i karakteristične vrijednosti djelovanja.

Svojstva materijala podrazumijevaju sva fizička, mehanička i termička svojstva materijala, a izražavamo ih koristeći karakteristične vrijednosti (X_k).

Geometrijski podaci su raznolike dimenzije konstrukcije i njen položaj u prostoru, a izražavamo ih karakterističnim, nominalnim vrijednostima (a_{nom}).

3.1.4. Metoda parcijalnih faktora

Metoda parcijalnih faktora je metoda unutar koje provjeravamo dosezanje graničnih stanja, odnosno, provjerava se da učinci djelovanja (E) ne ugrožavaju otpornost konstrukcije ili njenih dijelova (R) koristeći projektne vrijednosti varijabli, svojstva materijala i geometrije (Szavits-Nossan & Ivšić, 2006).

Projektne vrijednosti djelovanja prema EN 1990 dane su izrazom:

$$F_d = \gamma_f \cdot F_{rep} \quad (3.1.4.-1)$$

gdje je:

γ_f - parcijalni faktor djelovanja koji uzima u obzir nepoželjno, negativno odstupanje vrijednost djelovanja od reprezentativne vrijednosti.

Pošto djelovanja mogu biti i pozitivna i negativna za stabilnost konstrukcije, razlikujemo dva parcijalna faktora djelovanja: γ_{Finf} (pozitivni faktor djelovanja) i γ_{Fsup} (negativni faktor djelovanja).

Projektne vrijednosti svojstva materijala EN 1990 dane su izrazom:

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (3.1.4.-2)$$

gdje su:

η - pretvorni faktor koji uzimaju u obzir skalirajuće efekte i efekte vlage, temperature i ostalih parametara,

γ_m - parcijalni faktor za svojstva materijala koji uzima u obzir nepoželjno, negativno odstupanje vrijednosti svojstva materijala od karakteristične vrijednosti.

U mnogim proračunima prethodne faktore objedinjujemo u jedan faktor γ_M .

U većini slučajeva projektne vrijednosti geometrijskih veličina jednake su nominalnim vrijednostima, osim ako promjena geometrije konstrukcije uvelike utječe na sigurnost. Tada projektnu vrijednost za geometrijske veličine prema EN 1990 izražavamo kao:

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a \quad (3.1.4.-3)$$

gdje je:

Δa - odstupanje od geometrijske savršenosti uzimajući u obzir nepoželjno, negativno odstupanje vrijednosti geometrijske veličine od nominalne.

Temeljem projektnih vrijednosti varijabli izračunavamo projektne učinke (E_d) i projektne otpore (R_d).

Opća formula za projektne učinke prema EN 1990 je:

$$E_d = \gamma_{sd} \cdot E\{\gamma_{fi}, F_{rep_i}, a_d\} \quad (3.1.4.-4)$$

gdje su:

γ_{sd} - parcijalni faktor učinaka djelovanja koji uzima u obzir nepouzdanosti prilikom modeliranja djelovanja,

E - općeniti izraz za određivanje učinaka; funkcija parcijalnih faktora djelovanja, reprezentativnih vrijednosti djelovanja i projektnih vrijednosti geometrijskih veličina.

Opća formula za projektne otpore prema EN 1990 je:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R\{X_{di}, a_d\} \quad (3.1.4.-5)$$

gdje su:

γ_{Rd} - parcijalni faktor otpora koji uzima u obzir nepouzdanosti modela otpornosti i geometrijskih veličina,

R - općeniti izraz za određivanje otpornosti; funkcija projektnih vrijednosti svojstva materijala i projektnih vrijednosti geometrijskih veličina.

Prihvatljiva konstrukcija zadovoljava uvjet $E_d \leq R_d$ (Szavits-Nossan & Ivšić, 2006). Opća provjera graničnih stanja prikazana je tablicom 3-2.

Tablica 3–2 Provjera graničnih stanja metodom parcijalnih faktora

Djelovanja	Svojstva materijala
karakteristične vrijednosti: $\psi \cdot F_k$	karakteristične vrijednosti: X_k
↓	↓
projektne vrijednosti: $F_d = \gamma_f \psi \cdot F_k$	projektne vrijednosti: $X_d = \eta \cdot X_k / \gamma_m$
+	+
projektne vrijednosti geometrijskih veličina	
=	=
Učinci	Otpori
projektne vrijednosti: $E_d = \gamma_{sd} \cdot E\{F_d, a_d\}$	projektne vrijednosti: $R_d = R\{X_d, a_d\} / \gamma_{Rd}$
⊇	⊆
Provjera: $E_d \leq R_d$	

3.2. Geotehničko projektiranje prema Eurokod 7

Eurokod 7 se sastoji od dva dijela:

- EN 1997-1 Geotehničko projektiranje – Dio 1: Opća pravila,
- EN 1997-2 Geotehničko projektiranje – Dio 2: Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla.

Eurokod 7 se nadovezuje na EN 1990 te preuzima osnove projektiranja opisane u poglavljima 3.1. do 3.1.4.

U svrhu racionalizacije opsega istražnih radova i složenosti postupaka dokazivanja stabilnosti Eurokod 7 uvodi geotehničke kategorije prema kojima svrstavamo konstrukcije obzirom na stupanj složenosti i stupanj izloženosti visokim rizicima. Tako razlikujemo Geotehničke kategorije 1, 2 i 3 gdje u 1. kategoriju spadaju najjednostavniji geotehnički objekti, u 2. kategoriju spadaju rutinski geotehnički zahvati, a u 3. kategoriju vrlo složeni zahvati velikog rizika. Norme EN 1997-1 se općenito odnose na 2. geotehničku kategoriju (Szavits-Nossan & Ivšić, 2006).

EN 1997-1 detaljnije razlikuje granična stanja te uvodi pet graničnih stanja nosivosti dok su granična stanja uporabivosti gotovo izostavljena pošto se prema praksi geotehničke konstrukcije pretežno dizajniraju uporabom dovoljno velikog faktora sigurnosti u odnosu na granično stanje nosivosti (Szavits-Nossan & Ivšić, 2006).

Vrste graničnih stanja su:

EQU – gubitak ravnoteže konstrukcije ili tla razmatranog kao kruto tijelo,

STR – slom ili velika deformacija konstrukcije ili njenog elementa,

GEO – slom ili velika deformacija tla,

UPL – gubitak ravnoteže konstrukcije ili tla uslijed uzgona vode ili drugih vertikalnih sila,

HYD – hidraulički slom; interna erozija tla uzrokovana hidrauličkim gradijentima.

Provjera stabilnosti prikazana je u tablici 3-3.

Tablica 3-3 Provjera stabilnosti prema EN 1997-1 (Lebo, 2014)

Granično stanje	Provjera otpornosti	Napomene
EQU	$E_{dst;d} \leq E_{st;d} + T_d$	$E_{dst;d}$ je destabilizirajući, a $E_{st;d}$ stabilizirajući proračunski učinak djelovanja, a T_d je moguća otpornost tla

Granično stanje	Provjera otpornosti	Napomene
STR/GEO	$E_d \leq R_d$	E_d je proračunski učinak djelovanja, a R_d je proračunska otpornost
UPL	$G_{dst;d} + Q_{dst;d} \leq G_{st;d} + R_d$	$G_{dst;d}$ je trajno, a $Q_{dst;d}$ prolazno destabilizirajuće vertikalno djelovanje, a $G_{st;d}$ je proračunsko stabilizirajuće vertikalno trajno djelovanje; R_d je moguća proračunska otpornost tla na izdizanje konstrukcije
HYD	$S_{dst;d} \leq G'_{st;d}$	$S_{dst;d}$ je strujna sila u stupcu tla, a $G'_{st;d}$ je efektivna težina stupca tla

Kada se razmatraju stanja statičke ravnoteže (EQU) preporuča se korištenje parcijalnih faktora prema tablici 3-4.

Tablica 3–4 Parcijalni faktori za EQU (EN 1997-1)

Trajno djelovanje	oznaka	vrijednost
nepovoljno	$\gamma_{G;dst}$	1,1
povoljno	$\gamma_{G;st}$	0,9
Privremeno djelovanje	oznaka	vrijednost
nepovoljno	$\gamma_{Q;dst}$	1,5
povoljno	$\gamma_{Q;st}$	0
Parametri tla	oznaka	vrijednost
kut unutarnjeg trenja	$\gamma_{\varphi'}$	1,25
efektivna kohezija	$\gamma_{c'}$	1,25
nedrenirana posmična čvrstoća	γ_{cu}	1,4
jednoosna tlačna čvrstoća	γ_{qu}	1,4
jedinična težina	γ_{γ}	1,0

EQU provjera je rasprostranjenija u konstrukcijskom projektiranju te se u geotehničkom projektiranju koristi u rijetkim slučajevima (kruti duboki temelji na nosivim stijenama) (EN 1997-1).

Provjera za uzgon (UPL) preporuča korištenje parcijalnih faktora prema tablici 3-5.

Tablica 3–5 Parcijalni faktori za UPL (EN 1997-1)

Trajno djelovanje		oznaka	vrijednost
nepovoljno		$\gamma_{G;dst}$	1,1
povoljno		$\gamma_{G;st}$	0,9
Privremeno djelovanje		oznaka	vrijednost
nepovoljno		$\gamma_{Q;dst}$	1,5
Parametri tla		oznaka	vrijednost
kut unutarnjeg trenja		$\gamma_{\phi'}$	1,25
efektivna kohezija		$\gamma_{c'}$	1,25
nedrenirana posmična čvrstoća		γ_{cu}	1,4
vlačna čvrstoća pilota		$\gamma_{s;t}$	1,4
otpor sidara		γ_a	1,4

Provjera za slom usred strujnog djelovanja vode (HYD) preporuča korištenje parcijalnih faktora prema tablici 3-6.

Tablica 3–6 Parcijalni faktori za HYD (EN 1997-1)

Trajno djelovanje		oznaka	vrijednost
nepovoljno		$\gamma_{G;dst}$	1,35
povoljno		$\gamma_{G;st}$	0,9
Privremeno djelovanje		oznaka	vrijednost
nepovoljno		$\gamma_{Q;dst}$	1,5

Za provjeru graničnih stanja prema STR i GEO dana su tri projektna pristupa koja se razlikuju prema distribuciji parcijalnih faktora između djelovanja, učinaka, svojstava materijala i otpornosti. Razlikujemo projektne pristupe 1, 2 i 3 dok projektni pristup 1 ima dvije kombinacije (tablica 3-7), gdje su A_i parcijalni faktori djelovanja, M_i parcijalni faktori svojstava materijala, a R_i parcijalni faktori otpora.

Tablica 3–7 Projektni pristupi za STR i GEO (EN 1997-1)

Projektni pristup	Kombinacije
1	A1 + M1 + R1 A2 + M2 + R1
2	A1 + M1 + R2
3	(A1 ili A2) + M2 + R3

Projektni pristupi 1 i 3 primjenjuje parcijalne faktore na djelovanja i na parametre tla. Projektni pristup 2 primjenjuje parcijalne faktora na mjestu učinka djelovanja. Projektni pristup 3 se u Hrvatskoj primjenjuje za sve geotehničke proračunske situacije GEO (Lebo, 2014). Parcijalni faktori preporučeni za provjeru STR i GEO su dani tablicom 3-8.

Tablica 3–8 Parcijalni faktori za STR i GEO (EN 1997-1)

Trajno djelovanje		oznaka	A1	A2	
	nepovoljno	$\gamma_{G;dst}$	1,35	1	
	povoljno	$\gamma_{G;st}$	1	1	
Privremeno djelovanje		oznaka	A1	A2	
	nepovoljno	$\gamma_{Q;dst}$	1,5	1,3	
	povoljno	$\gamma_{Q;st}$	0	0	
Parametri tla		oznaka	M1	M2	
	kut unutarnjeg trenja	$\gamma_{\varphi'}$	1	1,25	
	efektivna kohezija	$\gamma_{c'}$	1	1,25	
	nedrenirana posmična čvrstoća	γ_{cu}	1	1,4	
	jednoosna čvrstoća	γ_{qu}	1	1,4	
	jedinična težina	γ_{γ}	1	1	
Otpori		oznaka	R1	R2	R3
	otpor tla	$\gamma_{R;e}$	1	1,1	1

Unutar tablice 3-8 navedeni su samo otpori relevantni za proračun stabilnosti kosina.

Za granična stanja uporabivosti svi parcijalni faktori iznose 1.

3.3. Stabilnost kosina prema Eurokod 7

11. poglavlje EN 1997-1, *Ukupna stabilnosti*, daje preporuke za proračunavanje stabilnosti kosina. Proračuni stabilnosti kosina se temelje na provjeri graničnih stanja STR i GEO za parcijalne faktore dane tablicom 3-8.

Iako Eurokod 7 ne daje proračunski model za izračun stabilnosti kosina preporučaju se modeli u kojima je klizna masa modelirana kao kruto tijelo ili sklop više manjih tijela koja se kreću istodobno. Sam proračun stabilnosti izračunava se metodama granične ravnoteže ili metodama konačnih elemenata.

Ako se za proračun stabilnosti koriste metode granične ravnoteže obavezno se provjeravaju ravnoteže ukupnih momenata i vertikalnih sila. Također, ako se ne provjerava ravnoteža horizontalnih sila pretpostavljaju se horizontalni položaji međulamelarnih sila. Prethodne upute prema Eurokodu 7 čine određene metode granične ravnoteže neuporabivima (Fellenius, pojednostavljena Janbu i slično).

Napredne numeričke metode kao što su metode konačnih elemenata (npr. PLAXIS 2D) su značajnije prilagodljivije naspram metoda granične ravnoteže te stoga prikladnije za napredne proračune stabilnosti kosina. Svaka provjera kosine MKE obavlja se redukcijom parametara čvrstoće kao što je opisano u poglavlju 2.5.

4. STABILNOST KOSINE U NEKOHERENTNOM TLU

Podravina, posebice Dravska nizina, je bogata aluvijalnim šljunčanim i pjeskovitim sedimentima. Ponegdje su naslage debele i do 200 metara pa nije ni čudno da prva organizirana eksploatacija tog područja datira iz 1868. godine (Feletar, 2016). Eksploatacija se uglavnom odvija unutar dravskog polja gdje su šljunčare u izravnoj vezi s vodama rijeke te eksploatacijom nastaju jezera. Dubina tih jezera varira između 4,5 i 40 metara, a širenjem eksploatacijskog polja ista su se približila postojećoj infrastrukturi. Kako bi se ustanovila stabilnost kosina jezera i utjecaji okolne infrastrukture i prometa kreirana su dva karakteristična presjeka na temelju kojih ćemo odgovoriti na spomenute probleme. Situacijska karta prikazana slikom 4-1 daje nam uvid na lokaciju karakterističnih presjeka, granice eksploatacijskog polja i postojeću infrastrukturu.



Slika 4-1 Situacijska karta s označenim karakterističnim presjecima

Pošto se kut unutarnjeg trenja šljunkovitog materijala teško određuje, nakon proračuna stabilnosti, dan je odgovor na pitanje utjecaja kuta unutarnjeg trenja na stabilnost potopljene kosine. Provedene su zasebne analize pri različitim kutovima trenja te na temelju dobivenih faktora sigurnosti određena međuovisnost.

4.1. Izrada presjeka

Za izradu 3D modela tla korišten je dodatak za Autodesk Civil naziva Geotechnical Module. Dodatak omogućuje unos bušotinskih podataka, kreiranje 3D modela bušotina i izradu 2D presjeka. Bušotinski podaci koje nakon terenskog ispitivanja dobivamo uvijek

sadrže opis izrade bušotina, lokaciju pojedine bušotine i inženjerskogeološke presjeke bušotina.

Iste podatke potrebno je sortirati i pripremiti za rad s GM (Geotechnical Module). GM zahtjeva izradu dvije *.xlsx datoteke. Unutar prve će se nalaziti lokacijski podaci bušotina, a unutar druge podaci očitani iz inženjerskogeoloških presjeka. Također, zbog prepoznavanja, datoteke moraju imati točno ova imena «Location Details.xlsx» i «Field Geological Descriptions.xlsx».

Nakon otvaranja datoteke «Location Details.xlsx» potrebno je prvi redak popuniti kako je prikazano na slici 4-2.

	A	B	C	D	E	F
1	Location ID	Location Type	Easting	Northing	Ground Level	Final Depth
2	BH01	BH	532304.56	5121043.72	125.3	
3	BH02	BH	532139.51	5121045.61	127.1	
4	BH03	BH	532137.53	5120885.55	125.88	
5	BH04	BH	531980.27	5120739.57	126.19	

Slika 4–2 Primjer popunjene tablice Location Details

Na slici je također prikazan unos lokacijskih podataka za četiri bušotine, gdje u A stupac unosimo identifikacijsku oznaku terenskog ispitivanja (u ovom slučaju naziv bušotine), u B stupac vrstu terenskog ispitivanja (BH je skraćenica za eng. *borehole*), u C i D stupac koordinate lokacije prema hrvatskom terestričkom referentnom sustavu, HTRS96, u E stupac nadmorsku visinu ušća bušotine, a u F stupac konačnu dubinu bušotine. Popunjavanje stupaca A, B, C, D i E je obavezno dok stupac F popunjavamo prema potrebi. Nakon što smo unijeli sve potrebne podatke trenutnu datoteku spremamo kao Comma Separated Values datoteku koja ima ekstenziju *.csv; «Location Details.csv» (*File – Save As – *.csv*).

Popunjavanje datoteke «Field Geological Descriptions.exe» za prvu bušotinu prikazano je na slici 4-2.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Location ID	Depth Top	Depth Base	Legend Code	Geology Code	Geology Code 2	BGS Lexicon	Description
2	BH01	0	0.1		H			
3	BH01	0.1	2.5		S			
4	BH01	2.5	3.6		G			
5	BH01	3.6	19.8		G			
6	BH01	19.8	20.8		C			

Slika 4–3 Primjer popunjene tablice Field Geological Descriptions

Unutar stupca A unosimo identifikacijske oznake terenskog ispitivanja koje se moraju poklapati s onima iz prethodne datoteke. Prema inženjerskogeološkim profilima bušotina je podijeljena po dubini s obzirom na materijal, primjer za prvih 3,8 metara nalazi se na slici 4-4.

DUBINA, m	DEBLJINA SLOJA, m	% JEZGRE	RPV	PETROGRAFSKI SASTAV		STRATIGRAF. PRIPADNOST	OZNAKA UZORKA	PROMJER BUŠ. mm
				SIMBOL	OPIS			
0,1					Humus			
	1,3	90			Smeđi prašnasti pijesak	Q	SFs	146
1,4	1,1	90			Smeđi jednolično graduirani pijesak	Q	SU	146
2,5	1,3	90	3,6		Smeđi jednolično graduirani šljunak	Q	GP	146

Slika 4-4 Inženjerskogeološki presjek bušotine - prvih 3,8 metara

Dubinske podatke je potrebno prenijeti u stupce B i C, a opisne podatke u stupac E gdje smo umjesto geoloških kodova u stupac E unosili oznake glavnih grupa materijala tla prema jedinstvenoj klasifikaciji. Iste smo mogli proširiti za dopunske oznake (graduiranost, količina sitnih čestica i plastičnost) no zbog kompleksnosti 3D modela preskačemo taj korak. Također pošto je prvih deset centimetara nabušen humus isti klasificiramo u posve izmišljenu grupu H. Nakon što smo unijeli sve potrebne podatke trenutnu datoteku spremamo s ekstenzijom .csv.

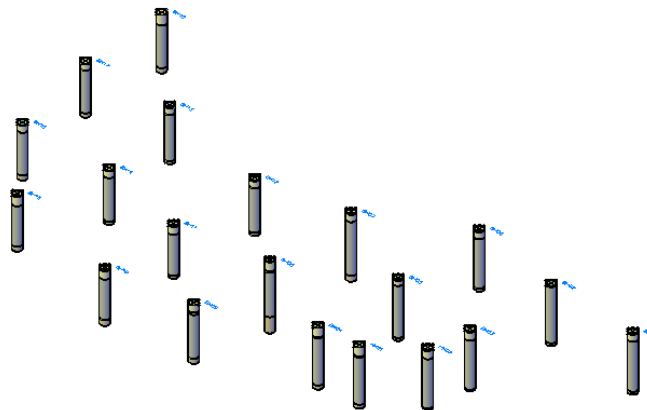
Kako bi uneseni podaci bili čitljivi od strane GM moramo koristiti decimalnu točku, a ne zarez.

Pokrećemo Autodesk Civil s instaliranim dodatkom GM te pritišćemo ikonu *Connect*, nakon čeg potvrdom gumbom *Login* omogućujemo rad dodatka.

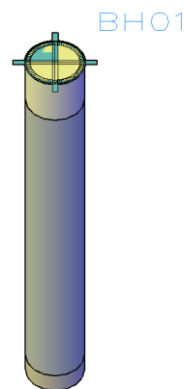
Otvora se prozor Geotechnical Module koji nam omogućuje izradu novog projekta, te isto ostvarujemo klikom na gumb *Create*. Unosimo potrebne podatke, identifikacijsku oznaku projekta, ime projekta, status (*Open*) i kategoriju (*Default*) te iste potvrđujemo klikom na gumb *Save*. Vraćamo se na prethodni prozor te odabiremo kreirani projekt pritiskom na gumb *OK*.

Prijenos kreiranih *.csv datoteka u realizirani 3D model započinjemo pritiskom na ikonu *Import*. U novootvorenom prozoru dodajemo kreirane datoteke pomoću gumba *Add*, a potvrđujemo gumbom *Next*. Nakon što je provedena provjera valjanosti datoteka i ako je ista potvrđena, repetitivnim pritiskom gumba *Next* i *Finish* kreirali smo 3D modele bušotine.

Slika 4-5. prikazuje polje bušotina u izometrijskom pogledu, a slika 4-6. detalj bušotine BH01.



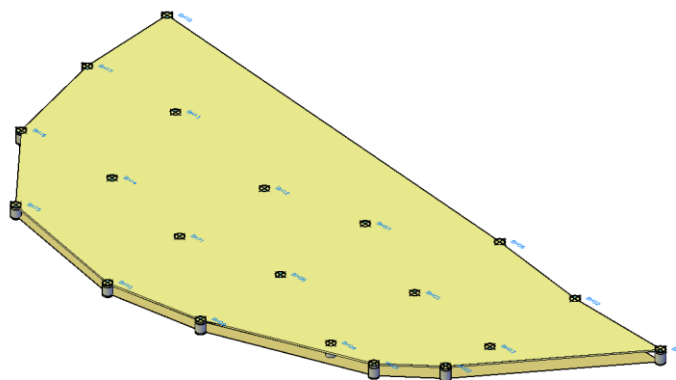
Slika 4-5 Polje bušotina, uvećanje 5



Slika 4-6 Bušotina BH01, uvećanje 5

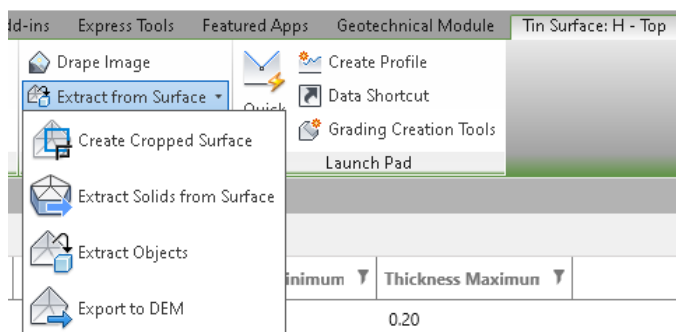
Kreirani objekti su skalirani zbog lakšeg prikazivanja, a kako bi smo uklonili uvećanje odabiremo ikonu *Locations* te opciju *3D exaggeration* postavljamo na 1. Ponovnim klikom ikone *Locations* zatvaramo prozor.

Sljedeći korak u izradi 3D modela je kreiranje ploha granica između slojeva materijala. Isto se izvodi pritiskom ikone *Strata* i potvrdom željenih granica u stupcu *Visible*. Klikom na prazan kvadratić potvrđujemo izradu gornje granice sloja, a klikom na padajući izbornik do tog kvadratića otvara se opcija za izradu donje granice sloja. Kako bi kasnije mogli koristiti plohu koju kreiraju točke dna bušotina potrebno je označiti opciju *Include Base of Locations*. Plohe granica između slojeva materijala prikazane su slikom 4-7.



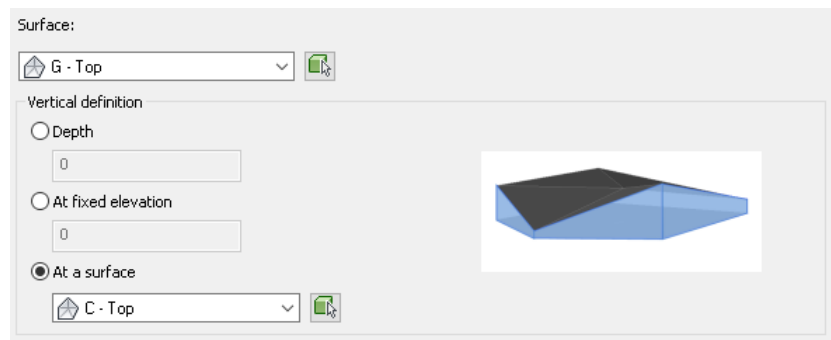
Slika 4–7 Polje bušotina s granicama između slojeva

Dodatak GM nakon provedenih koraka omogućuje izradu profila tla no ne i izradu kompletnog 3D modela. Kako bi kreirali 3D model prvo trebamo isključiti prikaz bušotina, isto radimo klikom na iskonu *Locations* i uklanjanjem oznaka pod stupcem *Plan* i *Model*. Označujemo jednu od ploha te se otvara tablični izbornik naziva *Tin Surface: "ime odabrane plohe"* unutar koje u listi naredbi *Surface Tools* odabiremo padajući izbornik *Extract from Surface* i odabiremo naredbu *Extract Solids from Surface*, slika 4-8.



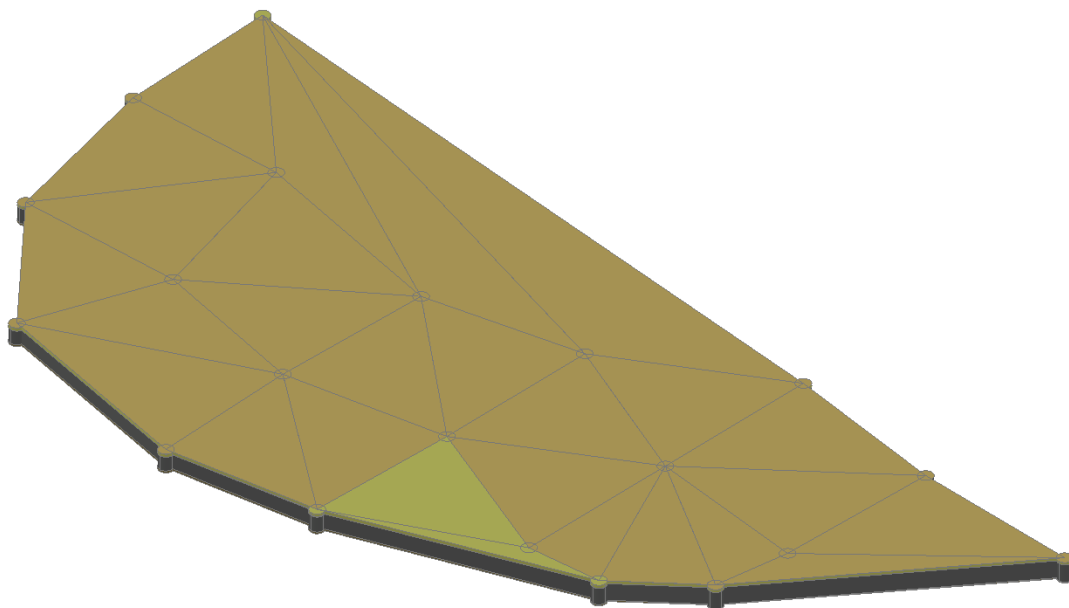
Slika 4–8 Navigacija do naredbe Extract Solids from Surface

Otvora se prozor unutar kojeg kreiramo 3D slojeve između ploha. Pod *Surface* odabiremo gornju plohu sloja, a pod *Vertical definition* odabiremo opciju *At a surface* i donju plohu sloja, slika 4-9.



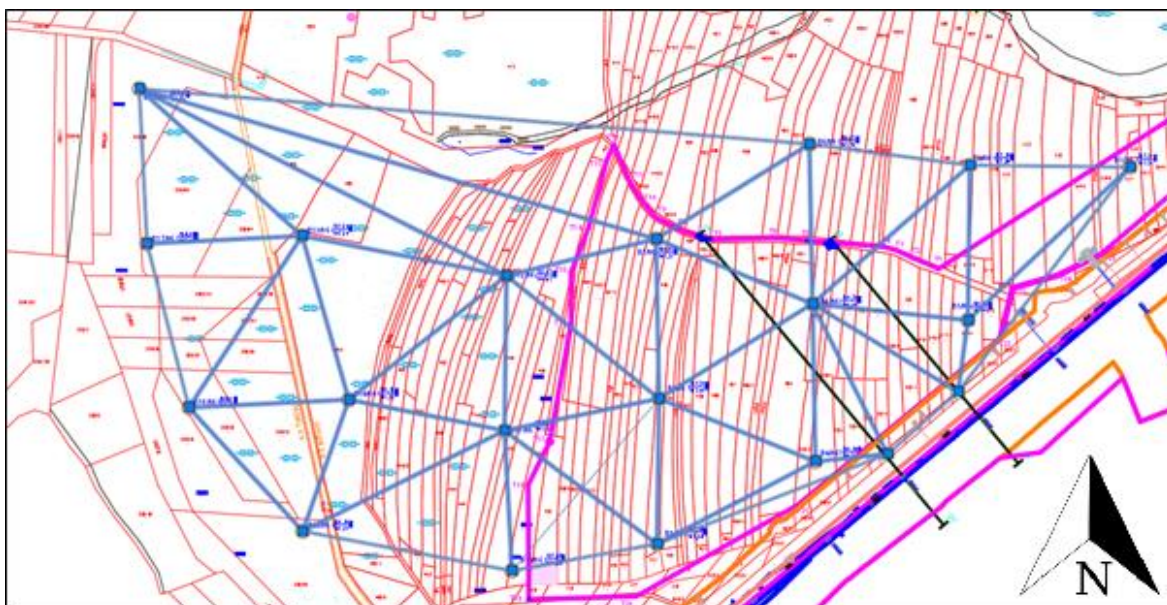
Slika 4–9 Primjer izrade sloja šljunaka (G)

Isti postupak ponavljamo za sve slojeve, slika 4-10. prikazuje kompletni 3D model tla.



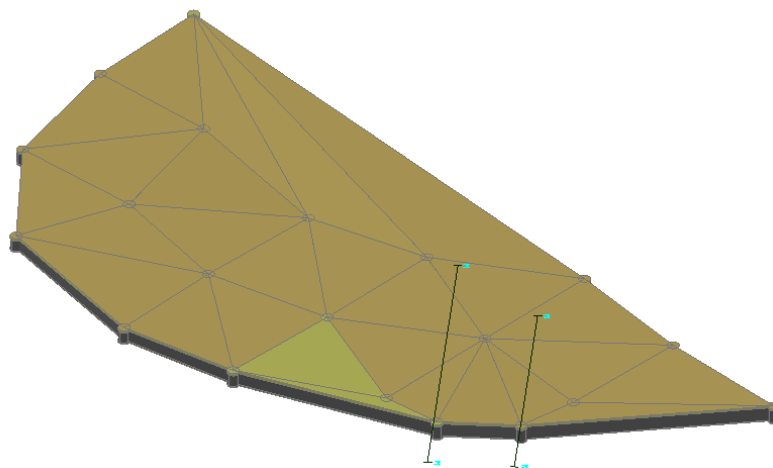
Slika 4–10 3D model tla s bušotinama

Kreirani model tla tada smještamo u situacijsku kartu, slika 4-11.



Slika 4–11 Situacijska karta nadopunjena 3D modelom tla, žičani prikaz

Za naredne korake potrebne su nam samo linije presjeka i model tla pa ostale elemente sklanjamo, slika 4-12.

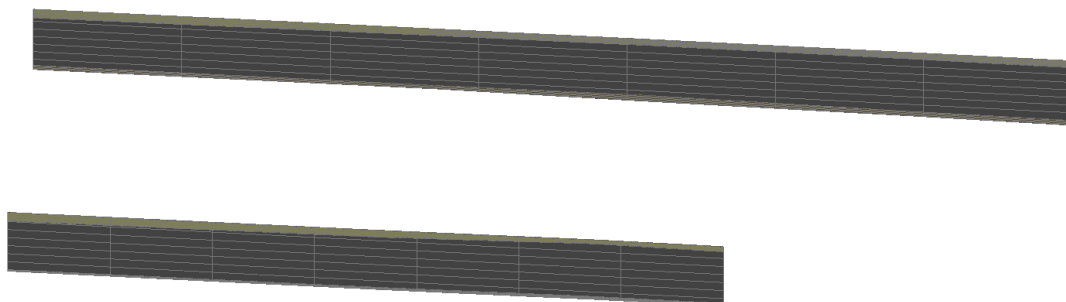


Slika 4–12 3D model tla s preuzetim linijama presjeka

Sljedeći korak je priljubljivanje linija presjeka uz 3D model. Odabiremo karticu *Surface* i iz grupe naredbi *Project Geometry* odabiremo naredbu *Project to UCS*. Odabiremo linije presjeka te iste ortogonalno projiciramo na model.

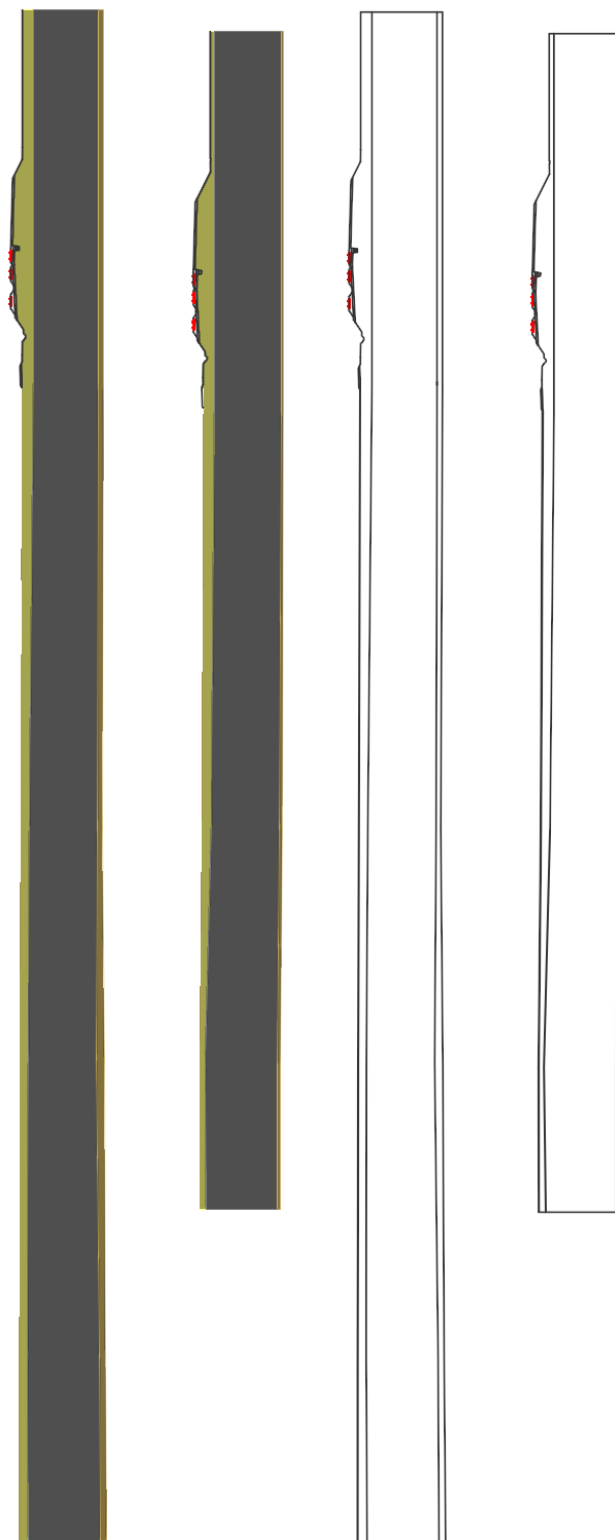
Vraćamo se u GM i odabiremo naredbu *Create* iz grupe naredbi *Profile*. Kako bi izradili profil ponavljamo izradu linija presjeka gdje nakon odabira naredbe *Create Alignment*

označujemo rubne točke linija presjeka i potvrđujemo pritiskom na *Next* i *Finish*. Koristeći novostvorene linije presjeka generiramo presjeke tako da iz grupe naredbi *Fence Diagrams* odabiremo naredbu *Create*. Označujemo linije presjeka i postavljamo debljinu (eng. *Thickness*) presjeka na 0,0 i potvrđujemo pritiskom na naredbu *Create*. Nakon sklanjanja 3D modela (označujemo 3D model i nakon desnog klika miša pod grupom naredbi *Isolate objects* odabiremo naredbu *Hide Selected Objects*) pojavljuje se presjeci, a isti su prikazani slikom 4-13.



Slika 4–13 Presjeci 3D modela tla 1-1 i 2-2

Sada otvaramo poprečne presjeke izrađene prema situacijskoj karti i smještamo presjeke tla u situacijske presjeke. Presjeke tla je potrebno 3D rotirati (*Modify – 3D Rotate*) kako bi odgovarali pružanju situacijskih presjeka. Slika 4-14 a) (lijevo) prikazuju gotove presjeke, a slika 4-14 b) (desno) konture regija presjeka.



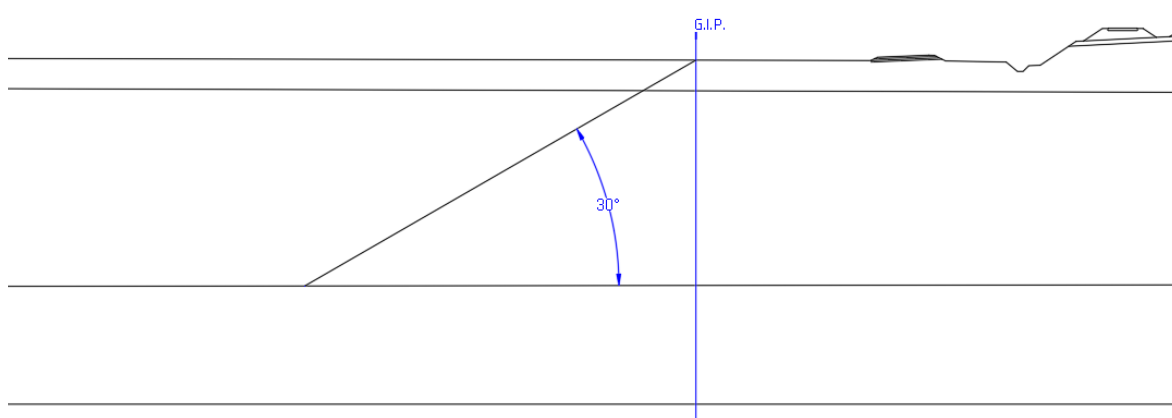
Slika 4–14 Presjeci tla ukomponirani sa situacijskim presjecima

Tlo neposredno ispod pruge i njenih dijelova modelirano je tako što su se linije granice slojeva, za potrebe izrade ovog rada, horizontalno proširile do rubova presjeka, a novostvorene konture su pretvorene u plohe pomoću naredbe *Region*.

Pošto su presjeci gotovo jednaki u daljnjim analizama koristit će se samo presjek 1-1.

4.2. Priprema presjeka za rad u PLAXIS 2D

PLAXIS 2D omogućuje automatski unos geometrija pomoću CAD crteža. U nastavku ćemo koristiti presjeke prikazane slikom 4-14 b). Iste ćemo podijeliti u dva zasebna crteža te u svaki ucrtati konturu kosine. Od granice istražnih prostora preuzete iz situacijske karte postavlja se kosina od 30° sve do sloja gline (*Draw - Line*). Slikom 4-15 je prikazan dio presjeka 1-1 s označenom granicom istražnog polja i konturom kosine.



Slika 4–15 Konture kosine presjeka 1-1

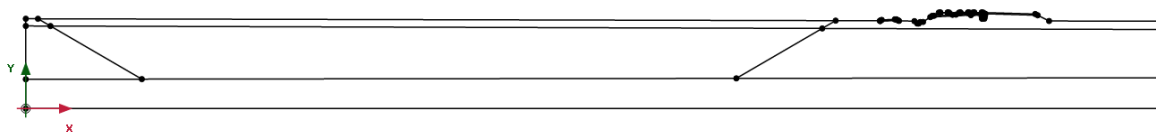
Prema istraživanjima iz 1991. godine, za područje Šoderice (jezero u neposrednoj blizini promatranih presjeka) zabilježeno je kako se ispod primarnog sloja šljunaka nalazi serija slojeva gline, pijeska, prahova te opet gline (Feletar, 2016). Pošto je terenskim istraživanjima nabušen samo sloj gline model ćemo pojednostaviti te pretpostaviti čistu glinu sve do dubine 30 metara.

Ovako pripremljene presjeke tada spremamo kao *.dxf* crteže čitljive od strane programa PLAXIS 2D.

4.3. Prijenos geometrije i formiranje regija

Pokretanjem programa PLAXIS 2D otvara se prozor unutar kojeg je moguća izrada novog projekta (*Start a new project*). Kreiran je novi projekt naziva *Kosina 1-1*, a pod opcijom modela je izabran *Plain strain* model i 15-čvorni trokutasti elementi.

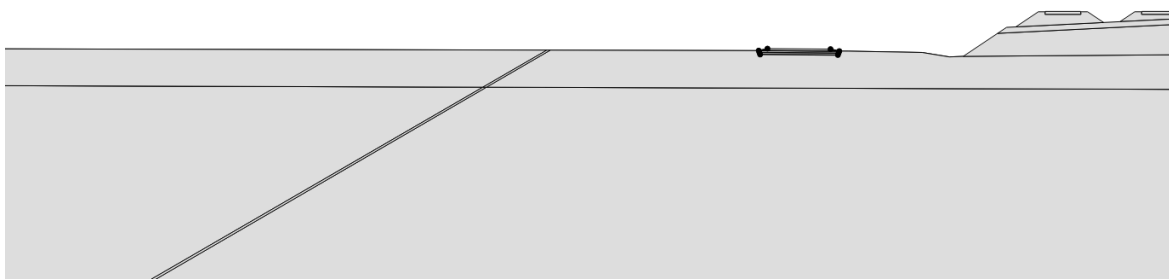
Prijenos geometrije se započinje odabirom grupe naredbi *Soil* i *Import soil*...nakon čega se odabire kreirani *.dxf* crtež. Prenesena geometrija presjeka 1-1 nalazi se na slici 4-16.



Slika 4–16 Geometrija presjeka 1-1 unutar programa PLAXIS 2D

Prijelazom u grupu naredbi *Structures* i odabirom naredbe *Create soil polygon* kreirane su regije tla. Iste su kreirane tako što su se odabrane točke kontura regije.

Kako bi smo olakšali proračun ucrtavamo (*Create line*) i uklanjamo par linija koje će pojednostaviti proračun te ukloniti erozijske plohe sloma iz proračuna stabilnosti. Konkretno, nacrtana je linija na udaljenosti 0,8 metara od konture kosine kako bi se uklonile spomenute erozijske plohe sloma. Također, cesta je zarotirana kako bi joj pružanje bilo horizontalno te je uklonjen dren ispod pruge i jarak između ceste i pruge. Uklonjeni i modificirani elementi mogu stvarati probleme u proračunu pošto u svojoj geometriji sadrže kosine velikih nagiba. Konačna geometrija prikazana je slikom 4-17.



Slika 4–17 Detalj geometrije modela unutar programa PLAXIS 2D

Isti rezultat se mogao ostvariti pomoću presjeka prikazanih slikom 4-14 a) gdje je korištenjem AutoCAD programa presjek prvo potrebno izravnati u 2D prostor pomoću naredbe *Flatten*. Nakon ovog koraka svim točkama su z koordinate postavljena na nulu te je tada potrebno ravnine (eng. *surface*) pretvoriti u regije (eng. *region*). Nakon tog koraka prilikom prijenosa geometrije PLAXIS 2D izjednačava AutoCAD regije s poligonima tla.

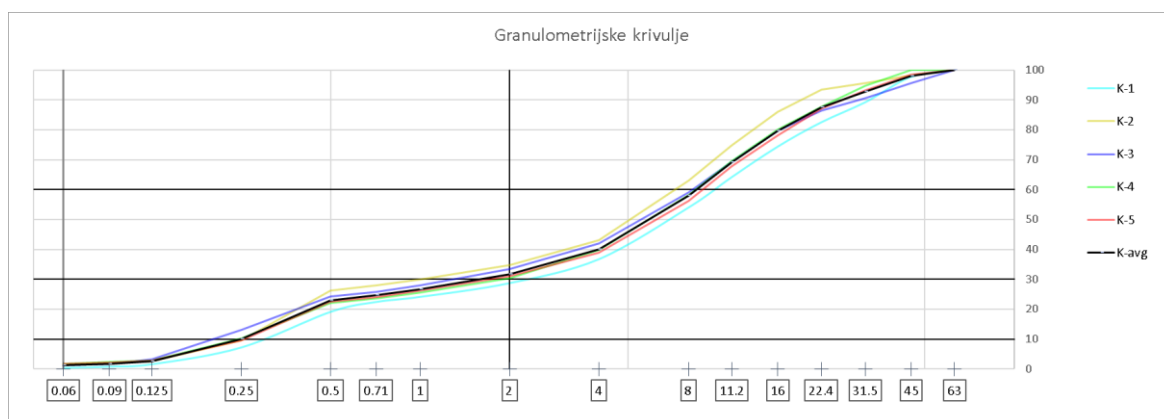
4.4. Obrada i implementacija rezultata laboratorijskih ispitivanja

Za potrebe obližnje eksploatacije šljunka provedeno je jezgrovanje i analiza šljunčanih serija. Ukupno je uzeto pet kompozitnih uzoraka koji su načinjeni uzimanjem dijelova pojedinačnih uzoraka i njihovim skraćivanjem. Svaki kompozit se sastoji od najviše četiri jezgre susjednih bušotina.

Kompoziti su redom K-1 (B-18, B-17, B-16,B-13), K2 (B-15, B-14,B-12,B-11), K3 (B-10, B-9, B-8, B-4), K4 (B-7, B-6, B-5) i K5 (B-3, B-2, B-1).

Za iste je provedena granulometrijska analiza sijanja čiji prosječni rezultati su prikazani tablicom 4-1. i slikom 4-18. **Tablica 4–1** Granulometrijska analiza sijanja

K-avg	
Prolazi kroz sito #	% (mas.)
0,063	1,34
0,09	1,80
0,125	2,62
0,25	9,94
0,5	22,84
0,71	24,78
1	26,74
2	31,68
4	40,10
8	58,08
11,2	69,14
16	79,68
22,4	87,48
31,5	92,70
45	98,04
63	100



Slika 4–18 Granulometrijske krivulje

Prema obliku granulometrijske krivulje, odnosno prema koeficijentu jednoličnosti i koeficijentu zakrivljenosti, ovaj materijal kategoriziramo kao *slabo graduirani pjeskoviti šljunak s malim udjelom sitnozrnatih materijala* oznake GP.

Za svaki kompozit određena je masa granulata koja zauzima 1 m³ u zbijenom stanju, a srednja vrijednost istih iznosi $m'_{avg} = 2056 \text{ kg/m}^3$. Istu vrijednost ćemo iskoristiti za određivanje jedinične težine šljunkovitog tla, $\gamma_{sat} = 20,17 \text{ kN/m}^3$.

Za svaki kompozit je također određena masa čestica tla, a srednja vrijednost istih iznosi $m_s = 2590 \text{ kN/m}^3$. Ovu masu koristimo za izračun jedinične težine čestica tla, $\gamma_s = 25,41 \text{ kN/m}^3$.

Prema (Geotechdata.info, 2013) koeficijent pora slabo graduiranog šljunka s malim udjelom sitnozrnatih materijala ima vrijednost između 0,26 i 0,46, a ovdje je procijenjena vrijednost $e = 0,36$. Ova vrijednost i izračunata vrijednost jedinične težine čestica tla nam omogućuju određivanje suhe jedinične težine šljunkovitog tla prema (Nonveiller, 1981):

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} \quad (4.4.-1)$$

Izračunata vrijednost suhe jedinične težine iznosi, $\gamma_{unsat} = 18,68 \text{ kN/m}^3$.

Efektivna kohezija tla gdje je udio sitnozrnatih materijala zanemariv iznosi $c' = 0 \text{ kN/m}^2$.

Prema (Geotechdata.info, 2013) vrijednost unutarnjeg kuta trenja slabo graduiranog pjeskovitog šljunka s malim udjelom sitnozrnatih materijala ima vrijednosti između 32° i 44°. Istu vrijednost možemo približe odrediti pomoću empirijske korelacije (Brinch Hansen & Lundgren, 1958):

$$\varphi = 36^\circ + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 \quad (4.4.-2)$$

gdje su vrijednosti φ_1 , φ_2 , φ_3 i φ_4 dane u tablici 4-2.

Tablica 4–2 Korekcijski parametri za određivanje kuta unutarnjeg trenja krupnozrnatih materijala (Brinch Hansen & Lundgren, 1958)

Tip tla		Relativna gustoća	
šljunak	$\varphi_1 = +2^\circ$	vrlo rahlo	$\varphi_2 = -6^\circ$
šljunak + pijesak	$\varphi_1 = +1^\circ$	rahlo	$\varphi_2 = -3^\circ$
pijesak	$\varphi_1 = 0^\circ$	srednje zbijeno	$\varphi_2 = 0^\circ$
		zbijeno	$\varphi_2 = +3^\circ$
		jako zbijeno	$\varphi_2 = +6^\circ$
Graduiranost		Oblik čestica	
dobro	$\varphi_3 = +3^\circ$	uglat	$\varphi_4 = +1^\circ$
srednje	$\varphi_3 = 0^\circ$	poluuglat	$\varphi_4 = 0^\circ$
loše	$\varphi_3 = -3^\circ$	poluzakrivljen	$\varphi_4 = -3^\circ$
		kružni	$\varphi_4 = -5^\circ$

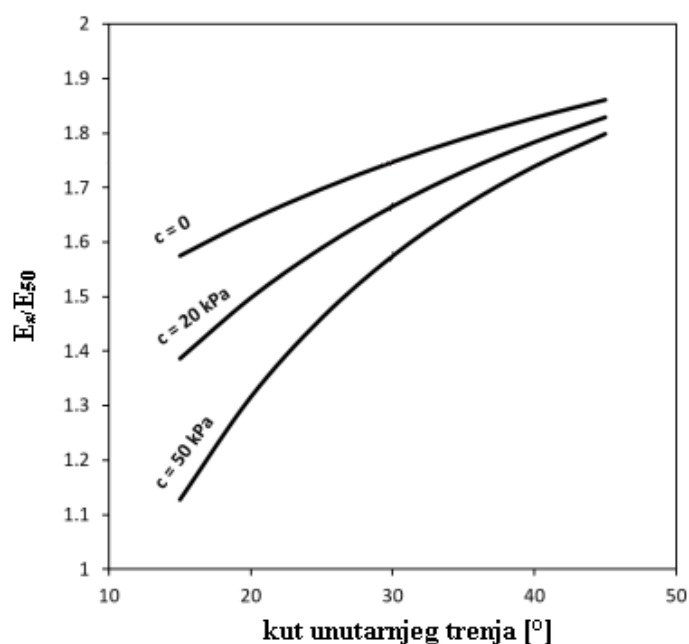
Temeljem ove korelacije, za šljunkovitu seriju, određen je kut unutarnjeg trenja $\varphi' = 37^\circ$.

Kut dilatancije određen je jednostavnom korelacijom (Boton, 1986):

$$\psi \approx \varphi - 30^\circ \quad (4.4.-3)$$

Prema ovoj korelaciji, za šljunkovito tlo, uzet je kut dilatancije $\psi = 7^\circ$.

Prema dijagramu sa slike 4-19 određen je odnos statičkog (Youngovog) modula E_s sa sekantnim modulom E_{50} za kut trenja 37° . Procijenjena vrijednost E_s/E_{50} je 1.75.



Slika 4–19 Dijagram procjene odnosa statičkog i sekantnog modula (Obrzud & Truty, 2018)

Tipična vrijednost statičkog modula slabo građiranog pjeskovitog šljunka iznosi 140 MPa (Kezdi, 1974). Ako uvrstimo ovu vrijednost statičkog modula u prethodno definirani odnos dobiva se vrijednost sekantnog modula $E_{50} = 80$ MPa.

Vrijednost edometarskog module E_{oed} je također uzeta kao 80 MPa (PLAXIS, 2016).

Vrijednosti za modul rasterećenja E_{ur} izračunata je prema jednadžbi (2.4.3-1) i E_{ur} tada iznosi 240 MPa.

Vrijednost Poissonovog koeficijenta je uzeta kao $\nu' = 0,2$ (Mayne, et al., 2009).

Koristeći prethodno određene parametre šljunak možemo modelirati pomoću modela ojačanog tla. Unutar PLAXIS 2D isto radimo pomoću naredbe *Show materials...* gdje definiramo materijale tla. Pritiskom na *New* otvara se prozor gdje se odabire model tla, a potom unose parametri, slika 4-20.

Material set			Stiffness		
Identification	pjeskoviti šljunak 37		E_{50}^{ref}	kN/m ²	80.00E3
Material model	Hardening soil		E_{oed}^{ref}	kN/m ²	80.00E3
Drainage type	Drained		E_{ur}^{ref}	kN/m ²	240.0E3
Colour	RGB 195, 229, 249		power (m)		0.5000
Comments			Strength		
c'_{ref}			kN/m ²	0.000	
General properties			φ' (phi)	°	37.00
γ_{unsat}	kN/m ³	18.68	ψ (psi)	°	7.000
γ_{sat}	kN/m ³	20.17			

Slika 4–20 Definiranje HS modela za pjeskoviti šljunak

Za potrebe obližnje eksploatacija uzorkovan je i karakteristični uzorak gline iz sloja ispod pjeskovitog šljunka. Za isti je obavljeno laboratorijsko određivanje Attebergovih granica plastičnosti. Određena je prirodna vlažnost $w_0 = 33,01$ %, granica plastičnosti $w_p = 25,27$ %, granica tečenja $w_L = 54,24$ %, indeks plastičnosti $I_p = 28,97$ % i indeks konzistencije $I_c = 0,73$. Temeljem dijagrama plastičnosti glina je klasificirana kao *glina visoke plastičnosti* oznake CH.

Čvrstoća glinovitog tla, ako se razmatraju efektivna naprezanja, najviše ovisi o trenju pa se uzima vrijednost efektivne kohezije $c' \approx 5$ kN/m² (Obrzud & Truty, 2018).

Kut unutarnjeg trenja visoko plastičnih glina iznosi $\phi' = 19^\circ$ (Carter & Bentley, 1991).

Kut dilatancije normalno konsolidiranih glina iznosi $\psi = 0^\circ$ (Obrzud & Truty, 2018).

Prema indeksu konzistencije ova glina spada u *teško gnječive* do *polučvrste* gline za koje je indeks konzistencije između 0,5 i 1. S vrijednošću indeksa konzistencije od 0,73 možemo odrediti vrijednost Youngovog modula elastičnosti, $E' = 30 \text{ MPa}$ (Obrzud & Truty, 2018).

Vrijednost Poissonovog koeficijenta je uzeta kao $\nu' = 0,4$ (Mayne, et al., 2009).

Vrijednosti jediničnih težina su procijenjene te γ_{sat} iznosi 18 kN/m^3 , a γ_{unsat} iznosi 16 kN/m^3 .

Pomoću ovih parametara možemo definirati Mohr-Coulombov model, slika 4-21.

Material set		Stiffness	
Identification	glina	E'	kN/m^2 30.00E3
Material model	Mohr-Coulomb	ν' (nu)	0.4000
Drainage type	Undrained (A)	Strength	
Colour	 RGB 172, 15, 12	c'_{ref}	kN/m^2 5.000
Comments		ϕ' (phi)	° 19.00
		ψ (psi)	° 0.000
General properties			
γ_{unsat}	kN/m^3		16.00
γ_{sat}	kN/m^3		18.00

Slika 4–21 Definiranje MC modela za glinu

Pošto se glina nalazi u nedreniranim uvjetima odabrana je opcija *Undrained (A)*.

Prema bušotinskim podacima pjeskovito tlo iznad šljunaka je *slabo graduirani prašinski pijesak* oznake SFs.

Efektivna kohezija tla gdje je udio sitnozrnatih materijala značajan se ne može zanemariti pa je za ovaj model ista procijenjena te iznosi $c' = 2 \text{ kN/m}^2$.

Vrijednost kuta unutarnjeg trenja uzeta je kao $\phi' = 34^\circ$ (Carter & Bentley, 1991).

Kut dilatancije je određen prema jednadžbi (4.4.-3) te iznosi $\psi = 4^\circ$.

Youngov modul je procijenjen te iznosi $E_s = 43 \text{ MPa}$ (Obrzud & Truty, 2018). Koristeći dijagram sa slike 4-19 za kut unutarnjeg trenja 34° ($E_s/E_{50}=1,72$) određena je vrijednost sekantnog modula E_{50} , a ista iznosi 25 MPa . Koristeći jednadžbe (2.4.3.-1) i (2.4.3.-2) određene su vrijednosti edometarskog modula i modula rasterećenja koji su tada $E_{oed} = 20 \text{ MPa}$ i $E_{ur} = 80 \text{ MPa}$.

Jedinične težine su procijenjene te iznose $\gamma_{sat} = 19 \text{ kN/m}^3$ i $\gamma_{unsat} = 17 \text{ kN/m}^3$ (Das, 2008).

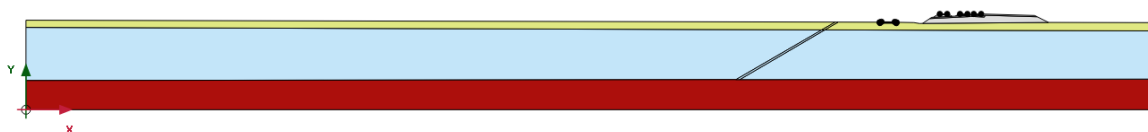
Pomoću ovih parametara je definiran HS model za SFs, slika 4-22.

Material set			Stiffness		
Identification	prahoviti pjesak H5		E_{50}^{ref}	kN/m²	25.00E3
Material model	Hardening soil		E_{oed}^{ref}	kN/m²	20.00E3
Drainage type	Drained		E_{ur}^{ref}	kN/m²	80.00E3
Colour	RGB 224, 232, 130		power (m)		0.5000
Comments			Strength		
c'_{ref}			kN/m²	2.000	
General properties			φ' (phi)	°	34.00
γ_{unsat}	kN/m³	17.00	ψ (psi)	°	4.000
γ_{sat}	kN/m³	19.00			

Slika 4–22 Definiranje HS modela za prašnasti pijesak

Nakon što smo definirali ove osnovne modele tla iste pridodajemo regijama kreiranim u prethodnom poglavlju. Desnim klikom miša na željenu regiju otvara se prozorčić gdje se odabire naredba *Soil > Set material* i odgovarajući model tla za odabranu regiju.

Presjek 1-1 s pridodanim modelima tla se nalazi na slici 4-23.



Slika 4–23 Presjek 1-1 s pridodanim modelima tla

Iz bušotinskih podataka je ustvrđeno da je prosječna dubina RPV 3,2 metra ispod površine terena. Kreirana je bušotina u ishodištu modela pomoću naredbe *Create borehole*, a *Water head* je postavljen na 26,80 m. Na ovaj način je zadana globalna RPV.

Ako se vratimo na sliku 4-23 vidjet ćemo da regije koje opisuju cestu i željezničku prugu još nisu definirane, isto je pojašnjeno u sljedećem poglavlju.

4.5. Modeliranje željezničke pruge i ceste

Primarni zadatak ovog rada je proračun stabilnosti kosine te moguće djelovanje obližnje ceste i pruge na stabilnost iste. Zbog toga su za parametre materijala korištenih za modeliranje same ceste i pruge korištene uvećane vrijednosti kako ne bi dolazilo do pojave lokalnih lomova u tim zonama.

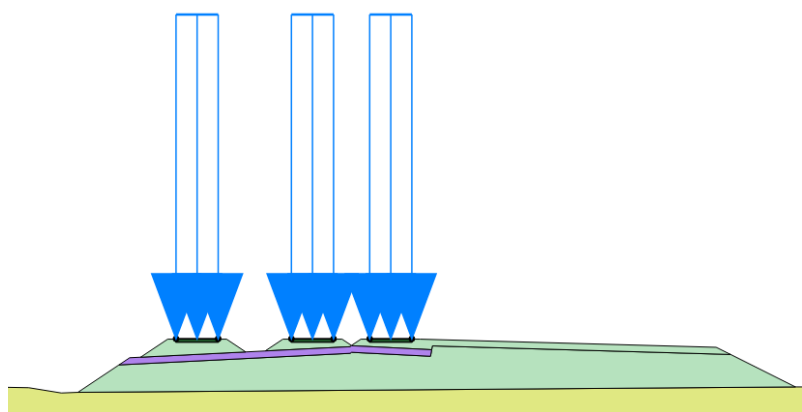
Ustroj željezničkih kolosijeka se dijeli na dva dijela; gornji i donji. Gornji ustroj se sastoji od tračnica, pragova i zastorne prizme (gornji nosivi sloj). Donji ustroj se sastoji od zaštitne tampon zone i donjeg nosivog sloja (Cindori Kovačević, 2018). U ovom slučaju zanemarit

će se tračnice. Materijali kojima će se opisati pragovi, zastorna prizma, tampon zona i donji nosivi sloj su prikazani tablicom 4-3.

Tablica 4–3 Parametri za modeliranje praga, tampona, zastorne prizme i donjeg nosivog sloja (Jiang & Nimbalkar, 2019)

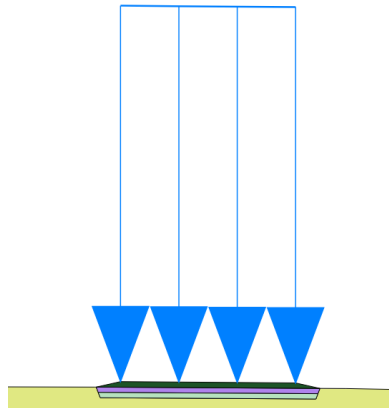
parametri	prag	tampon, zastorna prizma i donji nosivi sloj
Model	LE	MC
E' (kN/m ²)	3 000 000	80 000
γ (kN/m ²)	23	18
ν'	0,35	0,3
c' (kN/m ²)	-	0
ϕ' (°)	-	58
ψ (°)	-	28

Jasno je da će u stvarnosti materijali tampona, zastorne prizme i donjeg nosivog sloja biti različiti no u svrhu pojednostavljenja ovdje su izjednačeni. Vrijednosti najvećeg dopuštenog opterećenja po metru duljine za pruge iznosi 80 kN/m (Blašković Zavada, 2019) što za ovaj slučaj daje vrijednost od 60 kN/m/m . Isto modeliramo pomoću naredbe *Create line load* za koju je potrebno upisati vrijednost opterećenja s negativnim predznakom (opterećenje djeluje u “- y” smjeru). Slika 4.24 prikazuje modeliranu željezničku prugu.



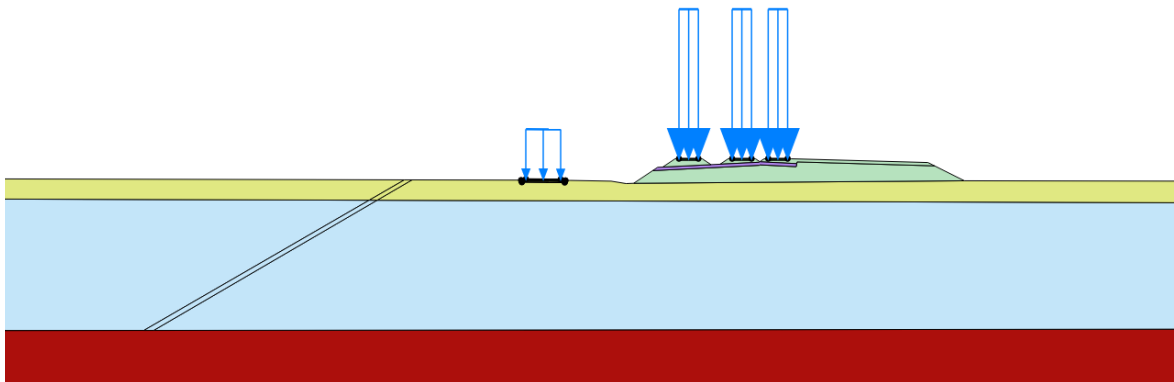
Slika 4–24 Modelirana željeznička pruga s opterećenjima

Cesta je pojednostavljena te modelirana kao trosloj prethodno definiranih materijala tampona, tucanika (materijal zastorne prizme) i betona (prag), slika 4-25. Većina cesta je projektirano za nosivost do 30 kN/m/m no pošto se ovdje radi o lokalnoj prometnici isto je smanjeno na 20 kN/m/m.



Slika 4–25 Modelirana cesta s opterećenjem

Potpuno definirani model kosine s okolnom infrastrukturom prikazan je slikom 4-26.



Slika 4–26 Detalj potpuno definiranog modela kosine s okolnom infrastrukturom

4.6. Projektni pristupi unutar PLAXIS 2D

PLAXIS 2D je jedan od rijetkih programa koji omogućuje automatsko ukomponiranje projektnih pristupa u proračune stabilnosti. Odabirom grupe naredbi *Soil* ili *Structures* i navigacijom do naredbe *Design approaches...* započinjemo definiranje projektnih pristupa. Otvara se sučelje prikazano slikom 4-27 unutar koje je definiran Projektni pristup 3 pomoću tablica 3.7 i 3.8.

Loads		
Materials		
#	Description	Factor
1	Permanent unfavourable	1.350
2	Permanent favourable	1.000
3	Variable unfavourable	1.500
4	Variable favourable	Not set
Loads		
Materials		
#	Description	Factor
1	Weight (γ)	1.000
2	Effective friction angle (ϕ')	1.250
3	Effective cohesion (c')	1.250
4	Undrained strength (s_u)	1.400

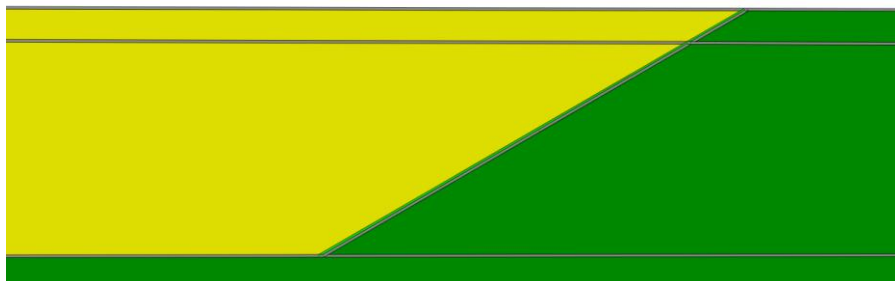
Slika 4–27 Projektni pristup 3 unutar PLAXIS 2D

Parcijalni faktori iznosa 0,000 nisu mogući unutar PLAXIS 2D. Kako bi smo potpuno zadovoljili kriterije Projektnog pristupa 3 u model ne unosimo privremena povoljna djelovanja.

4.7. Proračun

Prije početka proračuna potrebno je zadati rubne uvjete. PLAXIS (2019), za proračune sigurnosti, preporuča uporabu unaprijed definiranih rubnih uvjeta koji se zadaju pomoću naredbe *Create interfaces on the boundary*.

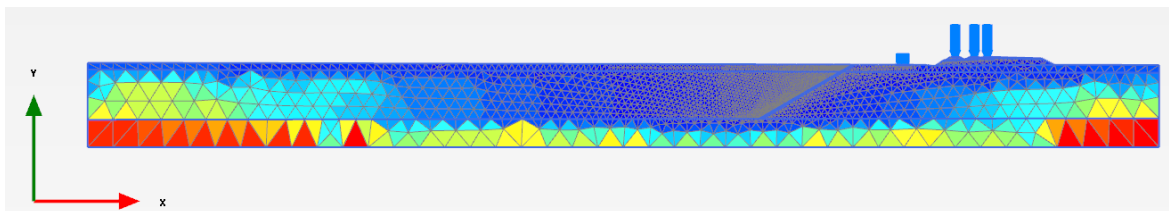
Ovakav model spreman je za diskretizaciju pomoću naredbe *Mesh – Generate Mesh*. Odabrana je opcija *very fine* za gustoću mreže elemenata. Dodatno je smanjena gustoća elemenata koji ne utječu na stabilnost kosine te povećana gustoća elemenata neposredno uz kosinu, slika 4-28.



Slika 4–28 Generiranje mreže elemenata

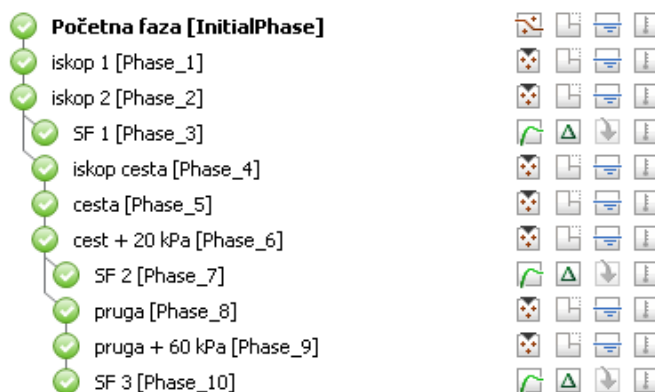
Nijansama zelene boje su prikazane zone povećanja gustoće elemenata, a žutom bojom zone smanjenja gustoće elemenata.

Slika 4-29 prikazuje diskretiziran model gdje su RGB skalom prikazani elementi po veličini.



Slika 4–29 Diskretiziran model

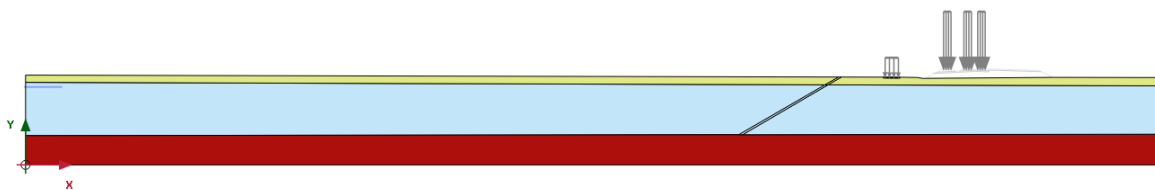
Faze proračuna se zadaju odabirom grupe naredbi *Staged construction* nakon čega se odabire ikona *Phases*. Otvara se prozor unutar kojeg se mogu dodavati, uklanjati i uređivati faze proračuna. Kreirano je 10 faza čije se stablo nalazi na slici 4-30.



Slika 4–30 Stablo faza proračuna

4.7.1. Početna faza

Početna faza definirana je kao *Gravity loading* proračun. Proračun je namijenjen za određivanje inicijalnih efektivnih naprezanja, pornih tlakova i ostalih parametara subhorizontalnih do vertikalnih slojeva tla. Model izračuna pornih tlakova je definiran kao *Phreatic*. *Phreatic* proračun generira porne tlakove na temelju razine podzemne vode i čvornih uvjeta. Pod opcijom *Design approach* odabire se *Projektni pristup 3* kreiran u poglavlju 4.6. *Projektni pristup unutar PLAXIS 2D*. Za ovu fazu aktivirani su poligoni tla prisutni prije eksploatacije, izgradnje ceste i pruge (slika 4-31). Aktivacija i deaktivacija poligona se obavlja pomoću naredbe *Toggle activation*.



Slika 4–31 Aktivni poligoni početne faze

4.7.2. Faze iskopa

Eksploatacija šljunka modelirana je u dva koraka iskopa. Prvi korak je uklanjanje pokrova, a drugi korak kompletan iskop do sloja gline. Proračuni iskopa su plastične analize koje za promjene opterećenja daju elastoplastične deformacije i naprezanja bez konsolidacije. U ovom slučaju promjena opterećenja se ostvaruje deaktivacijom iskopanih poligona, slika 4-32.

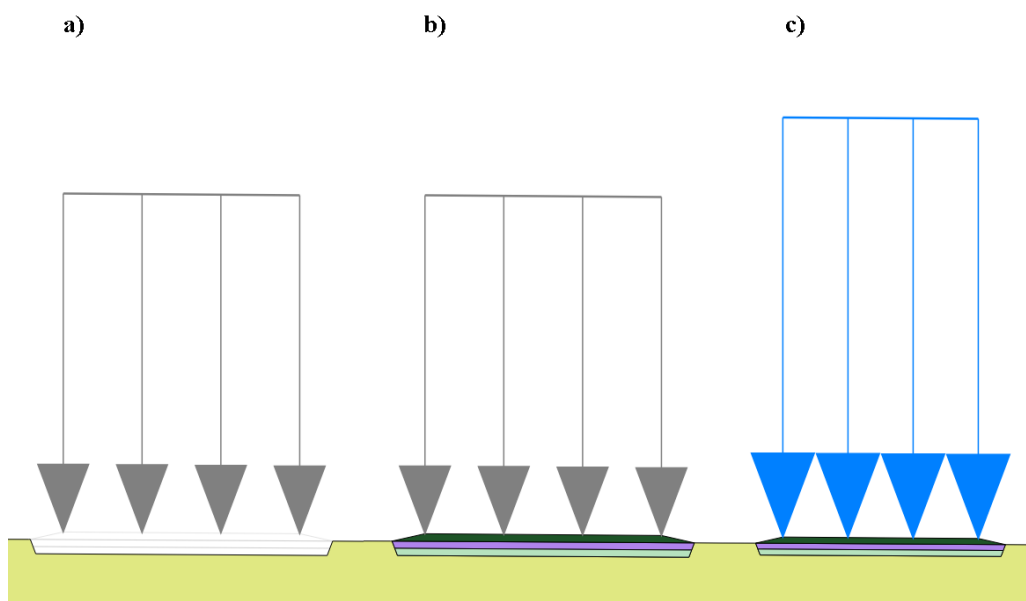


Slika 4–32 Aktivni poligoni - iskop 2

Deformacije dobivene *Gravity loading* analizom nemaju značajnu fizikalnu vrijednost te se stoga odabire opcija *Reset displacements to zero* kako bi plastične analize započele proračun bez deformacija prijašnje faze (PLAXIS, 2019). Odabrani projektni pristup prethodne analize (*Projektni pristup 3*) nastaviti će se kroz cijelo stablo.

4.7.3. Faze izgradnje ceste

Izgradnja ceste modelirana je trima fazama plastične analize. Prva faza je iskop ceste gdje su deaktivirani poligoni temelja ceste, slika 4-32 a). Druga faza je aktivacija poligona temelja ceste i asfaltnog sloja, slika 4-32 b), a treća faza je aktivacija opterećenja uslijed prometa, slika 4-32 c).



Slika 4–33 Aktivni poligoni faza izgradnje ceste

Prilikom aktivacije opterećenja potrebno je definirati vrstu opterećenja. Isto se obavlja nakon odabira opterećenja gdje se u opcijama elementa pod opcijom *Identification* odabire vrsta opterećenja, za ovaj slučaj promjenjivo nepovoljno opterećenje (eng. *variable unfavourable*). Prilikom ovih plastičnih analiza, odabrana je opcija *Reset displacements to zero* kako bi spriječili utjecaj pomaka plastičnih analiza na naredne plastične analize i proračune sigurnosti (PLAXIS, 2019).

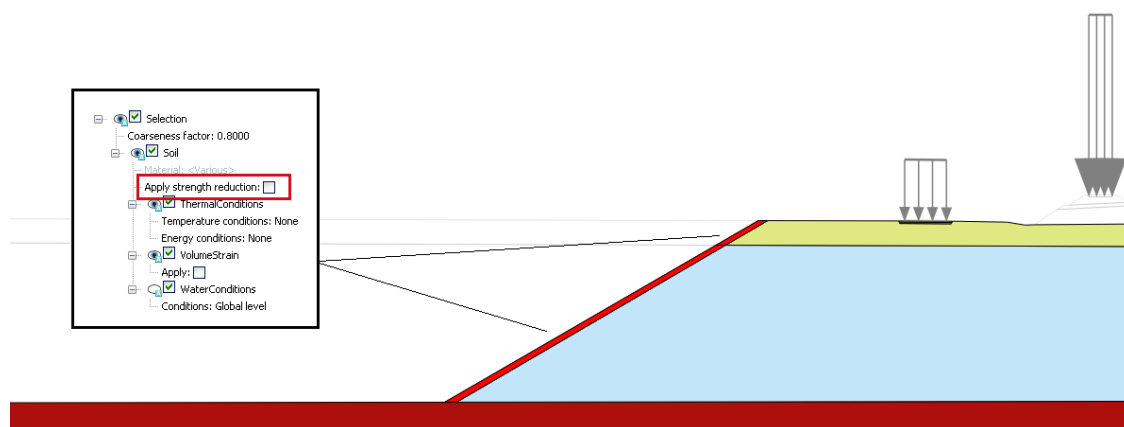
4.7.4. Faza izgradnje pruge

Izgradnja pruge modelirana je pomoću dvije faze plastične analize. Prva faza je aktivacija poligona pruge, a druga faza aktivacija opterećenja uslijed prometa. Opterećenje je i u ovom slučaju definirano kao privremeno nepovoljno. Izgradnja pruge je u stvarnosti mnogo složeniji zahvat no za potrebe ove analize ovakav model je zadovoljavajući. Kao i u prethodnim plastičnim analizama odabire se opcija *Reset displacements to zero*.

4.7.5. Faze proračuna stabilnosti

Nakon plastičnih analiza eksploatacije, izgradnje ceste i pruge postavljamo analize sigurnosti (eng. *Safety analysis*). Ove analize daju globalni faktor sigurnosti modela. Prilikom analize parametri čvrstoće se postepeno reduciraju sve dok ne dođe do sloma. Kako bi izbjegli erozijske slomove potrebno je izuzeti površinske slojeve kosine iz redukcije

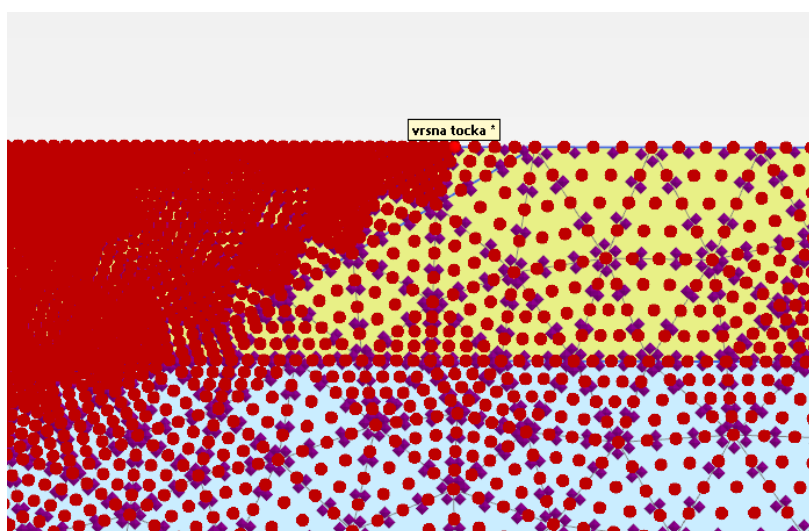
parametara. Odabirom na željeni poligon u opcijama elementa isključuje se opcija *Apply strength reduction*. Slika 4-34 crvenom bojom prikazuje poligone kojima je isključena spomenuta opcija. Ovaj korak ponavljamo u sve tre analize sigurnosti (SF 1, SF 2 i SF 3).



Slika 4–34 Izuzeti površinski slojevi kosine proračuna stabilnosti

Rezultati analize SF 1 dat će nam faktor sigurnosti čiste kosine. Rezultati analize SF 2 dat će nam utjecaj ceste i cestovnog prometa na stabilnost kosine, a rezultati analize SF 3 dat će nam utjecaj pruge i pružnog prometa na stabilnost kosine.

Kako bi se točno odredili lokalni faktori sigurnosti kosine potrebno je odabrati točke kosine koje će se koristiti za izradu dijagrama. Nakon odabira naredbe *Select points for curves* otvara se prozor unutar kojeg se odabiru točke, a iste se potvrđuju pritiskom na ikonu *Update*. Za model kosine odabrana je samo jedna, vršna točka, slika 4-35.



Slika 4–35 Odabir točke za izračun lokalnog faktora sigurnosti

Prilikom ovih analiza sigurnosti također odabiremo opciju *Reset displacements to zero* kako bi se uklonili utjecaji pomaka prethodnih plastičnih analiza.

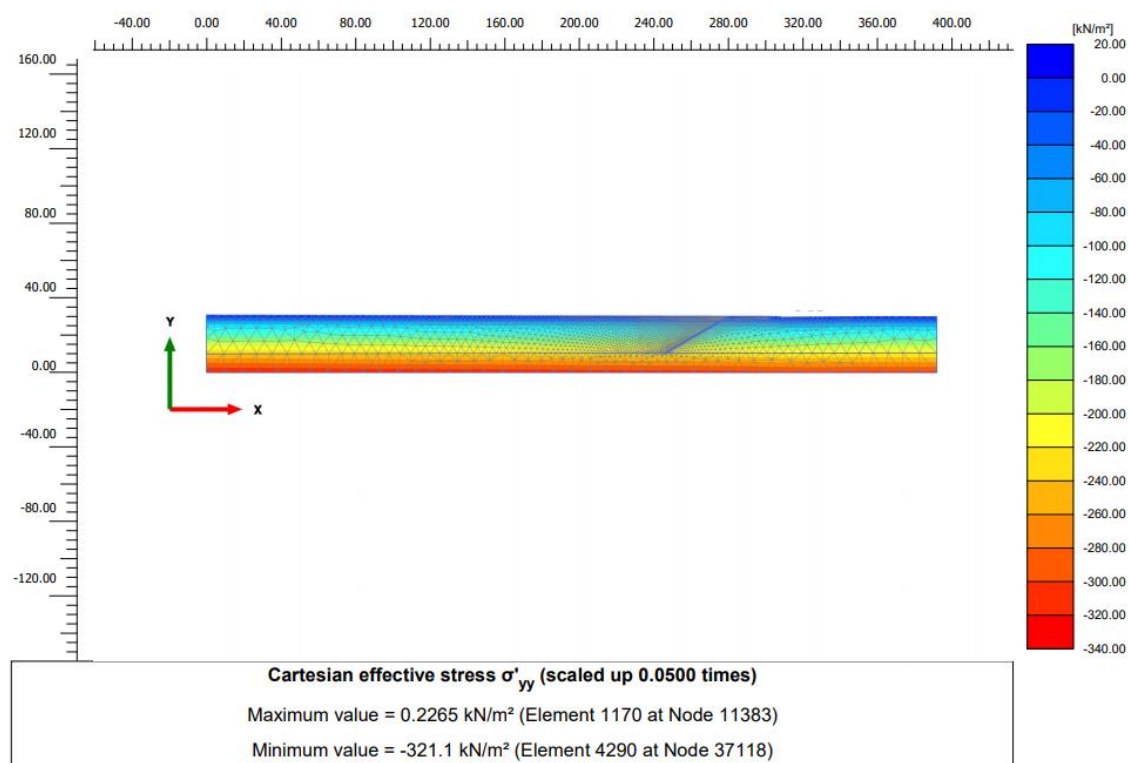
Pošto se redukcija parametara vrši po koracima potrebno je definirati dovoljan broj koraka redukcije kako bi smo osigurali slom. Zadani broj koraka ove analiza je 100 no nakon što se isključi opcija *Use default iter parameters* broj koraka podešavamo na 1000.

Nakon što su sve faze proračuna definirane odabire se ikona *Calculate* kako bi se započeo proračun. Brzina izračuna ovisit će o računalnim specifikacijama, veličini modela, veličini elemenata mreže i broju koraka. Za ovako definirane modele i računalo s četiri jezgre procesora izračun svih faza traje oko sat vremena.

4.8. Rezultati proračuna i analiza

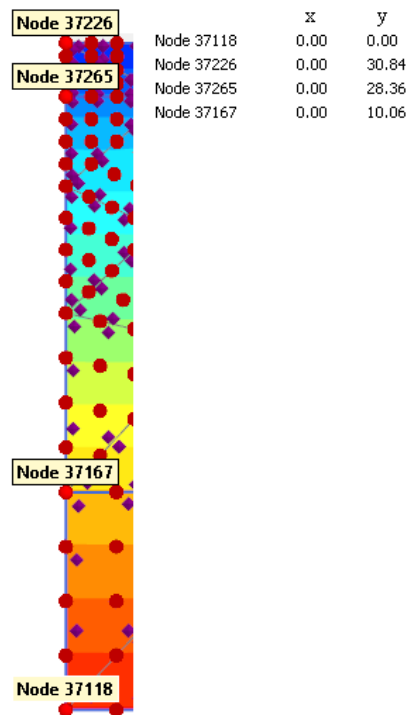
Glavni izlazni podaci provedenih analiza su pomaci i naprezanja.

Prvi korak analize rezultata je provjera ukupnih efektivnih vertikalnih naprezanja kako bi se uvjerali da je model pravilno zadan i program pravilno izračunava naprezanja. Na slici 4-36 nalazi se raspored efektivnih vertikalnih naprezanja početne faze σ'_{yy} koja će se usporediti s ručno izračunatim vrijednostima za krajnje lijevi rub modela.



Slika 4–36 Ukupna efektivna vertikalna naprezanja početne faze (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)

Maksimalna apsolutna vrijednost efektivnog vertikalnog naprezanja iznosi 321,1 kN/m² i ista je mjerena u lijevom donjem uglu modela. Ručnim izračunom bi trebali dobiti istu ili barem približno istu vrijednost. Slika 4-37 prikazuje detalj korišten za izračun



Slika 4–37 Detalj korišten za izračun efektivnih vertikalnih naprezanja

Pomoću y koordinata točaka određene su debljine slojeva prikazane u tablici 4-4.

Tablica 4–4 Podaci za izračun efektivnih vertikalnih naprezanja

visine točaka [m]	debljina slojeva [m]		γ_{sat} [kN/m ³]		γ_{unsat} [kN/m ³]	
30,84	2,48	18,30	19,00	20,17	17,00	18,68
28,36						
10,06	10,06		18,00		16,00	
0						

Ako znamo da je RPV na visini 26,8 m od dna modela tada saturirani uvjeti djeluju duž cijele visine glinenog sloja (crvena boja u tablici 4-4) i duž 16,74 m šljunkovitog sloja (plava boja u tablici 4-4). Suma vertikalnih naprezanja saturirane zone tada iznosi:

$$\sigma_{sat} = h_{sat,glina} \cdot \gamma_{sat,glina} + h_{sat,šljunak} \cdot \gamma_{sat,šljunak} = 518,73 \text{ kN/m}^2 \quad (4.8.-1)$$

Suhi uvjeti djeluju duž 1,56 m šljunkovitog sloja i duž cijele visine pjeskovitog sloja (žuta boja u tablici 4-4). Suma vertikalnih naprezanja suhe zone tada iznosi:

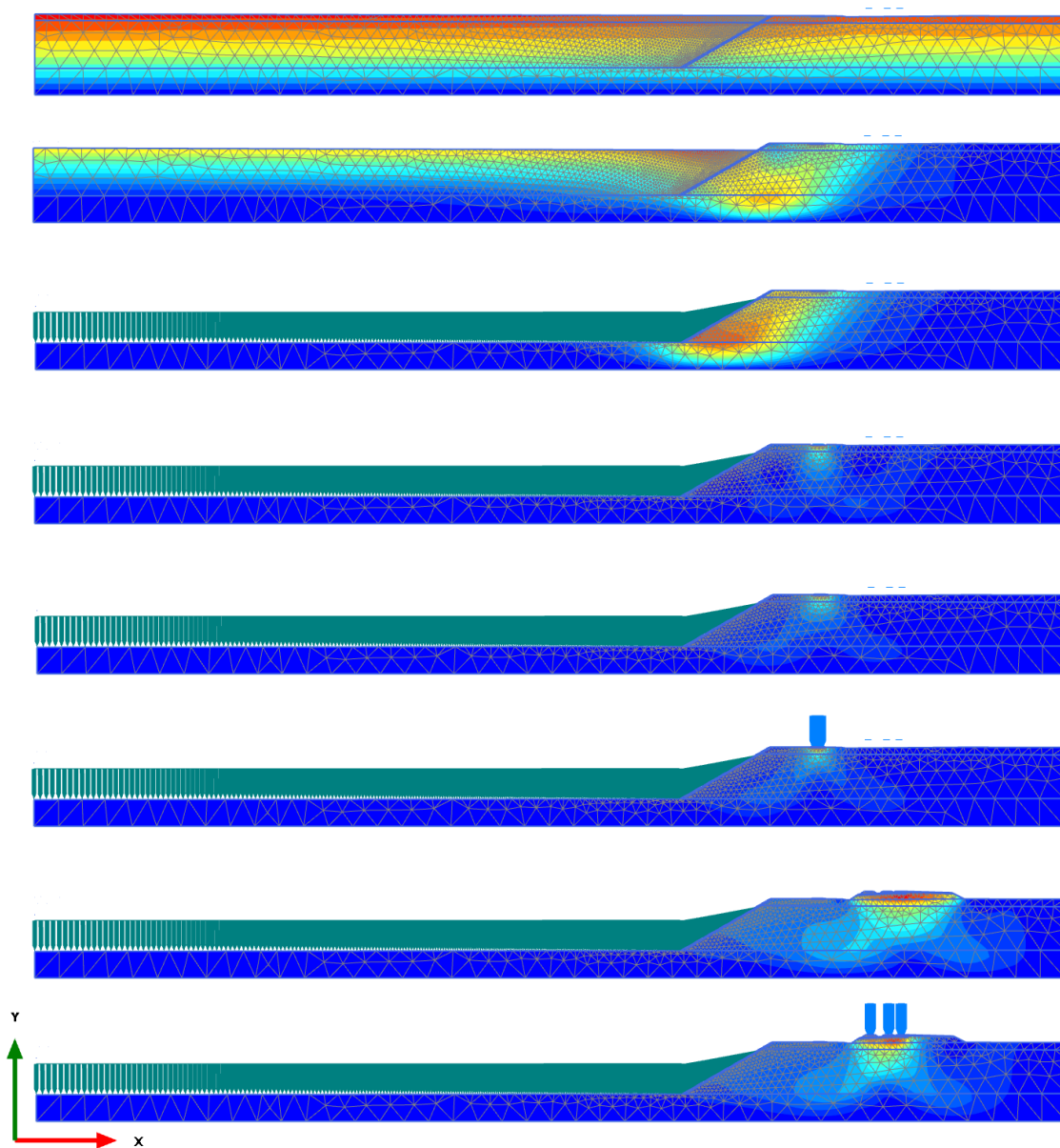
$$\sigma_{unsat} = h_{unsat,šljunak} \cdot \gamma_{unsat,šljunak} + h_{unsat,pjesak} \cdot \gamma_{unsat,pjesak} = 71,30 \text{ kN/m}^2 \quad (4.8.-2)$$

Efektivna vertikalna naprezanja cijele zone tada iznose:

$$\sigma'_{yy} = \sigma_{sat} + \sigma_{unsat} - \sigma_w = 322,03 \text{ kN/m}^2 \quad (4.8.-3)$$

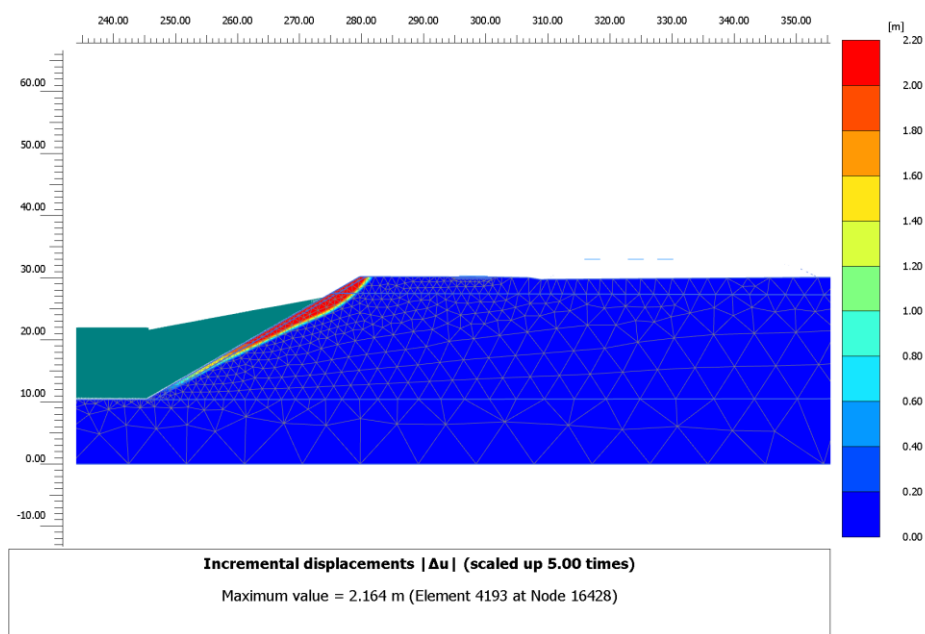
Isti rezultat je za 0,03% veći od onog dobivenog PLAXIS 2D proračunom te zaključujemo kako je model valjan i proračun naprezanja se provodi bez grešaka.

Drugi korak analize rezultata je provjera plastičnih analiza kako bi se uvjerali da nije došlo do nenadanih pomaka. Slika 4-38 prikazuje ukupne pomake svih plastičnih analiza za koje je ustanovljeno da su pomaci očekivanih veličina. Slika redom prikazuje ukupne pomake *početne faze*, *faze iskop 1*, *faze iskop 2*, *faze iskop ceste*, *faze cesta*, *faze cesta + 20 kPa*, *faze pruga* i *faze pruga + 60 kPa*.

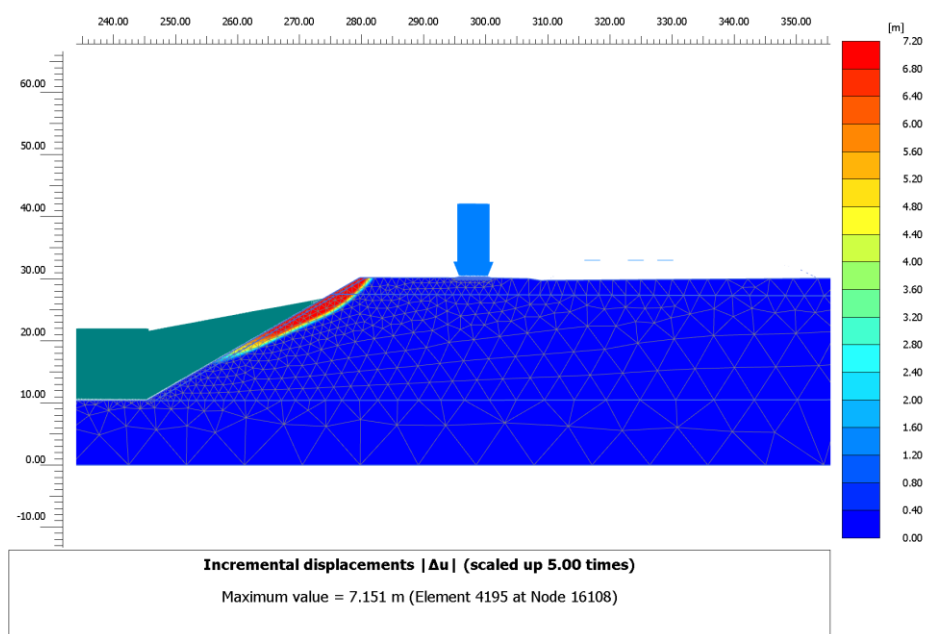


Slika 4-38 Ukupni pomaci plastičnih faza (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)

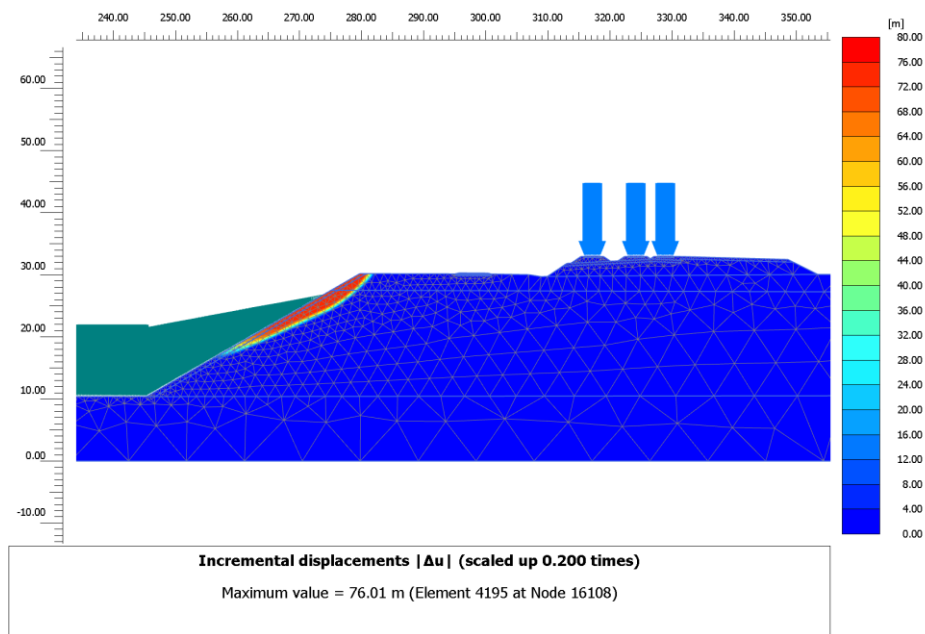
Treći korak analize rezultata je usporedba oblika inkrementalnih pomaka proračuna sigurnosti s inkrementalnim smičnim napreznjima kako bi se uvjerali da je formirana klizna ploha, odnosno, kako bi se uvjerali da je broj koraka analize stabilnosti dostatan da tokom proračuna dolazi do sloma. Kao što je prije spomenuto, pomaci unutar analize sigurnosti nemaju fizikalno značenje već služe za jasnije određivanja klizne mase. Slike 4-39, 4-40 i 4-40 prikazuju redom inkrementalne pomake SF1, SF 2 i SF 3.



Slika 4–39 Inkrementalni pomaci SF 1 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)

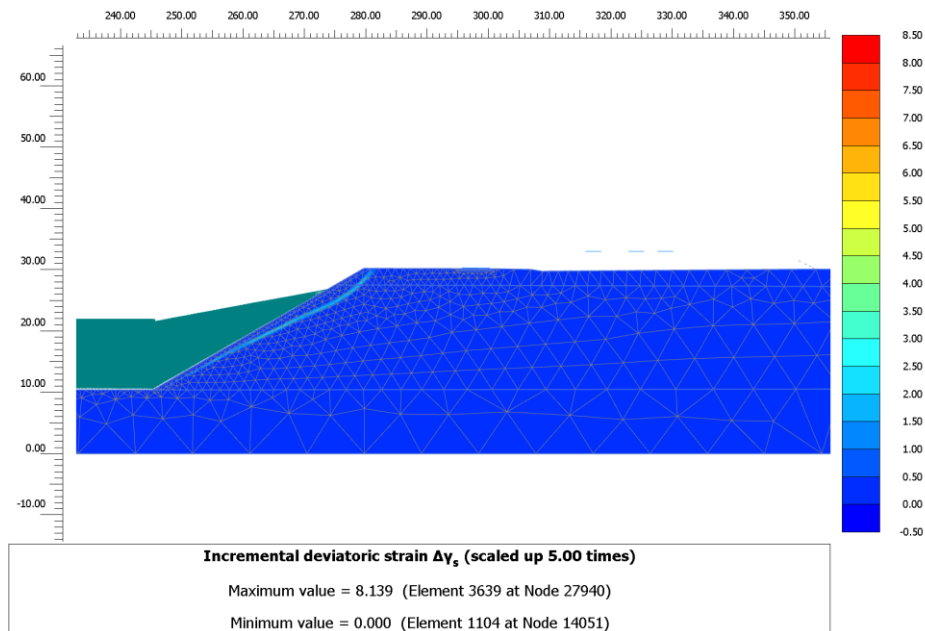


Slika 4–40 Inkrementalni pomaci SF 2 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)

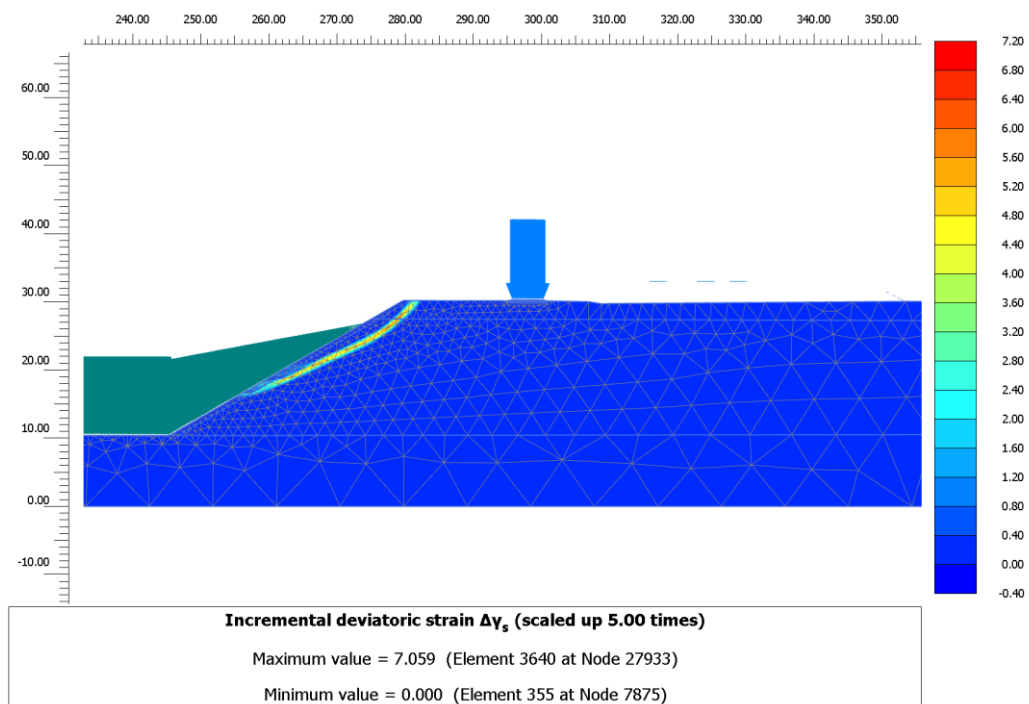


Slika 4–41 Inkrementalni pomaci SF 3 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)

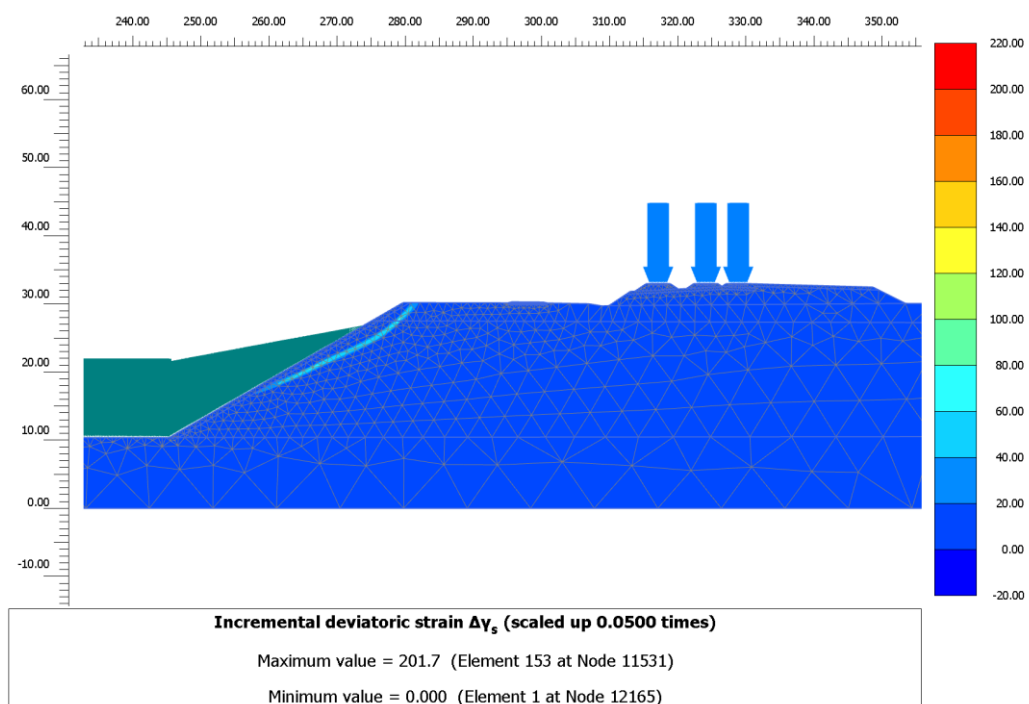
Slike 4-42, 4-43 i 4-44 redom prikazuju inkrementalna smična naprezanja za SF 1, SF 2 i SF 3. Na sve tri slike jasno se vidi razvijena klizna ploha, a ista se najbolje ističe na slici 4-43. Ako usporedimo iste s prethodnim istoimenim kliznim masama (inkrementalni pomaci) možemo tvrditi kako se radi o istim mehanizmima klizanja.



Slika 4–42 Inkrementalna smična naprezanja SF 1 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)

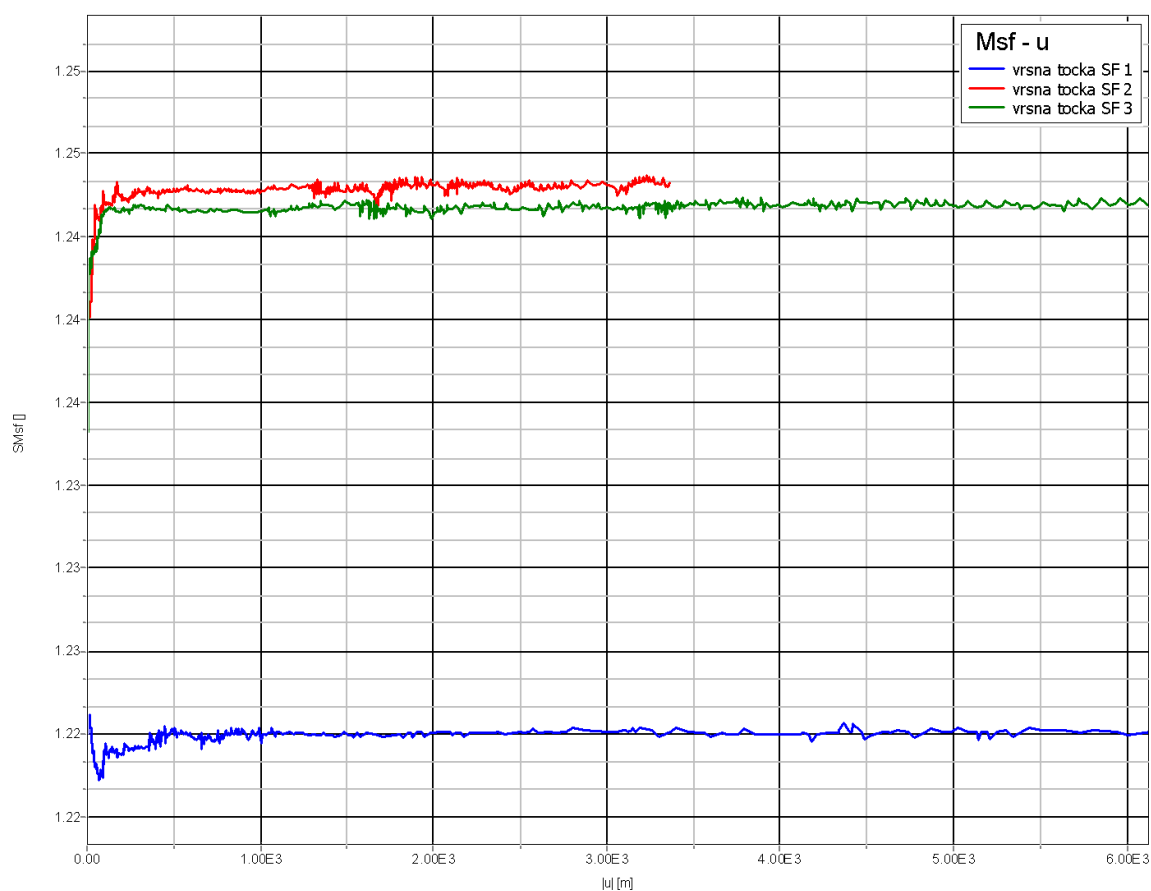


Slika 4–43 Inkrementalna smična naprezanja SF 2 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)



Slika 4–44 Inkrementalna smična naprezanja SF 3 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)

Zadnji korak analize rezultata je određivanje faktora sigurnosti. Faktor sigurnosti se određuje kao stabilna vrijednost M_{sf} u dijagramu ovisnosti o ukupnim pomacima vršne točke kosine, slika 4-45.



Slika 4-45 Dijagram faktora sigurnosti u ovisnosti o ukupnim pomacima vršne točke (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)

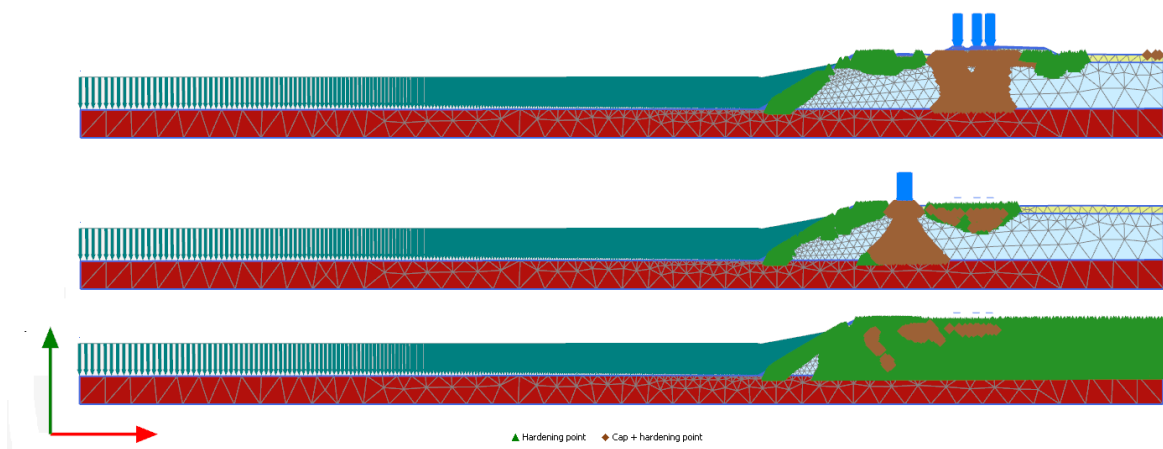
Vrijednosti ovih faktora sigurnosti očitavaju se iz tablice koja se otvara nakon desnog klika na dijagram i odabira opcije *View – Table*, slika 4-46.

vrsna točka SF 1				vrsna točka SF 2				vrsna točka SF 3			
Point ▲	Step ▲	u ▲ [m]	ΣMsf ▲ []	Point ▲	Step ▲	u ▲ [m]	ΣMsf ▲ []	Point ▲	Step ▲	u ▲ [m]	ΣMsf ▲ []
1014	1643	11119.775	1.224	2029	2643	3256.434	1.244	3048	3643	7577.730	1.243
1015	1644	11120.808	1.224	2030	2644	3259.878	1.244	3049	3644	7614.362	1.243
1016	1645	11121.324	1.224	2031	2645	3266.767	1.244	3050	3645	7632.678	1.243
1017	1646	11122.357	1.224	2032	2646	3270.212	1.244	3051	3646	7641.836	1.243
1018	1647	11124.422	1.224	2033	2647	3277.101	1.244	3052	3647	7660.152	1.243
1019	1648	11125.455	1.224	2034	2648	3290.879	1.244	3053	3648	7669.310	1.243
1020	1649	11125.971	1.224	2035	2649	3297.768	1.244	3054	3649	7687.626	1.243
1021	1650	11127.004	1.224	2036	2650	3311.546	1.244	3055	3650	7724.257	1.243
1022	1651	11129.069	1.224	2037	2651	3318.435	1.244	3056	3651	7742.573	1.243
1023	1652	11130.102	1.224	2038	2652	3332.213	1.244	3057	3652	7779.205	1.243
1024	1653	11132.167	1.224	2039	2653	3339.102	1.244	3058	3653	7797.521	1.243
1025	1654	11133.200	1.224	2040	2654	3352.881	1.244	3059	3654	7834.153	1.243

Slika 4–46 Očitane vrijednosti faktora sigurnosti SF 1, SF 2 i SF 3 (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)

Faktor sigurnosti “čiste kosine” iznosi 1,224, faktor sigurnosti utjecaja ceste na kosinu iznosi 1,244, a faktor sigurnosti utjecaja pruge na kosinu iznosi 1,243.

Jasno je da prilikom povećanja opterećenja na kosini dolazi do smanjenja faktora sigurnosti. Isto se nije manifestiralo u provedenim proračunima. Pretpostavljamo da se objašnjenje iza ovog ponašanja nalazi u odabranom modelu tla. Naime, odabrani su HS modeli tla koji omogućuju očvršćivanje tla. Ako provjerimo plastične analize netom prije proračuna stabilnosti (slika 4-47) i prikazemo plastične točke uočavamo zone očvršćivanja prikazane zelenim trokutićima i smeđim rombićima. Spomenute zone sadrže i elemente klizne mase te smatramo da su iste uzrokovale poraste faktora sigurnosti računatih za djelovanje cestovnog prometa i pružnog prometa. Odnosno, ponašanje tla ne ovisi samo o iznosu trenutnog opterećenja i naprezanja već i o povijesti promjena istih.



Slika 4–47 Zone ojačanog tla plastičnih analiza (kut unutarnjeg trenja šljunka 37°)

Proračuni opisani u poglavlju 4.7. obavljeni su za vrijednosti kuta unutarnjeg trenja šljunka u rasponu od 33° do 41°. Rezultati ovih proračuna prikazani su tablicom 4-5.

Tablica 4–5 Faktori sigurnosti za šljunak kuta unutarnjeg trenja u rasponu od 33° do 41°

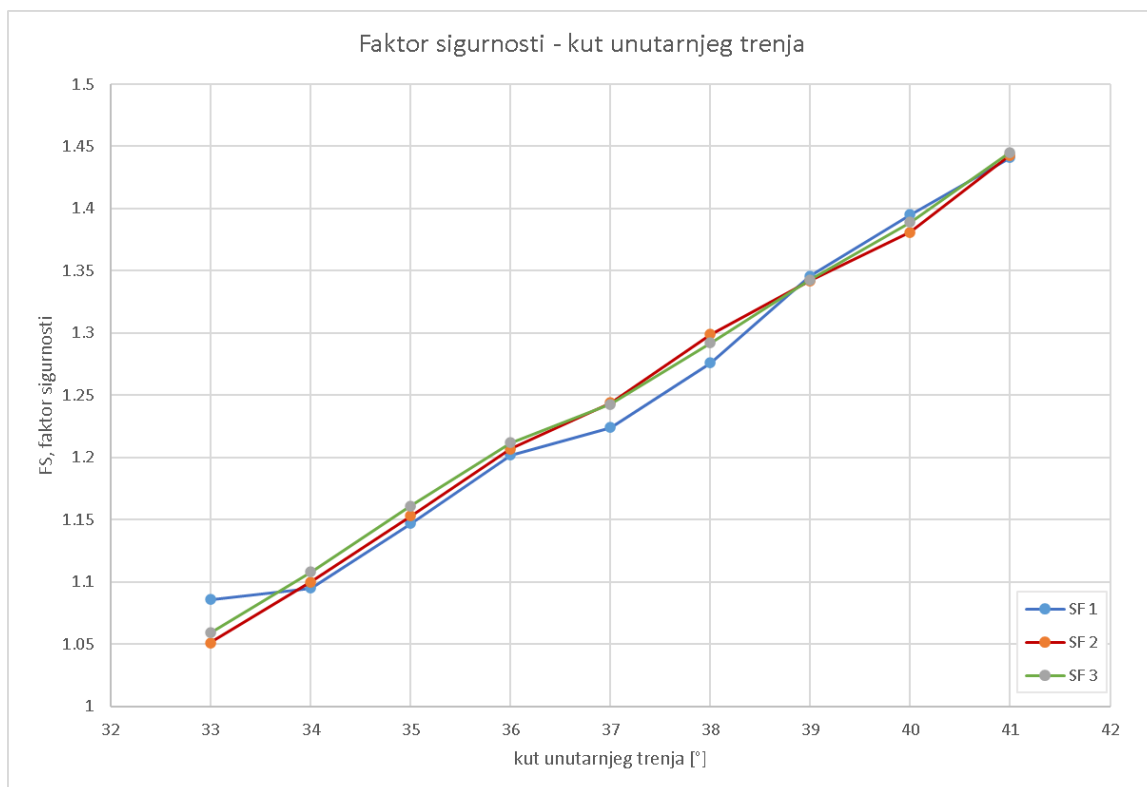
SF 1	FS	SF 2	FS	SF 3	FS
41°	1,441	41°	1,443	41°	1,445
40°	1,395	40°	1,381	40°	1,389
39°	1,346	39°	1,342	39°	1,343
38°	1,276	38°	1,299	38°	1,292
37°	1,224	37°	1,244	37°	1,243
36°	1,202	36°	1,207	36°	1,212
35°	1,147	35°	1,153	35°	1,161
34°	1,095	34°	1,1	34°	1,108
33°	1,086	33°	1,051	33°	1,059

Iz tabličnih rezultata jasno se očituje porast faktora sigurnosti kosine s porastom kuta unutarnjeg trenja. Za kut unutarnjeg trenja 33° dobivaju se faktori sigurnosti koji su na granici ravnoteže, dok postupnim porastom kuta trenja sve do 41° dobivamo prihvatljivije vrijednosti faktora sigurnosti. Kako bi se jasnije uočile promjene faktora sigurnosti s porastom kuta unutarnjeg trenja kreirana je tablica unutar koje su prikazane razlike faktora sigurnost s promjenom kuta, tablica 4-6. Plavom bojom su označeni rezultati “čiste” kosine, crvenom bojom rezultati utjecaja cestovnog prometa na stabilnost kosine, a zelenom rezultati utjecaja pružnog prometa na stabilnost kosine.

Tablica 4–6 Razlike faktora sigurnosti s promjenom kuta unutarnjeg trenja

Razlike FS s promjenom kuta unutarnjeg trenja								
41°	0,046		41°	0,062		41°	0,056	
40°		0,049	40°		0,039	40°		0,046
39°	0,07		39°	0,043		39°	0,051	
38°		0,052	38°		0,055	38°		0,049
37°	0,022		37°	0,037		37°	0,031	
36°		0,055	36°		0,054	36°		0,051
35°	0,052		35°	0,053		35°	0,053	
34°		0,009	34°		0,049	34°		0,049
33°			33°			33°		

Iz samih podataka se mogu pretpostaviti gotovo linearne ovisnosti kuta unutarnjeg trenja i faktora sigurnosti (slika 4-48).



Slika 4–48 Dijagram faktora sigurnosti pri različitim kutovima unutarnjeg trenja

5. ZAKLJUČAK

U radu su dane teorijske osnove o stabilnosti kosina i uputstva za proračunavanje istih prema preporukama Eurokoda korištenjem programa PLAXIS 2D. Rad je pisan u takvom obliku kako bi se dobiveni rezultati analiza mogli s lakoćom replicirati te kako bi se u budućnosti mogle obaviti nove analize kosina drugačijih nagiba i građe.

Stabilnost kosina je složena, viševarijabilna analiza čiji rezultati ovise o geometriji kosine, svojstvima tla i stijena, prisutnosti vode i mnogim drugim parametrima. Stoga, rezultate provedenih analiza moramo sagledavati u zadanom okviru te je pogrešno ekstrapolirati bilokakve utvrđene međuovisnosti.

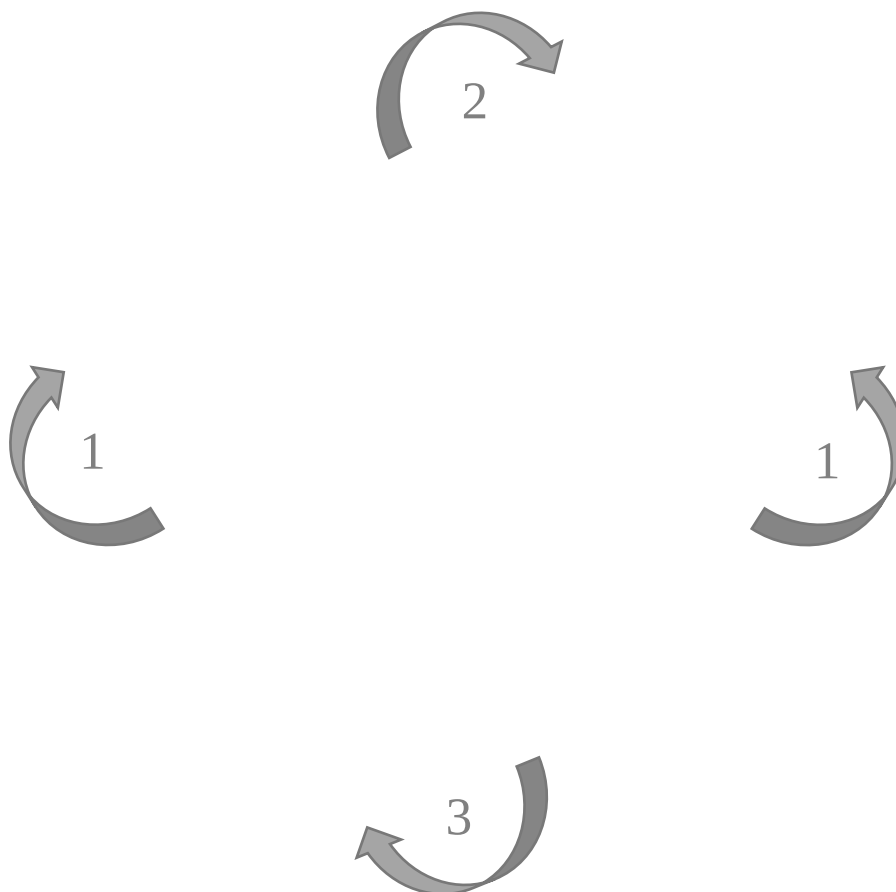
Na temelju provedenih analiza uspostavljen je odnos između faktora sigurnosti i kuta unutarnjeg trenja za djelomično potopljenu kosinu nagiba 30° načinjenu od temeljnog sloja gline, debelog sloja šljunka i pjeskovitog pokrova. Provedeno je 27 zasebnih analiza stabilnosti kosine pri kutovima unutarnjeg trenja u rasponu od 33° do 41° . Za jedinični porast kuta unutarnjeg trenja dobiva se prosječni porast faktora sigurnosti od 0,047. Odnosno, za ovako definiranu kosinu, za jedinični porast kuta unutarnjeg trenja šljunka možemo očekivati porast faktora sigurnosti od približno 0,05.

Iako su provedene i analize za određivanje utjecaja infrastrukture na stabilnost kosine iz dobivenih rezultata se sa sigurnošću ne može tvrditi značajnost njihova utjecaja.

LITERATURA

- Albataineh, N., 2006. *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*, Master Thesis. Akron: University of Akron.
- Basan, R., 2016. *Material Behavior*. Rijeka: an.
- Blašković Zavada, J., 2019. *OSNOVE PROMETNE INFRASTRUKTURE*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti.
- Bonda, A. J., Schuppener, B., Scarpelli, G. & Orr, T. L., 2013. *Eurocode 7: Geotechnical Design Worked examples*. Luksemburg: Publications Office of the European Union.
- Boton, M., 1986. The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique* 36, pp. 65-78.
- Bower, T. A., Cleall, P. J. & Jefferson, A. D., 2020. *A reformulated hardening soil model*. Cardiff: ORCA.
- Brinch Hansen, J. & Lundgren, H., 1958. *Geoteknik*. Kopenhagen: Teknisk Forlag.
- Carter, M. & Bentley, S., 1991. *Correlations of soil properties*. London: Penetech Press Publishers.
- Cindori Kovačević, M., 2018. *Željeznice - donji i gornji ustroj*. s.l.:Graditeljska tehnička škola.
- Das, B., 2008. *Advanced Soil Mechanics*. London & New York: Taylor & Francis.
- Feletar, D., 2016. Geneza i eksploatacija šljunka i pijeska na području Šoderice. *Podravina*, Svezak 15, pp. 24-35.
- Geotechdata.info, 2013. *Geotesting.info*. [Mrežno]
Available at: <http://www.geotesting.info/parameter/angle-of-friction.html>
[Pokušaj pristupa 20 8 2020].
- Gotić, I. & Zidar, M., 1997. *Stabilnost Kosina*. Varaždin: VŽU.
- Griffiths, D. V. & Lane, P. A., 2016. Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique* 49, p. 338.
- Ibrahimović, A., 2014. *Stabilnost kosina i potporne konstrukcije*. Tuzla: Univerzitet u Tuzli.
- Jiang, Y. & Nimbalkar, S., 2019. Finite Element Modeling of Ballasted Rail Track Capturing Effects of Geosynthetic Inclusions. *Frontiers in Built Environment*.
- JSG, 2000. *JSG TEXAS*. [Mrežno]
Available at: <https://www.jsg.utexas.edu/tyzhu/files/Some-Useful-Numbers.pdf>
[Pokušaj pristupa 2020].
- Kezdi, A., 1974. *Handbook of Soil Mechanics*. Amsterdam: Elsevier.

- Kvasnička, P. & Domitrović, D., 2007. *Mehanika tla - interna skripta*. Zagreb: RGNf Sveučilište u Zagrebu.
- Lebo, Ž., 2014. *EUROKOD 7 U GEOTEHNIČKOM INŽENJERSTVU RH*. Zagreb, TVZ.
- Maksimović, M. M., 2008. *Mehanika tla - četvrto izdanje*. Beograd: AGM knjiga.
- Mayne, P. i dr., 2009. Geomaterial behavior and testing. *State-of-the-art-paper*, pp. 2777-2872.
- Nonveiller, E., 1981. *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Zagreb: Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu.
- Nonveiller, E., 1987. *Kliženje i stabilizacija kosina*. Zagreb: Školska knjiga.
- Obrzud, R. F. & Truty, A., 2018. *THE HARDENING SOIL MODEL - A PRACTICAL GUIDEBOOK*. s.l.:Zace Services Ltd..
- PLAXIS, 2016. *Material Models*. s.l.:Bentley Systems, Incorporated.
- PLAXIS, 2019. *Manual*. s.l.:Bently Systems, Incorporated.
- Schanz, T., Vermeer, P. A. & Bonnier, P. G., n.d. *The hardening soil model formulation and verification*. Rotterdam: Balkema.
- Sorić, J., 2004. *Metoda konačnih elemenata*. Zagreb: Golden marketing - Tehnička knjiga.
- Szavits-Nossan, A. & Ivšić, T., 2006. *Novi Eurokod 7: geotehničko projektiranje*. Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Terzaghi, K., Redlick, V. A. & Kampe, R., 1929. *Ingenieurgeologie*. Beč: Springer-Verlag Wien.
- Vanicke, I., 2000. *Geomechanika 10: mehanika zemin*. 3th ur. Prague: CTU.
- Zlatović, S., 2006. *Uvod u mehaniku tla*. Zagreb: Udžbenici Tehničkog veleučilišta u Zagrebu TVZ.



Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO
GEOLOŠKO
NAFTNI FAKULTET



UTJECAJ KUTA UNUTARNJEG
TRENJA NA STABILNOST KOSINA U
NEKOHERENTNOM TLU