

Primjena metode materijalne točke u analizi umanjenog modela kosine

Erbežnik, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:421881>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo
Geotehnika
Dinamika tla

Dominik Erbežnik
0114031396

**Primjena metode materijalne točke u analizi umanjenog
modela kosine**

Diplomski rad

Rijeka, 18. rujna 2023.

IZJAVA

Diplomski rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Dominik Erbežnik

U Rijeci, 18. rujna 2023.

SAŽETAK

Na umanjenom modelu padine, za tri zadana nagiba, ispitano je statičko ponašanje tla uslijed djelovanja gravitacije te dinamičko ponašanje tla izloženog oborinama. Ispitane su tri različite miješavine tla koje se sastoje od pijeska uzorkovanog na rijeci Dravi te kaolina u različitim omjerima. Za izradu modela te provođenje numeričke analize korištena su četiri software-ska programa a to su AutoCaD, GiD, Anura3D te ParaView. Za proračun se koristila metoda materijalne točke čiji je osnovni princip rada pojašnjen u radu. Na kraju rada dana je usporedba rezultata dobivenih numeričkom analizom te rezultata ispitivanja na umanjenom fizičkom modelu kosinu koje je provedeno na Građevinskom fakultetu u Rijeci.

Ključne riječi: metoda materijalne točke, numerička analiza, pomak tla, oborina, model, simulacija, statičko ponašanje, dinamičko ponašanje

ABSTRACT

On a reduced model of the slope, for three given inclinations, the static behavior of the soil due to the action of gravity and the dynamic behavior of the soil exposed to rainfall were tested. Three different soil mixtures consisting of sand sampled from the Drava River and kaolin in different proportions were tested. Four software programs, namely AutoCaD, GiD, Anura3D and ParaView, were used to create the model and perform the numerical analysis. The material point method was used for the calculation, the basic principle of which is explained in the paper. At the end of the paper, a comparison of the results obtained by the numerical analysis and the test results on the reduced physical slope model, which was carried out at the Faculty of Civil Engineering in Rijeka, is given.

Keywords: material point method, numerical analysis, soil displacement, rainfall, model, simulation, static behaviour, dynamic behaviour

Sadržaj

Popis slika	vi
Popis tablica	vii
1 UVOD	1
2 PREGLED LITERATURE	3
2.1 Tipovi nestabilnosti	3
2.1.1 Osnovni dijelovi klizišta	7
2.2 Utjecaj oborine na klizišta	9
2.3 Numeričke metode u analizi kosine	12
2.3.1 Metode granične ravnoteže	12
2.3.2 Metode granične analize	13
2.3.3 Metoda konačnih elemenata	14
2.3.4 Metoda konačnih razlika	16
3 OSNOVE METODE MATERIJALNE TOČKE (MPM)	17
4 NUMERIČKE SIMULACIJE UMANJENOG MODELA KLIZIŠTA	21
4.1 Metodologija	21
4.1.1 Geometrija modela	21
4.1.2 Značajke tla	23
4.2 Parametri modela	26
4.2.1 Statički model	26
4.2.2 Tranzitni model	29
5 Rezultati simulacija	33
5.1 Rezultati simulacija statičkih modela	33
5.2 Rezultati probnih simulacija tranzitnih modela	44
6 Diskusija	55
7 Zaključak	57

Popis slika

2.1	Tip nestabilnosti kosine - odron [1]	4
2.2	Tip nestabilnosti kosine - prevrtanje [1]	4
2.3	Tip nestabilnosti kosine - klizanje: (a) rotacijsko klizanje, (b) translacijsko klizanje i (c) blokovsko klizanje. Modificirano prema [1]	5
2.4	Tip nestabilnosti kosine - širenje tla, modificirano prema [2]	5
2.5	Tip nestabilnosti kosine - tečenje [1]	6
2.6	Tip nestabilnosti kosine - puzanje, modificirano prema [1]	7
2.7	Osnovni dijelovi klizišta, modificirano prema [1]	8
2.8	Mehanizam sloma padine uzrokovanog oborinom, modificirano prema [3]	9
2.9	Klizište u selu Flegi, općina Motovun [4]	10
2.10	Mohr-Coulombov kriterij sloma [5]	11
2.11	Metoda granične ravnoteže - metoda lamela, modificirano prema [6]	13
2.12	Teorem gornje i donje granice [7]	13
2.13	Prikaz konzole podjeljene na konačne elemente u 3D [8]	14
2.14	Prikaz Eulerove diskretizacije [9]	15
2.15	Prikaz Lagrangeove diskretizacije [9]	15
2.16	Prikaz mreže elemenata metode konačnih razlika, modificirano prema [10]	16
3.1	Shema prostorne diskretizacije metodom materijalne točke modificirano prema [11]	18
3.2	MPM algoritam za jedan računski korak vremenskog inkrementa: (a) prijenos informacija sa materijalne točke na čvorove, (b) rješavanje jednadžbi ravnoteže, (c) mapiranje polja brzine na točke, (d) ažuriranje položaja točke. Modificirano prema [12]	19
4.1	Prikaz dimenzija [m] modela padine od 35° primjenom CAD alata	22
4.2	Model padine od 35° kreiran u GiD pred-procesoru	22
4.3	Graf ovisnosti kuta unutarnjeg trenja i kohezije s obzirom na udio čestica kaolina za $e = 0.77$ [13]	24
4.4	Rubni uvijeti statičkih modela	27

4.5	Granice modela koje se uklanjaju u drugoj fazi komputacije	27
4.6	Prikaz oblika tetraedra	28
4.7	Diskretizacija statičkog modela konačnim elementima	29
4.8	Rubni uvijeti za krute čestice tranzitnog modela	30
4.9	Rubni uvijeti za tekućine tranzitnog modela	30
4.10	Točke zadane za određivanje površine procjeđivanja i infiltracije	31
4.11	Površina kosine	31
4.12	Diskretizacija tranzitnog modela konačnim elementima	32
5.1	Shema položaja točaka čiji su pomaci promatrani; H - na vrhu kosine, M - na sredini kosine, L - na dnu kosine	33
5.2	Prikaz kosine nagiba 40° materijala modland-a na kraju simulacije	34
5.3	Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 40°, klizanje materijala u trajanju od 3.25 sekunde maksimalnog pomaka od 0.896 m	34
5.4	Prikaz kosine nagiba 35° materijala modland-a na kraju simulacije	35
5.5	Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 35°. Značajan pomak nakon uklanjanja granica 4.5 nakon 0.1 sekunde, nakon 0.2 sekunde nema daljnjeg pomaka	35
5.6	Prikaz kosine nagiba 30° materijala modland-a na kraju simulacije	36
5.7	Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 30°, smanjenje nagiba krivulje pomaka nakon uklanjanja granica 4.5 nakon 0.1 sekunde, nakon 0.2 sekunde nema daljnjeg pomaka	36
5.8	Prikaz kosine nagiba 40° materijala kaoland10 na kraju simulacije	37
5.9	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 40°, klizanje materijala u trajanju od 6 sekundi maksimalnog pomaka od 0.998 m	37
5.10	Prikaz kosine nagiba 35° materijala kaoland10 na kraju simulacije	38
5.11	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 35°, Značajan pomak nakon uklanjanja granica 4.5 nakon 0.1 sekunde, nakon 0.3 sekunde nema daljnjeg pomaka	38
5.12	Prikaz kosine nagiba 30° materijala kaoland10 na kraju simulacije	39
5.13	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 30°, smanjenje nagiba krivulje pomaka nakon uklanjanja granica 4.5 nakon 0.1 sekunde, nakon 0.2 sekunde nema daljnjeg pomaka	39
5.14	Prikaz kosine nagiba 40° materijala kaoland15 na kraju simulacije	40
5.15	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland15 nagiba kosine 40°, klizanje materijala u trajanju od 4.5 sekundi maksimalnog pomaka od 1 m	40

5.16	Prikaz kosine nagiba 35° materijala kaoland15 na kraju simulacije	41
5.17	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland15 nagiba kosine 35°, klijanje materijala u trajanju od 9.5 sekundi maksimalnog pomaka od 0.532 m	41
5.18	Prikaz kosine nagiba 30° materijala kaoland15 na kraju simulacije	42
5.19	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland15 nagiba kosine 30°, bez promjene nagiba krivulje pomaka nakon uklanjanja granica 4.5 nakon 0.1 sekunde, nakon 0.2 sekunde nema daljnjeg pomaka	42
5.20	Prikaz kosine nagiba 40° materijala modland-a na kraju simulacije	44
5.21	Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 40°, značajan pomak nakon 65 sekundi simulacije oborine zatim veći pomaci u inkrementima	44
5.22	Prikaz kosine nagiba 35° materijala modland-a na kraju simulacije	45
5.23	Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 35°, značajan pomak nakon 62 sekunde simulacije oborine zatim veći pomaci u inkrementima	45
5.24	Prikaz kosine nagiba 30° materijala modland-a na kraju simulacije	46
5.25	Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 30°, značajan pomak nakon 105 sekunde simulacije oborine zatim blagi linearni porast	46
5.26	Prikaz kosine nagiba 40° materijala kaoland10 na kraju simulacije	47
5.27	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 40°, značajan pomak u prvih 40 sekundi zatim nema daljneg pomaka	47
5.28	Prikaz kosine nagiba 35° materijala kaoland10 na kraju simulacije	48
5.29	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 35°, značajan pomak u prvih 35 sekundi zatim nema daljneg pomaka	48
5.30	Prikaz kosine nagiba 30° materijala kaoland10 na kraju simulacije	49
5.31	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 30°, značajan pomak u prvih 25 sekundi zatim blagi linearni porast maksimalnog pomaka	49
5.32	Prikaz kosine nagiba 40° materijala kaoland15 na kraju simulacije	50
5.33	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland15 nagiba kosine 40°, značajan pomak nakon 98 sekundi zatim pomak u inkrementima	50
5.34	Prikaz kosine nagiba 35° materijala kaoland15 na kraju simulacije	51
5.35	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland15 nagiba kosine 35°, značajan pomak nakon 116 sekundi zatim pomak u inkrementima	51
5.36	Prikaz kosine nagiba 30° materijala kaoland15 na kraju simulacije	52
5.37	Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland15 nagiba kosine 30°, značajan pomak u prvih 90 sekundi zatim bez pomaka	52

Popis tablica

4.1	Tablica miješavina tla s pripadajućim nagibom te sastavom miješavine za koje su izrađeni modeli	23
4.2	Osnovne značajke materijala - Statički modeli	23
4.3	Osnovne značajke materijala - Tranzitni modeli	25
4.4	Struktura mreže diskretiziranih statičkih modela	28
4.5	Struktura mreže diskretiziranih tranzitnih modela	30
5.1	Rezultati statičkih modela	43
5.2	Rezultati probnih tranzitnih modela	53

1. UVOD

Jedna od najvećih prirodnih prijetnji za ljude, objekte te okolinu je zasigurno pojava klizišta koja se mogu pokrenuti nizom različitih faktora. Klizišta nastaju zbog poremećaja prirodne stabilnosti padine [14]. Mogu pratiti jake kiše ili nakon suša, potresa ili vulkanskih erupcija. Stabilnost samog klizišta uvelike ovisi o djelovanju gravitacije, vrsti tla, čvrstoćom tla koja ovisi o različitim značajkama materijala kao što je veličina zrna, stupanj zbijenosti, porozitet, kohezija, kut unutarnjeg trenja, itd. Najosnovniji zahtjev za stabilnost padine je da posmična čvrstoća tla mora biti veća od posmičnog napona potrebnog za ravnotežu [15, 16]. Određivanje stabilnosti kosine se provodi određivanjem njenog faktora sigurnosti 2.1 jednom od numeričkih metoda. S napretkom računalne tehnologije i napretkom računalne snage, metode numeričke analize postale su nezamjenjivo sredstvo za rješavanje problema geotehničkog inženjerstva [16, 17]. Kako bi se odredio faktor sigurnosti koriste se različite numeričke metode koje su razvijene kroz dugi niz godina kao što su metoda granične ravnoteže, metoda graničnog analize, metoda materijalne točke, metoda konačnih elemenata, itd. [17]. Numeričke metode se međusobno razlikuju po ulaznim parametrima, rubnim uvjetima, ograničenjima u rezultatima te principu rada. Opširnije o numeričkim metodama kasnije u podpoglavlju 2.3 [14]. Dva uvjeta koja rezultiraju nestabilnosti padine su: (1) smanjenje čvrstoće na smicanje tla i (2) povećanje potrebnog posmičnog napreznja za ravnotežu. Smanjenje čvrstoće na smicanje tla uzrokovano je raznim in situ procesima, kao što je povećanje pritiska vode u porama, pucanje tla, bubrenje glina, itd. [16, 18]. Povećanje posmičnog napreznja je izazvano opterećenjem na vrhu kosine, povećanje težine tla zbog povećanog sadržaja vode, podrhtavanje tla, itd [16].

U ovome diplomskom radu istraženo je ponašanje tri različite miješavine tla, Dravskog pijeska i kaolina u tri različita masena postotka, 100% pijeska - 0% kaolina, 90% pijeska - 10% kaolina te 85% pijeska - 15% kaolina. Provedene su numeričke simulacije u statičkim uvjetima u kojima djeluje samo gravitacijska sila te u tranzitnim uvjetima u kojima je tlo izloženo simulaciji oborine. Numeričke simulacije, osim za različite vrste tla, provedene su i za različite nagibe kosine, i to za: 30°, 35° i 40°. Za provođenje simulacija korištena su tri različita računalna programa. Računalni program GiD [19] korišten je kao pred-procesor za kreiranje geometrije modela i kao grafičko suče-

lje za računalni program Anura3D [20]. Anura3D korištena je za zadavanje značajki materijala, ulazne podatke, uvijete modela te sam proračun metodom materijalne točke [12, 20]. Za vizualizaciju dobivenih rezultata te pokretanje simulacije i izradu grafova korišten je računalni program ParaView [21]. Diplomski rad sastoji se od šest poglavlja te uvoda u diplomski rad. U poglavlju 2 objašnjeni su i navedeni osnovni tipovi nestabilnosti kosine te dijelovi klizišta. Ukratko je opisan utjecaj oborine na klizište, prikazan mehanizam sloma tla te kako utječe infiltracija oborine na promjenu osnovnih veličina parametara tla. Također, nabrojane su i objašnjene osnovne numeričke metode koje se koriste za analizu kosina, princip rada, ograničenja te primjeri računalnih programa koji koriste navedene numeričke metode. U poglavlju 3 se nalazi detaljan opis metode materijalne točke [12], objašnjen je princip rada algoritma, navedene osnovne jednadžbe na kojima se bazira metoda, prednosti i mane korištenja metode te primjeri iz prakse. Nakon osnova metode materijalne točke koja se koristi za analizu kosine, metodologija izrade modela umanjenog klizišta i parametri modela su opisani u poglavlju 4. Poglavlje sadrži detaljan opis geometrije modela, rubnih uvijeta, značajki miješavina tla, postavki komputacija, diskretizacije modela konačnim elementima, itd. U poglavlju 5 se nalaze rezultati simulacija statičkih i tranzitnih modela u obliku grafova pomaka u vremenu te prikaza modela nakon završetka slijeganja odnosno kretanja klizne mase niz kosinu. Također, sumirani su maksimalni pomaci zajedno sa pomacima u tri dijela kosine, definirano kasnije u tekstu, u obliku tablice. U poglavlju 6 je provedena diskusija, objašnjenje rezultata simulacija, usporedba dobivenih pomaka sa rezultatima ispitivanja [22] te smjernice i ideje za dobivanje točnijih rezultata. U zadnjem poglavlju 7 donesen je kratki zaključak obzirom na rezultate simulacija i osvrt na provedeno ispitivanje.

2. PREGLED LITERATURE

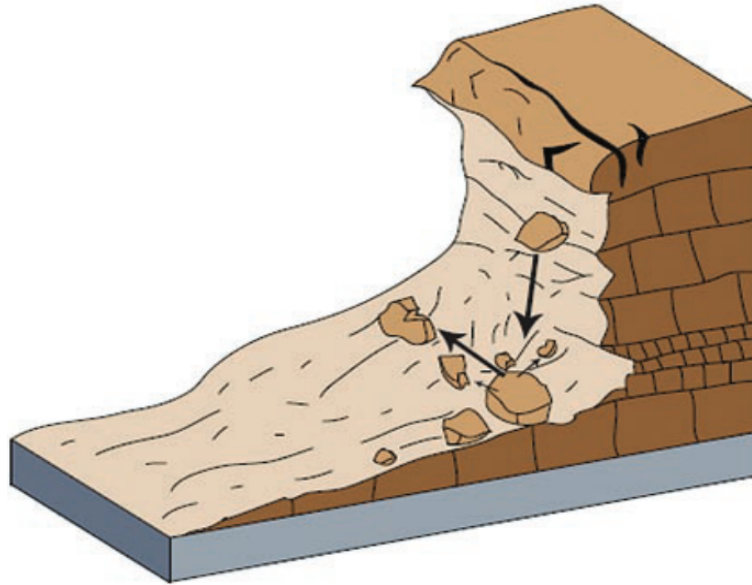
Glavni kriteriji korišteni u klasifikaciji nestabilnosti su vrsta pokreta i tip materijala. Vrste kretanja (definirane u nastavku) dijele se u pet glavnih skupina: odron , prevrtanja, klizanje, širenje tla i tok. Šesta skupina, složena kretanja na kosini, uključuje kombinacije dviju ili više od ostalih pet vrsta. Materijali se dijele u dvije klase: stijene i inženjersko tlo [23]. Prema [24], Varnesovoj klasifikaciji [23] su pridodani novi tipovi nestabilnosti te je kretanje materijala detaljnije podjeljeno. Tip nestabilnosti je nadalje podjeljen prema tipu tla (npr. klizanje rezidualnog tla) ili stijene (npr. klizanje složenih slabih sedimentnih stijena) koja se kreće te razlikuje više načina tečenja tla kao što su muljni tokovi, piješčani tokovi, blatni tokovi, zemljani tokovi, itd. [24]. U daljnjem tekstu je detaljnije opisana klasifikacija prema [23].

2.1 Tipovi nestabilnosti

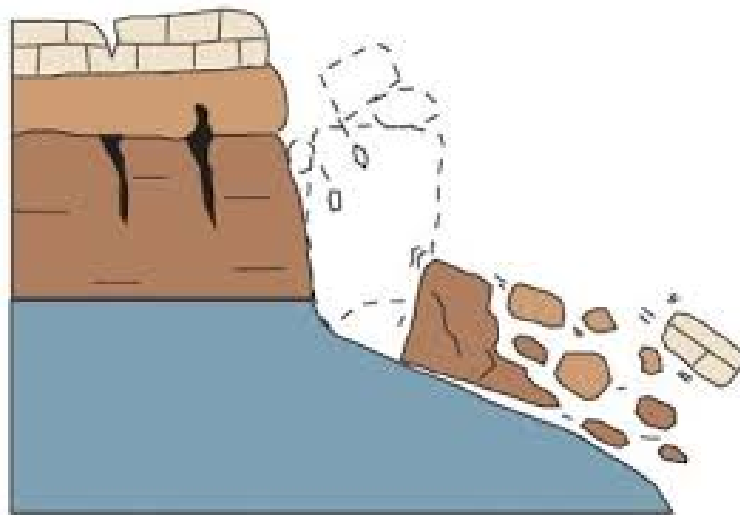
Odron (slika 2.1) podrazumjeva odvajanje mase bilo koje veličine od strme padine ili litice, duž površine na kojoj se odvija mali ili nikakav posmični pomak, te pada uglavnom kroz zrak slobodnim padom. Kretanja su vrlo brza do ekstremno brza i mogu im, ali i ne moraju prethoditi manji pokreti koji dovode do progresivnog odvajanja mase od njene glavnine. Odron je zapravo pad tek odvojene mase s područja stijenske podloge [23].

Prevrtanja (slika 2.2) nisu otpočetak prepoznata kao posebna vrsta kretanja. Ova vrsta kretanja sastoji se od rotacije odlomka ili više njih prema naprijed oko neke zakretne točke, ispod ili nisko u samom odlomku, pod djelovanjem gravitacije i sila koje prenose susjedni odlomci kosine ili tekućine u pukotinama [23].

Klizanje je u pravilu kretanje koje se sastoji od posmične deformacije i pomaka duž jedne ili više površina koje su vidljive ili se mogu predočiti, ili unutar relativno uske zone. Pokret može biti progresivan; to jest, posmični slom se u početku ne mora pojaviti istovremeno preko onoga što na kraju postaje definirana ploha sloma, već se može

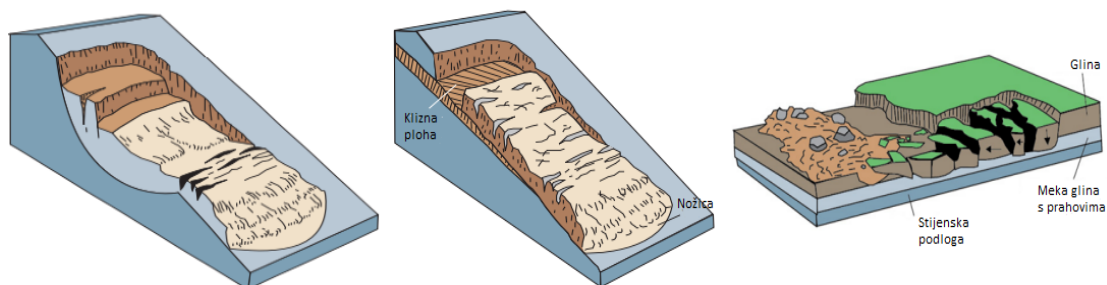


Slika 2.1: Tip nestabilnosti kosine - odron [1]



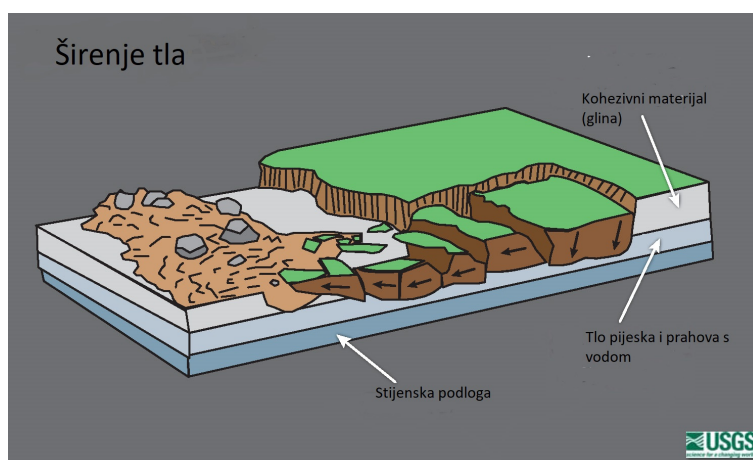
Slika 2.2: Tip nestabilnosti kosine - prevrtanje [1]

proširiti iz područja lokalnog sloma. Pomaknuta masa može skliznuti izvan izvorne površine puknuća na ono što je bila izvorna površina tla, koja tada postaje površina razdvajanja. Klizanje je nadalje podijeljeno u rotacijsko, translacijsko i blokovsko klizanje (slika 2.3) [23].



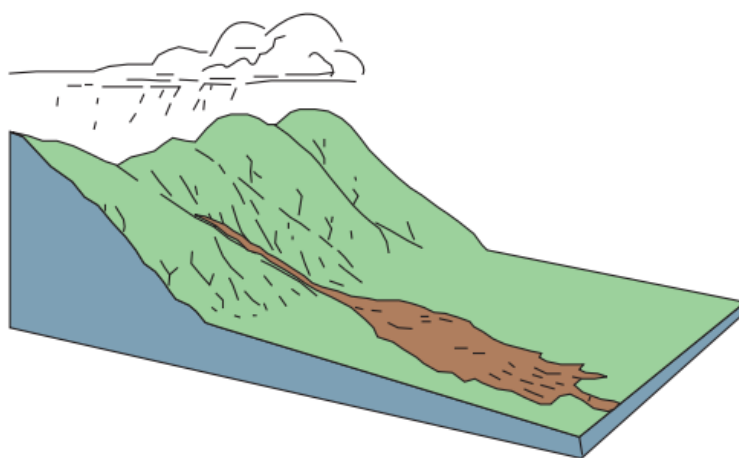
Slika 2.3: Tip nestabilnosti kosine - klizanje: (a) rotacijsko klizanje, (b) translacijsko klizanje i (c) blokovsko klizanje. Modificirano prema [1]

Kod širenja tla (slika 2.4), dominantni način kretanja je bočno izduživanje izazvano posmičnim ili vlačnim lomovima. Mogu se razlikovati dvije vrste. 1. Distribuirani pokreti rezultiraju ekstenzijom, ali bez prepoznate ili dobro definirane plohe sloma ili zone plastičnog toka. Pojavljuje se uglavnom u stijenskoj podlozi, posebno na vrhovima grebena. 2. Kretanja mogu uključivati lomljenje i širenje koherentnog materijala, bilo podloge ili tla, zbog ukapljivanja ili plastičnog toka materijala koji se nalazi ispod. Koherentni gornji dijelovi mogu se slegnuti, premjestiti, rotirati ili raspasti, ili mogu teći [23].



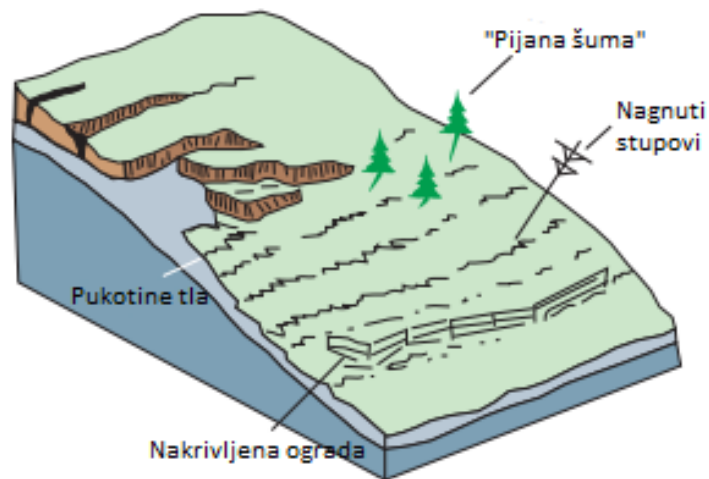
Slika 2.4: Tip nestabilnosti kosine - širenje tla, modificirano prema [2]

Tok tla (slika 2.5) podrazumjeva tečenja tla najčešće u nekonsolidiranim materijalima koje vrlo često započinje kao neki drugi tip nestabilnosti kao prevrtanje, odron ili klizanje prilikom čega kolazi do naglog gubitka kohezije u materijalu. Prilikom tečenje može postojati velika varijacija u brzini toka, granulometrijskom sastavu te sadržaju vode [23].



Slika 2.5: Tip nestabilnosti kosine - tečenje [1]

Jedan od glavnih tipova toka je puzanje (slika 2.6). Puzanje je neprimjetno sporo, ravnomjerno kretanje tla ili stijene koje oblikuju kosinu prema dolje. Pomicanje je uzrokovano posmičnim naprezanjem dovoljnim da proizvede trajnu deformaciju, ali premalim da bi došlo do sloma smicanjem. Općenito postoje tri vrste puzanja: (1) sezonsko, gdje je kretanje unutar dubine tla na koje utječu sezonske promjene vlažnosti tla i temperature tla; (2) kontinuirano, gdje posmično naprezanje kontinuirano premašuje čvrstoću materijala; (3) progresivno, gdje kosine dosežu točku sloma kao i druge vrste kretanja mase. Puzanje je najlakše prepoznati po zakrivljenim deblima stabala, savijenim ogradama ili potpornim zidovima, nagnutim stupovima ili malim valovima na površini tla [23].



Slika 2.6: Tip nestabilnosti kosine - puzanje, modificirano prema [1]

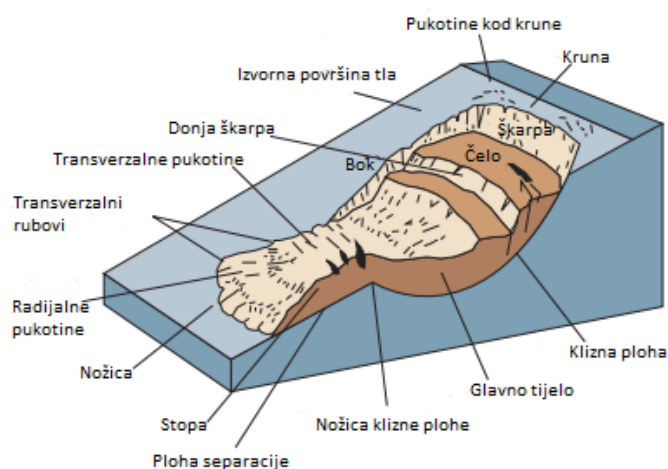
2.1.1 Osnovni dijelovi klizišta

Prema Varnesu [23], osnovni dijelovi klizišta su:

- 1) Kruna klizišta (Crown) - nepokrenuti materijal uz najviši dio iznad škarpe
- 2) Škarpa (Main scarp) - vidljivi vrh klizne plohe u neporemećenom tlu
- 3) Vrh klizišta (Top) - najviša točka kontakta pokrenute klizne mase i škarpe
- 4) Čelo klizišta (Head) - gornji dio kliznog tijela uz kontakt pokrenute klizne mase i škarpe
- 5) Donja škarpa (Minor scarp) - vlačna pukotina u pokrenutom materijalu klizišta nastala pomacima unutar pokrenute klizne mase
- 6) Glavno tijelo klizišta (Main body) - dio pokrenutog materijala klizišta koji prekriva kliznu plohu između škarpe i završetka klizne plohe
- 7) Stopa (Foot) - dio klizišta koji je pokrenut dalje od završetka klizne plohe
- 8) Dno klizišta (Tip) - najudaljenija točka u nožici klizišta gledano od vrha klizišta
- 9) Nožica (Toe) - donji rub pokrenutog materijala klizišta, obično zakrivljenog oblika, koji je najudaljeniji od škarpe
- 10) Klizna ploha (Surface of rupture) - ploha koja predstavlja donju granicu pokrenutog materijala, a koja se nalazi ispod izvorne površine terena

- 11) Nožica klizne plohe (Toe of surface of rupture - presječnica između donjeg dijela klizne plohe i izvorne površine terena
- 12) Ploha separacije (Surface of separation) - dio izvorne površine terena prekriven stopom klizišta
- 13) Pokrenuti materijal (Displaced material) - materijal pomaknut klizanjem iz svog prvobitnog položaja
- 14) Zona usjednutog materijala (Zone of depletion) - područje klizišta unutar pokrenutog materijala koje je niže od izvorne površine terena
- 15) Zona akumulacije (Zone of accumulation) - područje klizišta unutar pokrenutog materijala koje je više od izvorne površine terena
- 16) Usijedanje (Depletion) - volumen ograničen škarpom, usjednutom masom i izvornom površinom terena
- 17) Usjednuta masa (Depleted mass) - masa (volumen) pokrenutog materijala koji leži na kliznoj plohi, ali ispod izvorne površine terena
- 18) Akumulacija (Accumulation) - volumen pokrenutog materijala koji leži iznad izvorne površine terena
- 19) Bok (Flank) - nepokrenuti materijal uz bočni dio plohe sloma
- 20) Izvorna površina terena (Original ground surface) - površina kosine koja je postojala prije nego je došlo do klizanja

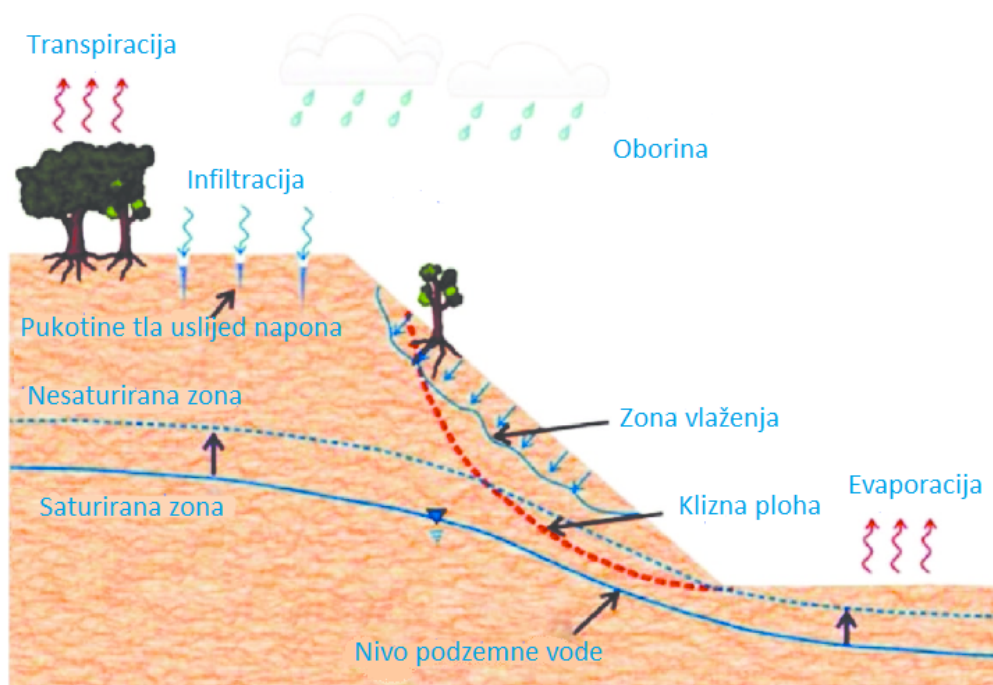
Te su prikazani na slici 2.7.



Slika 2.7: Osnovni dijelovi klizišta, modificirano prema [1]

2.2 Utjecaj oborine na klizišta

Postoje mnogi čimbenici koji utječu na stabilnost padina, kao što su materijali koji čine samu padinu, položaj podzemne vode i sukucija tla [25, 26]. Nestabilnost padine je uzrokovana slabostima materijala koji čini padinu, što u početku može biti potaknuto promjenama svojstava tla. Oborina je jedan od glavnih pokretača koji čini nekoliko varijacija u svojstvima tla [26]. Oborina povećava pritisak vode u porama i te time smanjuje efektivno naprežanje u tlu, a posljedično tome i čvrstoću tla. Osim toga, zasićenost tla na prvih 0,3 do 0,4 m dovodi do redukcije sukucije tla i izaziva plitko klizište (slika 2.8). Oborina slabog intenziteta koja traje dulje vrijeme povećava razinu podzemne vode i rezultira dubokim klizištem, obično nakon nekoliko ciklusa padanja [27].



Slika 2.8: Mehanizam sloma padine uzrokovanog oborinom, modificirano prema [3]

Propusnost tla značajno utječe na infiltraciju oborina unutar padine koju čini nesaturirano tlo. Veće količine oborinske vode infiltriraju se u tla koja tvore padinu i koja se odlikuju visokom propusnošću, što uzrokuje smanjenje sukucije tla zbog saturacije [28]. Infiltracija oborinske vode u tlo s visokom propusnošću smatra se većom od propusnosti tla u početku do čak 3,5 puta, a zatim počinje degradirati prema stacionarnim uvjetima [28, 29]. Suprotno tomu, kada je intenzitet oborina nizak, infiltracija je niska na vrhu padine i zatim postupno raste prema stacionarnim uvjetima [30]. Tijekom dugog vremenskog razdoblja, kiša niskog intenziteta možda je nesigurnija od jake kiše koja se dogodi kratkotrajno jer uzrokuje slom padine zbog smanjenja sukucije tla u prvih 20 do

50 cm tla. Obilne oborine tijekom dugog razdoblja smanjuju stopu procjeđivanja unutar nagiba tla [27, 29, 31]. Iznenadno povećanje pornog tlaka zbog oborina omekšava materijal i obično dolazi do sloma padina. Nivo podzemne vode se podiže i rezultira plitkim klizištem zbog povišene podzemne vode, primjer klizišta na slici 2.9.



Slika 2.9: Klizište u selu Flegi, općina Motovun [4]

Zbog infiltracije oborina, klizišta se obično povezuju s napredovanjem zone vlažnosti, tj. zone koju karakterizira strmi hidraulički gradijent i čini oštru granicu između vlažnog i suhog tla, u nesaturiranim tlima, a čini se da je kritični faktor sigurnosti na istoj dubini kao i zona vlažnosti [28, 29, 31]. Sile procjeđivanja u tlima s niskom gustoćom zbijenosti imaju značajan utjecaj na brzinu procjeđivanja. Sile procjeđivanja koje su proporcionalne intenzitetu oborina i koeficijentu pora mogu uzrokovati nastanak klizišta [27, 32].

Uobičajena metoda za izračunavanje stabilnosti kosina je analiza granične ravnoteže u mehanici tla. Stabilan nagib može se održati samo kada je faktor sigurnosti (F , izraz (2.1)) veći ili jednak 1 [18], a ovisi o težini tla, pritisku vode u porama i kutu nagiba.

$$F = \tau_S / \tau_R \quad (2.1)$$

gdje je: τ_S - Raspoloživa čvrstoća na smicanje, koja ovisi o težini tla, koheziji, kutu trenja i pornom tlaku, τ_R - Ravnotežni posmični napon koji je potreban za održavanje stabilnosti padine.

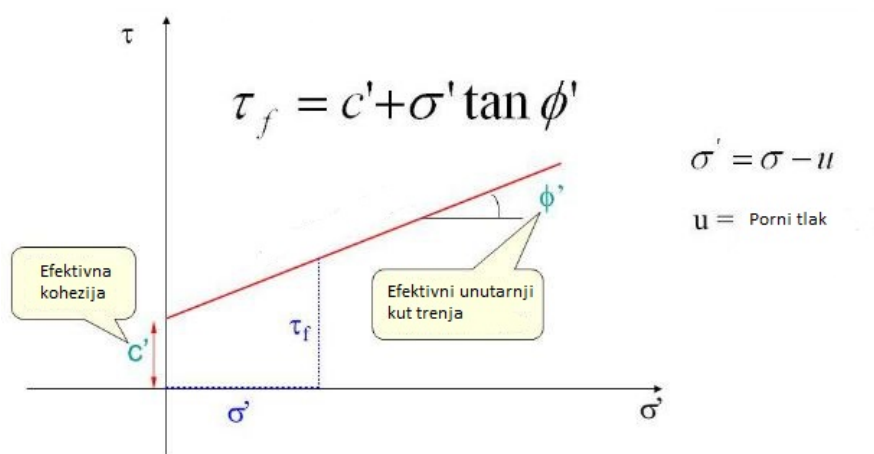
Posmična čvrstoća jednaka je maksimalnom posmičnom naprežanju koje može apsorbirati

rati kosina bez sloma i može se definirati Mohr-Coulombovim kriterijem čvrstoće (slika 2.10):

$$\tau_s = c + \sigma' \cdot \tan \phi \quad (2.2)$$

gdje je: c - kohezija, σ' - Ukupno normalno naprezanje koje djeluje na površinu i ϕ - kut unutarnjeg trenja

Terzaghi [33] je prvi otkrio da tlak vode u porama kontrolira otpor trenja padine, što je ostao najvažniji koncept u razumijevanju ponašanja klizišta. Temeljno načelo stabilnosti padine je da porast tlaka vode u porama smanjuje čvrstoću tla na smicanje. Posmična čvrstoća tla, posebno glina, kontrolirana je otporom trenja i silama među česticama. Gustoća i posmična čvrstoća tla rastu s povećanjem konsolidacije. Do porasta tlaka vode u porama dolazi kada je zasićeno tlo pod stresom i kada se poroznost ne može povećati ili se tekućina iz pora ne može proširiti ili izaći kroz pukotine [16].



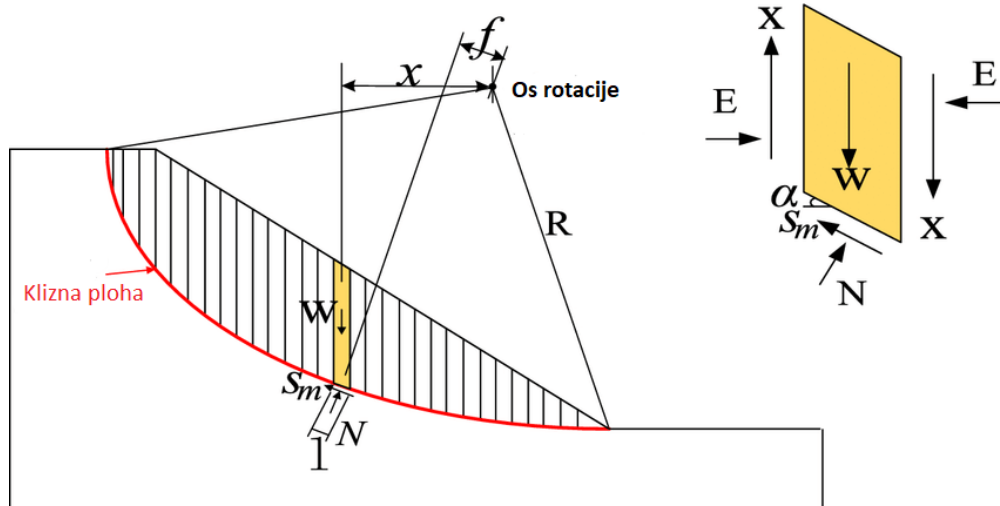
Slika 2.10: Mohr-Coulombov kriterij sloma [5]

2.3 Numeričke metode u analizi kosine

Nakon što su predmet interesa i mehanizmi definirani, potrebno je odabrati numeričku metodu. Ovaj izbor potaknut je tehničkom sposobnošću metode da obuhvati ispravnu mehaniku i proizvede željene rezultate. Odabir metode također ovisi o dostupnosti metode (softvera) i raspoloživih računalnih resursa jer su neke metode skupe. Izbor numeričkih metoda utječe na idealizaciju problema. Na raspolaganju je veliki broj različitih računalnih metoda u rasponu od najjednostavnijih (npr. empirijskih metoda) do naprednijih metoda (npr. metoda konačnih elemenata, metoda materijalne točke). Svaka metoda ima svoje prednosti i ograničenja. Nekoliko glavnih metoda je sažeto u daljnjem tekstu [12].

2.3.1 Metode granične ravnoteže

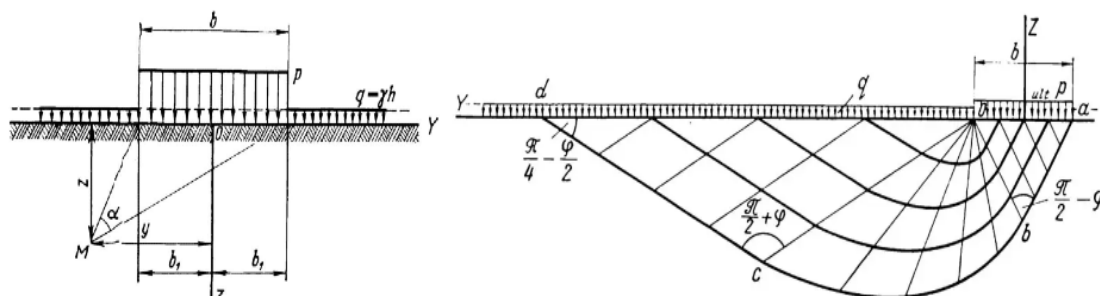
Metode granične ravnoteže (eng. *The Limit Equilibrium Method*, nadalje LEM) obično rastavljaju problem na dijelove ili blokove i provjeravaju je li tlo u stanju ravnoteže (slika 2.11). To se postiže rješavanjem Newton-ovih jednadžbi i postavljanjem kriterija sloma. Korištenje jednostavnog kriterija sloma podrazumijeva da se slom određuje samo iz stanja naprezanja i zanemaruje put naprezanja do sloma, te da kriterij vrijedi svugdje duž površine sloma [34], ali rezultirajuća naprezanja ne zadovoljavaju nužno ravnotežu u svakoj točki. Površinu sloma mora definirati korisnik, što često zahtijeva mnogo ispitivanja kako bi se odredilo kritično stanje. Ove metode također idealiziraju uvjete odvodnje kao drenirane ili nedrenirane, isključujući djelomično drenirane uvjete iz analize [34, 35]. LEM je ne zahtijeva velike računalne resurse i lako se može izvesti ručno ili s proračunskom tablicom, čak i za veliki broj slučajeva. LEM odvaja deformaciju od čvrstoće i ne uspijeva prikazati bilo koji oblik interakcije u analizu. Međutim, duga povijest ovih metoda rezultirala je široko dostupnim alatima i opsežnim zajedničkim iskustvom u pogledu njihove pouzdanosti [12, 36].



Slika 2.11: Metoda granične ravnoteže - metoda lamela, modificirano prema [6]

2.3.2 Metode granične analize

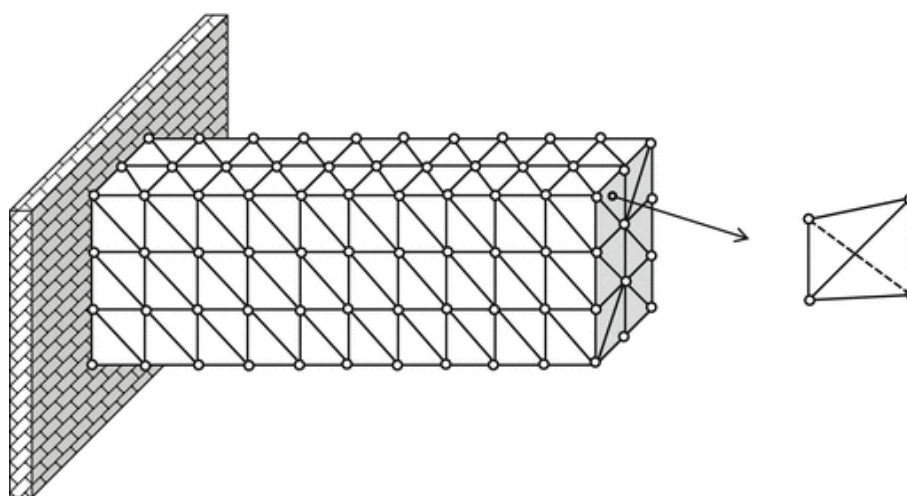
Metode granične analize (eng. *The Limit Analysis Method*, nadalje LAM) temelje se na teoriji plastičnosti i normalnosti. Teorem donje granice (slika 2.12) traži polja naprezanja takva da je ravnoteža zadovoljena, ali ne i uvjete kompatibilnosti. Moguće je imati različita polja naprezanja koja zadovoljavaju iste uvjete. Teorem gornje granice traži kinematički prihvatljivo polje brzine koje zadovoljava granične uvjete brzine [9, 36]. Dolazi do rješenja u nedostatku ravnoteže dajući nesigurne procjene. Ljudska procjena uvijek će biti gornja granica jer će tlo uvijek pronaći pametnije načine sloma [12]. Granični teoremi plastičnosti daju fleksibilnija i sveobuhvatnija rješenja jer gornja granica uvodi kinematičku kompatibilnost u skladu s hipotezom povezanog kriterija sloma, koji je odsutan u LEM-u. Kombinacija LAM-a s FEM-om (metoda konačnih elemenata) i optimizacijskim algoritmima rezultirala je brzim računalnim programima za analizu stabilnosti [12, 36]. LimitStateGEO je jedan od računskih software koji se koristi u za analizu graničnog stanja ili projektni problem koji uključuje stabilnost padine, nosivost, zidove, temelje, ojačano tlo ili složene kombinirane sustave [37] te Optum CE [38].



Slika 2.12: Teorem gornje i donje granice [7]

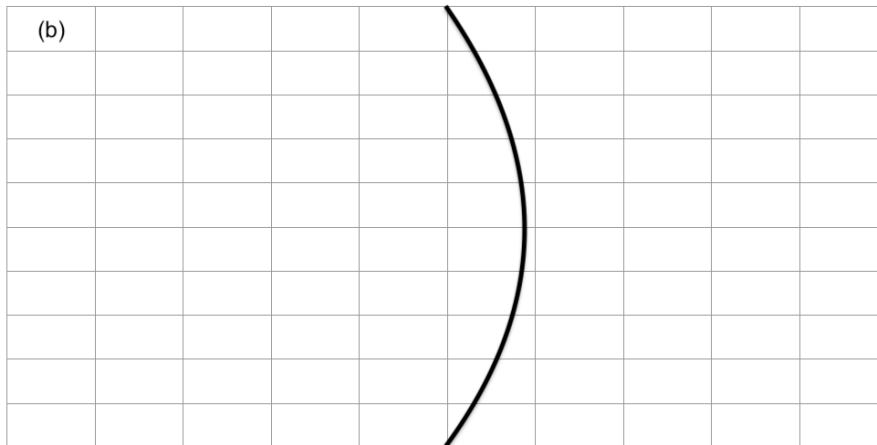
2.3.3 Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata (eng. *The Finite Element Method*, nadalje FEM) rješava Newtonove jednačbe kako bi se dobila stanja naprezanja i deformacije s obzirom na opterećenje i diskretizira kontinuum na elemente koji se ne preklapaju (slika 2.13).

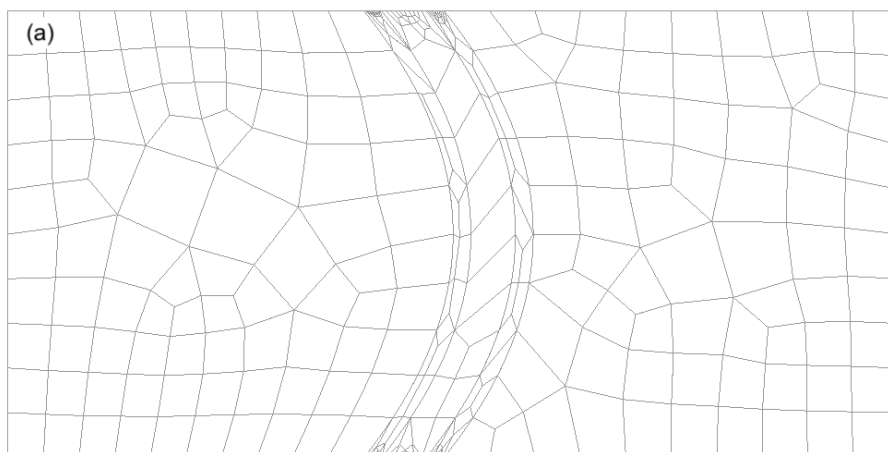


Slika 2.13: Prikaz konzole podjeljene na konačne elemente u 3D [8]

Također, omogućuje korištenje složenih modela tla. FEM je najpopularnija numerička metoda u geotehničkom inženjerstvu. Međutim, FEM nije optimiziran za simulacije velikih deformacija zbog problema s iskrivljenjem mreže. Međutim, napredni algoritam kao što je proizvoljni Lagrangian-Eulerian FEM (ALE FEM) nudi slobodu u mijenjanju računске mreže, ali zahtijeva značajan računalni napor u nekim slučajevima [12]. Ovisno o načinu na koji se diskretizira polje razlikujemo Lagrangeovu i Eulerovu diskretizaciju (slike 2.14, 2.15). Eulerova analiza općenito se odnosi na tekućinu (nije ograničena na tekućine), a Lagrangeova analiza na krute čestice. Osnovna logika iza Eulerovih elemenata je da mreža ostaje fiksirana i da se materijal može kretati iz jednog elementa u drugi dok se kod Lagrangea elementi uklapaju sa modelom [9]. Najpoznatiji FEM software-i su PLAXIS te Abaqus [39, 40].



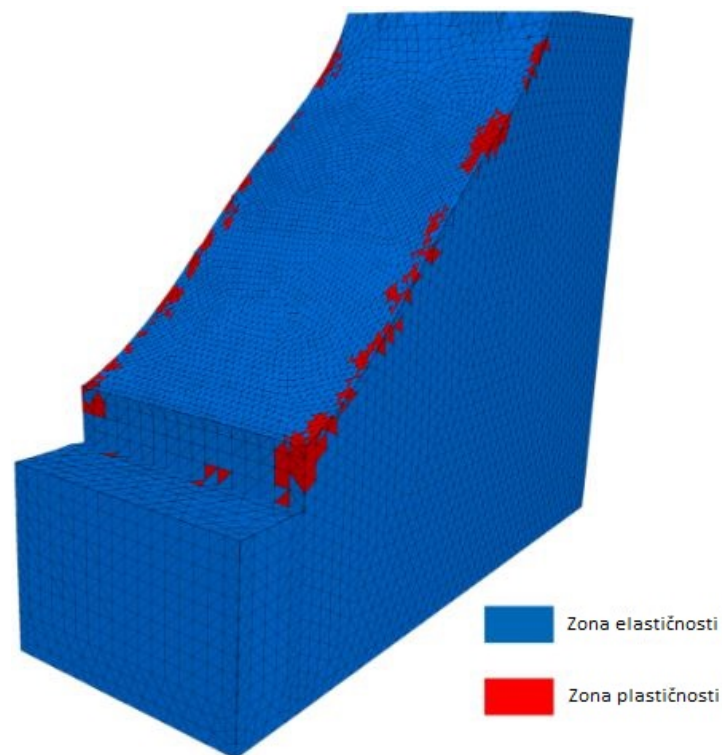
Slika 2.14: Prikaz Eulerove diskretizacije [9]



Slika 2.15: Prikaz Lagrangeove diskretizacije [9]

2.3.4 Metoda konačnih razlika

Metoda konačnih razlika (eng. *The Finite Difference Method*, nadalje FDM) (slika 2.16) aproksimira derivacije u parcijalne diferencijalne jednačbe linearnim kombinacijama vrijednosti funkcije u točkama mreže. Sposoban je simulirati velike probleme deformacije ažuriranjem koordinata mreže. Također koristi prizmatične elemente što otežava modeliranje složenih geometrija [12]. U praksi se najčešće koristi u dinamici fluida i termodinamici. Poznatiji računski software-i koji koriste FDM su PLAXIS [39] te Dedalus [41] i Fenics project [42] koji služe samo za rješavanje diferencijalnih jednažbi. Jedan od računskih software-a koji se koristi konačnim razlikama je FLAC2D [43].



Slika 2.16: Prikaz mreže elemenata metode konačnih razlika, modificirano prema [10]

3. OSNOVE METODE MATERIJALNE TOČKE (MPM)

Metoda materijalne točke (eng. *The Material Point Method*, nadalje MPM) jedna je od velikog broja numeričkih metoda koje se razvijaju za simulaciju problema interakcije tla, vode i strukture u materijalima i uključuju velike deformacije. MPM kombinira prednosti pristupa koji se temelje na mreži i na točkama: izobličenje mreže može se eliminirati, a povijest se pohranjuje u materijalnim točkama (eng. *The Material Point*, nadalje MP). MPM je napredna formulacija metode konačnih elemenata (FEM) gdje je tijelo kontinuuma predstavljeno skupom Lagrangeovih točaka, koje se nazivaju materijalne točke. Materijalne točke se kreću kroz Eulerovu računsku mrežu. MP prenose sva fizikalna svojstva kontinuuma kao što su brzine, naprezanja, deformacije, gustoća, moment, materijalni parametri i drugi parametri stanja, dok se mreža koristi za rješavanje jednadžbi ravnoteže bez pohranjivanja ikakvih trajnih informacija [12].

Sposobnost numeričkog modela da održi točnost ovisi o poštivanju tri osnovna zakona kontinuuma: (i) zakon očuvanja mase (izraz 3.1), (ii) zakon očuvanju momenta količine gibanja (izraz 3.2) i (iii) zakon o očuvanju mehaničke energije (izraz 3.3) [44, 45].

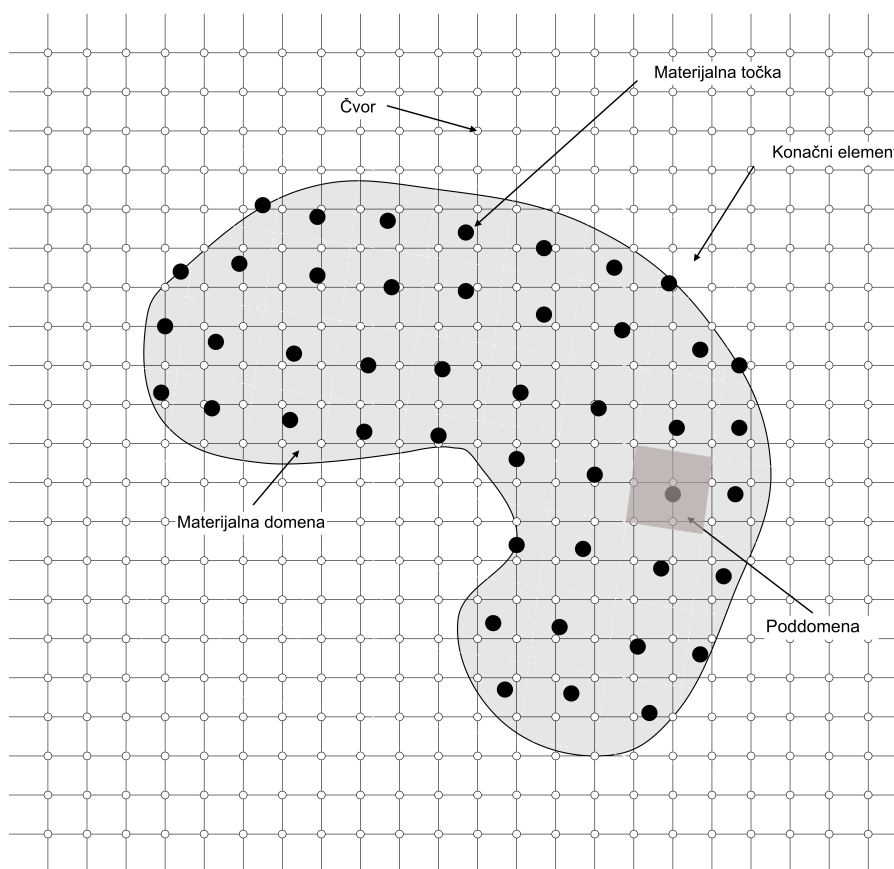
$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} + \nabla \cdot \sigma + \rho b \quad (3.2)$$

$$\rho \frac{dE}{dt} = \sigma : \frac{d\varepsilon}{dt} + \rho v \cdot b \quad (3.3)$$

U MPM-u, računski domena je prostorno diskretizirana u dva okvira kao što je prikazano na slici 3.1. Prvo, tijelo kontinuuma je podijeljeno na skup materijalnih točaka. Svaka točka predstavlja inicijalno definirani dio domene i masu te poddomene. Jedna od osnovnih i najvažnijih karakteristika MPM-a je da masa svake točke ostaje strogo konstantna što implicira da je očuvanje mase automatski zadovoljeno, dok se volumen točaka može mijenjati omogućujući kompresiju ili rastezanje materijala. U standard-

nom MPM-u, smatra se da je masa koncentrirana na odgovarajuću materijalnu točku. Druge veličine, kao što su brzine, deformacije i naprezanja, također se inicijaliziraju i prenose na točke. Svaka točka se kreće u odnosu s deformacijama tijela. Drugi okvir je računski mreža koja je ekvivalentna konvencionalnoj mreži konačnih elemenata. Konstruiran je tako da pokriva cijelu domenu problema, uključujući prazne prostore u koje se očekuje da će se točke kretati tijekom izračuna. Diskretizirane jednadžbe ravnoteže momenta obično se rješavaju u čvorovima ove računski mreže, dok se jednadžbe očuvanja mase i konstitutivne jednadžbe rješavaju u samoj materijalnoj točki [12].

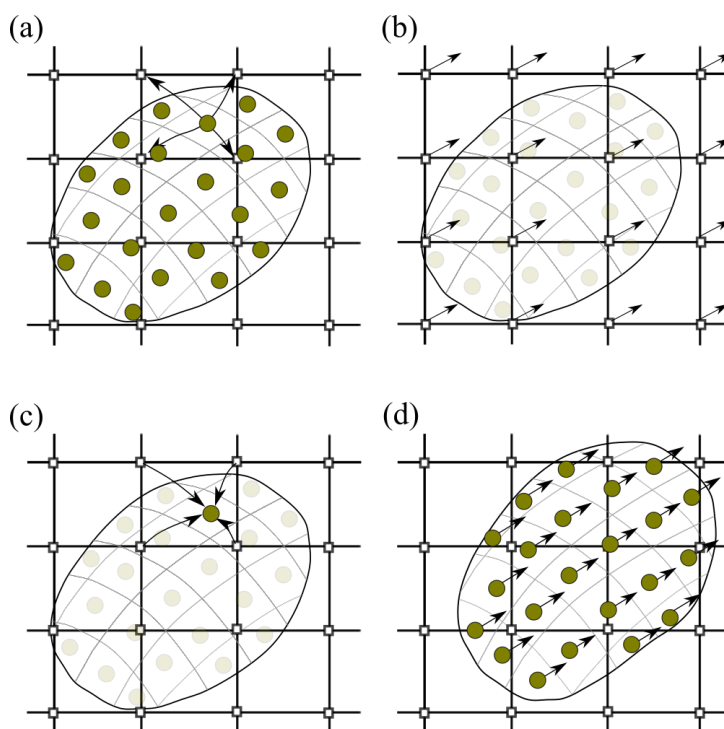


Slika 3.1: Shema prostorne diskretizacije metodom materijalne točke modificirano prema [11]

Informacije potrebne za rješavanje jednadžbi ravnoteže na računskoj mreži u bilo kojem trenutku analize prenose se sa točaka na čvorove mreže pomoću funkcija preslikavanja, tj. tipičnih funkcija oblika koje se također koriste u FEM-u. Nakon rješavanja jednadžbi ravnoteže korištenjem sheme inkrementalne vremenske integracije, količine koje prenose točkama ažuriraju se interpolacijom rezultata mreže, koristeći iste funkcije preslikavanja. Informacije povezane s mrežom nisu potrebne za sljedeći korak analize. Stoga se može odbaciti izbjegavajući bilo kakvu distorziju mreže [12].

Primjena inženjerskih rubnih uvjeta je olakšana. Na primjer, naprezanja i pomaci, ili njihove brzine, mogu se primijeniti na bilo koji mrežni čvor granice ili izravno na točke. Dodatna prednost MPM-a je opis materijala za koji se mogu primijeniti dobro poznati konstitutivni modeli, koji opisuju odnos naprezanje-deformacija materijala. Nedostaci MPM-a su, na primjer, njegova ovisnost o mreži, koja je glavni problem u bilo kojoj formulaciji konačnih elemenata, njegovi računalni troškovi i problemi stabilnosti uzrokovani materijalnim točkama koji prelaze granice elemenata [12].

Na slici 3.2 prikaz je izračun MPM algoritma za jedan korak u odgovarajućem vremenskom inkrementu. Na početku svakog koraka, komponente jednadžbi ravnoteže momenta definiraju se preslikavanjem informacija iz točaka u čvorove računske mreže pomoću interpolacije ili funkcija oblika (slika 3.2 a). Jednadžbe gibanja rješavaju se za primarne nepoznate varijable, tj. čvorne akceleracije (slika 3.2 b). Ove nodalne vrijednosti koriste se za ažuriranje ubrzanja, brzine i položaja materijalnih točaka, kao i za izračunavanje deformacija i naprezanja na točku (slika 3.2 c). U tom trenutku, na mreži se više ne pohranjuju trajne informacije. Stoga se može slobodno redefinirati na kraju svakog vremenskog koraka, ali obično se drži fiksnim. Pozicija točaka u odnosu na element kojem su dodijeljene ažurira se nakon podešavanja mreže (slika 3.2 d) [12].



Slika 3.2: MPM algoritam za jedan računski korak vremenskog inkrementa: (a) prijenos informacija sa materijalne točke na čvorove, (b) rješavanje jednadžbi ravnoteže, (c) mapiranje polja brzine na točke, (d) ažuriranje položaja točke. Modificirano prema [12]

4. NUMERICKE SIMULACIJE UMANJENOG MODELA KLIZIŠTA

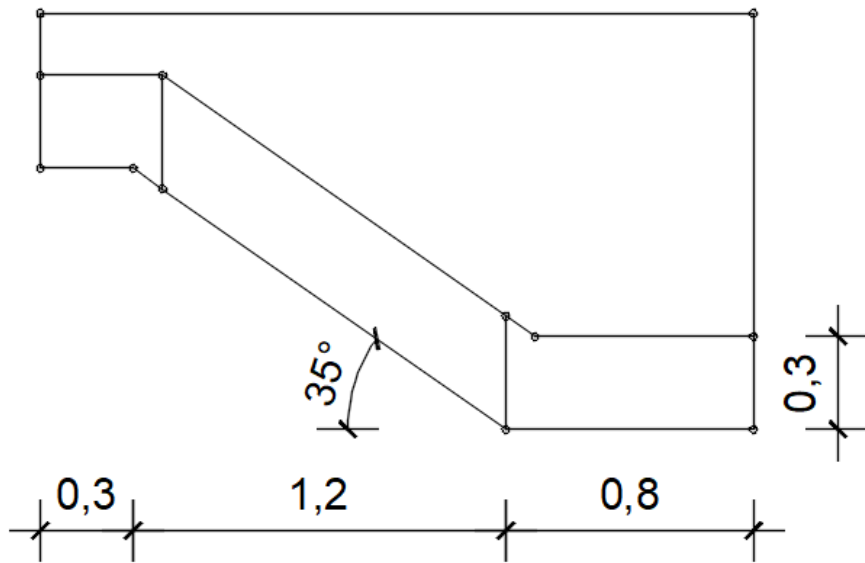
4.1 Metodologija

Za potrebe ovog rada izrađeno je ukupno 18 različitih modela umanjenog klizišta. Devet modela je izrađeno za ispitivanje ponašanja tla uslijed djelovanja gravitacije dok je drugih devet izrađeno za ispitivanje ponašanja tla uslijed djelovanja gravitacije i oborine, infiltracije vode. Modeli su podjeljeni prema:

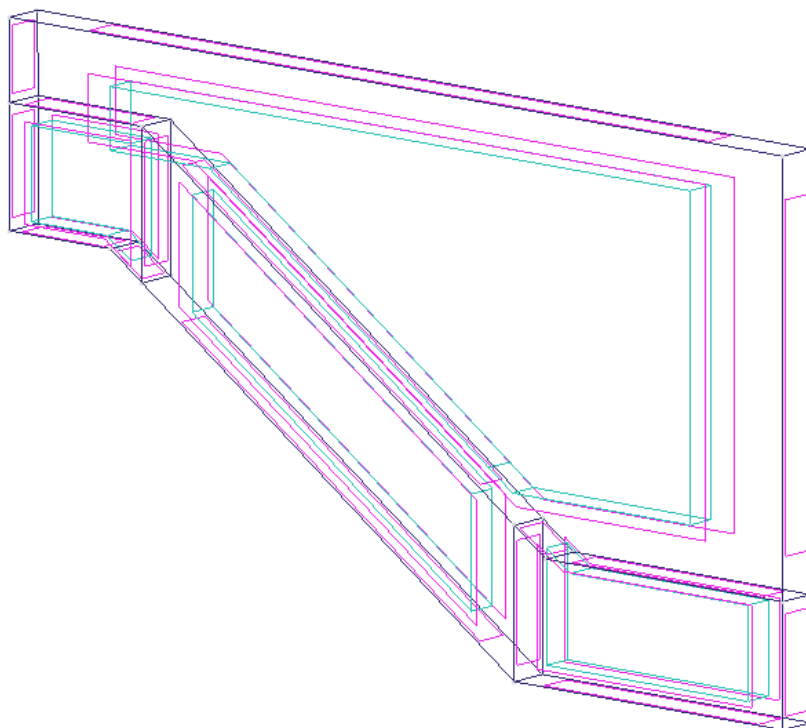
- 1) Nagibu padine
- 2) Miješavini tla, materijalu koji čini padinu
- 3) Uvjetima u kojima se ispituje ponašanje tla

4.1.1 Geometrija modela

Kod izrade modela koristila su se tri različita nagiba padine, 30° , 35° (4.1) i 40° . Geometrija modela je izrađena po umanjenom fizičkom modelu klizišta koji se nalazi u laboratoriju za geotehniku na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Model klizišta je izrađen u dvije razine (etaže) te kosine koja ih povezuje. Duljina gornje etaže iznosi 30 cm dok je donja etaža 80 cm. Ukupna dužina modela je 2,3 m. Na kosini se nalazi materijal u visini stupca od 30 cm. Modeli za ispitivanje ponašanja tla uslijed gravitacije su izrađeni u 3D (slika 4.2), za debljinu modela je uzeto 0,1 m dok su modeli za ispitivanje ponašanja tla uslijed oborine napravljeni u 2D zbog ograničenja software-a. Modeli se sastoje od točaka, linija, površina te volumena (vrijedi samo za 3D).



Slika 4.1: Prikaz dimenzija [m] modela padine od 35° primjenom CAD alata



Slika 4.2: Model padine od 35° kreiran u GiD pred-procesoru

4.1.2 Značajke tla

Ponašanje tla uslijed djelovanja gravitacije i oborine je ispitano na tri različite miješavine tla. Miješavine se sastoje od Dravskog pijesak te kaolina, a razlikuju se u postotku kaolina u samoj miješavini. U tablici 4.1 su prikazani modeli s obzirom na nagib kosine i udio kaolina.

Tablica 4.1: Tablica miješavina tla s pripadajućim nagibom te sastavom miješavine za koje su izrađeni modeli

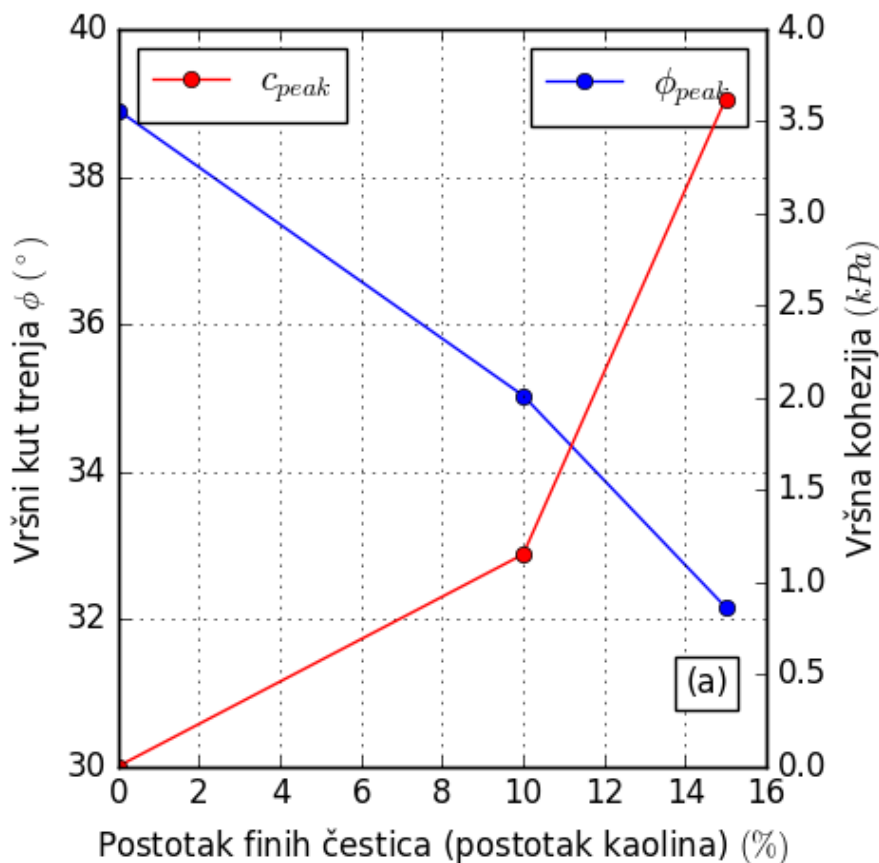
Naziv	Nagib Kosine [°]	Komponente miješavine [%]
Modland	30, 35, 40	Pijesak - 100, Kaolin - 0
Kaoland10	30, 35, 40	Pijesak - 90, Kaolin - 10
Kaoland15	30, 35, 40	Pijesak - 85, Kaolin - 15

Za ispitivanje ponašanja tla uslijed gravitacije značajke za sve tri miješavine tla su dane u tablici 4.2.

Tablica 4.2: Osnovne značajke materijala - Statički modeli

	Modland	Kaoland10	Kaoland15
Tip materijala		suhi materijal	
e		0.77	
G_s [kN/m^3]	2.7	2.69	2.67
Konstitutivni model		Mohr-Coulomb	
ν		0.3	
Youngov modul elastičnosti, E [kPa]		10000	
c [kPa]	0	1.1	3.6
ϕ [°]	35	33	32

Za statičke modele materijal je definiran kao suhi materijal. Početni parametar koji se definirao je koeficijent pora, za sve tri miješavine iznosi 0.77 te se s obzirom na njega, prema slici 4.3 [13], odredio kut unutarnjeg trenja te kohezija.



Slika 4.3: Graf ovisnosti kuta unutarnjeg trenja i kohezije s obzirom na udio čestica kaolina za $e = 0.77$ [13]

Kod tranzitnih modela za tip materijala je odabran nesaturirani materijal u dvije faze sa sukijom. Značajke materijala za sve tri miješavine su dane u tablici 4.3. Osnovne značajke su iste kao i kod statičkih modela osim kohezije. Volumenski modul tekućine uzet je prema primjeru 12.3 iz [46] i iznosi $60 \cdot 10^3$ kPa. Volumenski modul vode, relativna promjena volumena tijela uzrokovana jediničnim tlačnim ili vlačnim naprezanjem koje jednoliko djeluje na njegovu površinu definirano prema [47], je zadan za oko sto puta manji od stvarne vrijednosti no i dalje je značajno veći od Young-ovog modula, smanjenje volumenskog modula nam omogućuje da rasteretimo komputaciju a zadržimo realistične rezultate [46]. Dinamična viskoznost tekućine, definirana kao otpor gibanju jednog sloja tekućine preko drugog prema [48], je također uzeta iz primjera 12.3 [46]. Za zadavanje početnih naprezanja u modelu koristi se K_0 procedura te iznosi 0.5. Prema [49], K_0 je koeficijent mirnog potiska tla te je definiran kao omjer horizontalnog efektivnog naprezanja σ_x i vertikalnog efektivnog naprezanja σ_z tla pri nultom bočnom defor-

Tablica 4.3: Osnovne značajke materijala - Tranzitni modeli

	Modland	Kaoland10	Kaoland15
Tip materijala	nesaturirani materijal sa sukcijom		
e		0.77	
G_s [kN/m^3]	2.7	2.69	2.67
K_0		0.5	
Propusnost tla [m^2]	3.5e-12	3.4e-12	3.3e-12
Volumenski modul tekućine [kPa]		60000	
Dinamična viskoznost tekućine [$kPa \cdot s$]		1e-6	
Konstitutivni model		Mohr-Coulomb	
ν		0.3	
E [kPa]		10000	
c [kPa]	0	1.1	3.6
ϕ [°]	35	33	32
Krivulja retencije vode		linearna	
Koeficijent linearnosti		4e-4	
Krivulja hidraulične provodljivosti		konstanta	

macijom. K_0 procedura održava konstantan odnos između vertikalnog i horizontalnog naprezanja prema formuli:

$$\sigma_x = K_0 \cdot \sigma_z \quad (4.1)$$

gdje je: σ_x - horizontalno naprezanje, a σ_z - vertikalno naprezanje

Kod statičkih modela vrijedi $K_0 = 0$, stoga se koristi formula:

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (4.2)$$

gdje je:

- ν - poissonov koeficijent

Prema Špoljarić [50], koeficijent propusnosti za modland iznosi $3.39e-3$ cm/s. Koeficijent propusnosti za kaoland10 i kaoland15 je umanjen za 2% i 5% u odnosu na modland. Propusnost tla je dobivena prema formuli:

$$K_o = \frac{K \cdot \mu}{\gamma/1000} \quad (4.3)$$

gdje je:

- K - koeficijent propusnosti
- μ - dinamična viskoznost vode
- γ - specifična težina vode

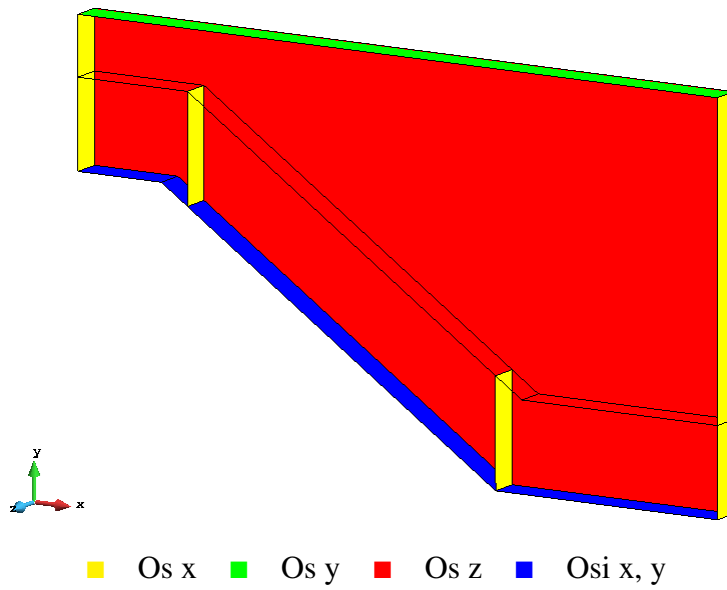
Vrijednosti ostalih parametara kao što su krivulja retencije vode, koeficijent linearnosti te krivulja hidraulične provodljivosti su odabrani kako bi se smanjilo vrijeme potrebno za provedbu simulacije te pojednostavljenja.

4.2 Parametri modela

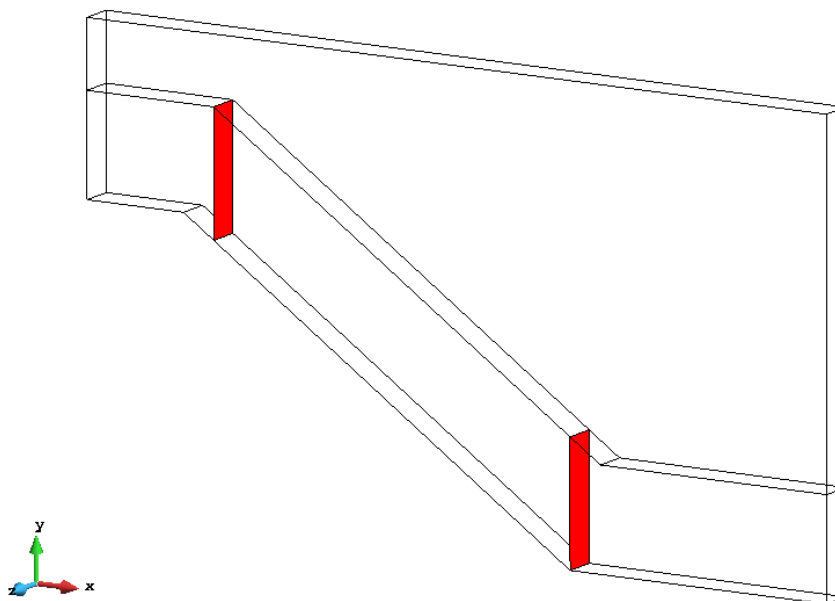
U ovom poglavlju prikazan je način definiranja modela te početni parametri statičkih i tranzitnih modela. Za svaki model potrebno je odrediti njegove rubne uvijete, broj materijalnih točaka po elementu mreže, napraviti diskretizaciju modela te odrediti postavke po kojima će se provesti komputacija.

4.2.1 Statički model

Kod statičkih modela postoji samo miješavina tla odnosno kruta tvar, stoga je potrebno odrediti samo rubne uvijete za krute čestice. Modeli su napravljeni u tri dimenzije stoga se granice određuju na površine modela. Model je ograničen pomacima na rubovima modela referentom osi osim dno modela kojem je spriječen pomak u x i y osi. Dvije dodatne granice su definirane na početku i kraju kosine te će se one na početku druge faze proračuna ukloniti (slika 4.5. Na slici 4.4 je prikaz rubnih uvijeta za statičke modele nagiba kosine od 35° .

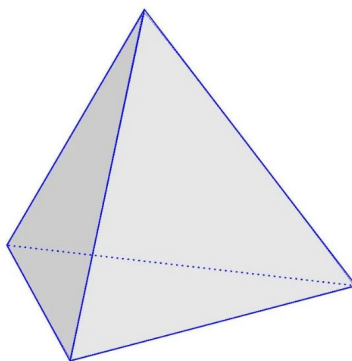


Slika 4.4: Rubni uvijeti statičkih modela



Slika 4.5: Granice modela koje se uklanjaju u drugoj fazi komputacije

Izrađena je ne strukturirana mreža konačnih elemenata koja se sastoji od dvije različite veličine tetraedara (slika 4.6).



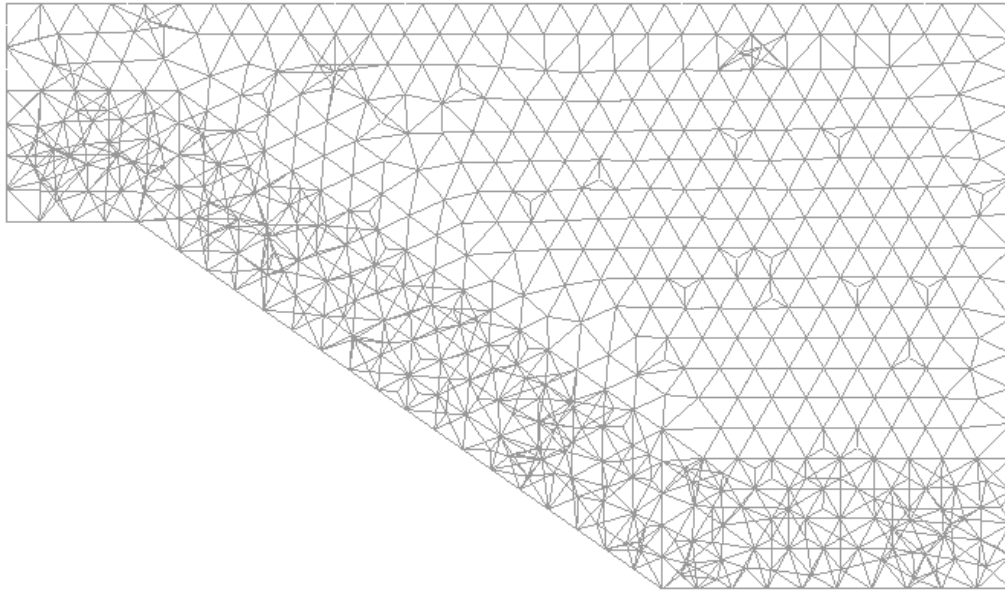
Slika 4.6: Prikaz oblika tetraedra

Prostor materijala tj. kosine se diskretizirao elementima veličine 0.08 m dok je ostali dio modela diskretiziran elementima veličine 0,2 m. Korištenje dvije veličine elemenata omogućuje da se smanji ukupan broj elemenata tako da se elementi prostora povećaju odnosno omoguće progušćivanje mreže materijala. To nam omogućuje da u modelu definiramo samo jednu materijalnu točku po elementu i zadržimo odgovarajuću gustoću mreže. U tablici 4.4 je prikazana struktura mreže za različite nagibe kosine dok je na slici 4.7 prikazana mreža modela nagiba kosine 35° .

Tablica 4.4: Struktura mreže diskretiziranih statičkih modela

Nagib kosine	Broj čvorova	Broj elemenata / materijalnih točaka
30°	6035	3182
35°	6238	3291
40°	6513	3458

Proračun simulacije se izvodi u dvije faze. U prvoj fazi koju čini jedan korak u trajanju od pola sekunde, modelu nanosimo početna naprezanja koju čini djelovanje gravitacije te težina samog materijala. Model se u prvoj fazi nalazi u kvazi statičkom stanju. Prvu fazu još definira homogeno lokalno prigušenje materijala čiji koeficijent iznosi 0.75 i pridonosi stabilnošću modela. Kraj prve faze, odnosno početak druge faze, je definiran prekidom statičkih uvijeta, smanjenju prigušenja tla na 0.05 te uklanjanjem granica na početku i kraju modela (slika 4.5). Promjenom postavki omogućuje se slobodno djelovanje naprezanja te pomak materijalnih točaka odnosno materijala.



Slika 4.7: Diskretizacija statičkog modela konačnim elementima

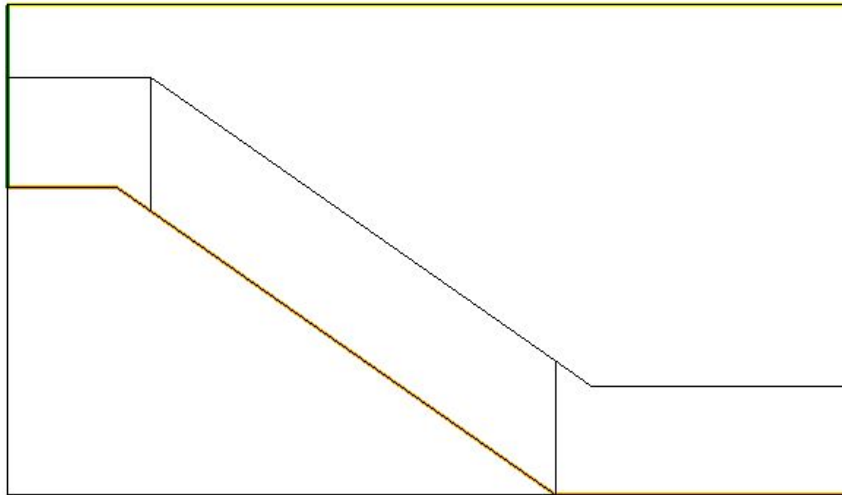
4.2.2 Tranzitni model

Zbog ograničenja software-a tranzitni modeli su izrađeni u 2D. Geometrija modela se razlikuje po tome što je ispod kosine napravljena dodatna površina kako bi se mogli odrediti dodatni parametri. Zbog toga što se simulira oborina potrebno je odrediti dva seta rubnih uvijeta, za krute čestice (tlo) te tekućinu (oborina) (slike 4.8 i 4.9). Rubni uvijeti krutih čestica su isti kao i za statičke modele dok se rubni uvijeti za tekućine razlikuju po tome da dno modela ima ograničenje samo po y osi. Rubni uvijeti se definiraju na linijama modela.

Modelu su zadani površina procjeđivanja i infiltracija koje se zadaju dviju točkama, maksimumu i minimumu koordinata x, y te čine površinu na koju će djelovati (slika 4.10).

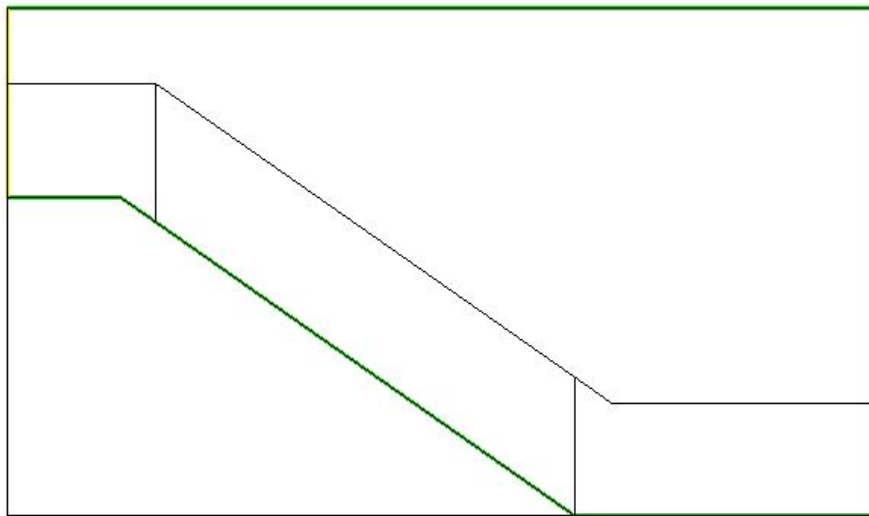
Također, zadana je i površina kosine kao kontaktna linija na kojoj započinje procjeđivanje oborine u kosinu (slika 4.11).

Mreža konačnih elemenata je napravljena s dvije veličine trokutastih elemenata, slično kao i kod statičkih modela. Veličina elemenata za područje izvan kosine je 0.1 m dok su elementi u kosini veličine 0.07 m. Svakom elementu su zadane tri materijalne točke. U tablici 4.5 je prikazana struktura mreže za različite nagibe kosine dok je na slici 4.12 prikazana mreža modela nagiba kosine 35° .



■ Os x ■ Os y ■ Os x, y

Slika 4.8: Rubni uvijeti za krute čestice tranzitnog modela

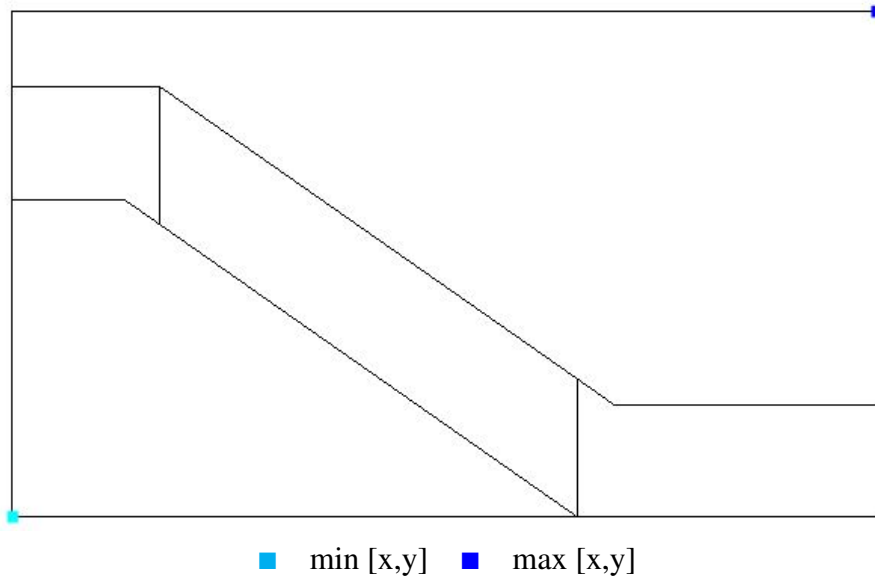


■ Os x ■ Os y

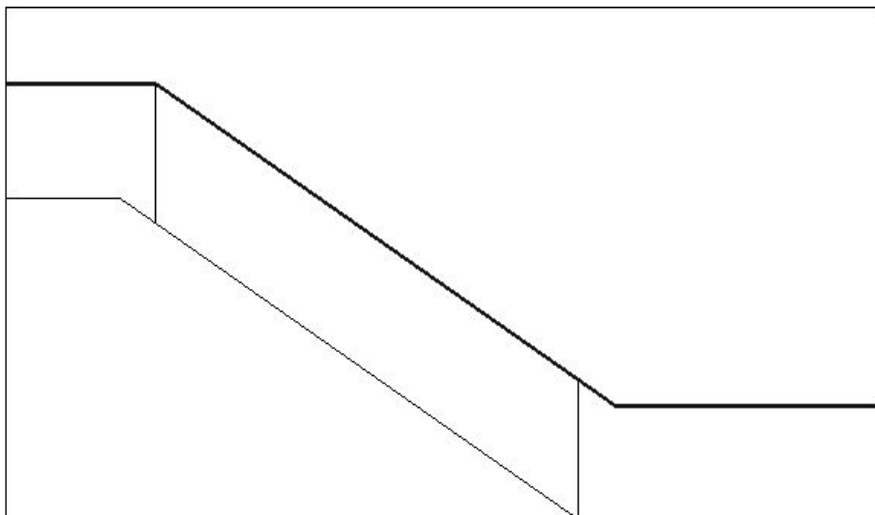
Slika 4.9: Rubni uvijeti za tekućine tranzitnog modela

Tablica 4.5: Struktura mreže diskretiziranih tranzitnih modela

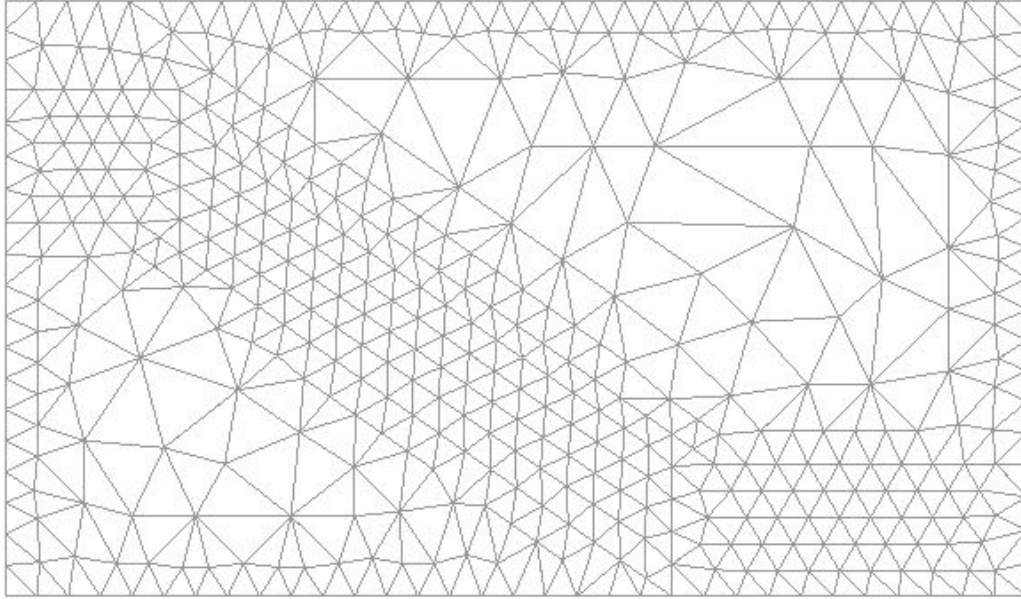
Nagib kosine	Broj čvorova	Broj elemenata	Broj materijalnih točaka
30°	512	921	2763
35°	464	823	2469
40°	467	829	2487



Slika 4.10: Točke zadane za određivanje površine procjeđivanja i infiltracije



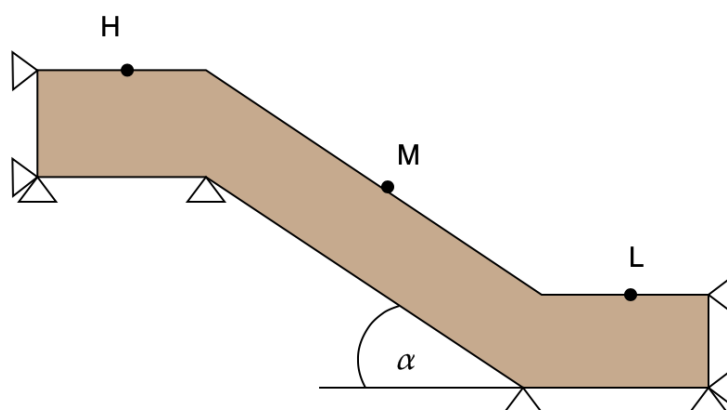
Slika 4.11: Površina kosine



Slika 4.12: Diskretizacija tranzitnog modela konačnim elementima

5. REZULTATI SIMULACIJA

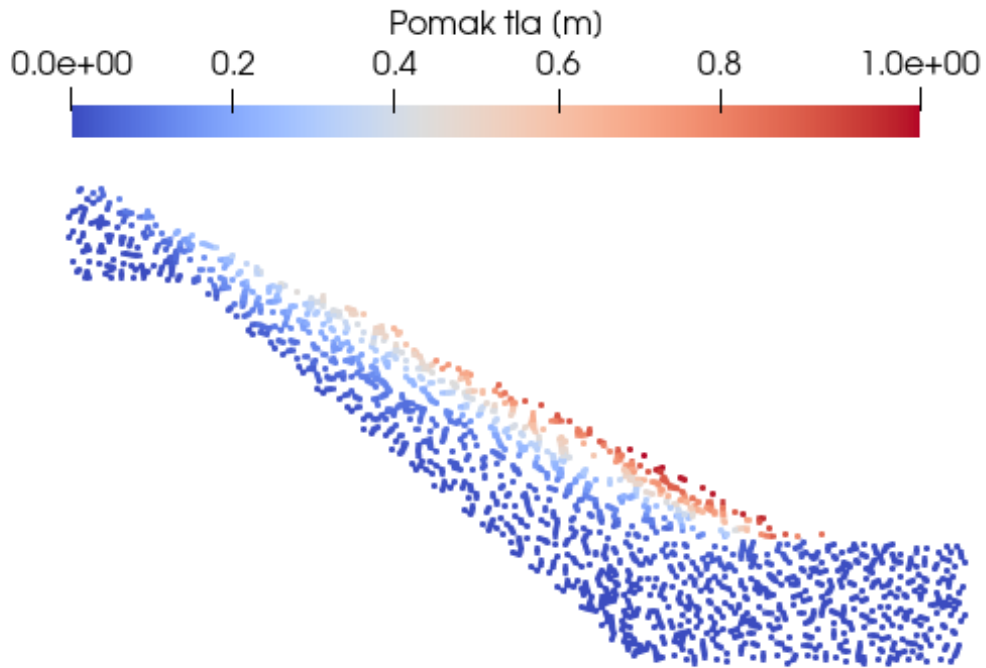
U slijedećem poglavlju prikazani su rezultati numeričkih simulacija. Prikaz rezultata podijeljen je u dva podpoglavlja: rezultati statičkih modela i rezultati tranzitnih modela. Rezultati su prikazani za tri koje se nalaze na kosini prema shemi 5.1.



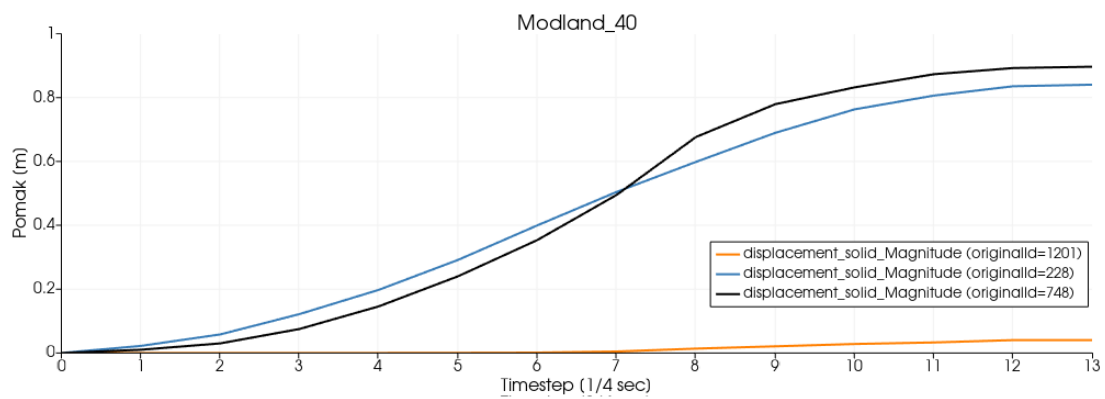
Slika 5.1: Shema položaja točaka čiji su pomaci promatrani; H - na vrhu kosine, M - na sredini kosine, L - na dnu kosine

5.1 Rezultati simulacija statičkih modela

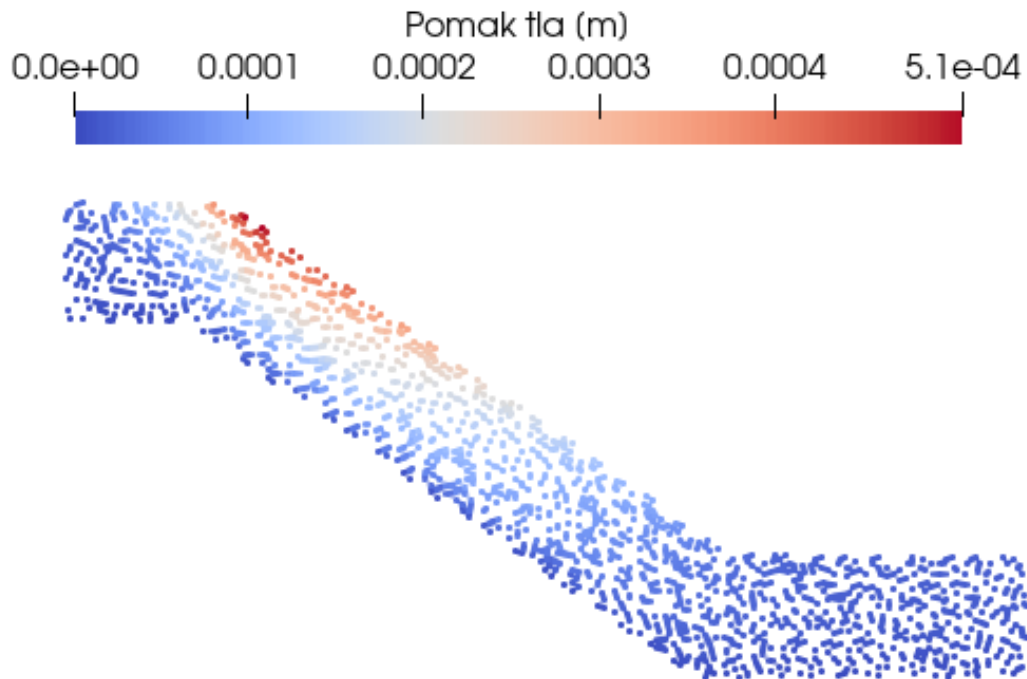
Na slikama redom od 5.2 do 5.19, prikazani su rezultati simulacija. Rezultati simulacije su prikazani u obliku grafa pomaka materijalne točke u vremenu. Prikazane su krivulje tri različite točke prema shemi 5.1, na vrhu kosine, na sredini kosine te na dnu kosine. Uz graf priložena je i slika stanja kosine nakon što se kosina nakon sloma, pokretanja klizne plohe ili slijeganja vratila u stanje mirovanja. Tablicom 5.1 sumirani su maksimalni pomaci pojedine simulaciji te pomaci na vrhu, sredini i dnu kosine.



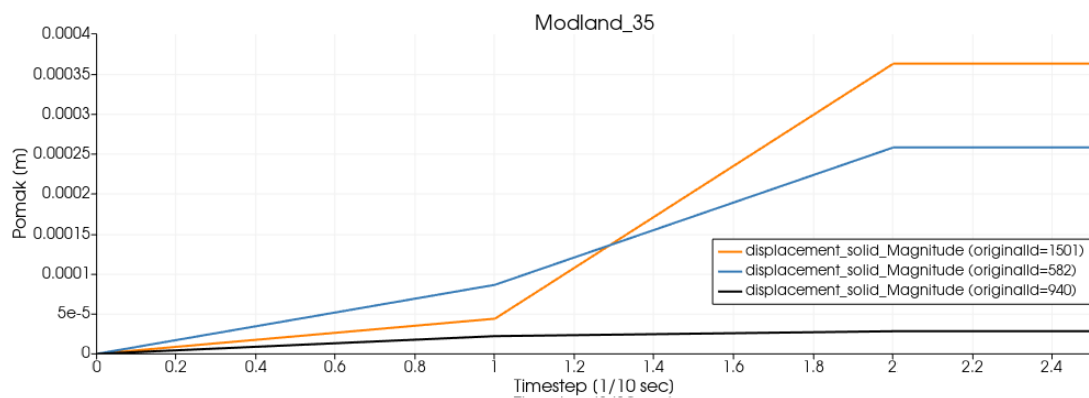
Slika 5.2: Prikaz kosine nagiba 40° materijala modland-a na kraju simulacije



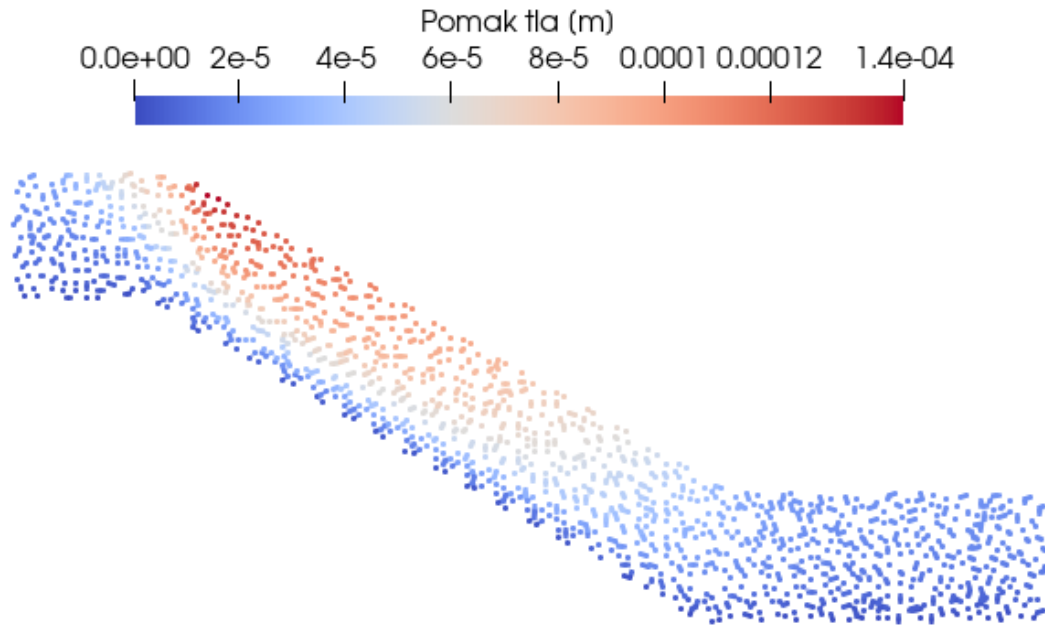
Slika 5.3: Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 40° , klizanje materijala u trajanju od 3.25 sekunde maksimalnog pomaka od 0.896 m



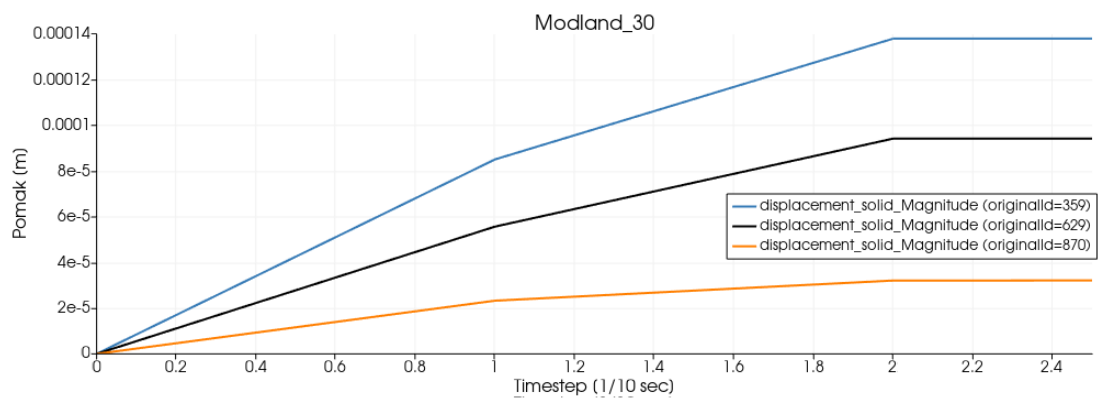
Slika 5.4: Prikaz kosine nagiba 35° materijala modland-a na kraju simulacije



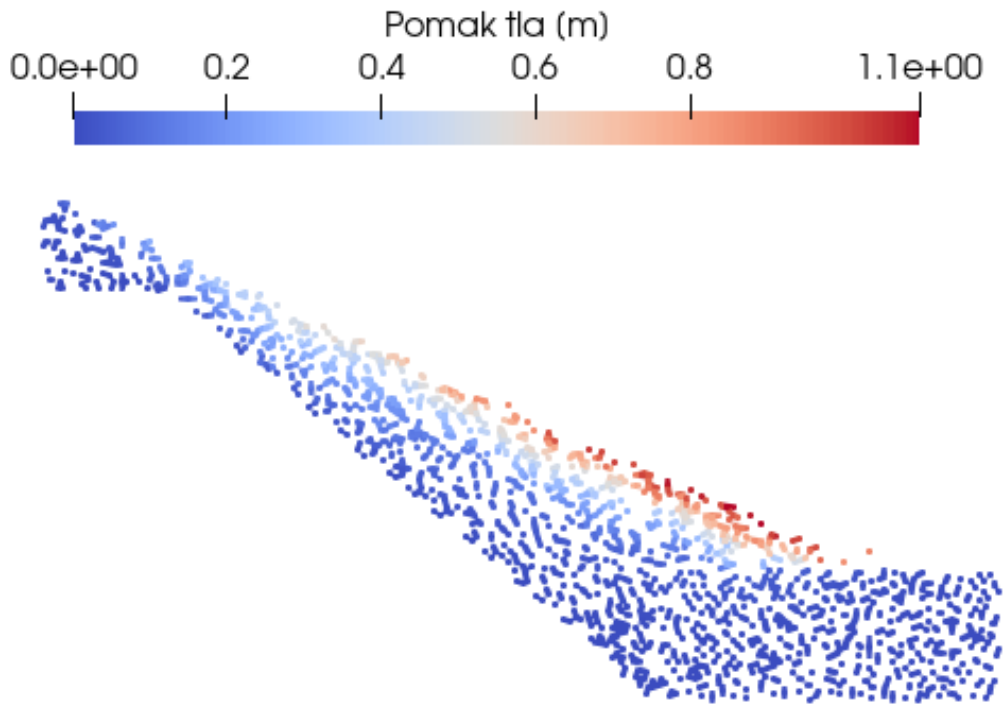
Slika 5.5: Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 35°. Značajan pomak nakon uklanjanja granica 4.5 nakon 0.1 sekunde, nakon 0.2 sekunde nema daljnijeg pomaka



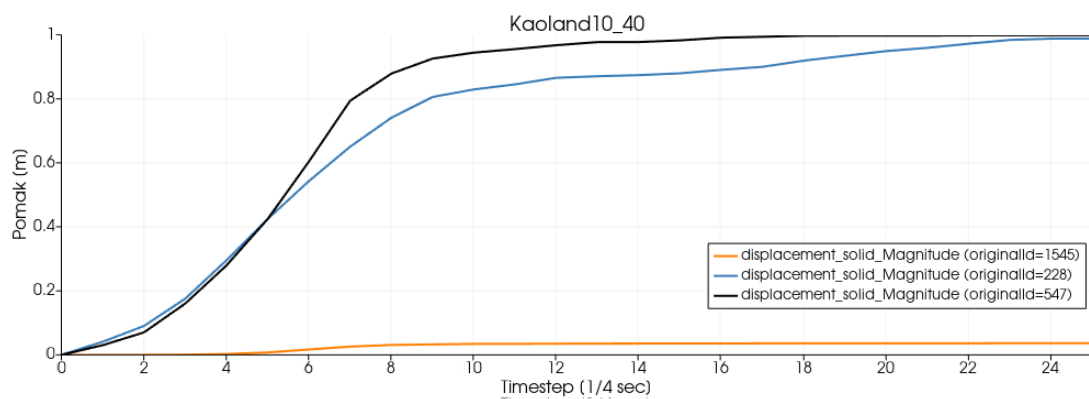
Slika 5.6: Prikaz kosine nagiba 30° materijala modland-a na kraju simulacije



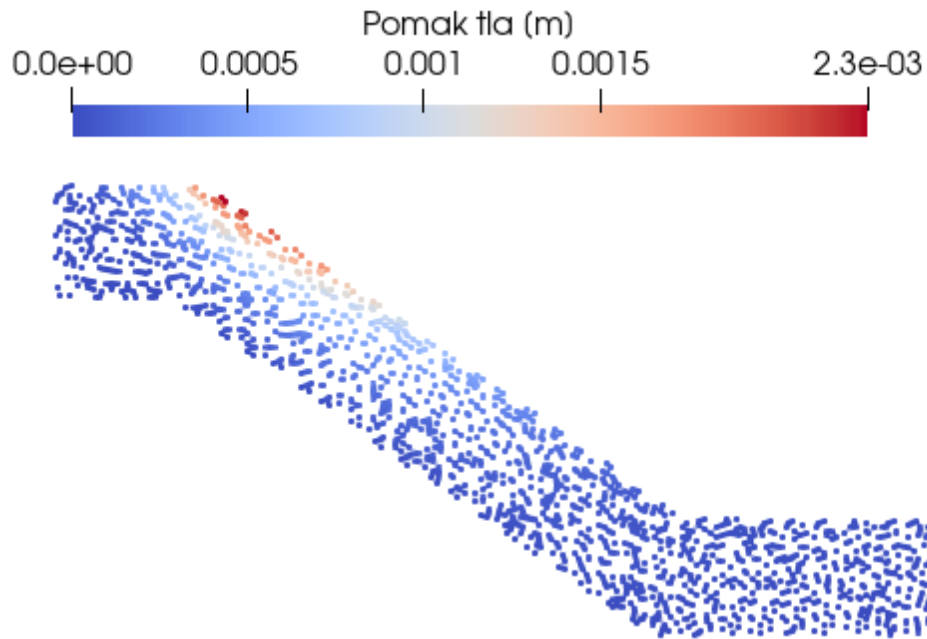
Slika 5.7: Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 30°, smanjenje nagiba krivulje pomaka nakon uklanjanja granica 4.5 nakon 0.1 sekunde, nakon 0.2 sekunde nema daljnjeg pomaka



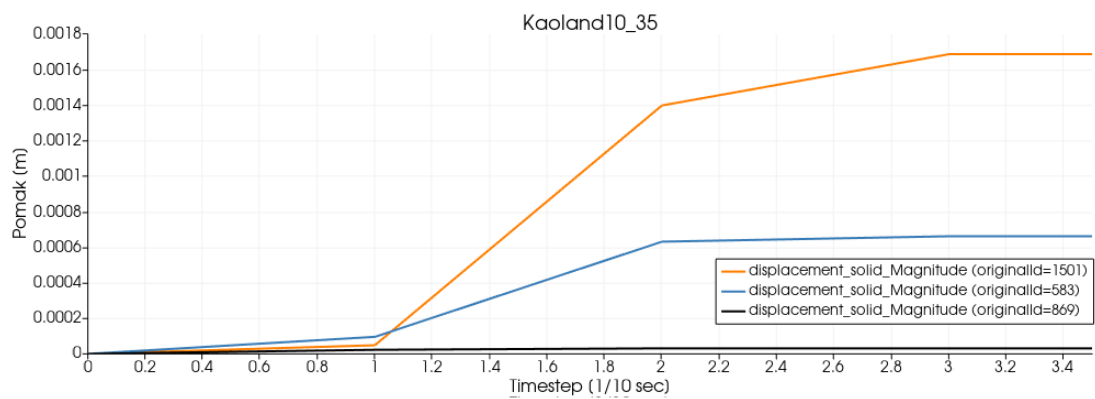
Slika 5.8: Prikaz kosine nagiba 40° materijala kaoland10 na kraju simulacije



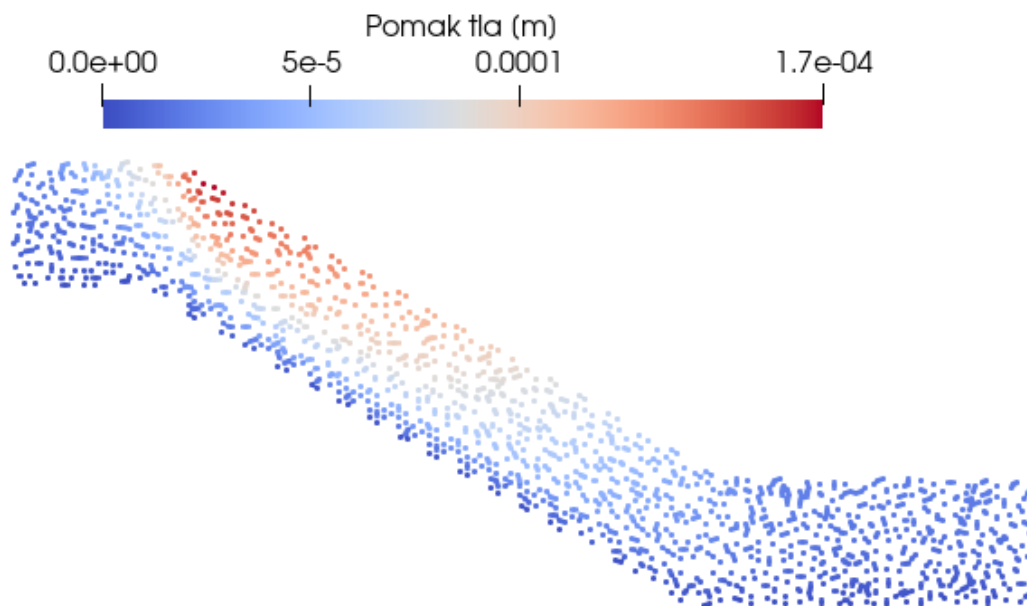
Slika 5.9: Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 40°, klizanje materijala u trajanju od 6 sekundi maksimalnog pomaka od 0.998 m



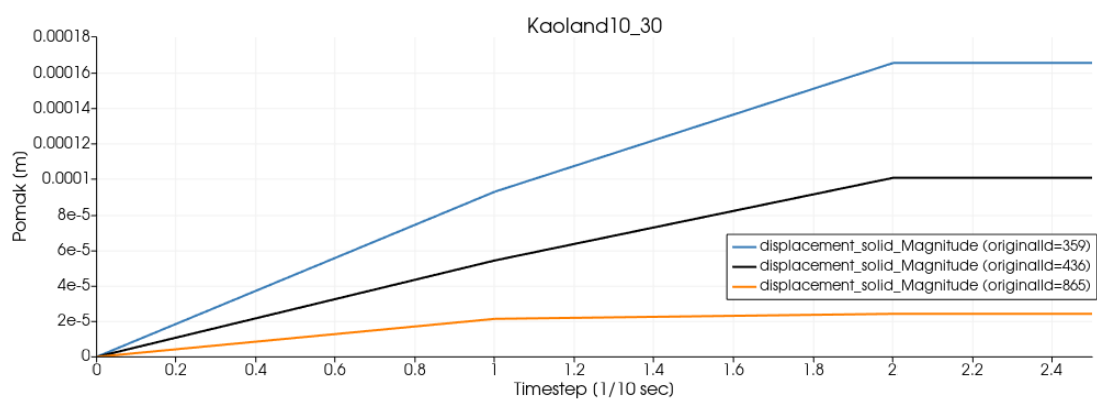
Slika 5.10: Prikaz kosine nagiba 35° materijala kaoland10 na kraju simulacije



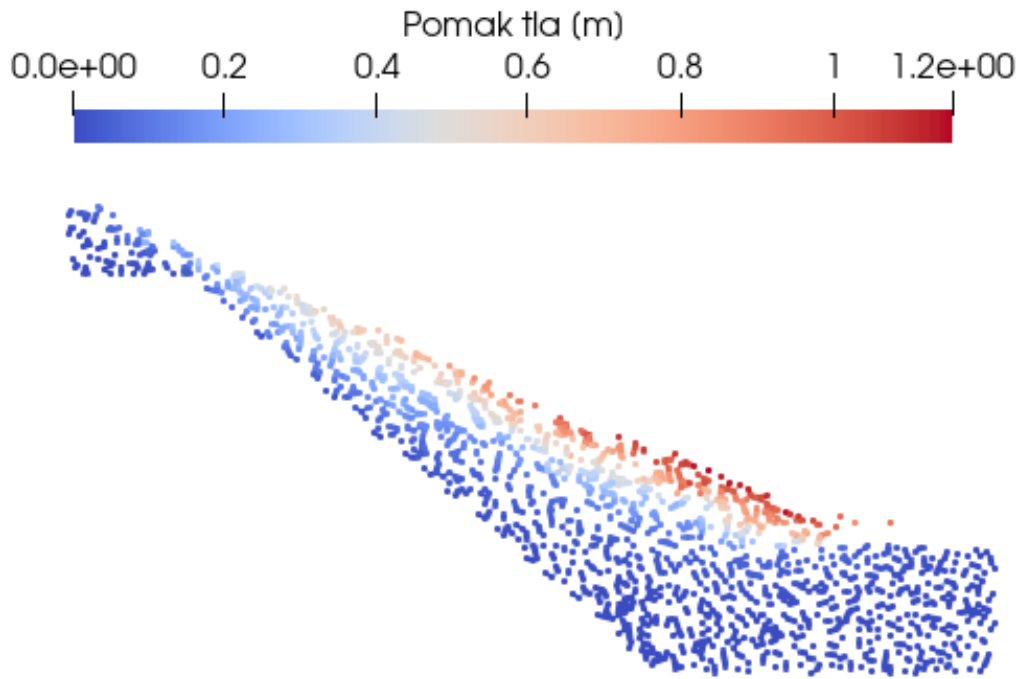
Slika 5.11: Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 35°, Značajan pomak nakon uklanjanja granica 4.5 nakon 0.1 sekunde, nakon 0.3 sekunde nema daljnje pomaka



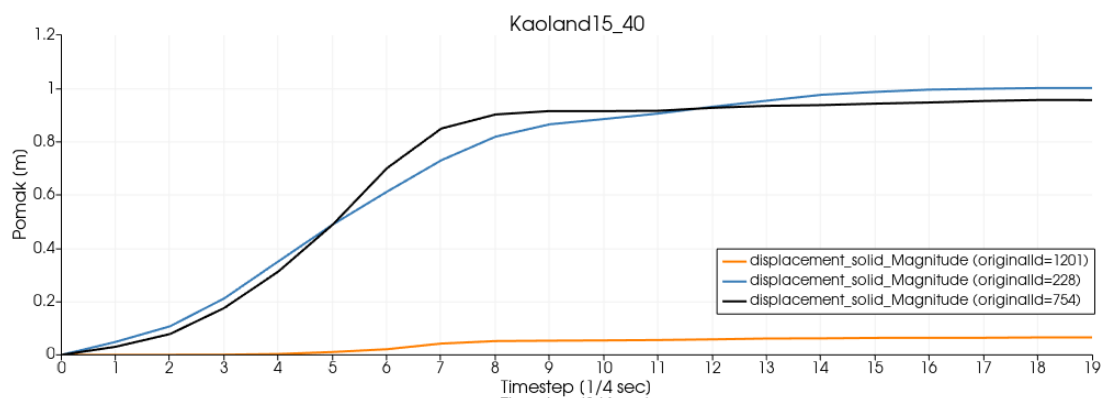
Slika 5.12: Prikaz kosine nagiba 30° materijala kaoland10 na kraju simulacije



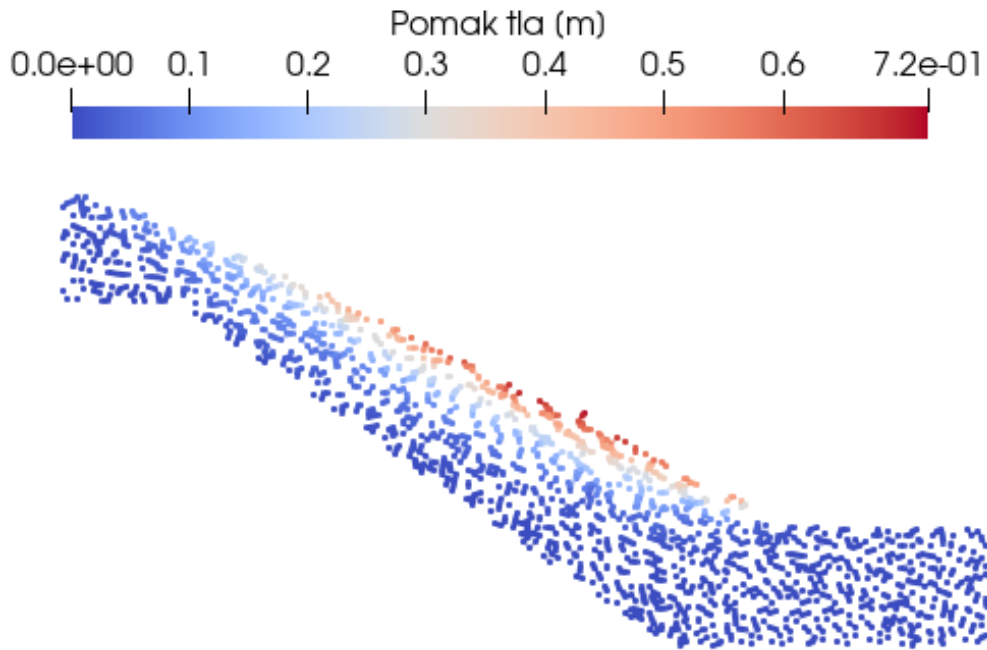
Slika 5.13: Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 30° , smanjenje nagiba krivulje pomaka nakon uklanjanja granica 4.5 nakon 0.1 sekunde, nakon 0.2 sekunde nema daljnjeg pomaka



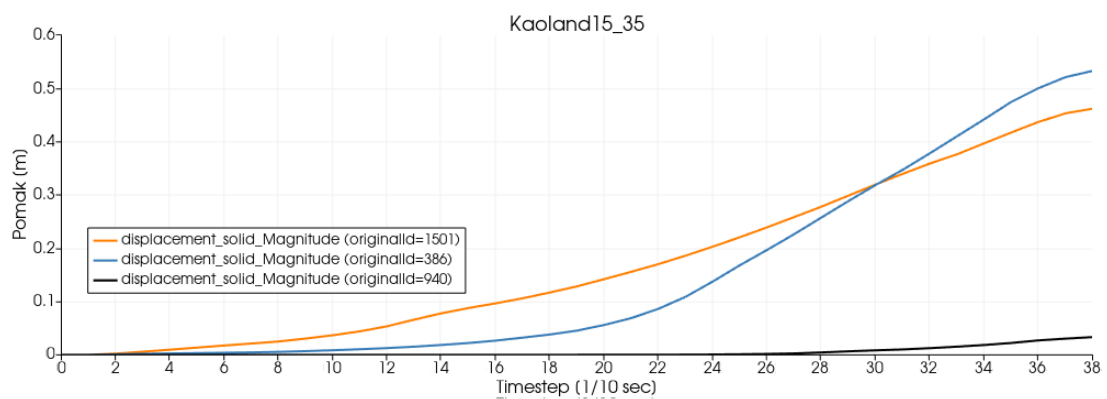
Slika 5.14: Prikaz kosine nagiba 40° materijala kaoland15 na kraju simulacije



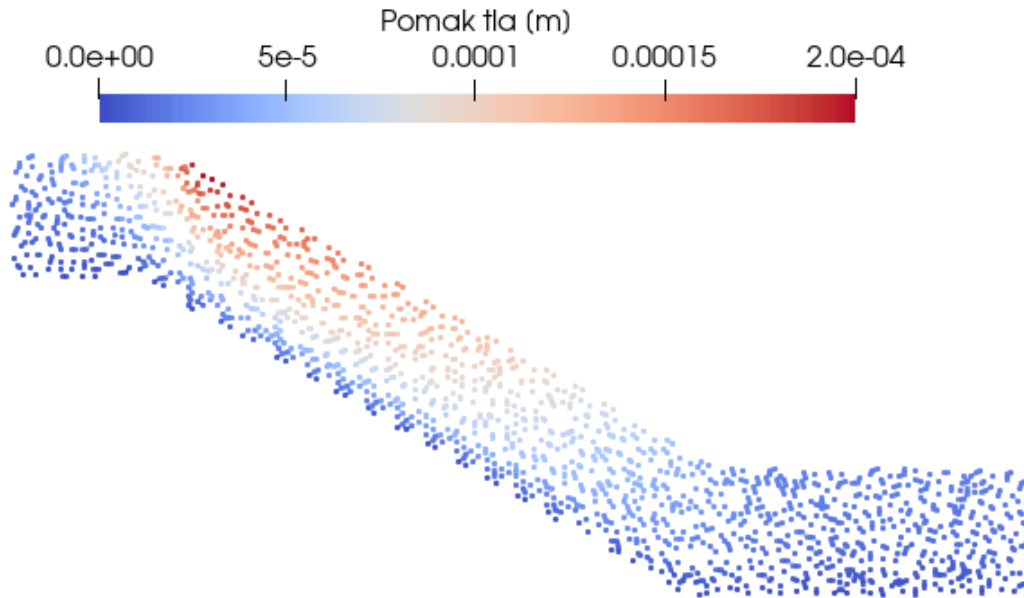
Slika 5.15: Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland15 nagiba kosine 40°, klizanje materijala u trajanju od 4.5 sekundi maksimalnog pomaka od 1 m



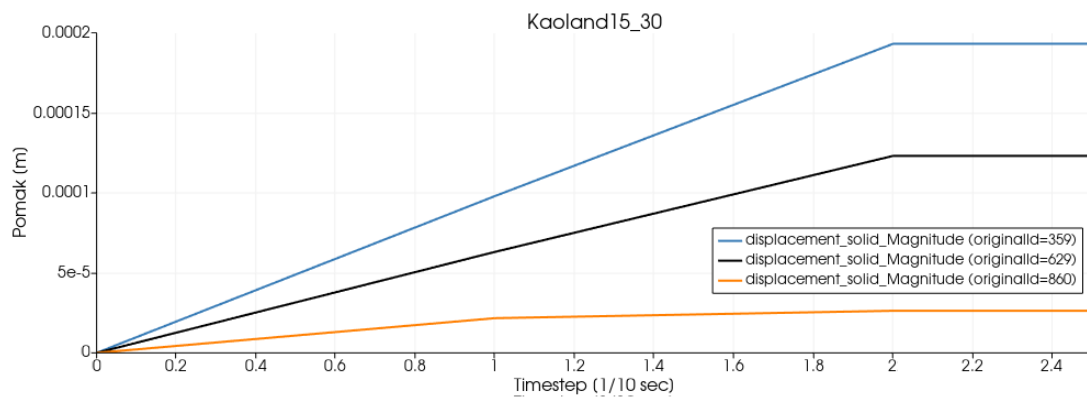
Slika 5.16: Prikaz kosine nagiba 35° materijala kaoland15 na kraju simulacije



Slika 5.17: Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland15 nagiba kosine 35°, klizanje materijala u trajanju od 9.5 sekundi maksimalnog pomaka od 0.532 m



Slika 5.18: Prikaz kosine nagiba 30° materijala kaoland15 na kraju simulacije



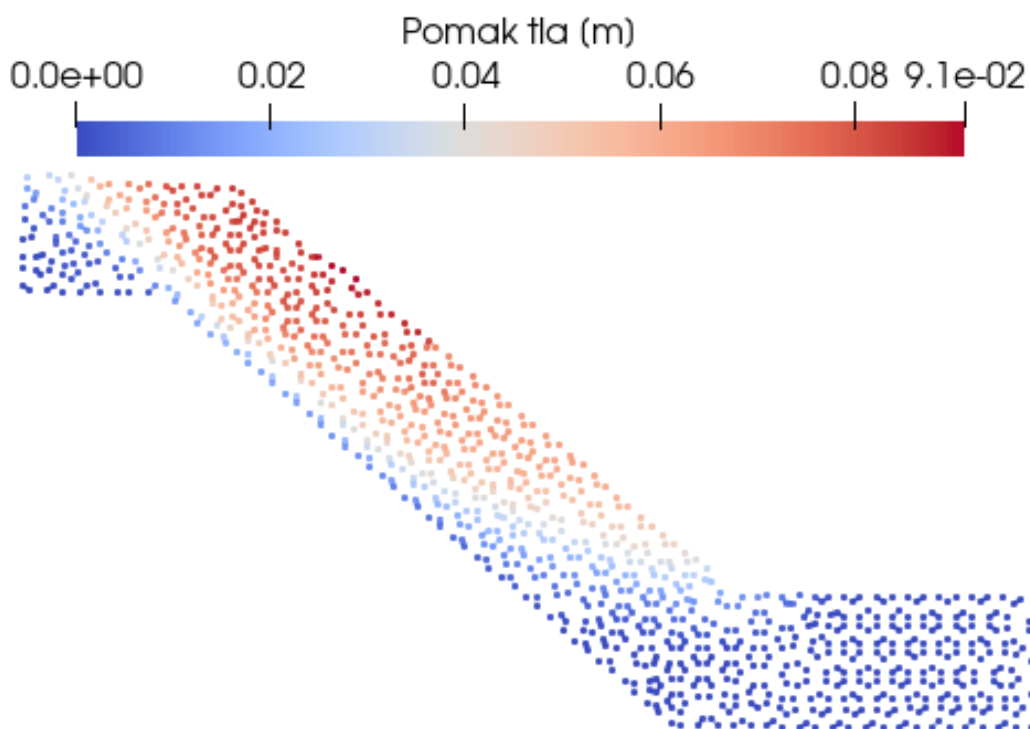
Slika 5.19: Graf pomaka materijalnih točkaka za kaoland15 nagiba kosine 30° , bez promjene nagiba krivulje pomaka nakon uklanjanja granica 4.5 nakon 0.1 sekunde, nakon 0.2 sekunde nema daljnjeg pomaka

Tablica 5.1: Rezultati statičkih modela

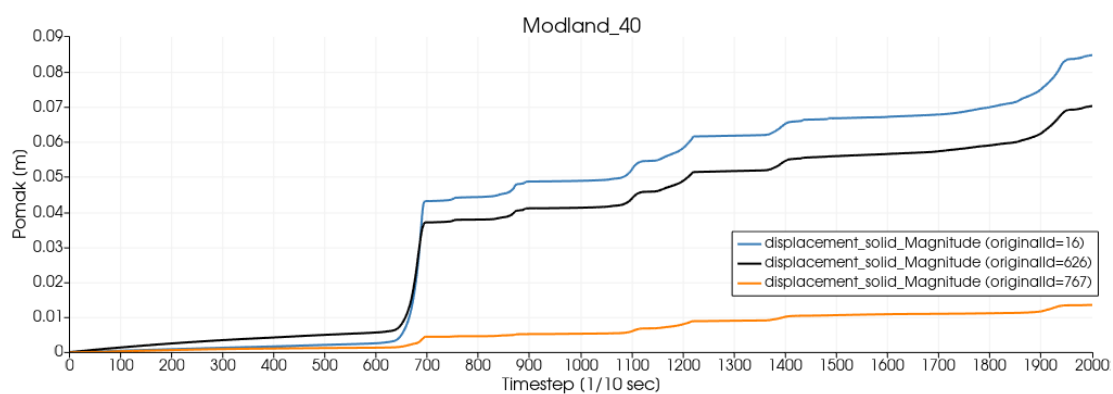
Materijal	Nagib kosine [°]	Pomak dno [m]	Pomak sredina [m]	Pomak vrh [m]	Maksimalni pomak [m]
Modland	40	0.040	0.896	0.840	0.896
Modland	35	2e-5	3e-4	4e-4	4e-4
Modland	30	3e-5	1e-4	1e-4	1e-4
Kaoland10	40	0.036	0.998	0.988	0.998
Kaoland10	35	5e-6	7e-4	0.001	0.001
Kaoland10	30	2e-5	1e-4	2e-4	2e-4
Kaoland15	40	0.65	0.955	1.00	1.00
Kaoland15	35	0.033	0.461	0.532	0.532
Kaoland15	30	2e-5	1e-4	2e-4	2e-4

5.2 Rezultati probnih simulacija tranzitnih modela

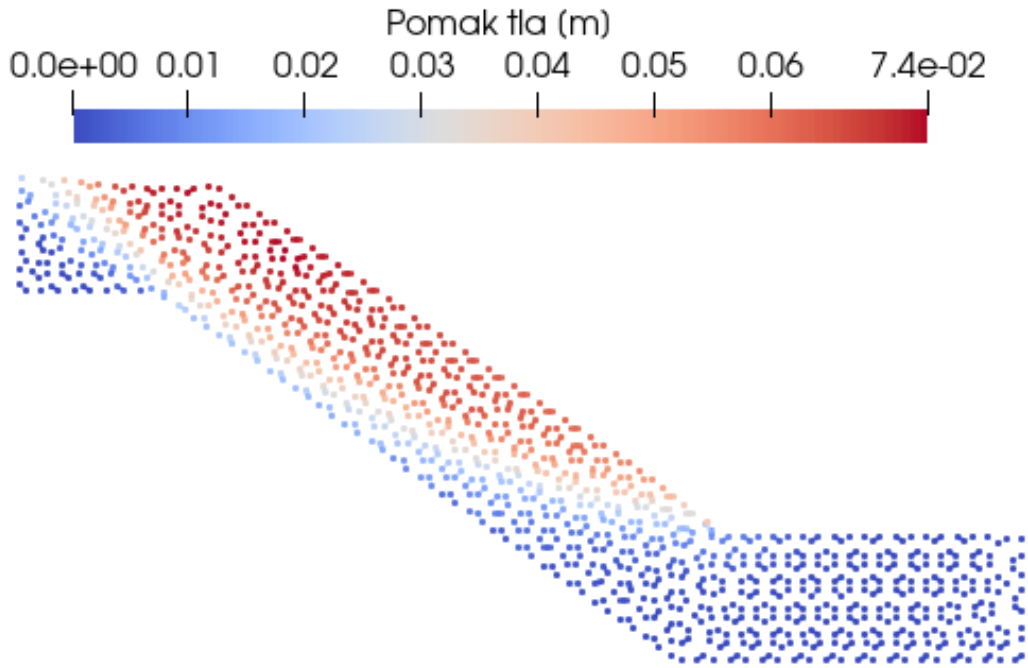
Rezultati simulacija tranzitnih modela su prikazana kao i rezultati statičkih modela (slike 5.20 - 5.37). Ovo su probna ispitivanja te se rezultati ne smiju smatrati konačnim. Smjernice za daljnje istraživanje nalaze u sljedećem poglavlju. Na kraju poglavlja nalazi se tablica 5.2 sa vrijednostima pomaka u točka na vrhu, sredini te dnu kosine.



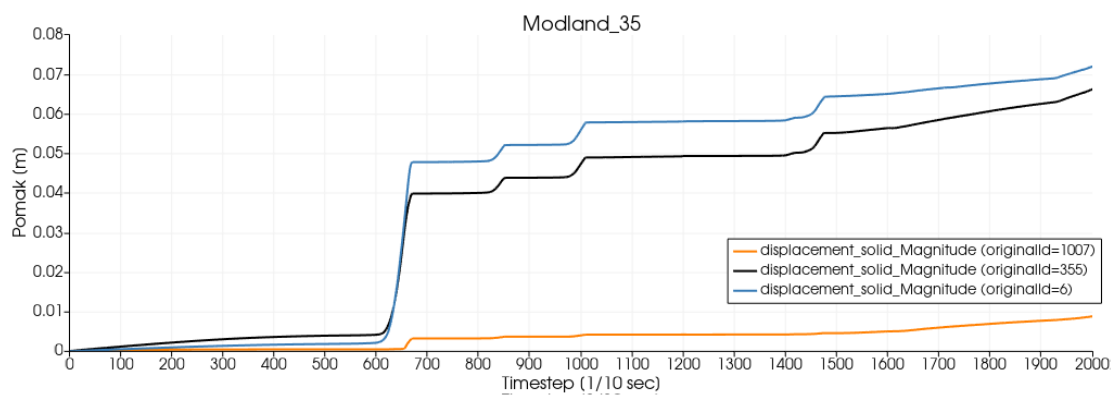
Slika 5.20: Prikaz kosine nagiba 40° materijala modland-a na kraju simulacije



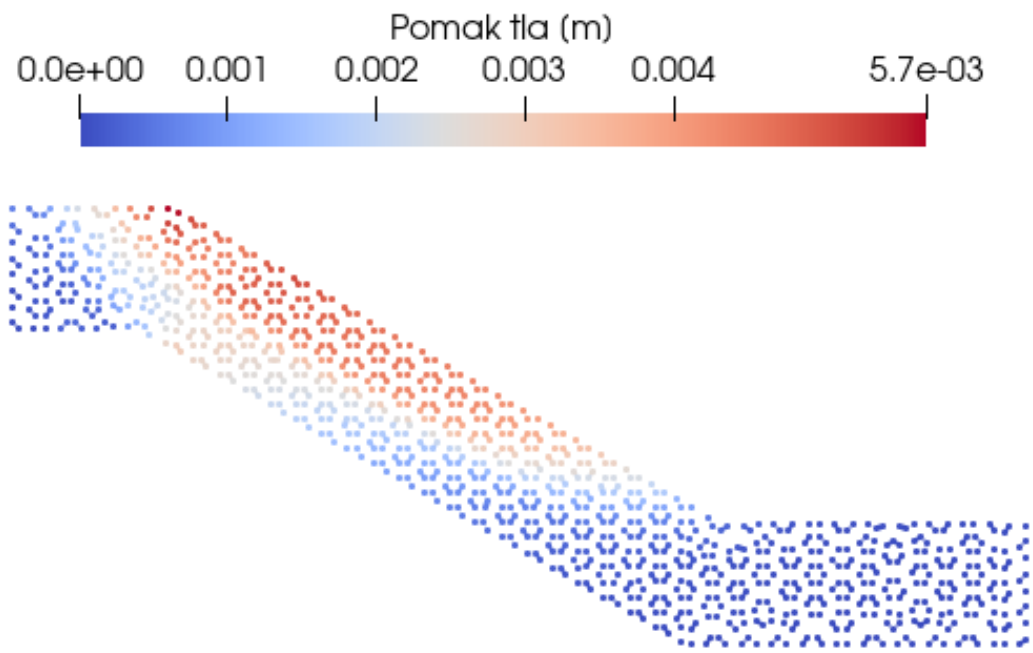
Slika 5.21: Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 40° , značajan pomak nakon 65 sekundi simulacije oborine zatim veći pomaci u inkrementima



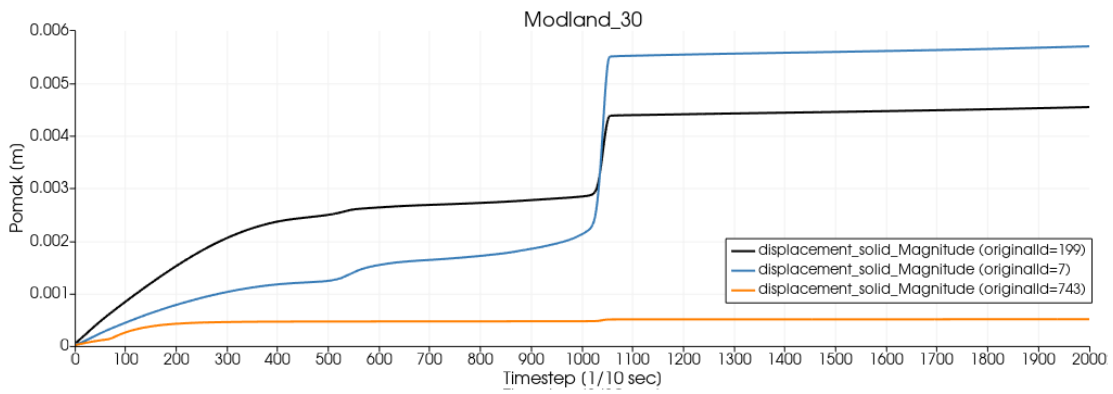
Slika 5.22: Prikaz kosine nagiba 35° materijala modland-a na kraju simulacije



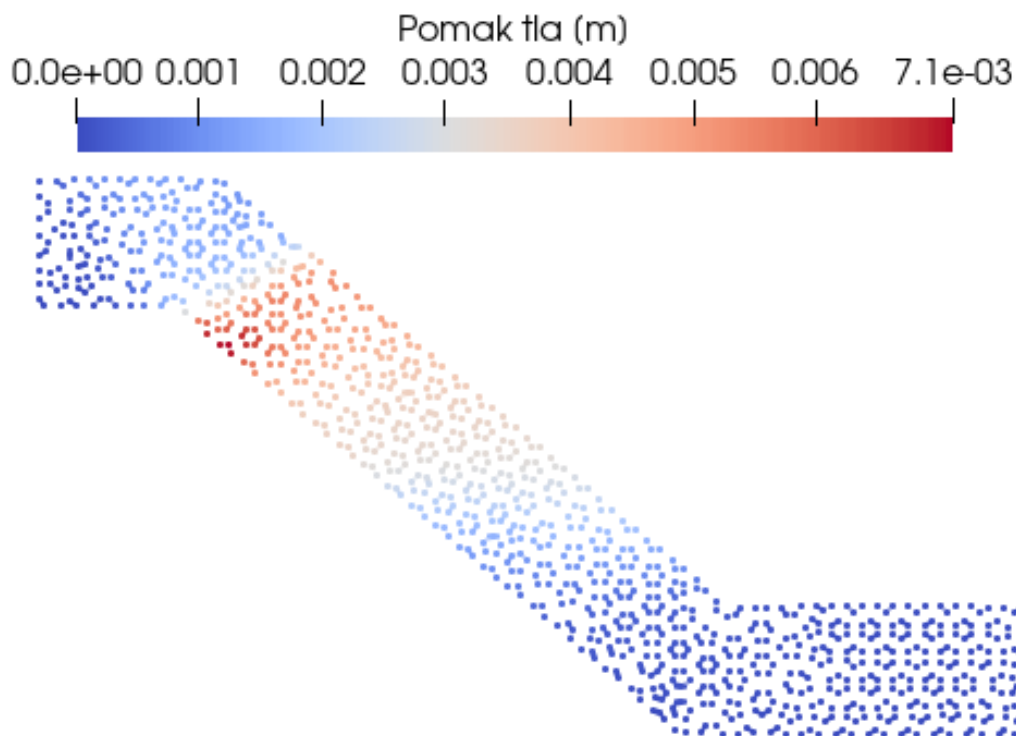
Slika 5.23: Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 35°, značajan pomak nakon 62 sekunde simulacije oborine zatim veći pomaci u inkrementima



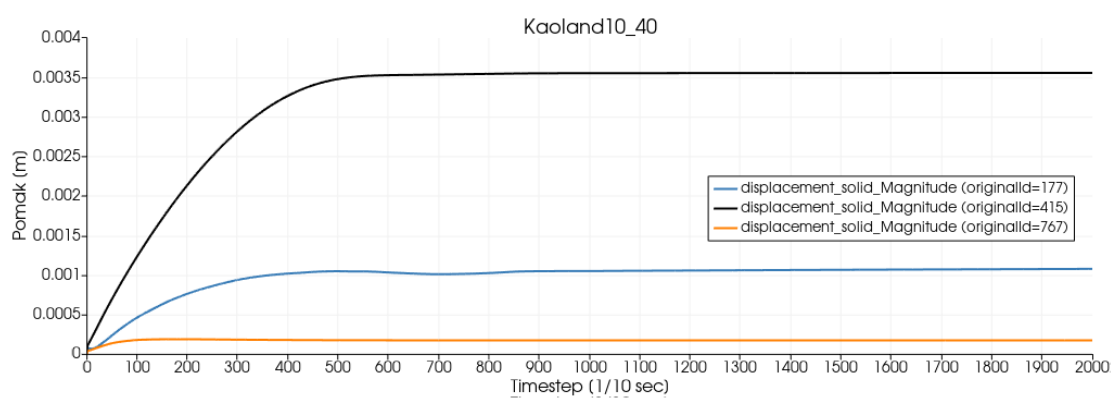
Slika 5.24: Prikaz kosine nagiba 30° materijala modland-a na kraju simulacije



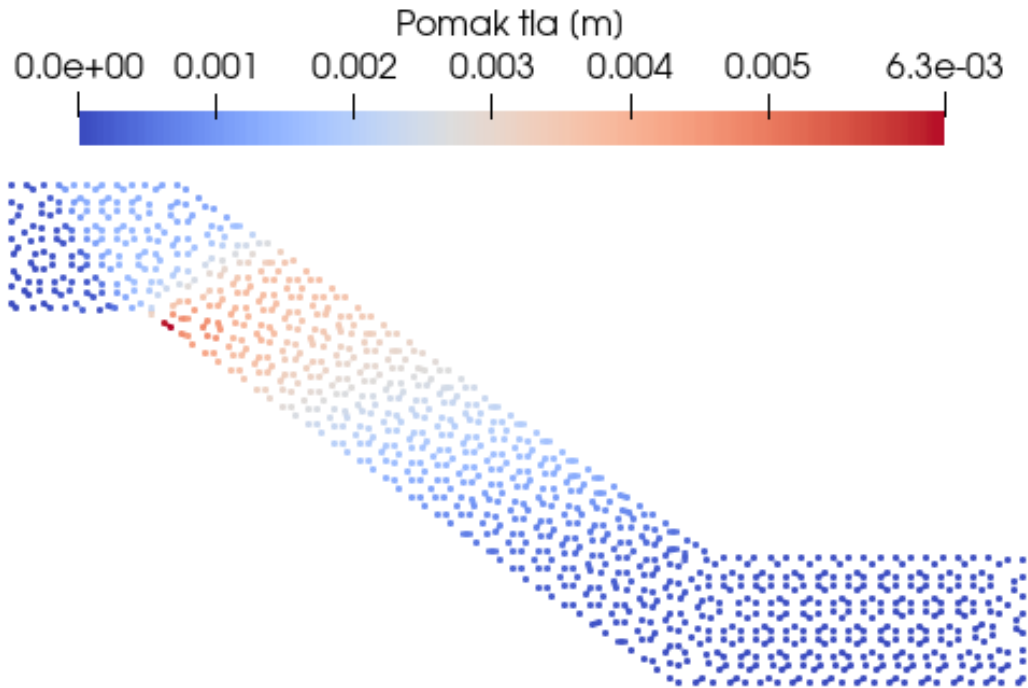
Slika 5.25: Graf pomaka materijalnih točaka za modland nagiba kosine 30°, značajan pomak nakon 105 sekunde simulacije oborine zatim blagi linearni porast



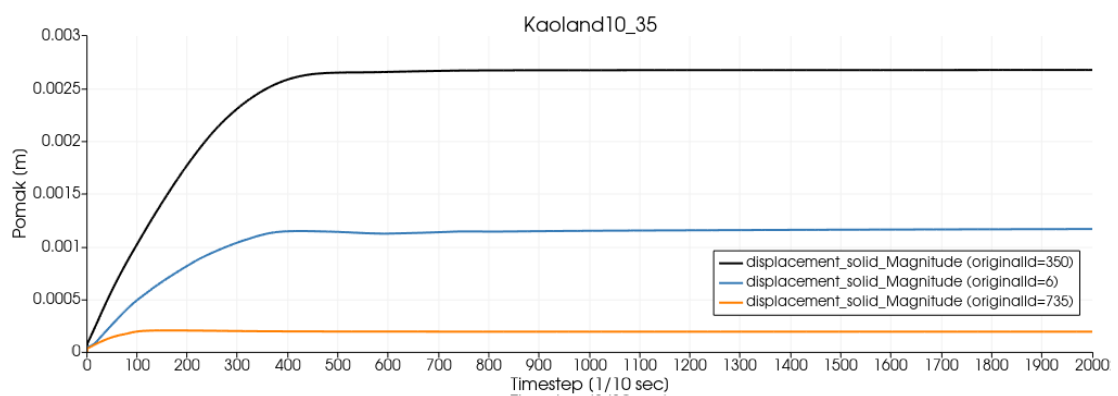
Slika 5.26: Prikaz kosine nagiba 40° materijala kaoland10 na kraju simulacije



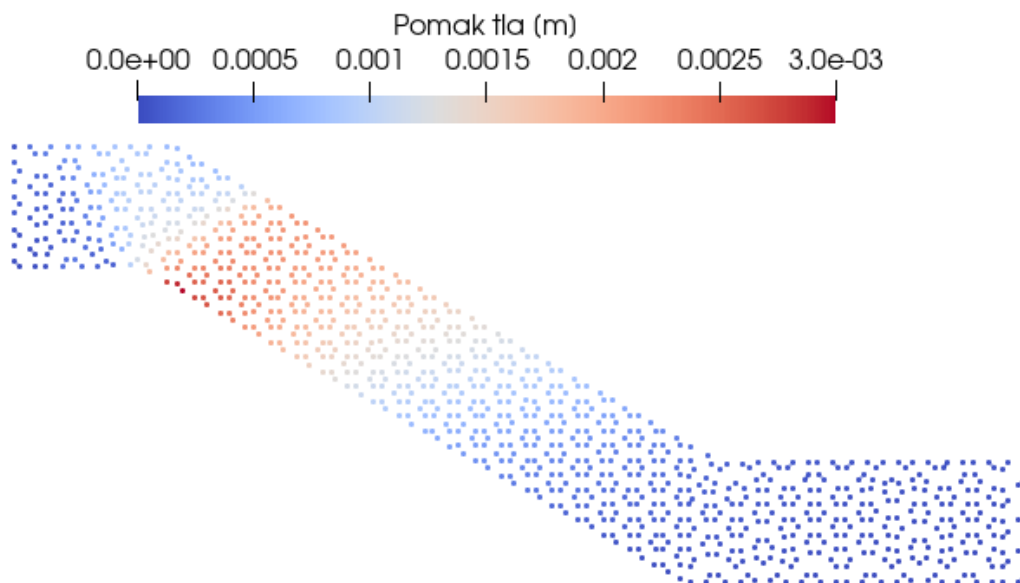
Slika 5.27: Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 40° , značajan pomak u prvih 40 sekundi zatim nema daljnjeg pomaka



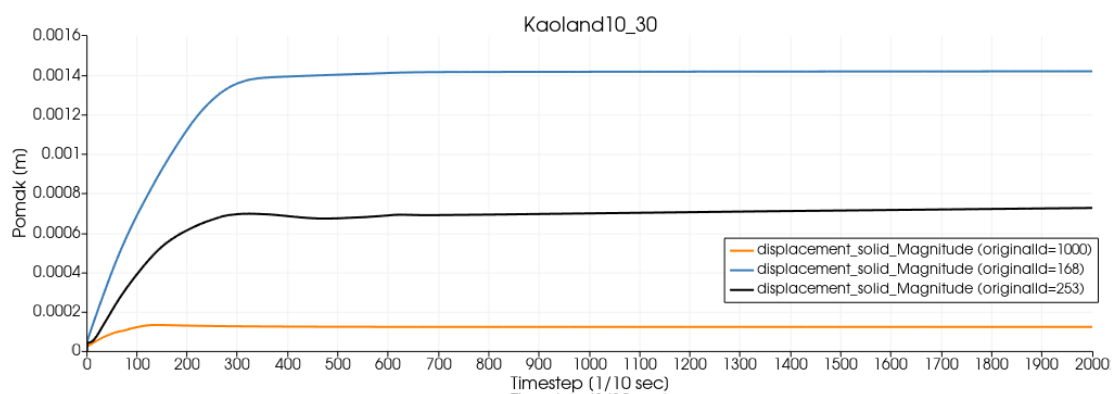
Slika 5.28: Prikaz kosine nagiba 35° materijala kaoland10 na kraju simulacije



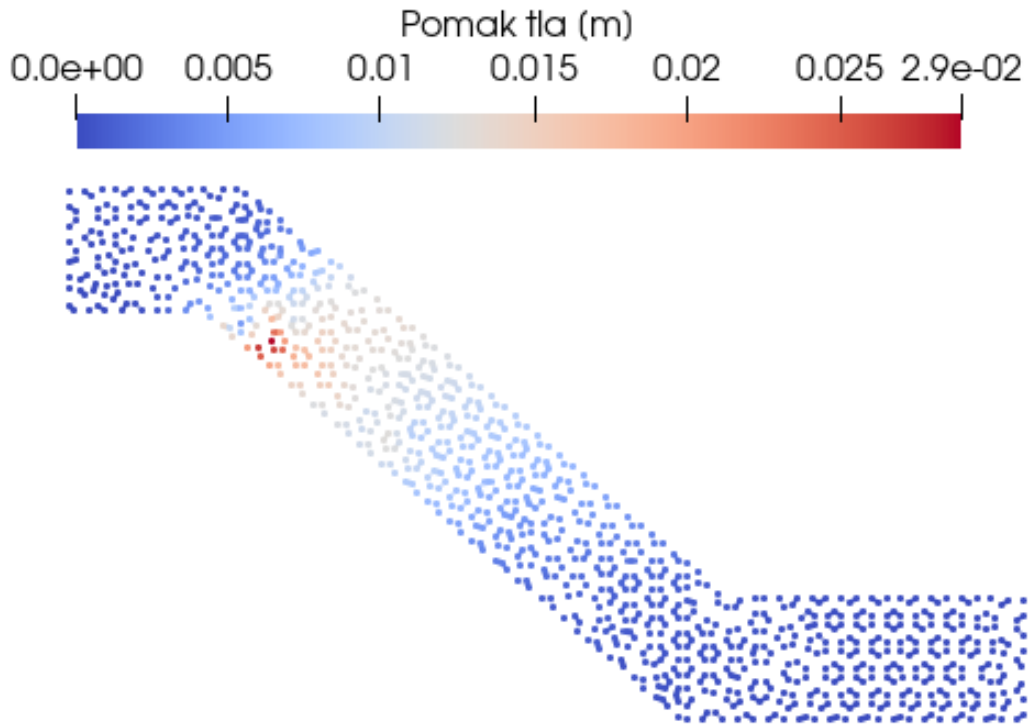
Slika 5.29: Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 35° , značajan pomak u prvih 35 sekundi zatim nema daljnjeg pomaka



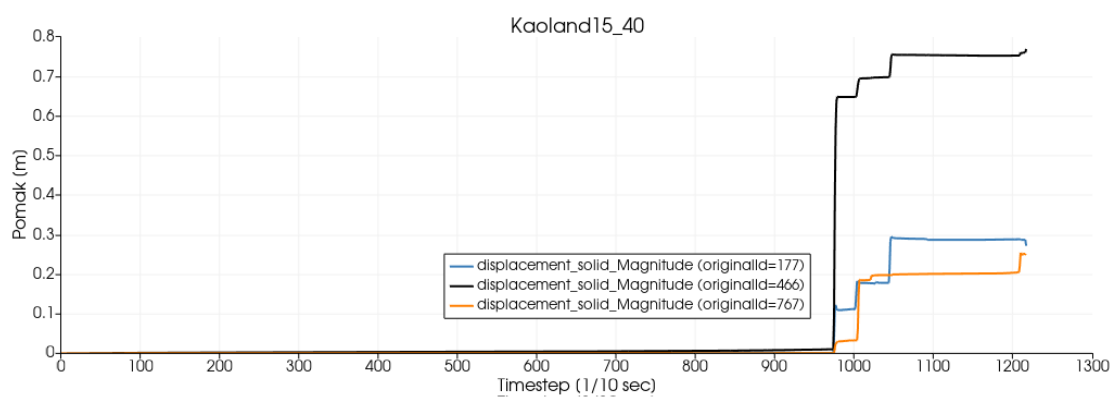
Slika 5.30: Prikaz kosine nagiba 30° materijala kaoland10 na kraju simulacije



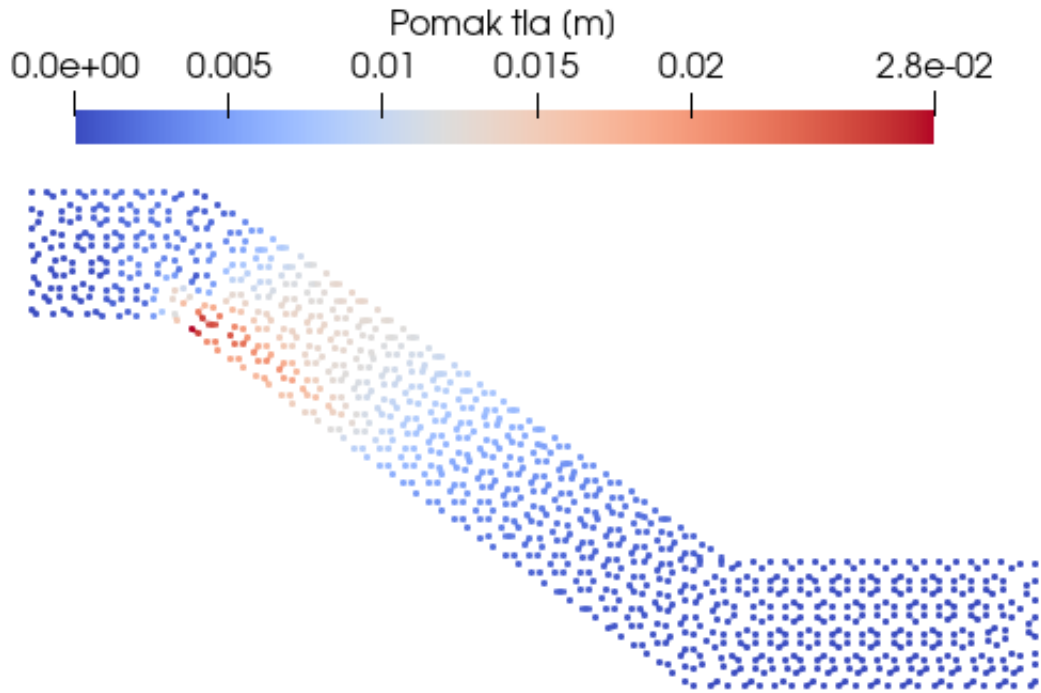
Slika 5.31: Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland10 nagiba kosine 30°, značajan pomak u prvih 25 sekundi zatim blagi linearni porast maksimalnog pomaka



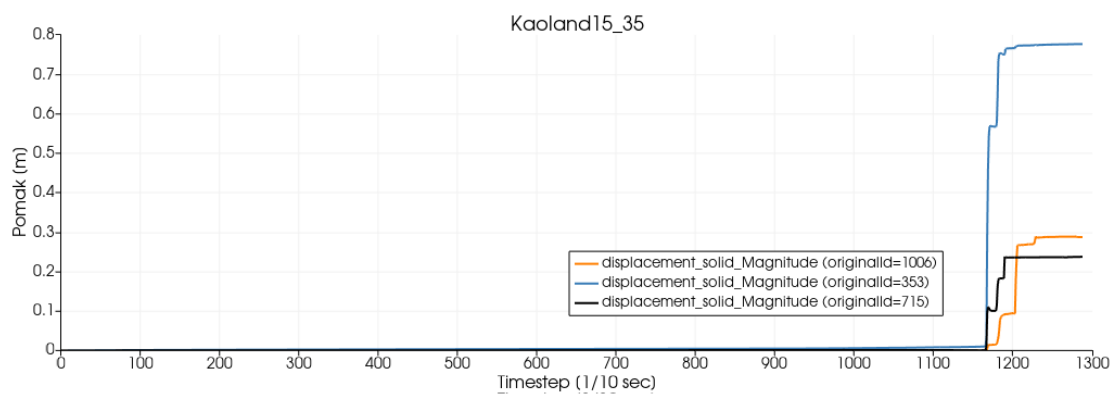
Slika 5.32: Prikaz kosine nagiba 40° materijala kaoland15 na kraju simulacije



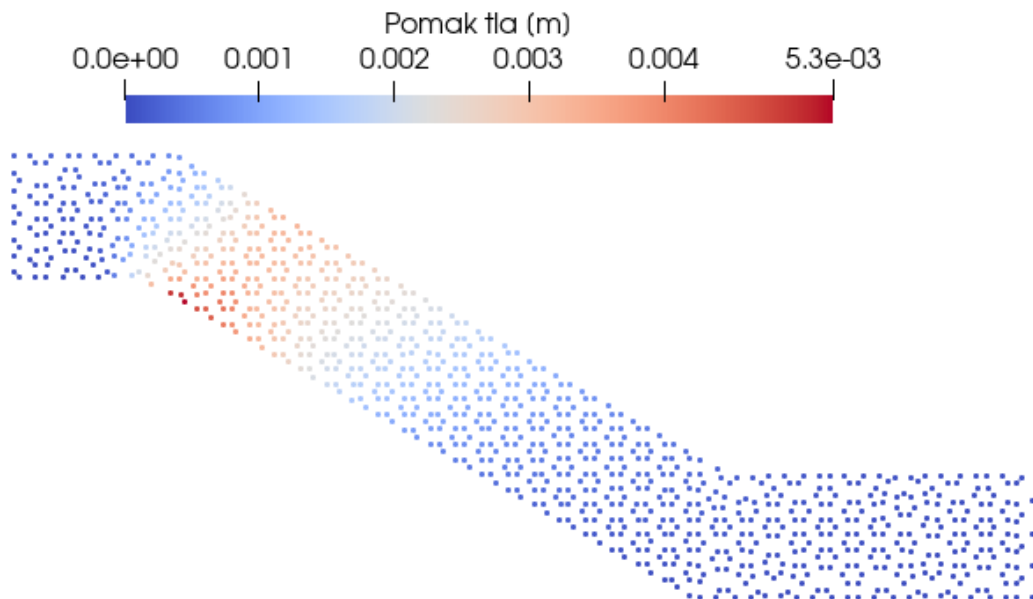
Slika 5.33: Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland15 nagiba kosine 40°, značajan pomak nakon 98 sekundi zatim pomak u inkrementima



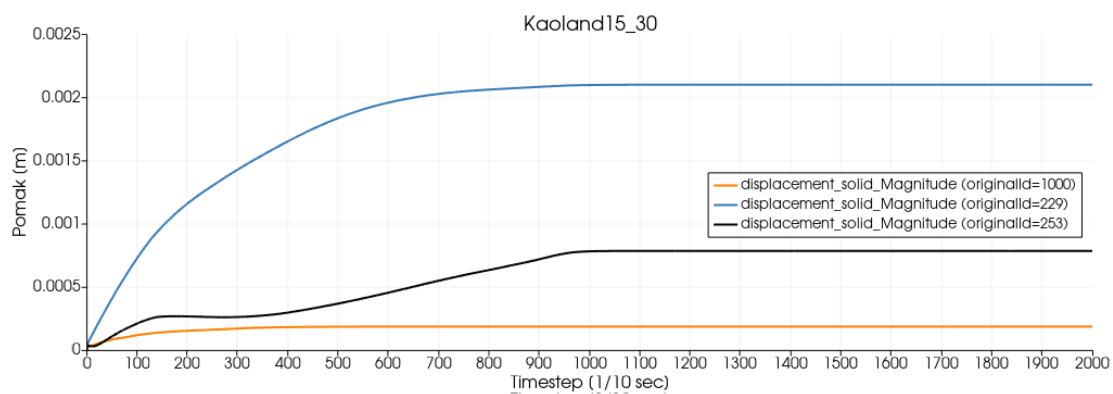
Slika 5.34: Prikaz kosine nagiba 35° materijala kaoland15 na kraju simulacije



Slika 5.35: Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland15 nagiba kosine 35°, značajan pomak nakon 116 sekundi zatim pomak u inkrementima



Slika 5.36: Prikaz kosine nagiba 30° materijala kaoland15 na kraju simulacije



Slika 5.37: Graf pomaka materijalnih točaka za kaoland15 nagiba kosine 30°, značajan pomak u prvih 90 sekundi zatim bez pomaka

Tablica 5.2: Rezultati probnih tranzitnih modela

Materijal	Nagib kosine [°]	Pomak dno [m]	Pomak sredina [m]	Pomak vrh [m]	Maksimalni pomak [m]
Modland	40	0.013	0.069	0.084	0.084
Modland	35	0.008	0.065	0.071	0.071
Modland	30	4e-4	0.004	0.005	0.005
Kaoland10	40	1e-4	0.003	0.001	0.003
Kaoland10	35	1e-4	0.002	0.001	0.002
Kaoland10	30	1e-4	7e-4	0.001	0.001
Kaoland15	40	0.249	0.768	0.286	0.768
Kaoland15	35	0.288	0.237	0.775	0.775
Kaoland15	30	1e-4	7e-4	0.002	0.002

6. DISKUSIJA

U prethodnom poglavlju prikazani su dobiveni rezultati numeričke analize kosine metodom materijalne točke za tri različine mješavine tla i tri različita nagiba kosine u statičkim i tranzitnim uvjetima opisana u poglavlju 2.3. Za izradu modela, geometrija, značajke tla te parametri modela su zadani okvirno prema ispitivanju provedeno u [22] u svrhu usporedbe rezultata.

Rezultati statičkih modela prikazuju pomake uslijed djelovanja gravitacije. Simulacija je provedena u dvije faze, u prvoj fazi zadana su inicijalna naprezanja pri kojima se materijal nalazi u kvazi statičkim uvjetima kako bi izbjegli mogući slom tla na početku same simulacije. Materijalu pri takvim uvjetima je omogućena inicijalna konsolidacija uslijed gravitacije bez utjecaja kosine na sam pomak. Nadalje to nam omogućuje da jasno raspoznamo pomake inicijalnih naprezanja od stvarnog pomaka uzrokovanog djelovanjem gravitacije na kosinu. Prijelaz između navedenih pomaka okarakteriziran je lomom krivulje pomaka na prijelazu iz prvog u drugi vremenski korak, stoga rezultate prema grafovima 5.3 - 5.19 možemo smjestiti u tri kategorije: (i) kvazi linearno opadanje pomaka u vremenu, (ii) kvazi linearan porast pomaka u vremenu, (iii) "S" krivulja pomaka u vremenu. Logistična krivulja pomaka pojavljuje se kod modela kod kojih je uslijedio slom tla odnosno translacijsko klizanje materijala niz kliznu plohu, konkretno kod svih modela nagiba kosine 40° te kod modela materijala kaoland15 nagiba kosine 35° . Slom je nastao zbog prevelikog nagiba kosine s obzirom na kut trenja materijala koji čine kosinu, zbog toga se sloma materijala događa na početku same simulacije. Nadalje kod navedenih modela, pomak materijalne točke na vrhu je manji u odnosu na pomak materijalne točke na sredini kosine (tablica 5.1) kao posljedica toga jer se klizna ploha kreirala po sredini kosine te klizna masa sa vrha kosine gura materijal pri čemu on klizi po stabilnom dijelu kosine no netreba isključiti mogućnost da može biti posljedica sretnog rasporeda materijalnih točaka u elementima mreže koji onemogućuju drukčiji oblik klizanja. Vrijednosti pomaka modela u kojima nije došlo do sloma tla su veoma male, manje od milimetra.

Tranzitni modeli su simulirani pod djelovanjem oborine i gravitacije. Pomaci uslijed gravitacije su ispitani statičkim modelima stoga nisu fokus simulacije te je simulacija provedena u jednoj fazi. Simulacije su ograničene na 2000 vremenskih koraka kako

bi se rasteretila numerička analiza. Modeli su simulirani uslijed konstantnog inteziteta oborine koji iznosi 72.6 mm/h. Rezultate tranzitnih oborina također možemo kategorizirati prema grafovima pomaka materijalnih točaka u vremenu (slike 5.21 - 5.37). Pojavljuju se dva tipa krivulja: (i) stepenasta sa inkrementalnim porastom pomaka, (ii) kvazi logaritamska krivulja. Vezu između krivulja pomaka i modela, tj. materijala i nagiba kosine, je teško točno odrediti. Rezultate simulacija ne možemo uzeti kao konačne. Prilikom usporedbe rezultata prema ispitivanju provedenog u [22] možemo vidjeti da je na fizičkom modelu slom tla uvjetovan porastu pornog tlaka u nožici kosine te ima oblik retrogresivnog rotacijskog klizišta. Rezultati dobiveni simulacijom prikazuju najveći pomak na kontaktu materijala i donje granice modela ili na vrhu kosine što ukazuje na neispravnost početnih parametara ili postavki proračuna u pojedinim modelima. Važno je napomenuti kako se nije dogodio slom materijala u nijednom modelu za razliku od statičkih modela gdje je do sloma tla u pojedinim modelima došlo pod djelovanjem gravitacije.

Prilikom izrade diplomskog rada nailazilo se na mnoge prepreke i probleme pri izradi modela. Izrada same geometrije u računskom programu GiD se ne preporuča zbog nedovoljno alata za izradu složenijih oblika modela stoga je jedan od preporučenih načina izrada geometrije pomoću CAD alata te export-iranje u ".dxf" obliku u GiD. U slučaju nepravilne geometrije modela pojavljuju se problemi zadavanja rubnih uvijeta koji zatim uzrokuju da mreža konačnih elemenata nije efikasno određena što za posljedicu može imati nestabilan model ili pak pružiti krive rezultate. Najveći nedostatak provedene numeričke analize je taj da zahtijeva vrlo snažno računalo kako bi u razumnom vremenskom periodu mogao izračunati parametre za značajan broj materijalnih točaka, što bi značilo da je i skupa. Nadalje i sama obrada velike količine podataka, koji se trebaju pohraniti na računalu dobivenih numeričkom analizom, je zahtjevna. Komputacija se može pojednostaviti na više načina. Smanjenjem ili idealizacijom pojedinih uvijeta koji ne utječu bitno na rezultate ali znatno opterećuju izračun, ili pak smanjenjem broja materijalnih točaka, ili pojednostavljenje mreže konačnih elemenata na štetu kvalitete i točnosti rezultata.

7. ZAKLJUČAK

Diplomskim radom analizirano je ponašanje tri različite mješavine tla koje su izložene djelovanjem gravitacije i simulacije oborine za tri različita nagiba kosine. Za potrebu provedbe ispitivanja i izrade modela korišteni su računalni programi AutoCaD, GiD, Anura3D te ParaView. Za numeričke simulacije koristila se metoda materijalne točke koja kombinira prednosti pristupa koji se temelje na mreži i na točkama. Točnost analize ovisi o poštivanju zakona očuvanja mase, zakona o očuvanju momenta količine gibanja i zakona o očuvanju mehaničke energije. Kod statičkih modela dogodio se instantni slom tla u četiri simulacije u trajanju od par sekundi, za sve tri mješavine tla kosine od 40° te za kaoland15 pri nagibu kosine od 35° . Do sloma tla je došlo zbog prevelike razlike između kuta unutarnjeg trenja mješavina te nagiba kosine. Rezultati ostalih simulacija ukazuju na vrlo male pomake uslijed gravitacije u gdje su maksimalni pomaci zabilježeni u manje od sekunde bez daljnjeg značajnog rasta pomaka. Najveći pomak se dogodio u materijalu kaoland10 za nagib kosine 35° te iznosi oko 1 mm dok najveći pomaci u drugim modeli su manji od 1 mm, iz toga možemo zaključiti kako su pomaci premali te su zanemarivi. Obzirom na rezultate tranzitnih modela možemo vidjeti kako se najveći pomak za materijal modland za sva tri nagiba kosine dogodio prije samog vrha kosine dok za sve ostale materijale najveći pomak se događa na unutarnjem rubu modela pri vrhu kosine. Rezultati za modland su očekivani rezultati te iznose par centimetara za kosine nagiba 35° i 40° nakon 200 sekundi dok za kosinu od 30° pomak je par milimetara. Za ostale materijale možemo zaključiti kako se događa greška u simulaciji najvjerojatnije uzrokovana interakcijom rubnih uvijeta i mreže konačnih elemenata.

Iako se metoda materijalne točke često koristi u inženjerskoj praksi, čest slučaj je loše prakse i pogrešnog korištenja numeričkih alata. U pravilu, numerički modeli i analize trebaju ići od najjednostavnijih prema kompliciranijim jer su potrebne brojne razine idealizacije problema. Ovaj pristup omogućuje provjeru valjanosti u postupnom procesu kako bi se konačno dobio složeniji model i predviđanje. Važno je imati na umu da netočne vrijednosti parametara mogu dopustiti provođenje izračuna, ali dovode do netočnih rezultata stvarajući iluziju stvarnosti. Važno je ispitati model izvođenjem niza testova koji potvrđuju da je model ispravno postavljen. Zbog složenosti problema geotehničkog inženjerstva, numeričke metode pokazuju svoje jedinstvene prednosti. Ra-

cionalno modeliranje s razumijevanjem geotehnike je presudan čimbenik za ispravan numerički proračun. Numeričke metode imaju široku primjenu za analizu naprezanja, pomaka i stabilnosti. Međutim, rezultati simulacije često se uvelike razlikuju od onih na terenu. Konačno, važno je imati na umu da su numerička predviđanja po definiciji idealizirana interpretacija stvarnosti.

LITERATURA

- [1] Highland, L. and Bobrowsky, P. *The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides*. 01 2008. ISBN 978-141132226-4.
- [2] Highland, L. and Bobrowsky, P. *TXT-tool 0.001-2.1 Landslide Types: Descriptions, Illustrations and Photos*, pages 1–38. 01 2018. ISBN 978-3-319-57773-9. doi: 10.1007/978-3-319-57774-6_1.
- [3] Arai, W., Prunier, F., Djeran-Maigre, I., and Millard, A. Three-dimensional analysis of hydraulic effect on unsaturated slope stability. *Environmental Geotechnics*, 3, 12 2013. doi: 10.1680/envgeo.13.00099.
- [4] Pogledaj klizište, 2020. URL <https://pri-mjer.hr/virtualna-izlozba-pogledaj-kliziste/>.
- [5] URL <https://structville.com/2020/10/application-of-effective-stress-analysis-in-cohesive-soils.html>. [Online; accessed - Sep-2023].
- [6] Zhang, Y., Zhu, Y., Yan, X., Li, S., Yu, Q., and Wang, Y. A determination method of rainfall type based on rainfall-induced slope instability. *Natural Hazards*, 113, 08 2022. doi: 10.1007/s11069-022-05301-2.
- [7] Tsyrovich, N. *SOIL MECHANICS*. Mir Publishers Moscow, 1976.
- [8] Neto, M. A., Amaro, A., Roseiro, L., Cirne, J., and Leal, R. *Finite Element Method for 3D Solids*, pages 233–263. Springer International Publishing, Cham, 2015. ISBN 978-3-319-17710-6. doi: 10.1007/978-3-319-17710-6_7. URL https://doi.org/10.1007/978-3-319-17710-6_7.
- [9] Zhang, X., Chen, Z., and Liu, Y. *The Material Point Method: A Continuum-Based Particle Method for Extreme Loading Cases*. 10 2016. ISBN 9780124077164.
- [10] Tu, J., Zhang, Y., Mei, G., and Xu, N. Numerical investigation of progressive slope failure induced by sublevel caving mining using the finite difference method and adaptive local remeshing. *Applied Sciences*, 11(9), 2021. ISSN 2076-3417. doi: 10.3390/app11093812. URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/9/3812>.

- [11] Troncone, A., Conte, E., and Pugliese, L. Analysis of the slope response to an increase in pore water pressure using the material point method. *Water*, 11:1446, 07 2019. doi: 10.3390/w11071446.
- [12] Fern, E., Rohe, A., Soga, K., and Alonso, E. *The Material Point Method for Geotechnical Engineering: A Practical Guide*. 01 2019. ISBN 9781138323315. doi: 10.1201/9780429028090.
- [13] Franjic, V. *Utjecaj sitnozrnastih čestica na posmičnu čvrstoću krupnozrnastog tla*. PhD thesis, 2023. URL <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:157:084057>.
- [14] Shanmugam, G. *New perspectives on deep-water sandstones: Origin, recognition, initiation, and reservoir quality: Amsterdam, Elsevier, Handbook of petroleum exploration and production, v. 9, 524 p. ISBN: 978-0-444-56335-4. 2012.* 01 2012. ISBN ISBN: 978-0-444-56335-4.
- [15] Brönnimann, C. Effect of groundwater on landslide triggering. 01 2011.
- [16] Shanmugam, G. and Wang, Y. The landslide problem. *Journal of Palaeogeography*, 4(2):109–166, 2015. ISSN 2095-3836. doi: <https://doi.org/10.3724/SP.J.1261.2015.00071>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209538361530016X>.
- [17] Al-Atroush, M. Lectures notes : Numerical analysis in geotechnical engineering–theory and application-(part 1: Introduction)., 11 2018.
- [18] Duncan, J. M. and Wright, S. G. Soil strength and slope stability. 2005. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129019229>.
- [19] Melendo, A., Coll, A., Pasenau, M., Escolano, E., and Monros, A. www.gidhome.com, 2018. URL www.gidsimulation.com. [Online; accessed Jun-2018].
- [20] Community, Anura3D MPM Research. Anura3d mpm version xxxx source code, 2023. URL www.anura3d.com.
- [21] Ahrens, J., Geveci, B., and Law, C. ParaView: An end-user tool for large data visualization. In *Visualization Handbook*. Elsevier, 2005. ISBN 978-0123875822.
- [22] Maksimović, S. *Analiza površinskih pomaka na modelu klizišta*. PhD thesis, 2020. URL <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:157:844977>.
- [23] Cruden, D. and Varnes, D.J. Landslide types and processes. In: *Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), Landslides: investigation and mitigation. National Academy Press, Washington, D.C, 247:36–75, 01 1996.*

- [24] Hungr, O., Leroueil, S., and Picarelli, L. The varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 04 2014. doi: 10.1007/s10346-013-0436-y.
- [25] Han, B., Hou, S., Zhu, B., Wang, L., Li, A., and Ye, H. Deformation monitoring and prediction of a reservoir landslide in sichuan province, china. *Applied Mechanics and Materials*, 580-583:2694–2701, 07 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.2694.
- [26] Martha Patuti, I. Mechanism and characteristics of the landslides in bone bolango reGENCY, gorontalo province, indonesia. *International Journal of Geomate*, 12, 02 2017. doi: 10.21660/2017.29.79901.
- [27] Alsubal, S., bin Sapari, N., Harahap, I.S.H., and Ali Mohammed Al-Bared, M. A review on mechanism of rainwater in triggering landslide. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 513(1):012009, apr 2019.
- [28] Galeandro, A., Doglioni, A., Simeone, V., and Simunek, J.J. Analysis of infiltration processes into fractured and swelling soils as triggering factors of landslides. *Environmental earth sciences*, 07 2013. doi: 10.1007/s12665-013-2666-7.
- [29] Tiwari, B. and Caballero, S. Experimental modeling of rainfall induced slope failures in compacted clays. *Geotechnical Special Publication*, pages 1217–1226, 03 2015. doi: 10.1061/9780784479087.109.
- [30] Chinkulkijniwat, A., Yubonchit, S., Horpibulsuk, S., Jothityangkoon, C., Jeep-taku, C., and Arulrajah, A. Hydrological responses and stability analysis of shallow slopes with cohesionless soil subjected to continuous rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12):2001–2013, 2016. doi: 10.1139/cgj-2016-0143.
- [31] Li, W. C. Implication of subsurface flow on rainfall-induced landslide: a case study. *Landslides*, 13, 07 2015. doi: 10.1007/s10346-015-0619-9.
- [32] Tiwari, B., Tran, D., Ajmera, B., Carrilo, Y., Stapleton, J., Khan, M., and Mohiuddin, S. *Effect of Slope Steepness, Void Ratio, and Intensity of Rainfall on Seepage Velocity and the Stability of Slopes*, pages 584–590. doi: 10.1061/9780784479742.048.
- [33] Terzaghi, K and Fröhlich, O. K. Theorie der setzung von tonschichten: eine einführung in die analytische tonmechanik. 1936.
- [34] Cherrett, T. Ice manual of geotechnical engineering. *Transport*, 165:79–79, 05 2012. doi: 10.1680/tran.2012.165.2.79.

- [35] Potts, D. Numerical analysis: A virtual dream or practical reality? *Geotechnique*, 53:535–573, 01 2003. doi: 10.1680/geot.53.6.535.37330.
- [36] Sloan, S. Geotechnical stability analysis. *Géotechnique*, 63:531–572, 06 2013. doi: 10.1680/geot.12.RL.001.
- [37] Mefle, M. Á. V. *STUDY OF THE ACCURACY OF LIMITSTATE: GEO AND COMPLIANCE WITH EUROCODE 7 IN SLOPE STABILITY ANALYSIS*. PhD thesis, MSc thesis. University of Birmingham, 2014.
- [38] Bredtmann, M. Comparison of calculation software for numerics in geotechnics: Optumce and plaxis. *Documents Geotechnik Universität Duisburg-Essen*, 2020.
- [39] Brinkgreve, R. B. J., Swolfs W. M. and Engin, E. Reference manual plaxis, 2011. URL <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46137/manuals---plaxis>. [Online; accessed - Sep-2023].
- [40] Esgandari, M. and Olatunbosun, O. Implicit–explicit co-simulation of brake noise. *Finite Elements in Analysis and Design*, 99:16–23, 2015. ISSN 0168-874X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2015.01.011>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168874X15000128>.
- [41] Burns, K. J., Vasil, G. M., Oishi, J. S., Lecoanet, D., and Brown, P. P. Dedalus: A flexible framework for numerical simulations with spectral methods. *Physical Review Research*, 2(2):023068, April 2020. doi: 10.1103/PhysRevResearch.2.023068.
- [42] Alnaes, M. S., Blechta, J., Hake, J., Johansson, A., Kehlet, B., Logg, A., Richardson, C., Ring, J., Rognes, M. E., and Wells, G. N. The FEniCS project version 1.5. *Archive of Numerical Software*, 3, 2015. doi: 10.11588/ans.2015.100.20553.
- [43] URL <https://www.itascacg.com/software/flac2d>. [Online; accessed - Sep-2023].
- [44] Yerro, A., Rohe, A., Martinelli, M., Fern, J., and Ceccato, F. *Anura3D Scientific Manual version 2022*, 2022.
- [45] Jagodnik, V. *Primjena metode materijalne točke u inženjerstvu*. 2019.
- [46] Yerro, A., Rohe, A., Martinelli, M., Fern, J., and Ceccato, F. et al. *Anura3D Tutorial Manual version 2023*, 2023.
- [47] Bahadori, A. and Vuthaluru, H. B. Prediction of bulk modulus and volumetric expansion coefficient of water for leak tightness test of pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86(8):550–554, 2009.

- [48] Watson, J. T. R., Basu, R. S., and Sengers, J. V. An improved representative equation for the dynamic viscosity of water substance. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 9(4):1255–1290, 1980.
- [49] Li, L., Dai, Z., Liu, R., and Jian, F. Experimental study on the coefficient of earth pressure at rest for sand. *Buildings*, 13(5), 2023. ISSN 2075-5309. doi: 10.3390/buildings13051276. URL <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/5/1276>.
- [50] Špoljarić, M. *Određivanje krivulje retencije vode i koeficijenta propusnosti pijeska*. PhD thesis, 2021.