

Utjecaj podzemne vode na stabilnost kosina

Galić, Gorana

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:157:590736>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



image not found or type unknown 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**

Gorana Galić

Utjecaj podzemne vode na stabilnost kosina

Završni rad

Rijeka, 2020.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski sveučilišni studij
Građevinarstva
Geotehničko inženjerstvo**

**Gorana Galić
JMBAG: 0114030084**

Utjecaj podzemne vode na stabilnost kosina

Završni rad

Rijeka, rujan 2020.

Naziv studija: **Sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo**
Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Građevinarstvo
Znanstvena grana: Geotehnika

Tema završnog rada

UTJECAJ PODZEMNE VODE NA STABILNOST KOSINA
THE INFLUENCE OF GROUNDWATER ON SLOPE STABILITY

Kandidat: **GORANA GALIĆ**
Kolegij: **GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO**
Završni rad broj: **20-P-70**

Zadatak:

U radu će se obraditi problematika stabilnosti kosina, uzroci i pokretači nestabilnosti, a posebice utjecaj vode na pokretanje klizišta. Dat će se pregled osnovnih načina sanacije klizišta, a detaljnije će se obraditi drenaža kao mjera povećanja faktora sigurnosti na klizanje. U praktičnom dijelu rada potrebno je provesti analize stabilnosti metodom granične ravnoteže. Koristeći program *Slide2*, *Rocscience* potrebno je prikazati utjecaj razine podzemne vode na faktor sigurnosti kosine.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2020.

Komentor:

doc. dr. sc. Josip Peranić,
dipl. ing. građ.

Mentorica:

doc. dr. sc. Sanja Dugonjić Jovančević,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i komentorom, 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.

Gorana Galić

U Rijeci, 15. rujna 2020.

Utjecaj podzemne vode na stabilnost kosina

SAŽETAK

Pojave klizanja tla na padinama posljedica su sloma na određenim plohama ili zonama gdje posmična naprezanja zbog promjene opterećenja postanu veća od posmične čvrstoće tla. Najvažniji čimbenici pokretanja klizišta su oborine, infiltracija i promjena razine podzemne vode. U ovom radu opisani su utjecaji podzemnih voda poput pornog tlaka, hidrodinamičkih sila, tlaka vode i uzgona na stabilnost kosina. Kada su poznati uzroci klizanja i provjereni parametri, može se pristupiti projektiranju sanacije klizišta. Različitim mjerama sanacije moguće je smanjiti naprezanja i povećati posmičnu čvrstoću duž klizne plohe. Smanjenje razine podzemne vode izvedbom drenažnih elemenata jedan je od načina saniranja klizišta koji je detaljnije obrađen u ovom radu. Uspješnost provedenih mjera procjenjuje se provođenjem analiza stabilnosti.

KLJUČNE RIJEČI:

klizišta, analize stabilnosti kosina, podzemna voda, metode sanacije

The influence of groundwater on slope stability

ABSTRACT

Landslides on the slopes are consequence of the failure along shear plane or zone where, due to the increasing loads, shear stress becomes higher than the available shear strength. The most important landslide triggering factors are precipitation, infiltration and changes in groundwater level. In this work the influence of groundwater, such as pore pressure, hydromechanical forces, water pressure, and buoyancy are described. Only when the causes of the landslide are known and all the parameters have been determined, one can approach the design of remediation measures. Lowering of the groundwater level by installing different drainage elements is one possible approach for landslide rehabilitation, which is discussed in more details in this work. The success of implemented remediation measures is usually assessed by conducting slope stability analysis.

KEY WORDS:

landslides, slope stability analysis, groundwater, remediation measures

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	HIDROLOŠKI CIKLUS I IZVORI PODZEMNE VODE.....	3
3.	PODZEMNE VODE I INFILTRACIJA.....	5
4.	UTJECAJ PODZEMNE VODE NA STABILNOST KOSINA.....	7
5.	PROPUSNOST TLA	9
6.	UTJECAJ VODE NA STIJENSKU MASU.....	13
6.2.	Drugi važni utjecaji vode na stijensku masu – bubrenje i smrzavanje	16
7.	KLIZIŠTA.....	18
7.1.	Elementi i dimenzije klizišta	19
7.2.	Klasifikacija klizišta	21
8.	NAČINI SANACIJE KLIZIŠTA	24
8.1.	Drenaža kao mjera sanacije	25
8.1.1.	<i>Dreniranje drenažnim usjecima i bušenim drenovima</i>	26
8.1.2.	<i>Dreniranje horizontalnim drenovima</i>	28
9.	ANALIZE STABILNOSTI – METODE GRANIČNE RAVNOTEŽE	30
10.	ANALIZE STABILNOSTI KOSINE UPOTREBOM PROGRAMA SLIDE2 (ROCSCIENCE).....	35
11.	ZAKLJUČAK.....	39
12.	LITERATURA	40

POPIS TABLICA

Tablica 1: Koeficijent propusnosti raznih vrsta tala [1].....	10
Tablica 2: Dimenzije kliznog tijela [5].....	20
Tablica 3: Ograničenja, usvojene pretpostavke i uvjeti ravnoteže proračuna za različite metode [9].....	32

POPIS SLIKA

Slika 1: Kruženje vode u prirodi [6].....	4
Slika 2: Efekt povećanja pornog tlaka [13].....	8
Slika 3: Varijacije faktora sigurnost s obzirom na kut nagiba kosine [10].....	8
Slika 4: Visina dizanja vode u kapilarama [1].....	11
Slika 5: Prodiranje vode iz trošne stijene u nekonsolidirano tlo [6].....	12
Slika 6: Hidraulička vodljivost različitih geoloških materijala [3].....	15
Slika 7: Karakterističan presjek klizišta [1].....	18
Slika 8: Elementi klizišta [15].....	19
Slika 9: Dimenzije kliznog tijela [5].....	20
Slika 10: Rotacijska klizanja [1].....	21
Slika 11: Translacijsko kliženje bloka i plohe [1].....	22
Slika 12: Složeno klizanje, kombinacija ravne i zakrivljene plohe [1].....	22
Slika 13: Tečenje tla [1].....	23
Slika 14: Višestruko retrogresivno klizanje [1].....	23
Slika 15: Metode drenaže u kosini [3].....	26
Slika 16: Detalj izlaza cijevnog drena iz stijenskog pokosa [2].....	27
Slika 17: Horizontalni drenovi u kosini [16].....	28
Slika 18: Sile i naprezanja na kliznoj plohi (a) poligon sila (b) komponente naprezanja na elementu klizne plohe [13].....	31
Slika 19: Geometrija modela kosine	35
Slika 20: Položaj kritične klizne plohe s pripadajućim faktorom sigurnosti za suhe uvjete	36
Slika 21: Porast podzemne vode do nožice klizišta	37
Slika 22: Razina podzemne vode pri kojoj nastupa slom tla.....	38
Slika 23: Izvedba samobušivih drenova.....	38

1. UVOD

Klizišta spadaju u najvažnije prirodne katastrofe. Dobro je poznato da je voda jedan od glavnih pokretača klizišta. Klizanje tla označava kretanje površinskog sloja zemljišta na nagnutoj površini terena. Brojne studije o klizištima raspravljaju o različitim učincima koje voda može imati na stabilnost kosina: porast nivoa podzemne vode i posljedični porast tlaka vode u porama, eksfiltracija podzemne vode iz čvrste podloge, erozija izazvana procurivanjem, hidraulički pritisak podizanja ispod klizišta i utjecaj vode na plastičnost klizišta. Geološke i hidrogeološke značajke poput propusnosti i saturacije klizišta i slojeva materijala od kojeg je klizište građeno u velikoj mjeri određuju koji su od tih procesa dominantni u izazivanju klizanja [6].

Shema protoka podzemne vode može se vremenom promijeniti zbog aktivnosti klizišta, stvaranja pukotina i povećane propusnosti uslijed zasićenja tla. Kada je nagnuto lice podzemne vode, potrebna su povećana tangencijalna naprezanja da preuzmu sile zbog strujnog tlaka. Zapaženo je da je u padini od malo propusnog materijala lice podzemnih voda većinom približno paralelno s površinom, a manje se oscilacije pojavljuju zbog sezonskih oscilacija oborina. Nagli poremećaji toga stanja, koji nastaju zbog dugotrajnih nepovoljnih klimatskih utjecaja, zbog trajnog procjeđivanja vode u tlo iz defektnih vodovodnih ili kanalizacijskih cijevi, zbog nepažljivog natapanja, zbog izgradnje brana i stvaranja akumulacijskih jezera, povišuju razinu podzemnih voda i povećavaju strujni tlak, što nepovoljno utječe na postojeću ravnotežu padine i može uzrokovati klizanje tla [5].

Promjena vegetacijskog pokrivača sječom šume i nepažljivo obrađivanje zemlje obično povećavaju razinu podzemne vode u tlu, što pobuđuje klizanje tla. Od promjene vegetacijskog pokrivača do prvih pojava klizanja može proći i do 50 godina, pa se obično uzroci pripisuju nekom drugom čimbeniku. Posljedice, međutim, nepažljivog obrađivanja zemlje ili izlivanje i natapanje površine većim količinama vode pojavljuju se već nakon nekoliko godina [5].

Daleko najvažniji učinak podzemne vode u stijenskoj masi je smanjenje stabilnosti koja je posljedica pritiska vode unutar diskontinuiteta, pornog pritiska. Pri ispitivanju

stijenskog pokosa ili pokosa tla može se dogoditi pogreška i pretpostaviti da podzemna voda ne postoji ako se na licu kosine ne pojavi curenje vode. Brzina prodiranja može biti manja od brzine isparavanja, pa zbog toga površina nagiba može biti suha, a ipak može postojati voda pod velikim pritiskom u stijenskoj masi. Za nestabilnost kosina odgovoran je tlak vode, a ne brzina protoka. Odvodnja je jedno od najučinkovitijih i najekonomičnijih rješenja za poboljšanje stabilnosti kosina. Racionalno projektiranje sustava odvodnje moguće je samo ako se razumije obrazac protoka vode unutar stijenske mase, a mjerenje hidrauličke vodljivosti i tlaka vode ključ je ovog razumijevanja [3].

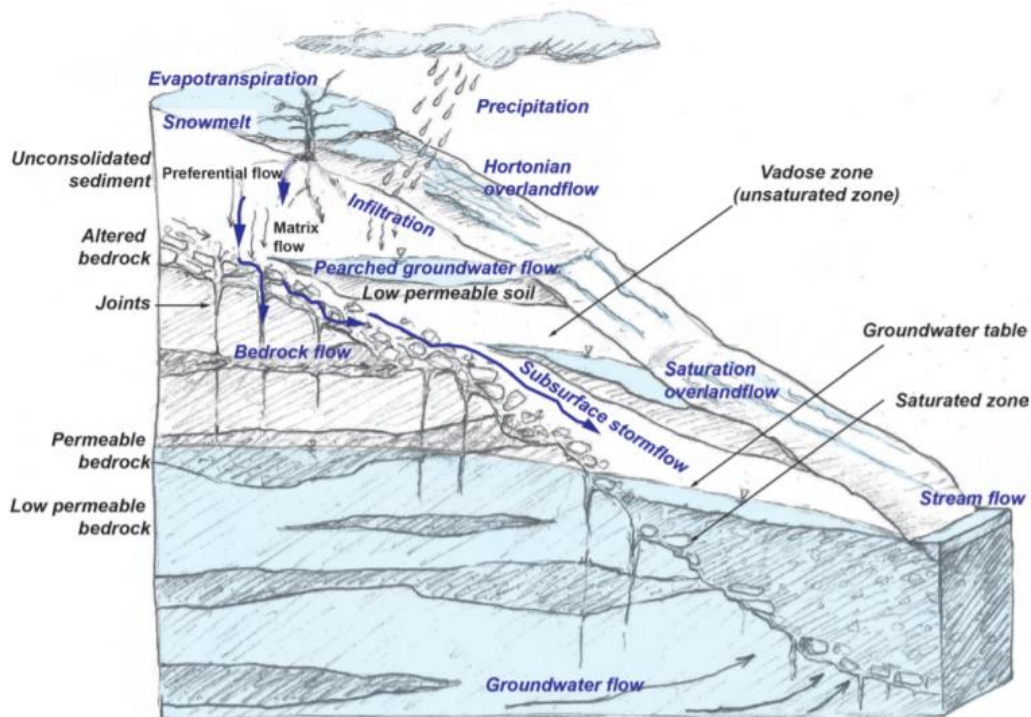
2. HIDROLOŠKI CIKLUS I IZVORI PODZEMNE VODE

Hidrološki ciklus odnosi se na ciklus kruženja vode u prirodi, a predstavlja postojanje i kretanje vode na, u i iznad tla. Hidrološki ciklus kontrolira prostornu i vremensku raspodjelu svježije vode koja je ujedno i obnovljiva.

Voda je na Zemlji u stalnom kretanju i uvijek u drugom stanju, od tekućeg stanja, vodene pare, odnosno plinovitog stanja i leda, to jest krutog stanja, što čini Zemlju jedinstvenom u Sunčevu sustavu i omogućuje život na njoj. Procesi koji čine hidrološki ciklus su oborine, kondenzacija, infiltracija, otjecanje i evaporacija.

Ciklus se odvija tako da Sunce zagrijava oceane, mora i ostale vode i tako uzrokuje proces evaporacije gdje voda prelazi iz tekućeg stanja u plinovito. Uslijed utjecaja promjena temperature ili tlaka zraka vlaga se kondenzira i vraća na zemlju u obliku kiše ili snijega. Isparava oko 70% prosječne količine oborina, a ostatak se pojavljuje kao tekuća voda na zemlji ili ispod površine. Određena količina vode isparava u zraku između oblaka i kopnene površine, a preostala količina izravno isparava s vlažnih površina i kroz proces transpiracije putem biljaka, iz njihovih listova i stabljika. Ostatak vode koji se ne vraća u atmosferu, gotovo 30%, čini otjecanje i osigurava potencijalno dostupnu slatku vodu. U površinskim vodotocima se skuplja dio vode koja otječe, no veći udio prodire u podzemlje kroz propusno tlo. Voda koja je prodrla u tlo može se pojaviti na površini u obliku arteških izvora ili kao povremeni izvori u obliku estavela, a ispod razine mora se pojavljuju izvori u obliku vrulja [8].

Slika 1 prikazuje hidrološki ciklus i različite komponente površinskih i podzemnih voda koje teku padinom. Otjecanje po površini nastaje kao saturirani nadzemni tok kada je tlo potpuno zasićeno i kada oborine premaše sposobnost infiltracije u tlo. Otjecanje ispod površine naziva se podzemni tok [6].



Slika 1: Kruženje vode u prirodi [6]

Ovaj pojednostavljeni hidrološki ciklus prikazuje neke tipične izvore podzemne vode i naglašava da podzemna voda može prijeći znatne udaljenosti kroz stijenu i tlo. Stoga je važno uzeti u obzir regionalnu geologiju područja. Voda u tlu općenito teče od mjesta višeg prema mjestu nižeg visinskog potencijala brzinom koja ovisi o propusnosti tla (opisano u poglavlju 5).

Glavni izvor podzemne vode je vadozna voda. Vadozna voda je u zoni u kojoj je voda pod tlakom manjim od atmosferskog tlaka, nalazi se iznad razine podzemne vode u kojoj su pore ispunjene zrakom. Freatska voda teče lateralno uslijed hidrostatskog tlaka ispod vodnog lica, a iz nje crpe vodu izdašni bunari. Na sve većim dubinama i tlakovima manje je i freatske vode, pa je tako većina stijena suha na dubinama većim od 3 km. Kapilarna voda se uzdiže iznad razine podzemne vode uslijed površinske napetosti. Kapilarne vode ima vrlo malo u šljuncima, a u glinama doseže i do 10 m. Izvori podzemne vode osim oborina mogu obuhvaćati i prikupljanje vode iz susjednih rijeka, zemljanih brana, akumulacija ili oceana [7].

3. PODZEMNE VODE I INFILTRACIJA

Podzemne vode su vode koje se nalaze u podzemlju. Stacionarne su ili teku kroz podzemlje. Različita im je starost, pa tako podzemne vode mogu biti stare tek nekoliko dana ili čak do par tisuća godina. Podzemlje se može sastojati od nekonsolidiranog sedimenta, raspucale stijene ili masivne čvrste stijene, a infiltracija podrazumijeva prodiranje vode s površine u dubinu tla čime se stvara podzemna voda. Tok površinske vode prema podzemlju se odvija gravitacijski ili svojstvom kapilarnosti. Stvaranje podzemnog toka ovisi o prethodnoj zasićenosti tla, topografiji čvrste stijene, geometriji, dubini i propusnosti različitih slojeva materijala tla i stijena. Razina podzemne vode je razina u stijeni ili tlu ispod koje su sve pore ispunjene vodom, može se reći da prati topografiju površine, ali je blažeg reljefa. Kod tla i stijena veće propusnosti velike količine voda otječu, odnosno infiltriraju se u podzemlje.

Količina vode koja se infiltrira u tlo zavisi o tome kako su oborine raspoređene, koliki je dio voda koje otječu po površini, kakva je evaporacija na tom prostoru, te kakvi su hidrogeološki odnosi u zoni prihranjivanja vodonosnika. Vodonosnik, odnosno vodonosni sloj je porozni medij koji vodu prima, propušta i u nekim vodonosnicima i otpušta. Za vrijeme visokog intenziteta oborina zasićenje vodom se pojavljuje prvo unutar gornjeg sloja tla (zasićenje odozgo prema dolje), a za vrijeme slabog intenziteta oborina javlja se pri dnu tla duž nepropusnog sloja (zasićenje odozdo prema gore) [7].

Prihranjivanje podzemnih voda odvija se najčešće infiltracijom, te nerijetko otjecanjem koncentriranih vodnih tokova. Veličina infiltracije ovisi o karakteristikama tla i tipu i gustoći vegetacijskog pokrova, a svojstva podzemnih voda ovise o geološkom sastavu podzemlja i podzemnoj hidrologiji. Količina podzemne vode koja pridonosi stvaranju prolaznih podzemnih voda varira s trajanjem i intenzitetom oborina. Bilo da se podzemni tok vode pojavljuje samo u tlu ili i u tlu i na čvrstoj podlozi, on može dovesti do povećanog i pozitivnog poreznog tlaka na strmom terenu i tako pokrenuti klizište. Različiti procesi i čimbenici djeluju istodobno u interakciji koja dovodi do klizanja kosina. Važno je procijeniti potencijalne uzroke i uzeti u obzir potencijalne promjene u vremenu [6].

Infiltracija oborinske vode u tlo utječe na pogoršanje uvjeta stabilnosti i može izazvati klizanje kosina na dva načina, to su smanjenjem kapilarnog tlaka, što utječe na povećanje

pornog tlaka i tako smanjuje efektivna naprezanja u materijalu i čvrstoću na smicanje i povišenjem razine zasićene zone iznad podzemne vode, također s istim posljedicama. Za oba učinka smanjuju se sile otpora na kliznoj plohi, a sile koje pospješuju klizanje se povećavaju [10].

Dodatno, slijevanje kiše i otapanja snijega utječe na povećanje težine materijala kosina. Osim toga, podzemna voda postoji gotovo svugdje ispod zemljine površine, ispunjava pore između čestica ili pukotina u stijeni, te može doći do diskontinuiteta koji je prisutan u stijenskoj masi i tako zamijeniti zrak vodom u pornom prostoru i na taj način dovesti do sloma tla [3].

Procjenjujući odnos klime i razine podzemnih voda u kosinama treba uzeti u obzir i prosječne količine oborina i vršne događaje jer oni obično uzrokuju nestabilnosti. Primjeri događaja vršnih oborina koji mogu dovesti do visokih stopa infiltracije uključuju tajfune, intenzivne kiše i brzo otapanje snijega [3].

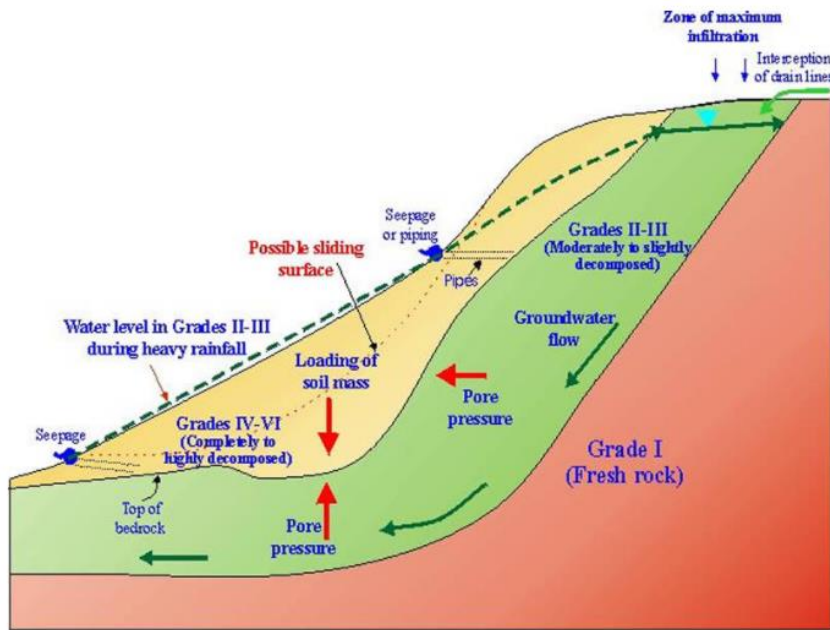
Često je nemoguće je izolirati samo jedan učinak vode i identificirati ga kao jedan od uzroka katastrofe.

4. UTJECAJ PODZEMNE VODE NA STABILNOST KOSINA

Kao što je i ranije spomenuto, podzemna voda mijenja težinu tla, pa tako utječe i na naprezanje do sloma tla. Utjecaj podzemne vode na kosinu može se razmatrati na dva načina. Prvi način obuhvaća podzemnu vodu ili vodonosnik ispod površine koji stvara pritisak vode u porama, a drugi obuhvaća infiltraciju kišnice koja prodire kroz površinu i teče niz padinu stvarajući pritisak vode. Utjecaj je povezan s okolnim razinama oborina, obližnjim vodenim masama, topografijom i hidrogeološkim karakteristikama stijene i tla [10].

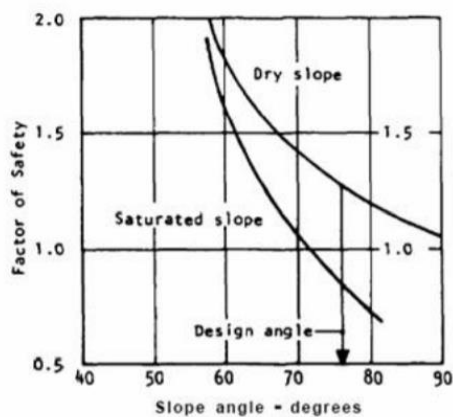
U srednje čvrstim i čvrstim stijenama voda ulazi u pukotine čime može značajno smanjiti stabilnost stijenskog pokosa. Tlak vode koji djeluje u diskontinuitetima smanjuje efektivna normalna naprezanja koja djeluje na ravninu, smanjujući na taj način posmičnu čvrstoću duž te iste ravnine. U slučaju kada se opterećenje poveća na vrhu padine tako se poveća i porni tlak. Stoga, ispunjavanje diskontinuiteta vodom može rezultirati smanjenjem stabilnosti umjetnih i prirodnih kosina.

Ukoliko je nekonsolidirani materijal suh ili nezasićen, porast opterećenja komprimira zrak u porama i tako zbija masu i približava zrna ili fragmente stijena zajedno, što povećava njenu čvrstoću na smicanje. Kada je stijenska masa zasićena, dolazi do porasta vanjskog tlaka i time dovodi do porasta pornog tlaka zbog nestišljivosti vode. Na slici 2 može se vidjeti tipičan geotehnički profil unutar kojega nastupa klizanje. Vidljivo je nekoliko slojeva materijala različite trošnosti, pri čemu je svježija stijenska masa u podlozi. Podloga je nepropusna i porni pritiscu javljaju se u gornjim propusnim slojevima gdje utječu na degradaciju posmične čvrstoće i slom. Klizanje nastupa pri visokim razinama podzemne vode, a potencijalna klizna ploha se uvijek ispod te razine. Za klizišta je također tipično procjeđivanje vidljivo na površini terena. Nekonsolidirani sedimenti ponašaju se na različite načine ovisno o tome jesu li suhi ili vlažni.



Slika 2: Efekt povećanja pornog tlaka [13]

Stabilnost kosina općenito ovisi i o kutu nagiba kosine. Graf na slici 3 prikazuje utjecaj sadržaja vode u stijeni na faktor sigurnosti kosine pri različitim kutovima nagiba kosine. Opisano je da se za povećanje kuta nagiba od 60° do 80° faktor sigurnosti kosine u uvjetima suhe stijene smanjuje s vrijednosti 2 na oko 1 (opisano u poglavlju 9). Dok u uvjetima zasićene stijene, porast kuta nagiba čini kosinu nestabilnom kada vrijednost kuta prelazi 70° . [10]



Slika 3: Varijacije faktora sigurnost s obzirom na kut nagiba kosine [10]

5. PROPUSNOST TLA

Propusnost tla, odnosno međuzrnska propusnost, označava raspršeni tok između zrna, a specifična je za pijeske i šljunke u slabo cementiranim pješčenjacima i za porozne vapnence. Ovisi o zasićenosti tla i podložna je vremenskim promjenama kao što su velike kiše i otapanje snijega, a također i sušna razdoblja gdje smanjena zasićenost dovodi do povećane hidrauličke vodljivosti, npr. u glinenim tlima se formiraju pukotine zbog isušivanja tla kroz koje se voda vrlo lako infiltrira [7].

Ovisno o propusnosti tla, voda u tlu teče od mjesta višeg potencijala prema mjestu nižeg potencijala, te izaziva hidrodinamičke sile i sile uzgona na uronjene volumene ispod razine vode u tlu. Posljedica tih pojava je promjena sila mase koje djeluju na svaku česticu tla zbog gravitacije. Darcy (1856.) je postavio hipotezu da je fiktivna brzina toka kroz tlo proporcionalna gradijentu tlaka i prema izrazu (1) preuzetom iz [1]:

$$v = k * i \quad (1)$$

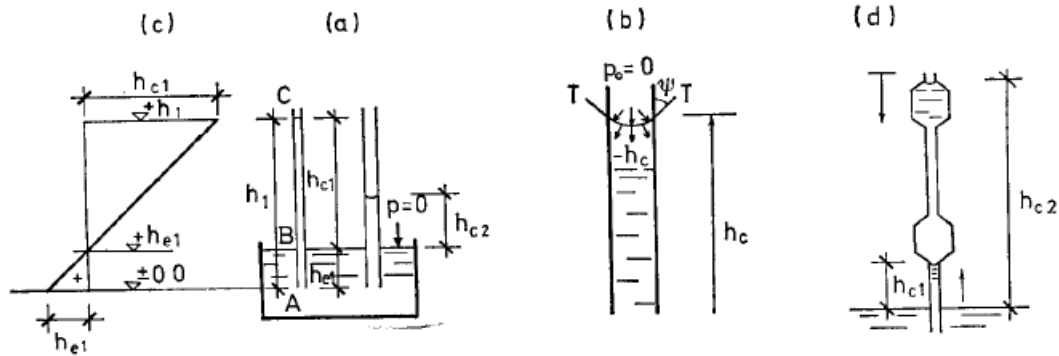
Konstanta koeficijenta propusnosti k ovisi o osobinama tla i viskoznosti vode koja teče, što znači da ovisi o geometriji i širini pora među česticama kroz koje teče voda, što je prikazano u tablici 1. Određuje se u laboratoriju mjerenjem protoka vode kroz uzorak konstantnog presjeka uz određene uvjete tlaka. Fiktivna, odnosno imaginarna brzina v označava brzinu toka vode gdje se pretpostavlja da voda teče kroz tlo i pore, a zapravo prolazi samo kroz pore tla većom efektivnom brzinom koja ovisi o relativnom porozitetu tla. Gradijent tlaka i , odnosno hidraulički gradijent označava razliku razine podzemne vode na ulazu i izlazu iz promatranog dijela na određenoj duljini puta vode kroz tlo. Darcyjev zakon vrijedi za sitnozrnasta tla gdje nema turbulencije u sitnim porama, odnosno opisuje laminarno kretanje vode u porama. Darcyjev zakon primjenjiv je na porozne medije pa se tako može koristiti za proučavanje protoka podzemne vode u intaktnoj stijeni. Međutim, potrebno je da protok bude laminaran, stoga Darcyjev zakon nije primjenjiv u slučaju nelinearnog ili turbulentnog protoka u pojedinačnom lomu [1].

Tablica 1: Koeficijent propusnosti raznih vrsta tala [1]

Materijal:	Šljunak	Pijesak	Sitan pjeskovit prah i smjese	Glina
k (cm/s)	10^2-10^{-1}	$10^{-1}-10^{-3}$	$10^{-3}-10^{-7}$	$< 10^{-7}$
Primjena materijala:	Propusni dijelovi nasipa		Nepropusne jezgre nasipa	

Posebno treba naglasiti da propusnost glinovitog tla ne ovisi samo o koeficijentu propusnosti nego ponajviše o vrsti minerala gline od kojih se to tlo sastoji. Različiti minerali gline privlače i vežu molekule vode za svoje površine silama različitog intenziteta čime nastaje sloj vezane vode kojoj debljina i gustoća ovise o intenzitetu tih sila.

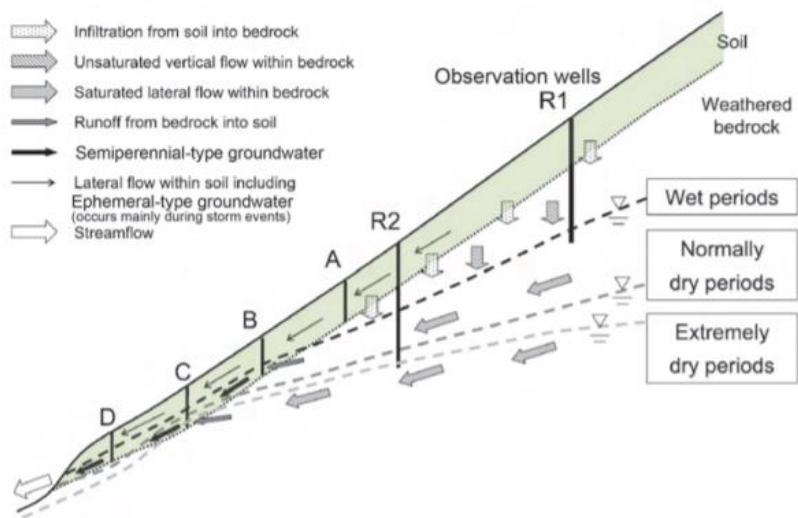
Povećanjem poroziteta raste postotak plohe kroz koju voda može teći, a time nastaje veći promjer pora čime se smanjuju otpori tečenju. Međusobna povezanost, raspodjela i oblik pora, a tako i količina plinova također utječu na veličinu propusnosti i sprječavaju protok vode. Propusnost je u svim smjerovima jednaka ukoliko su pore u tlu homogeno raspodijeljene. Pore između čvrstih čestica tla tvore složenu mrežu nasumce povezanih, nepravilnih prostora (kapilara) koji su na različitim mjestima različitog promjera. Visina dizanja vode osim što ovisi o promjeru i materijalu od kojeg je građena kapilara, u takvim, nepravilnim kapilarama ovisi i o smjeru kretanja vode. Na slici 4 je prikazana visina penjanja vode u kapilarama. Na početku je prikazano dizanje razine vode ovisno o različitim promjerima cjevčica (a) i pripadajući graf hidrostatskog tlaka (c) koji je na vrhu kapilare negativan i jednak atmosferskom tlaku zbog razlike između tlaka u vodi i na njezinoj površini. Poznato je da je vlačno naprezanje vode u uskim kapilarama veći zbog većeg molekularnog tlaka. Pod (b) su prikazane sile na površini vode koja je zakrivljena upravo zbog toga što ona preuzima razliku tlaka zbog napetosti. Na kraju je prikazano dizanje vode u kapilari s obzirom na različite promjere duž kapilare, a ovisi o smjeru kretanja vode. Kada vodostaj raste, voda će u kapilari dosegnuti visinu h_{c1} , do prvog proširenja. Ako se vodostaj snižava nakon prethodnog natapanja do veće visine, voda će e zaustaviti iznad proširenja, na visini h_{c2} [1].



Slika 4: Visina dizanja vode u kapilarama [1]

Podaci o kapilarnom dizanju vode vrlo su bitni kako bi se riješio problem utjecaja mraza, dimenzioniranja nasipa i slično. Djelovanje mraza se može u prirodi primijetiti opažanjem da se površina tla tokom smrzavanja zimi mjestimično izdiže, i da se ta mjesta kada okopni u proljeće potpuno ovlaže. Volumen vode se pri smrzavanju poveća cca 10%. Što znači da ako u porama tla ima oko 30% vode po volumenu, nakon smrzavanja bi se površina smrznute zone mogla izdignuti za 3% svoje debljine. To bi od prilike bilo nekoliko centimetara. Kada se led u smrznutim zonama otapa stvaraju se područja prezasićenog tla žitke konzistencije, što dovodi do manjih čvrstoća tla. Šljunak i pijesak nisu opasni za smrzavanje jer učinak mraza ovisi o količini frakcija ispod 0,02 mm, propusnosti, dubini podzemne vode, visini kapilarnog dizanja, zasićenosti pora vodom i o klimatskim uvjetima [1].

Ispod površine tla može se nalaziti nekonsolidirani sediment, trošna stijenska masa ili masivna čvrsta stijenska masa. Infiltracija oborina dovodi do smanjenja posmične čvrstoće tla posebno u homogenim profilima kosina. Ovisno o sezoni podzemna voda prodire iz trošne i lomljive stijene u nekonsolidirano tlo na površini kao što je prikazano na slici 5, gdje se jasno vidi da se voda infiltrira s površine u tlo, iz tla u stijenu i procjeđujući se nezasićenim vertikalnim tokom unutar temeljne stijene. Lateralnim tokom kroz stijenu voda otječe ka nožici gdje prodire iz kosine. Količina podzemnih voda temeljnih stijena koje doprinose stvaranju privremenih podzemnih voda varira ovisno o trajanju i intenzitetu kiša. Zbog variranja razine podzemne vode u vlažnim i suhim periodima može doći do nestabilnosti materijala na kosini [6].



Slika 5: Prodiranje vode iz trošne stijene u nekonsolidirano tlo [6]

6. UTJECAJ VODE NA STIJENSKU MASU

Propusnost stijene predstavlja mogućnost stijene da pretežno kroz njezine diskontinuitete protječe voda zbog vrlo slabe hidrauličke vodljivosti intaktne stijene. Protok podzemne vode može doprinijeti otjecanju u većini okruženja, a posebno podzemni protok između svježije stijene i nekonsolidiranog sedimentnog pokrova može biti jako važan zbog propusnosti u tom sloju koja može biti veća nego u prekrivajućem sloju. Pukotinska propusnost označava tok vode kroz pukotine u stijenama i povremeni tok vode u rasjednoj zoni. Tok podzemne vode potpomaže sekundarnu propusnosti koja označava povećanu propusnost zbog otapanja (posebno u vapnencima) i povremeni neraspršeni tok kroz proširene pukotine i kaverne [7].

Stabilnost stijenske mase ovisi o prisutnosti diskontinuiteta, točnije o njihovim mehaničkim svojstvima koja su povezana s morfološkim značajkama kao što su dilatacijski pukotinski otvori izazvani erozijom i hrapavost.

Hrapavost je karakteristična za površinsko stanje, opisuje nepravilnost površine nastale mehaničkim i kemijskim djelovanjima. Mjera hrapavosti vrši se laserom (kontrola skeniranja) kako bi se promatrala evolucija površine podvrgnute protoku kisele vode tj. kišnice. Poznato je da je koeficijent trenja manji na glatkoj površini nego na hrapavoj površini. Početna hrapavost koja se u stvarnosti mjeri prije nego što padne kiša, definira se kao referentno stanje, a nakon pada kiše hrapavost se smanjuje i što je više površina zasićena kišom to je hrapavost sve manja dok na kraju ista ta površina izgleda kao i početno, referentno stanje. Ovakav dokaz eksperimentom omogućava nam da razumijemo procese razgradnje vapnenca. Što je veći i snažniji protok vode, to je veća promjena. Brzina erozije vapnenca određena je razvojem pH vrijednosti. Protok vode kontrolira hrapavost i njezin razvoj, a pH vrijednost kiše u prirodi iznosi oko 5 [12].

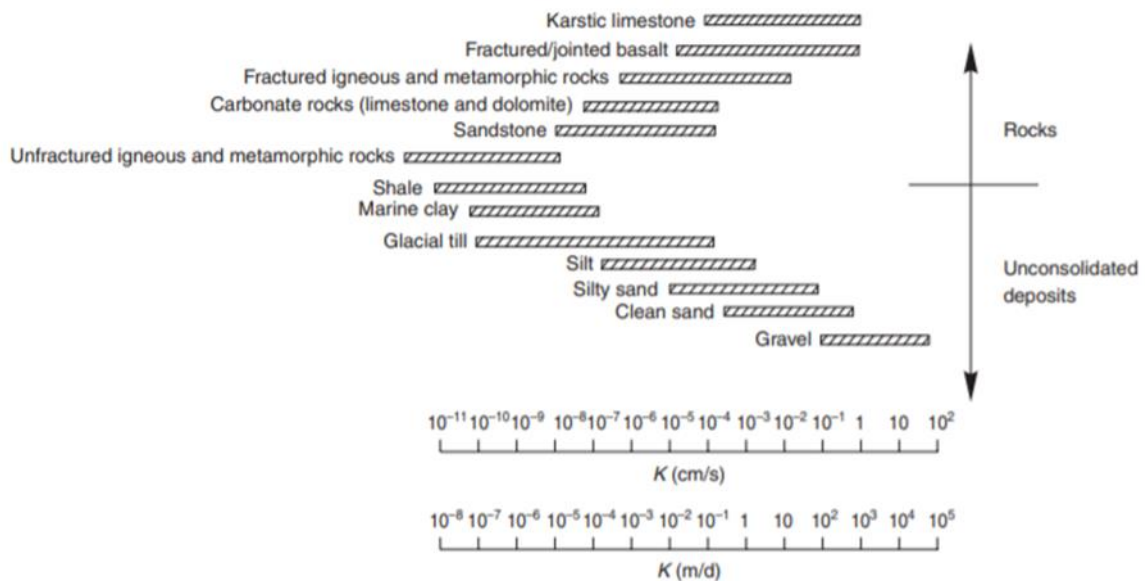
6.1. Propusnost stijena i trošenje

Prisutnost podzemne vode u stijenskom pokosu može imati štetan utjecaj na stabilnost iz sljedećih razloga: tlak vode smanjuje stabilnost padina smanjujući čvrstoću na smicanje

potencijalno lomljivih površina, tlak vode u vlačnim pukotinama ili sličnim skoro okomitim pukotinama smanjuje stabilnost povećavajući sile koje potiču klizanje. Promjene u sadržaju vlage nekih stijena, posebno škriljaca, mogu prouzrokovati ubrzano raspadanje i smanjenje čvrstoće na smicanje [3].

Postoji veliki broj parametara koji kontroliraju protok podzemne vode u stijenskim masama.

Hidraulička vodljivost, odnosno propusnost, je osnovni parametar koji definira protok podzemne vode i raspodjelu vodnog tlaka među čvrstim česticama kroz koje teče voda. Ovaj parametar povezuje protok vode kroz materijal s gradijentom tlaka, koji opisuje promjenu tlaka vode po udaljenosti. U većini vrsta stijena protok kroz intaktnu stijenu je zanemariv, a u osnovi se sav protok odvija duž diskontinuiteta. Na primjer, hidraulička vodljivost intaktnog granita i bazalta iznosi oko 10^{-10} cm/s, dok za neke krupne, slabo zbijene pješčenjake primarna hidraulička vodljivost može biti najviše 10^{-4} cm/s. Ovi uvjeti rezultiraju time da sekundarna hidraulička vodljivosti ima širok raspon vrijednosti koje ovise o postojanosti, širini i karakteristikama ispuna diskontinuiteta. Izraz sekundarna hidraulička vodljivost odnosi se na tok u stijenskoj masi i obuhvaća protok i u intaktnoj stijeni i bilo kojim prisutnim diskontinuitetima. Na primjer, granit koji ima vrlo nisku primarnu hidrauličku vodljivost obično sadrži zbijene, čiste spojeve slabe postojanosti, pa je i sekundarna hidraulička vodljivost niska. Suprotno tome, pješčenjak može imati primarnu vodljivost, a prisutnost slojevitosti rezultira visokom sekundarnom vodljivošću u smjeru paralelnom sa slojevima. Tipični rasponi sekundarne hidrauličke vodljivosti za različite vrste stijena, kao i za nekonsolidirane naslage, prikazani su na slici 6. To pokazuje poteškoće u predviđanju količina dotoka vode i pritiscima unutar kosina [3].



Slika 6: Hidraulička vodljivost različitih geoloških materijala [3]

U analizi stabilnosti kosine stijene najvažniji čimbenik koji treba uzeti u obzir je geometrija stijenske mase iza površine. Odnos između orijentacije diskontinuiteta i iskopanog lica stijene odredit će hoće li dijelovi stijenske mase slobodno kliziti ili se srušiti. Slijedeći najvažniji čimbenik koji upravlja stabilnošću je posmična čvrstoća potencijalne klizne plohe [3].

Ako diskontinuitet sadrži ispunu, svojstva posmične čvrstoće loma često se mijenjaju, s tim da na koheziju i kut trenja površine utječu debljina i svojstva ispunje. Za zonu ispunjenu glinom u granitu, pretpostavljalo bi se da bi posmična čvrstoća diskontinuiteta bila ona gline, a ne granita. U slučaju zacjeljenog prijeloma ispunjenog kalcitom, u proračunima bi se koristila visoka kohezija, ali samo ako bi bilo sigurno da će diskontinuitet ostati zacjeljen nakon bilo kakvih smetnji, na primjer smetnji uzrokovanih miniranjem. (rock) Rasjedi koji sadrže glinu ili ispućanu stijenu imaju malu vodljivost i mogu djelovati kao barijere podzemne vode iza kojih se može stvoriti visoki pritisak vode, dok rasjedi koji sadrže drobljenu i lomljenu stijenu imaju veliku vodljivost pa tako mogu djelovati kao drenaže [3].

Dva su glavna učinka na trošenje stijena: jednim dominira mehanička dezintegracija, drugim kemijsko razaranje, uključujući otapanje stijena. Općenito,

mehanički i kemijski učinci djeluju zajedno, ali, ovisno o klimatskom režimu, jedan ili drugi mogu biti dominantni.

Mehaničko trošenje stijena dovodi do otvaranja diskontinuiteta, stvaranja novih diskontinuiteta lomom stijena, promjene granulacije i loma pojedinih mineralnih zrna. Kemijsko trošenje rezultira promjenom boje stijene i dovodi do eventualne razgradnje silikatnih minerala u minerale gline. Neki se minerali, posebno kvarc, odupru ovom procesu i mogu ostati nepromijenjeni. Otapanje u aspektu kemijskog trošenja je posebno važno u slučaju sedimentnih stijena koje su topljive u vodi [3].

Poroznost stijenske mase utječe na razinu podzemne vode. U poroznoj stijenskoj masi voda će se nalaziti unutar stijene što rezultira malim porastom razine podzemne vode, dok će u čvrstoj stijenskoj masi, male poroznosti, voda relativno brzo ispuniti široke pukotine i time povećati tlak unutar diskontinuiteta, a time i kosine. Uobičajeno je da blokovi ispadaju sa strmih kosina vrlo brzo nakon kišnih pojava [3].

Ukupni volumen stijene ili tla sastavljen je od volumena čvrstog dijela i volumena šupljina. Općenito, stijene imaju manju poroznost od tla. Na primjer, poroznosti pijeska i gline kreću se u rasponu od 25 do 50%. A usporedbe radi, lomljeni bazalt i krški vapnenac mogu imati poroznost u rasponu od 5 do 50%, dok je poroznost guste stijene sastavljene u potpunosti od kristalnih minerala obično u rasponu od 0 do 5%. Značaj poroznosti na stijenama je u dizajnu sustava odvodnje. Na primjer, odvodi ugrađeni u granit male poroznosti trebaju samo malu količinu vode da bi se smanjili pritisci vode, dok odvodi u krškom vapnencu mogu ispuštati velike količine vode s malim učinkom na podzemnu vodu [3].

6.2. Drugi važni utjecaji vode na stijensku masu – bubrenje i smrzavanje

Korisno sredstvo za procjenu stanja podzemne vode u kosinama jest promatranje stanja tijekom razdoblja nižih temperatura, odnosno smrzavanja kada se volumen vode pri smrzavanju povećava cca 10% [1]. U to vrijeme čak i sitnija curenja vode mogu formirati ledenice koje pokazuju mjesto razine podzemne vode, kao i skup diskontinuiteta u kojima se odvija protok. Smrzavanje podzemne vode može uzrokovati da se voda

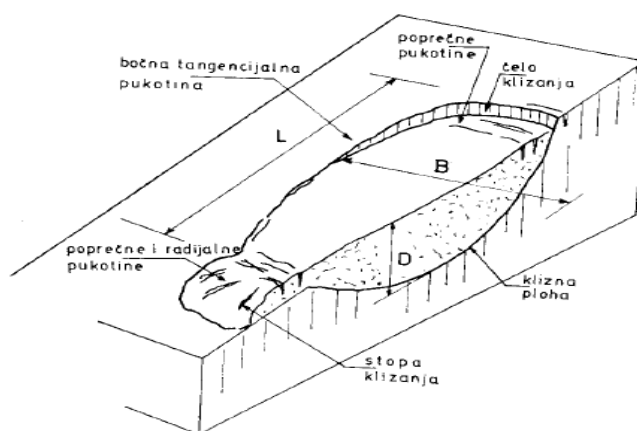
ponaša kao klin u pukotinama koje su napunjene vodom zbog temperaturne promjene volumena leda. Također, smrzavanje površinske vode na kosinama može blokirati odvodne putove vode što rezultira nakupljanjem tlaka vode u kosini s posljedičnim smanjenjem stabilnosti. Erozijski istrošeni stijeni površinskom i podzemnom vodom može rezultirati lokalnom nestabilnošću kada je nagib u nožici padine potkopan ili je blok olabavljen [3].

Neke stijene, poput škriljevca koji sadrže glinu koja bubri i evaporiti poput gipsa, pokazuju gubitak čvrstoće u prisutnosti vode. Iako posmična čvrstoća prekonsolidiranih glinenih ispuna može biti velika, može doći do značajnog gubitka čvrstoće uslijed omekšavanja, bubrenja i promjena poreznog tlaka pri rasterećenju istih. Bubrenje je rezultat hidratacije gline. Rasterećenje se događa kada se, primjerice, iskopa stijena za kosinu ili temelj. Gubitak čvrstoće također se javlja kod pomaka u lomljivim materijalima poput kalcita [3].

7. KLIZIŠTA

Opću definiciju klizišta dali su Varnes i Cruden (1996.) koja opisuje klizište kao „masu stijena, krhotina ili zemlje koja klizi niz kosinu“ [6]. Klizišta su jedna od najčešćih prirodnih opasnosti u svijetu. U prirodi su strmije kosine izgrađene od materijala veće čvrstoće npr. pijesak, šljunak, sipari itd., dok su blaže kosine uglavnom sačinjene od prašinih i glinovitih materijala. Tlo će u području kosine biti u ravnoteži ako je na tom dijelu čvrstoća na smicanje veća od napreznja smicanja. Ukoliko se pojavi poremećaj koji izazove promjenu u prirodnoj ravnoteži kosine, odnosno kada su napreznja veća od posmičnih napreznja, u kosini dolazi do sloma tla i klizanja tog područja. Klizanje kosine će se zaustaviti kada se oblik kosine toliko promijeni da se zbog promjene napreznja ponovo uspostavi ravnoteža ili kada prestanu djelovati utjecaji koji su izazvali poremećaja npr. promjena razine podzemne vode [1].

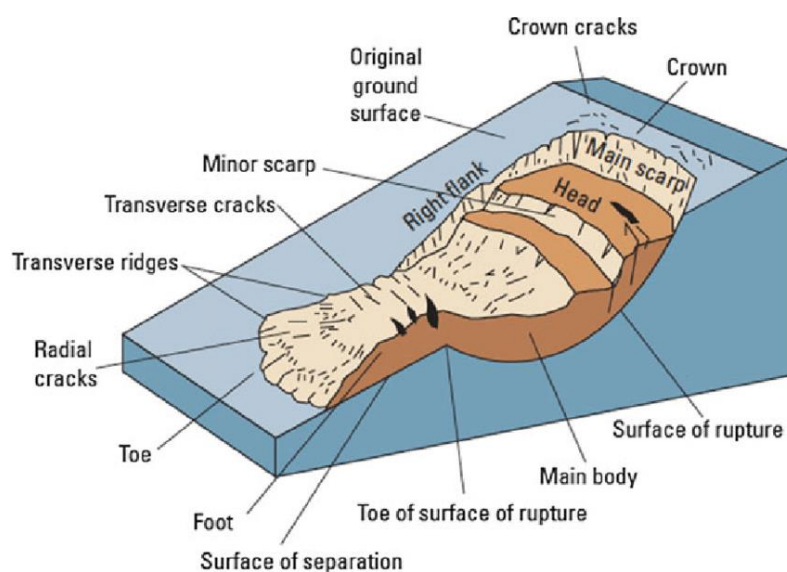
Pri proučavanju klizišta pažnju ponajviše treba obratiti na prepoznavanje i klasificiranje tipova klizišta, njihove morfološke osobine, geološke uvjete područja, brzine i veličine pokreta i uzročnike istih. Osim toga, klasifikacija mora sadržavati što točniji opis vrsta materijala kosine koje su zahvaćene klizanjem, mjerodavnu čvrstoću na smicanje i deformacijske osobine pri promjeni opterećenja. Na kraju, potrebno je proučiti stabilnost kosine ovisno o tipu klizanja i osobinama materijala. Stabilnost prirodnih kosina se proučava kako bi se pronašli uvjeti i mjere osiguranja trajne stabilnosti područja na kojima se mijenjaju prirodni uvjeti. Na slici 7 je prikazan presjek kroz karakteristično klizište duljine L , širine B i dubine D [1].



Slika 7: Karakterističan presjek klizišta [1]

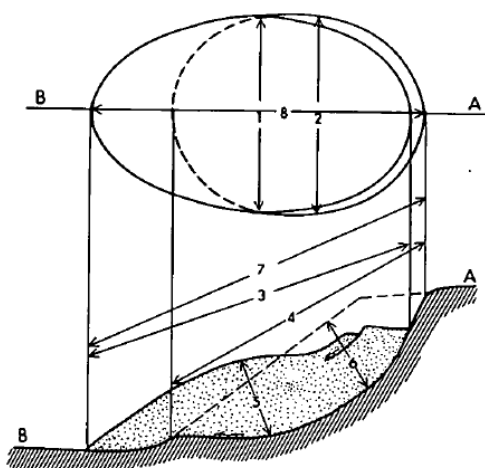
7.1. Elementi i dimenzije klizišta

Slika 8 prikazuje elemente klizišta. Klizište se najprije sastoji od krune, odnosno gornjeg dijela koji se nije pomaknuo tokom klizanja, zatim od glavnog čeonog ožiljka, vidljivog dijela puknuća, koji označava strmu plohu na gornjem rubu klizišta uzrokovanu pomicanjem materijala od početnog netaknutnog materijala, dok sekundarni ožiljci označavaju strmu plohu na pomaknutom materijalu koja je nastala diferencijalnim pokretima unutar materijala koji se pomjerio. Glava klizišta je gornji dio duž kontakta između izmještenog materijala i glavnog čeonog ožiljka, a tijelo je dio izmještenog materijala koji prekriva površinu puknuća između glavnog čeonog ožiljka i nožice klizne plohe. Klizna ploha je ploha koja formira donju granicu ispod izmještenog materijala u odnosu na originalni materijal na tom području, područje u kojemu je nastupio slom. Nožica klizne plohe je presjek (obično ukopan) između najnižeg dijela klizne plohe klizišta i originalnog materijala. Podnožje klizišta označava dio klizišta koji se pomaknuo izvan nožice površine puknuća i prekriva izvornu površinu tla, dok je nožica niži, obično zakrivljeni dio pomaknutog materijala, a ujedno je i najudaljeniji element gledajući od glavnog čeonog ožiljka. Bokovi klizišta su određeni bočnim pukotinama. Također, u osnovne elemente spadaju još transverzalne, radijalne i krunske pukotine, te poprečnih grebena izmještenog materijala [4].



Slika 8: Elementi klizišta [15]

Slika 9 prikazuje dimenzije klizišta koje su navedene u tablici 2. Širina pomaknute mase (1) je najveća širina kliznog tijela, dok je širina klizne plohe (2) maksimalna je širina između bokova klizišta. (3) dužina pomaknute mase je dužina od nožice do glave klizišta. Dužina pomaknute mase je dio omeđen nožicom klizne plohe i krunom (4). Ukupna dužina (7) predstavlja minimalnu udaljenost od nožice klizišta do krune [4].



Slika 9: Dimenzije kliznog tijela [5]

Tablica 2: Dimenzije kliznog tijela [5]

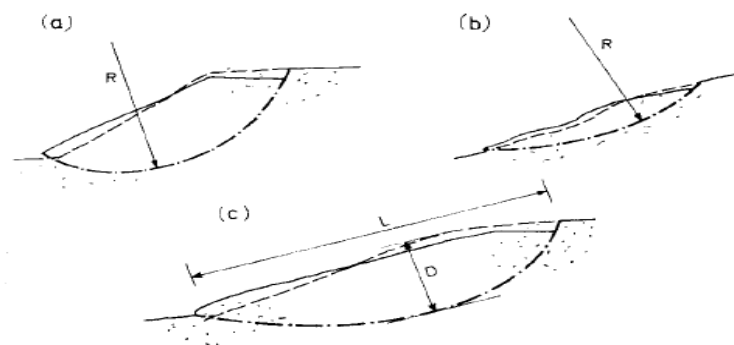
Broj	Dimenzije
1	Širina pomaknute mase
2	Širina površine klizne plohe
3	Dužina pomaknute mase
4	Dužina površine klizne plohe
5	Dubina pomaknute mase
6	Dubina klizne plohe
7	Ukupna dužina
8	Dužina središnje linije

7.2. Klasifikacija klizišta

Među kriterijima korištenim za identifikaciju i klasifikaciju klizišta su vrsta kretanja, vrsta materijala, brzina kretanja, geometrija područja nestabilnosti i rezultirajući sediment, starost klizišta, uzroci klizanja, stupanj poremećaja pomaknute mase, odnos ili nedostatak veze geometrije klizišta s geološkom strukturom, stupnjem razvijenosti, zemljopisnim položajem i stanjem aktivnosti [11].

Klasifikacija klizišta se vrši kako bi se proučila pojava nestabilnih kosina i nastanak klizišta. U građevinarstvu i mehanici tla kod problema klasifikacije klizanja proučavaju se mehanizmi pojave klizišta i uvjeti ravnoteže, te deformacije i slom materijala. Svrha klasifikacije je da se predvide opasnosti od klizanja, odrede i prouče mjere smirivanja aktivnih klizišta i oblikuju kosine usjeka, nasipa, zasipa i zasjeka umjetnih građevina kako ne bi došlo do sloma materijala. Zapravo, ona nam daje osnovni opis na osnovi kojega se raspoznavaju i razvrstavaju klizanja pri proučavanju. Tipovi pojava nestabilnosti prema Varnes-u (1978) su: odronjavanje, prevrtanje, klizanje, širenje i tok. A klasifikacija opisuje rotacijska klizišta, translacijska klizišta, složena klizišta, višestruka klizišta i kompleksna klizišta [1].

Rotacijsko klizanje je općenito vezano za homogene glinovite materijale, iako može nastati i u kosinama od nekoherentnog materijala i u nekim stijenskim pokosima kao rezultat jako raspucale i trošne stijene. U gornjem dijelu klizišta pojavljuju se slijeganje i pukotine, dok se u stopi izdiže i gnječi materijal. Na slici 10 su prikazana rotacijska klizišta redom: kružno cilindrično, duboko klizanje (a), plitko klizanje (b) i klizanje na plohi sloma općeg oblika (c) [1].



Slika 10: Rotacijska klizanja[1]

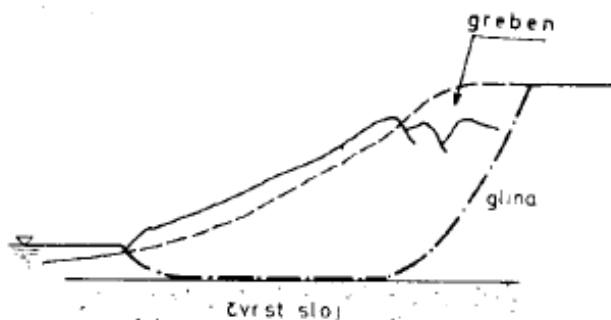
Translacijsko klizište opisuje planarno pomicanje materijala po ravnini kosine. Nastaje na mjestima gdje se diskontinuiteti u materijalu nalaze na manjoj dubini, približno paralelno s površinom kosine. U stjenovitom tlu dolazi do postupnog odvajanja blokova po slojevima ili pukotinskim plohama diskontinuiteta koji mogu biti ispunjeni materijalom manje čvrstoće, kao što prikazuje slika 11. U koherentnim materijalima opisuje plošna klizanja kada su diskontinuiteti međuslojevi gline ili od propusnog materijala. Takva klizanja obično nastaju u prekonsolidiranoj glini koja je raspucala [1].

Širina zone kretanja mase u translacijskim klizištima je veća od one za većinu rotacijskih klizišta. Kada se slom dogodi u dijelu između površinskih materijala i temeljne stijene kretanje će biti plitko i klizište se može proširiti na znatnoj udaljenosti. Takvi slomovi na kosinama su obično relativno široki [5].



Slika 11: Translacijsko klizenje bloka i plohe [1]

Složeno klizanje označava klizanje po plohi sloma koja se sastoji od više ravnih i zakrivljenih dijelova kao što je prikazano na slici 12. Materijal je u takvim klizištima nehomogen. Takvo kretanje izaziva velike unutrašnje deformacije mase ponajviše na prijelazima između translacijske i rotacijske zone. Ovisno o osobinama i rasporedu različitih materijala zahvaćenih kretanjem ovisi vanjski izgled klizišta i razlomljenost materijala na istom [1].



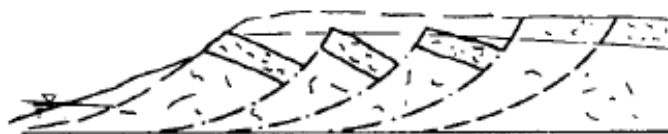
Slika 12: Složeno klizanje, kombinacija ravne i zakrivljene plohe [1]

Pojava tečenja materijala pojavljuje se kao zemljani tok koji ima karakterističan oblik "pješčanog sata". Do tečenja dolazi uslijed jakih oborina ili brzog otapanja snijega koji erodira i mobilizira rastresito tlo ili stijene na strmim padinama. Raspodjela brzina u masi koja se istiskuje slična je viskoznoj tekućini [5]. Sam protok je izdužen i obično se javlja u sitnozrnastim materijalima ili glinama na umjerenim padinama i u zasićenim uvjetima. Međutim, mogući su i suhi tokovi nekoherentnog materijala i tokovi u sasvim prezasićenom vlažnom tlu koje se pojavljuje najčešće u stopi klizišta zbog prisutnosti oborinske i drenirane vode koja prodire u rahli istaloženi materijal. Također, može nastati na dijelovima gdje se materijal na cijeloj duljini klizišta pregnećuje u prisutnosti procjedne vode čime poprima sve veće količine vode, na mjestima klizanja po nepravilnoj plohi. Slika 13 prikazuje najprije kosinu od zemljanog materijala, a zatim opisuje tečenje, odnosno blatni tok duljine L i dubine D , uzrokovan nakupljanjem oborinske vode [1].



Slika 13: Tečenje tla [1]

Kompleksna klizanja označavaju kombinaciju dva ili više istih ili različitih tipova klizanja. Na primjer, na slici 14 prikazano je rotacijsko klizanje s blatnim tokom koje nastaje na klizištima s velikim deformacijskim pomakom. Na stopi se nalazi poprilično razlomljen i razrahljen materijal koji može primiti velike količine vode i tako stvara blatni tok zemlje [1].



Slika 14: Višestruko retrogresivno klizanje [1]

8. NAČINI SANACIJE KLIZIŠTA

Osnove na kojima se temelji projekt za sanaciju klizišta i proračuni stabilnosti zbog velikog broja faktora i prirodne heterogenosti materijala koji utječu na stabilnost kosine nikad nisu potpuno pouzdani. Kako bi se pri projektiranju mjera potrebnih da se masa nad plohom ili zonom sloma smiri ili zaustavi, odnosno zadrži u ravnoteži, potrebno je poznavati bitne činitelje koji su izazvali klizanje, a to su geološka građa i povijest područja, geomehaničke osobine slojeva tla u kosini, razina podzemne vode i njezine oscilacije s vremenom, smjer, intenzitet i brzina pomaka, položaj plohe ili zone sloma, geomehaničke karakteristike svih materijala od površine terena do ispod zone sloma i mogući uzroci klizanja. Mjere za smirenje nastalog klizišta primjenjuju se kako bi se smanjila naprezanja na smicanje potrebna za ravnotežu, kako bi se povećala čvrstoća na smicanje materijala u zoni sloma ili se upotrebljava kombinacijom obiju mjera [2].

Nekoliko je metoda za stabilizaciju klizišta koje uključuju modificiranje profila kosine, sidrenje ili podupiranje postojećeg profila ili dreniranje materijala od kojeg je kosina izgrađena [7].

Ukoliko se žele smanjiti tangencijalna naprezanja koriste se mjere rasterećivanja gornjeg, aktivnog dijela klizišta ili se opterećuje donji, pasivni dio klizišta. Dapače, mogu se primjenjivati obje mjere ili mjera povoljnog skretanja strujnog tlaka, drenažom. Ukoliko se nastoji povećati čvrstoća nekoherentnog materijala u kosini ili na dijelu kosine, opterećuje se donji dio kosine, smanjuju se porni pritisci koji ujedno povećavaju efektivna naprezanja ili posebnim postupcima kao što je injektiranje, elektrokemijski procesi i dr. Različite mjere sanacije različito utječu na promjenu stabilnosti u koherentnom ili u nekoherentnom materijalu, a izbor prikladne metode sanacije ovisi o vrsti materijala, odnosno proporcionalne raspodjele ukupnog otpora na koheziju i trenje uzduž plohe sloma [1].

Zbog nepredvidivosti ponašanja kosina, programi praćenja kretanja mogu biti od koristi u upravljanju opasnostima od klizanja i pružaju informacije korisne za odabir metoda sanacijskih radova. Potrebno je i da se nakon završenih radova sanacije nastave promatrati pomaci, a ponajviše razine podzemne vode.

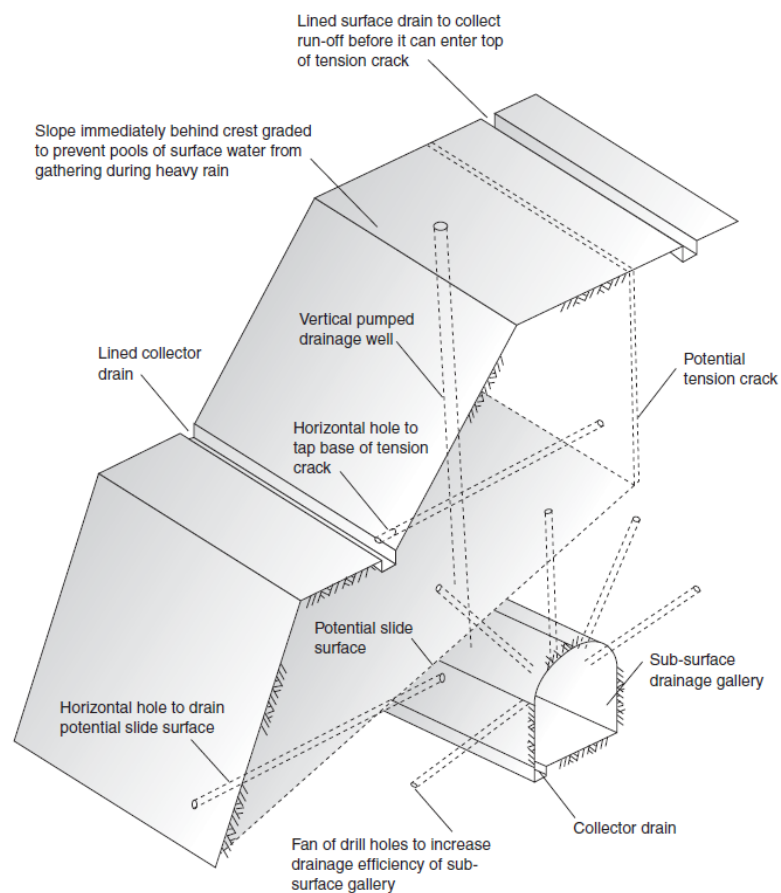
8.1. Drenaža kao mjera sanacije

Dreniranje je prirodno ili umjetno uklanjanje površinske i podzemne vode s područja s viškom vode. Dreniranje je mjera koja se najčešće primjenjuje u praksi jer su primarni uzroci nestabilnosti i klizanja kosina porni tlak, uzgon i hidrodinamičke sile. Razina podzemne vode se može povisiti u kosini zbog porasta razine uz stopu kosine npr. usporavanjem rijeke uz stopu kosine. Također, razina se može povisiti zbog promjene vegetacije na površini terena npr. krčenjem šuma, promjene klimatskih uvjeta na tom području uključujući obilne oborine nakon dužeg sušnog razdoblja, zatim, povećanjem hidrodinamičkih sila u materijalu male propusnosti zbog sniženja razine podzemne vode uz stopu kosine [2].

Metode za kontrolu tlaka vode uključuju ograničavanje površinske infiltracije i bušenje horizontalnih drenova ili bušenje vodoravnih drenova u nožici nagiba kako bi se stvorili otvori za vodu (slika 15). Odabir najprikladnije metode za položaj drenova ovisit će o čimbenicima kao što su intenzitet kiše ili otapanje snijega, propusnost stijena i dimenzije i nagib kosine [3].

Projektiranje sustava drenaže u svrhu stabilizacije klizišta vrlo je složen proces zbog toga što je tlo najčešće nehomogeno i njegova je propusnost različita na različitim mjestima. Ukoliko drenovi zahvaćaju propusnije zone tada će biti puno efikasniji, pa tome treba posvetiti veću pažnju pri projektiranju. Također je bitno da drenovi budu dublji od pokrenute mase i izvedeni u smjeru kretanja iste, a manji pomak mase koji bi potencijalno nastao nakon izrade drena neće poremetiti funkcioniranje tog drena. Postoji mogućnost i da se drenovi izvedu u pokrenutoj masi, međutim, tada treba kontrolirati proračunom stabilnosti postiže li se time zadovoljavajuće povećanje faktora sigurnosti [1].

Dreniranje se može ostvariti na nekoliko načina, a to su drenažni usjecima, horizontalnim i vertikalnim drenovima, primjenom elektroosmoze [2].

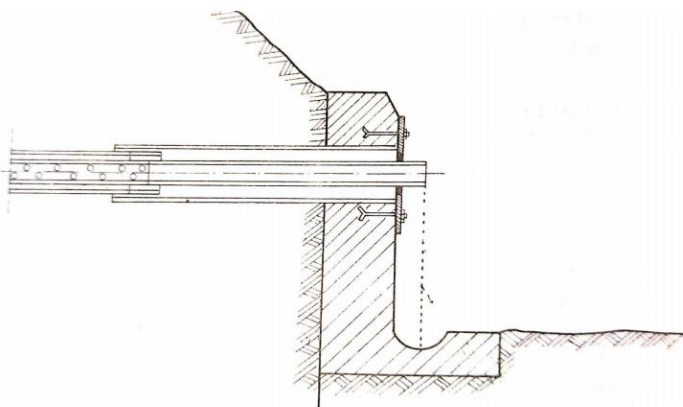


Slika 15: Metode drenaže u kosini [3]

8.1.1. Dreniranje drenažnim usjecima i bušenim drenovima

Kopani drenovi, prokapanici ili drenažni usjeci, su rovovi ispunjeni propusnim materijalom. Budući da moraju biti opremljeni tako da djeluju trajno, bitno je da ostanu propusniji od okolnog terena za vijeka trajanja zbog otjecanja vode. Izbor materijala za ispunu drenova mora biti takav da sprječava eroziju okolnog terena povećanim hidrauličkim gradijentom podzemne vode prema drenu, odnosno filtracijski tok vode prema drenu ne smije izazvati postepenu eroziju tla jer bi se dren u protivnom začepio. Ovakvi drenovi se uspješno koriste za stabilizaciju relativno plitkih klizišta. Konstrukcijski potrebna širina drena je od oko 60 do 80 cm, a minimalni poprečni presjek na donjem kraju mora biti dovoljan da primi cjelokupan protok drenirane vode. Eventualno se grade drenovi većeg kapaciteta kada je materijal nehomogen i veće propusnosti, pa je ekvivalentno tome i tok vode povremeno velik. Odvodni kapacitet

drena se povećava ugradnjom cijevi uz dno. Ukoliko je cijev od poroznog materijala tada se ugrađuje u pijesak, a ako cijevi nisu porozne ugrađuju se u šljunkoviti materijal čija granulacija odgovara otvorima cijevi i ostaloj ispuni drena. Ako se na to ne obrati pažnja dolazi do ispiranja ispune drena što će posljedično izazvati urušavanje i ispuniti cijev materijalom. Dren se na površini terena zatvara nabijenim slojem gline da bi se spriječilo procjeđivanje površinske vode koja sa sobom donosi sitne čestice, čime bi se smanjila propusnost drena. Poželjno je, kad god je to moguće, prekriti dren vegetacijskim pokrovom. Izlaz drena na teren se izvodi pomoću drenažne metalne cijevi koja je obično duga nekoliko metara, a njezin kraj se ugradi u betonski blok (slika 16). Najpovoljniji položaj drenova je u smjeru nagiba kosine a poželjno je da dosežu ispod dubine klizanja [1].

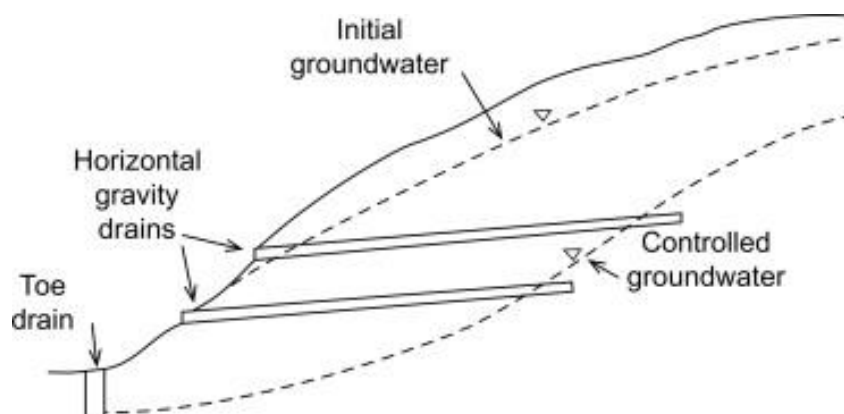


Slika 16: Detalj izlaza cijevnog drena iz stijenskog pokosa [2]

Ako se radi o klizištu s dubokom kliznom plohom najpovoljnija metoda povećanja faktora sigurnosti je postavljanje dubokih drenova koji se mogu ostvariti bušenjem vodoravnih ili blago nagnutih bušotina uz donji rub kosine, u koje se ugrade perforirane cijevi koje usmjeravaju tok podzemne vode prema sebi i odvede ju izvan kosine. U koherentnim materijalima bušotine se odmah mogu bušiti bez zacjeljivanja, pa se tako nakon bušenja direktno mogu ugraditi drenažne cijevi s filterom. Za trajnu instalaciju drenažna cijev mora imati zaštitni filter koji ju štiti od začepjenja, a tako i okolni materijal štiti od erozije i urušavanja [3].

8.1.2. Dreniranje horizontalnim drenovima

Horizontalni drenovi se mogu postaviti tako da uvedu niski hidrostatski potencijal znatno dublje u kosinu nego što se postiže drenažnim usjecima. Postavljajući horizontalne drenove u nehomogenom materijalu s međuslojevima veće propusnosti, tako da sijeku propusne naslage, postiže se bolji učinak dreniranja. Niži potencijal se tada prenosi na cijeli propusni sloj pa on djeluje kao dren cijelom svojom površinom i usmjeruje strujni tlak prema sebi, kao što prikazuje slika 17. Tako uz pomoć jednog, ispravno postavljenog drena možemo postići bolji efekt nego uz veći broj njih ako su neprikladno postavljeni. Budući da je većina podzemne vode sadržana u diskontinuitetima, drenove treba postaviti tako da presijecaju diskontinuitete koji sadrže vodu. Za uvjete prikazane na slici 17 drenovi se buše pod malim kutom kako bi presjekli stabilnije diskontinuitete koji se naginju u suprotnom smjeru od tijela kosine. Kad bi se rupe bušile pod strmim kutom, paralelno s tim diskontinuitetima, tada bi drenaža bila manje učinkovita. Najčešće su rupe obložene kako bi se smanjilo ispiranje sitnih čestica vodom iz pukotina. U koherentnom materijalu drenovi se mogu bušiti bez zacjeljivanja, pa se odmah nakon bušenja uvlači drenažna cijev s filterom. Ukoliko se bušotina urušava potrebno je ugraditi privremenu obložnu kolonu, zatim se uvede drenažna cijev, a kolona izvuče. Bušenje kraćih drenova se može provoditi ne vadeći jezgru pomoću spiralnih svrdala. Drenažna cijev za trajne instalacije mora imati zaštitni filter koji osigurava od začepljenja i štiti okolni materijal od erozije i urušavanja [1,3].



Slika 17: Horizontalni drenovi u kosini [16]

Također, cilj drenaže je odvodnja procjedne vode. Ukoliko se procjedna voda infiltrira u nožicu padine to može rezultirati degradacijom materijala male čvrstoće i potencirati dodatne probleme sa stabilnošću nizvodno od drenova. Ovisno o uvjetima na tom području, biti će potrebno prikupiti svu procijeđenu vodu i zbrinuti je na određenoj udaljenosti od kosine.

9. ANALIZE STABILNOSTI – METODE GRANIČNE RAVNOTEŽE

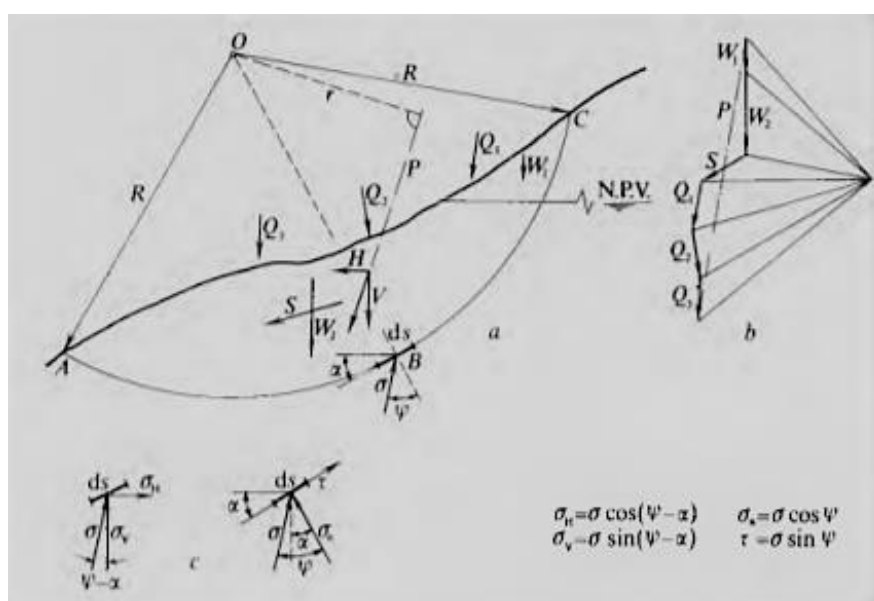
Analize stabilnosti kosine provode se radi utvrđivanja moguće pojave sloma u prirodnoj ili umjetnoj kosini ili radi utvrđivanja parametara čvrstoće materijala u kosinama u kojima je slom nastupio. Stabilnost kosina najčešće se analizira metodama granične ravnoteže. Te analize zahtijevaju informacije o čvrstoći tla, ali ne i podatke o njegovim deformacijama i o veličini kretanja kosine. Kretanje kosina obično se analizira metodom konačnih elemenata. Iako ova metoda definira kretanja i naprezanja na cijeloj kosini, ona ne pruža izravnu mjeru stabilnosti, poput faktora sigurnosti izračunatog analizom granične ravnoteže [9].

Tim se metodama ispituju faktori sigurnosti za više pretpostavljenih mogućih površina klizanja. Kritičnom se smatra ona površina klizanja koja ima najmanji faktor sigurnosti. Najviše se upotrebljavaju klizne plohe u obliku ravnine, kruga ili logaritamske spirale, ali tim se metodama mogu riješiti i klizne površine bilo kojeg oblika. Te metode, koje su u primijeni jednostavne, ne daju egzaktno rezultate, ali je njihovom primjenom za kontrolne analize izvršenih klizanja dokazana potrebna pouzdanost. Granična ravnoteža može se odrediti analitički i grafički [13].

Pretpostavka koja je usvojena u metodama granične ravnoteže je da je posmična čvrstoća potpuno mobilizirana duž plohe sloma u trenutku pojave sloma. Ona nije u skladu sa stvarnim veličinama naprezanja duž plohe sloma, osim u slučaju jednostavnih slučajeva planarnog i klinastog sloma. Pri pojavi sloma u kosinama, otpor smicanju se značajno mijenja u različitim dijelovima klizne plohe u funkciji različitih vrijednosti posmične čvrstoće i veličine posmičnih naprezanja duž klizne plohe. Druga pretpostavka je da je materijal u zonama sloma podvrgnut deformacijama bez pada posmične čvrstoće, te su pomaci unutar kliznog tijela mali u odnosu na pomake duž plohe sloma. Ove pretpostavke klizanja krutog kliznog tijela su prihvatljive ukoliko se slom događa kao klizanje cjelovite stijenske mase kao koherentnog tijela duž diskontinuiteta nastalih prije pojave klizanja [9].

Iz uvjeta ravnoteže sila, na segmentu kosine, dobit će se tri jednadžbe: za ravnotežu horizontalnih i vertikalnih komponenata sila i za ravnotežu momenata oko središta kliznog kruga. Pri tom zbroj komponenata naprezanja na obodu kliznog kruga mora biti

u ravnoteži s komponentama težine segmenata, strujnog tlaka i vanjskog opterećenja koji djeluju na promatrani segment. Te tri jednadžbe nisu dovoljne da se odredi vrijednost naprezanja u svakoj točki klizne plohe, iz čega bi se na već opisani način mogao odrediti faktor sigurnosti kosine. Problem nije statički određen, a ne mogu se primijeniti ni metode za rješavanje statički neodređenih sustava, jer se tlo ne ponaša kao elastičan materijal. Rješenje se nalazi uvođenjem u račun prikladnih pretpostavki o raspodjeli naprezanja uzduž klizne plohe, kao što je prikazano na slici 18 [13].



Slika 18: Sile i naprezanja na kliznoj plohi (a) poligon sila (b) komponente naprezanja na elementu klizne plohe [13]

Uvjet statičke ravnoteže segmenta iznad klizne plohe bit će zadovoljen ako raspodjela naprezanja odgovara uvjetu da je rezultanta naprezanja uzduž klizne plohe jednaka po iznosu, obrnuta po smjeru i da djeluje u istom pravcu kao i rezultanta P svih sila koje djeluju na segment i u njemu. Proračun se uz tu pretpostavku može izvesti resultantnom metodom i metodom lamela. Resultantnom metodom analizira se ravnoteža cjelokupne mase tla omeđene vanjskim konturama i površinom klizanja uz pretpostavku da su karakteristike materijala tla uzduž klizne plohe konstantne [13].

U metodi lamela masa se tla iznad klizne plohe podijeli na više vertikalnih lamela, te se za svaku od njih posebno ispituje ravnoteža. Taj postupak može se primijeniti i kad karakteristike materijala uzduž klizne plohe nisu konstantne. Grafički postupak prema rezultatnoj metodi upotrebljava se najčešće za klizne površine kružnog oblika. Za klizne površine bilo kojeg oblika grafički je postupak suviše kompliciran. Stabilnost metodom lamela moguće je ispitivati grafički i analitički [13].

Grafički postupak provodi se tako da se za svaku lamelu postave uvjeti ravnoteže sila i momenata. Obično se primjenjuje kad je broj lamela mali. Za više lamela analitička metoda, koja se zasniva na istim principima, znatno je preciznija uz upotrebu elektroničkih računala. Metoda lamela je statički neodređena. Rješava se eliminacijom prekobrojnih nepoznanica uvođenjem pretpostavki o položaju i smjeru sila na pojedinim lamelama. O pretpostavkama ovisi rezultat, a kontrola je logična raspodjela naprezanja unutar mase. Postoji mnogo pretpostavki koje zadovoljavaju raspodjelu naprezanja, a rezultat daje raspon vrijednosti faktora sigurnosti [13].

Tablica 3 prikazuje ostale metode proračuna stabilnosti kosina, njihova ograničenja, usvojene pretpostavke i uvjete ravnoteže.

Tablica 3: Ograničenja, usvojene pretpostavke i uvjeti ravnoteže proračuna za različite metode [9]

Metoda	Ograničenje, pretpostavke i uvjeti ravnoteže
Metoda lamela	Nizak faktor sigurnosti – vrlo netočan za razvučena klizišta s visokim pornim pristiskom; samo za kružnu plohu sloma; normalna sila na bazu svake lamele je $W\cos\alpha$, jedna jednadžba ravnoteže (suma momenata za cjelokupnu masu), jedna nepoznanica (faktor sigurnosti)
Modificirana Bishopova metoda	Točna metoda; samo za kružnu plohu sloma; zadovoljava uvjete ravnoteže vertikalnih sila i ukupnih momenata; međulamelarne sile su horizontalne; $N+1$ jednadžba i nepoznanica
Metoda ravnoteže sila	Zadovoljava ravnotežu sila; primjenjiva za sve izvedene i zakrivljene plohe sloma; usvaja nagnute međulamelarne sile, jednake ili različite za svaku pojedinu lamelu; mala promjena u nagibu međulamelarnih sila utječe na smanjenje F_s u odnosu na metode koje zadovoljavaju sve uvjete ravnoteže;

	veliki nagib međulamelarnih sila daje F_s veći od izračunatog metodama koje zadovoljavaju sve uvjete ravnoteže; 2N jednažbi i nepoznanica
Pojednostavljena metoda Janbua	Zadovoljava ravnotežu sila; primjenjiva za sve izvedene i zakrivljene plohe sloma; usvaja horizontalne međulamelarne sile; faktor sigurnosti je manji od izračunatog metodama koje zadovoljavaju sve uvjete ravnoteže; 2N jednažbi i nepoznanica
Modificirana švedska metoda	Zadovoljava ravnotežu sila; primjenjiva za sve izvedene i zakrivljene plohe sloma; usvaja nagib međulamelarnih sila jednak nagibu kosine (jednak za sve lamele); faktor sigurnosti je često značajno veći od izračunatog metodama koje zadovoljavaju sve uvjete ravnoteže za vertikalne i horizontalne sile; 2N jednažbi i nepoznanica
Metoda Lowea i Karafiatha	Općenito najtočnija metoda između metoda ravnoteže sila; primjenjiva za sve izvedene i zakrivljene plohe; usvaja nagib međulamelarnih sila u prosjeku nagiba kosine i plohe sloma (promjenjiv po lamelama); zadovoljava uvjete ravnoteže za vertikalne i horizontalne sile; 2N jednažbi i nepoznanica
Opća metoda Janbua	Zadovoljava sve uvjete ravnoteže; primjenjiva za sve izvedene i zakrivljene plohe sloma; usvaja položaj međulamelarne sile (promjenjiv po lamelama); metoda češće konvergira u odnosu na druge numeričke metode; točna metoda; 3N jednažbi i nepoznanica
Metoda Spencera	Zadovoljava sve uvjete ravnoteže; primjenjiva za sve izvedene i zakrivljene plohe sloma; usvaja jednak nagib međulamelarnih sila za sve lamele; nagib međulamelarnih sila računa se u procesu do zadovoljenja svih uvjeta ravnoteže; točna metoda; 3N jednažbi i nepoznanica
Metoda Morgensterna i Pricea	Zadovoljava sve uvjete ravnoteže; primjenjiva za sve izvedene i zakrivljene plohe sloma; usvaja jednak nagib međulamelarnih sila jednak prethodnoj metodi, nazvan $f(x)$; nagib međulamelarnih sila može biti promjenjiv po lamelama; nagib međulamelarnih sila računa se u procesu do zadovoljenja svih uvjeta ravnoteže; točna metoda; 3N jednažbi i nepoznanica
Metoda Sarme	Zadovoljava sve uvjete ravnoteže; primjenjiva za sve izvedene i zakrivljene plohe sloma; usvaja se da veličina vertikalne komponente međulamelarnih sila zadovoljava uvjete iz prethodnih metoda proračuna; računa horizontalnu akceleraciju za približno stabilno stanje ravnoteže preračunavanjem čvrstoće i iteriranjem sve do uvjeta u kojima je

	horizontalna akceleracija jednaka nuli zadovoljava približno stanje ravnoteže čime se dobiva konvencionalna vrijednost F_s ; 3N jednadžbi i nepoznanica
--	---

Faktor sigurnosti određen je kao odnos sila mogućeg otpora i aktivnih sila koje djeluju na kosinu prema formuli (2) [9]:

$$F_s = \frac{\Sigma(\text{Sile otpora})}{\Sigma(\text{Aktivne sile})} \quad (2)$$

Aktivne sile su sile koje teže pokrenuti kliznu masu. Tu spadaju vlastita težina kliznog tijela, sile strujnog pritiska, potresi i vanjska opterećenja. Sile otpora su sile koje se suprotstavljaju aktivnim silama i tako nastoje stabilizirati kosinu. Javljaju se u tlu, na kliznoj plohi i kao rezultat otpora tla. Osim na prethodan način, faktor sigurnosti se može izraziti kao odnos naprezanja na plohi sloma i čvrstoće materijala, odnos parametara čvrstoće u kosini i parametara čvrstoće potrebnih za održanje stabilnosti kosine, odnos momenata otpora i momenata aktivnih sila na plohi sloma. Faktor sigurnosti u projektiranju kosina, nasipa, usjeka i sanacije klizanja uzima se od 1,2-2,0 [2].

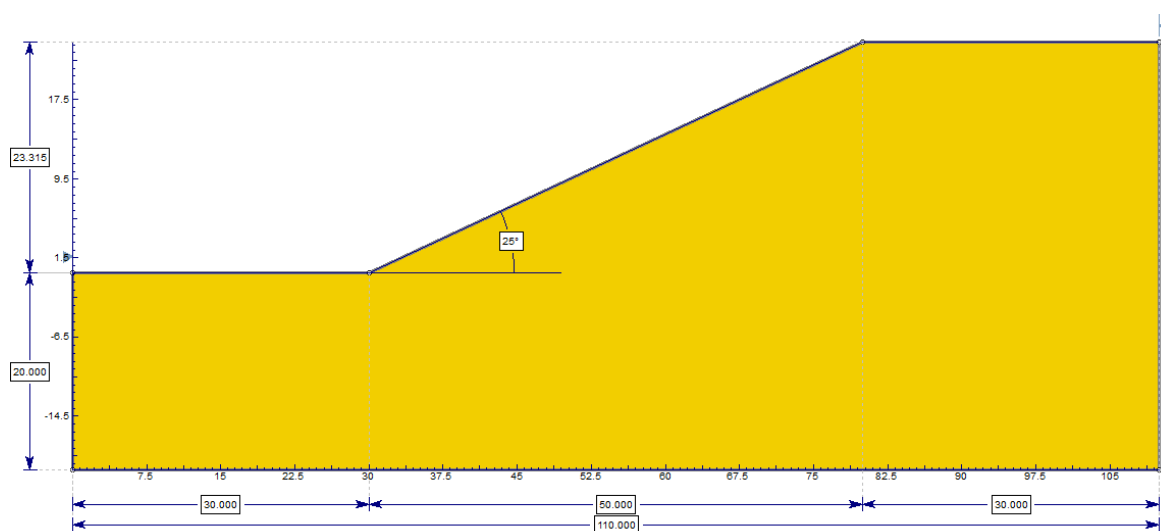
10. ANALIZE STABILNOSTI KOSINE UPOTREBOM PROGRAMA SLIDE2 (ROCSCIENCE)

Korištenjem programa Slide 2 (Rocscience Inc.) analiziran je utjecaj podizanja razine podzemne vode na stabilnost kosine. Od jedanaest metoda navedenih u prethodnom poglavlju, proračuni u programu Slide2 provedeni su prema modificiranoj Bishopovoj metodi. Svrha proračuna je odrediti utjecaj variranja, odnosno podizanja razine podzemne vode na stabilnost kosine proračunavanjem faktora sigurnosti za svaki pojedini i različiti slučaj. Generalno, minimalni faktor sigurnosti i kritična klizna ploha mogu se u određenoj mjeri razlikovati, ovisno o korištenoj metodi proračuna.

Model kosine za koju su provedene predmetne analize prikazan je na slici 19. Ukupna duljina modela iznosi 110 metara i visina 43,32 metra. Kosina duljine 55,2 metra nalazi se pod kutom od 25° i ima ukupnu visinu od 23.3 metra. Modelira se kosina izgrađena od prašinstog materijala, odnosno tla, kohezije 5 kPa, kuta trenja 28° i zapremninske težine 18 kN/m³. Čvrstoća materijala kosine opisana je Mohr-Coulobovim kriterijem čvrstoće prema izrazu:

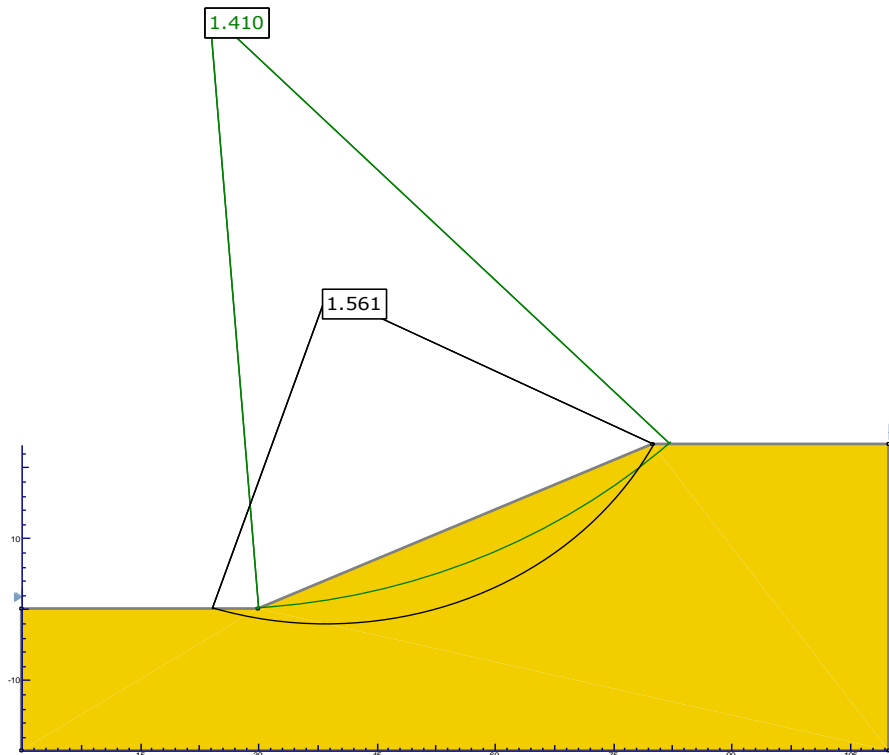
$$\tau_f = c' + \sigma_n' \tan \phi' \quad (3)$$

gdje su c' – efektivna kohezija (kN/m²), σ_n' – efektivno normalno naprezanje na plohi sloma, te ϕ' – kut unutrašnjeg trenja materijala (°).



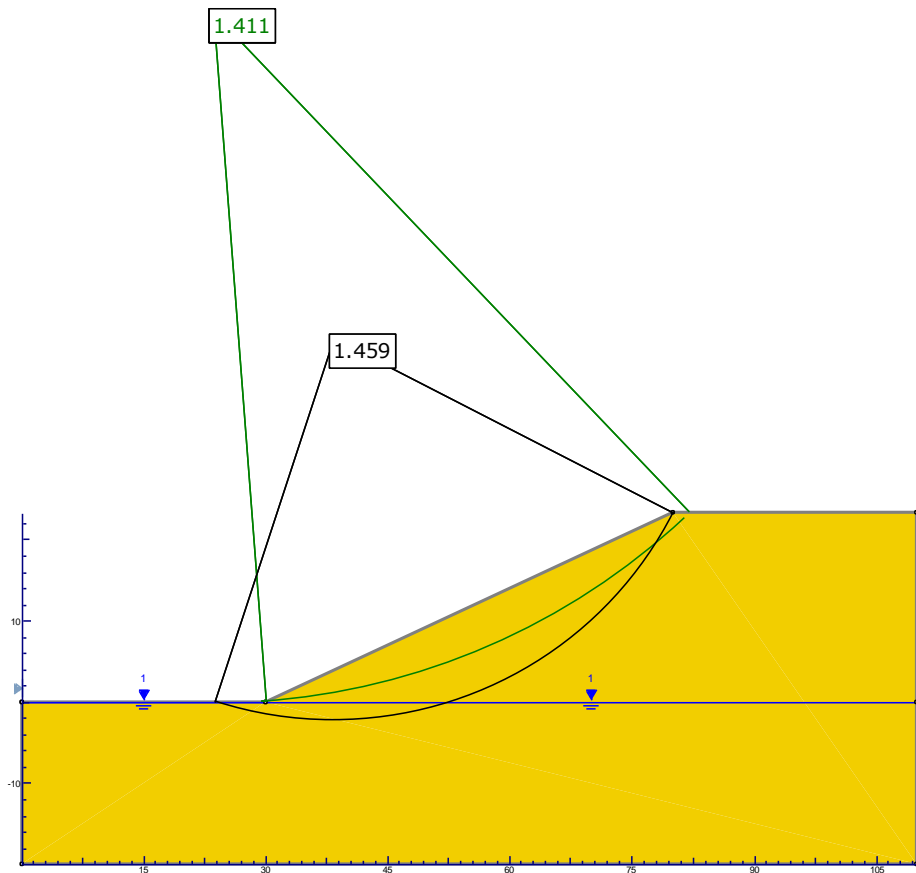
Slika 19: Geometrija modela kosine

Faktor sigurnosti proračunat za suhe uvjete u kosini prema modificiranoj Bishopovoj metodi iznosi 1,41. Položaj kritične klizne plohe, odnosno plohe s najmanjim faktorom sigurnosti prikazana je na slici 20. Dublja klizna ploha, s većim faktorom sigurnosti (1,561) prikazana je radi promatranja utjecaja podzemne vode na idućim modelima i također je prikazana na slici 20.



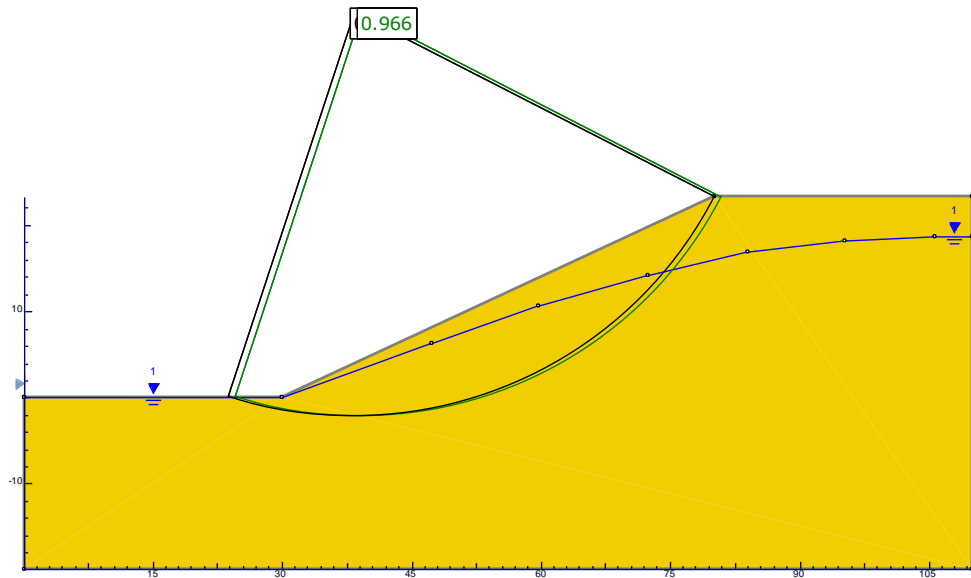
Slika 20: Položaj kritične klizne plohe s pripadajućim faktorom sigurnosti za suhe uvjete

Porast razine podzemne vode uzrokuje porast pornih pritisaka duž potopljenog dijela klizne plohe. Ovo utječe na način da se smanjuju efektivna naprezanja na potopljenom dijelu plohe proporcionalno iznosu pornog pritiska, odnosno u konačnici smanjuje se čvrstoću materijala tla definirana jednadžbom (3). Na slici 21 prikazana je kosina s horizontalnom razinom podzemne vode u dnu nožice kosine. Budući da podzemna vode ne doseže do kritične klizne plohe istaknute na slici 20 ($F_s=1,14$), ne mijenja joj oblik niti iznos faktora sigurnosti. No, faktor sigurnosti dublje klizne plohe se u ovom slučaju smanjuje ($F_s=1,46$), s obzirom da se dio klizne plohe pri dnu kosine u ovom slučaju nalazi pod vodom.



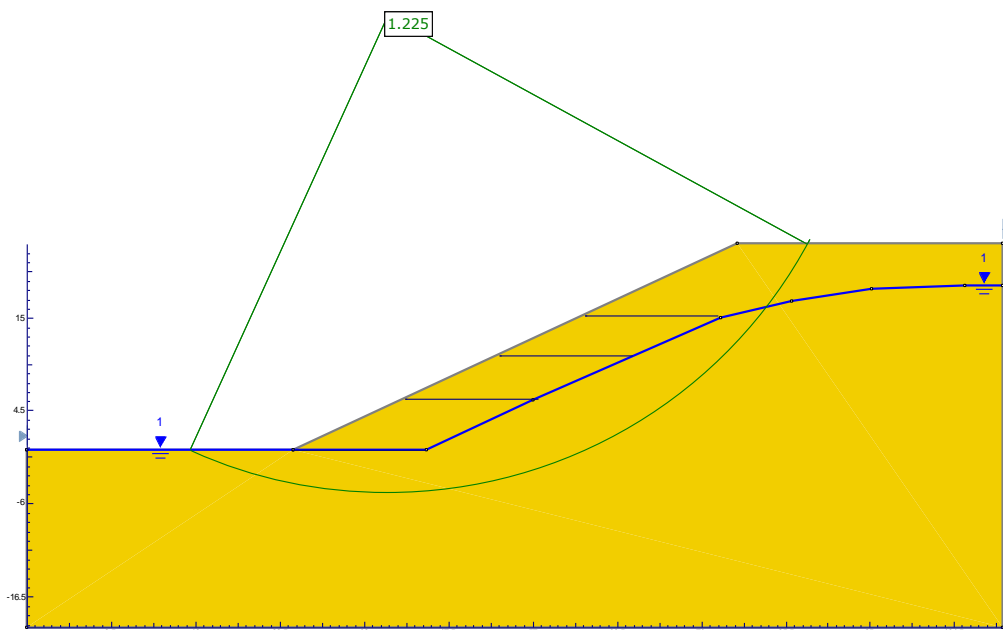
Slika 21: Porast podzemne vode do nožice klizišta

Ukoliko bi došlo do daljnjeg porasta razine podzemne vode, primjerice uslijed dugotrajnih oborina, nivo podzemne vode bi rastao kao i porni pritisak. Posljedično, čvrstoća materijala bi se smanjivala što negativno utječe na stabilnost kosine. Na slici 22 prikazan je kritičan, ujedno i relativno visok nivo podzemne vode, uslijed kojeg kosina postaje nestabilna ($F_s < 1$). Kritična klizna ploha s pripadajućim faktorom sigurnosti manjim od 1, odnosno uvjeti za koje kosina ostaje nestabilna, prikazani su na slici 22.



Slika 22: Razina podzemne vode pri kojoj nastupa slom tla

Konačno, u posljednjem modelu prikazan je utjecaj snižavanja razine podzemne vode izvedbom samobušivih drenova. U ovom slučaju simulira se izvedba i utjecaj horizontalnih drenova duljine 15 metara kao mjere sanacije klizišta. Postavljanjem drenova povećava se stabilnost kosine pri čemu se faktor sigurnosti povećava na 1,225. Kritična klizna ploha i pripadajući faktor sigurnosti prikazani su na slici 23.



Slika 23: Model s izvedenim samobušivim drenovima

11. ZAKLJUČAK

Klizišta su jedna od najrasprostranjenijih prirodnih katastrofa na Zemlji i jedan od glavnih problema u geotehnici. Svake godine klizišta uzrokuju tisuće smrtnih slučajeva i milijarde dolara ekonomskih gubitaka. Unatoč poboljšanjima u prepoznavanju, predviđanju, ublažavajućim mjerama i sustavima upozorenja, aktivnost klizišta u svijetu se povećava, a očekuje se da će se trend tako i nastaviti. Čimbenici koji uzrokuju ovu očekivanu povećanu aktivnost su povećana urbanizacija i razvoj u klizišnim područjima, kontinuirano krčenje šuma također u klizišnim područjima i povećane lokalne oborine uzrokovane klimatskim promjenama. Oborine, infiltracija i tok podzemne vode neki su od najvažnijih čimbenika pokretanja klizišta. Mehanizmi aktiviranja klizišta koji se odnose na hidrogeologiju vrlo su složeni jer svako klizište ima jedinstvenu shemu podzemnih voda. Često je teško pratiti podrijetlo i protok podzemnih voda u klizištima. To je zato što se s jedne strane hidrogeološki procesi odvijaju u podzemlju i teško je dostupno promatranje. S druge strane, propusnost klizišta, koja u velikoj mjeri kontrolira podzemnu vodu može biti vrlo heterogena. Bez obzira na uzrok, nakon što se postavi sumnja u stabilnost kosine, neophodno je istražiti njegovu ukupnu stabilnost i, ako je potrebno, provesti odgovarajuće mjere sanacije. Mjera za stabilizaciju klizišta uzrokovanih porastom razine podzemne vode je najčešće izrada drenažnih sustava. Zbog nejednolikosti tla i stijena i različite propusnosti na različitim mjestima projektiranje sustava drenaže može biti vrlo složen proces.

U radu je detaljnije obrađena problematika klizišta s naglaskom na nestabilnostima koje su uzrokovane podizanjem razine podzemne vode u kosini. Opisani su osnovni elementi i dimenzije klizišta te su predstavljeni klasifikacijski sustavi. Prikazana su osnovna načela sanacije klizišta te je detaljnije opisano dreniranje kao mjera sanacije. U praktičnom dijelu rada provedene su analize stabilnosti korištenjem programa Slide2 (Rocscience Inc.). Za usvojenu geometriju, materijalne značajke i hidrološke uvjete u kosini prikazano je na koji način porast razine podzemne vode utječe na smanjenje faktora sigurnosti kosine, te na koji način drenažni elementi povećavaju stabilnost kosine.

12. LITERATURA

- [1] Nonveiller, E., Mehanika tla i temeljenje građevina, Školska knjiga, Zagreb, 1979.
- [2] Nonveiller, E., Kliženje i stabilizacija kosina, Školska knjiga, Zagreb, 1987.
- [3] Rock slope engineering, Spon Press, New York, SAD, 2005.
- [4] Multilingual landslide glossary, BiTech Publishers Ltd., Richmond, B.C, Canada, 1993.
- [5] Landslides investigation and mitigation, National Academy Press Washington, D.C, 1996.
- [6] Effect of Groundwater on Landslide Triggering, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, Switzerland, 2011
- [7] Waltham, T., Foundations of engineering geology, Taylor and Francis, 2009.
- [8] Žic, E., Vasović, D., Podrijetlo vode i njeno značenje na planeti Zemlji, Zbornik radova (Građevinski Fakultet Sveučilišta U Rijeci), Svezak 22 Br. 1, Rijeka, 2019.
- [9] Arbanas, Ž. (2020): Stabilnost kosina, predavanje iz kolegija Geotehnika, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
- [10] Rajesh, R., Effect of groundwater, 2015
- [11] Varnes, D., Slope Movement Types and Processes, Chapter 2
- [12] Dochez, S., i dr., Influence of water on rock discontinuities and stability of rock mass, Earth and Planetary Science, 2013
- [13] Hrvatska tehnička enciklopedija 1963-97., 7. svezak Ke-Međ, 1980.
- [14] Phoenix Consulting Engineers, Slope Stability, <https://pce.net.nz/slope-stability.aspx> pristup 11.09.2020.
- [15] Geotech, Klizišta <https://www.geotech.hr/vrste-i-elementi-klizista/> 11.09.2020.
- [16] ScienceDirect, Horizontal Drain, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/horizontal-drain> 14.09.2020.