Modeliranje zaštite građevne jame pomoću softverskog paketa GEO5

Strmečki, Dejan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:891563

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

SVEUČILIŠTE SJEVER

SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN



DIPLOMSKI RAD br. 39/GRD/2021

Modeliranje zaštite građevne jame pomoću softverskog paketa GEO5

Dejan Strmečki

Varaždin, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE SJEVER

SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN

Studij Graditeljstva



DIPLOMSKI RAD br. 39/GRD/2021

Modeliranje zaštite građevne jame pomoću softverskog paketa GEO5

Student: Mentor:

Dejan Strmečki, 0336018079 dr. sc. Božo Soldo, red. prof.

Varaždin, rujan 2021.

Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR–42000 Varaždin

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za graditeljstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo

PRISTUPNIK Dejan Strmečki | MATIČNI BROJ 0336018079

DATUM 4. IV. 2021. | KOLEGIJ Geotehničko inženjerstvo

NASLOV RADA MODELIRANJE ZAŠTITE GRAĐEVNE JAME POMOĆU SOFTVERSKOG PAKETA GEO5

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU MODELING OF CONSTRUCTION PIT PROTECTON UZING GEO5 SOFTWARE PACKAGE

MENTOR dr. sc. Božo Soldo | ZVANJE red. prof.

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc. dr. sc. Bojan Đurin
2. prof. dr. sc. Božo Soldo
3. doc. dr. sc. Aleksej Aniskin
4. doc. dr. sc. Matija Orešković
5.

Zadatak diplomskog rada

BROJ 39/GRD/2021

OPIS

Pod temom Diplomskog rada:
"MODELIRANJE ZAŠTITE GRAĐEVINSKE JAME POMOĆU SOFTVERSKOG PAKETA GEO5 "
u radu je potrebno prikazati načela za modeliranje potporne konstrukcije, opisati djelovanja na potpornu konstrukciju, opisati način rada u GEO% programima te izvesti nekoliko usporednih analiza.
Načelni sadržaj rada sastojao bi se od poglavlja:
1.Uvod
2.Metode izvedbe građevinske jame
3.Djelovanja na potpornu konstrukciju
4.Određivanje dubine zabijanja, momenata savijanja i sila u zagatnim stijenama
5. Prikaz modeliranja zagatne stijene pomoću softverskog paketa GEO5 Demo
6.Rezultati i analiza proračuna
7. Zaključak
Literatura

ZADATAK URUČEN | POTPIS MENTORA

Sažetak

Za dimenzioniranje potporne konstrukcije potrebno je poznavati iznose unutrašnjih sila koje se pojavljuju unutar konstrukcije. Kako bi odredili unutrašnje sile potrebno je poznavati sile koje djeluju na potpornu konstukciju, zatim preko njih proračunati unutrašnje sile . Ti proračuni za jednostavne uvijete mogu se provestii ručno, no ukoliko se pojavljuju složeniji uvijeti proračuni često postaju prekomplicirani za ručno rješavanje. Tada na red nastupaju softverski geotehnički programi poput GEO5 koji lakoćom proračunavaju potrebe parametre. U ovom diplomskom radu naglasak se stavlja na primjere modeliranja zagatne stijene u raznim modelima tla i uvijetima podzemne vode, a i bez nje. Prikazuje se način modeliranja ne stijene pomoću dva programa Dizajn zagatne stijene i Provjera zagatne stijene. Programi omogućuju poračune dubine temeljenja potporne konstrukcije, momenata savijanja, poprečnih sila i eventualnih sila u sidrima ukoliko su definirana. Također, programi omogućiuju dimenzioniranje zagatne stijene. Armaturure armirano betonskih pilota i dijafragmi, ili provjeru nosivosti čelićnog žmurja na moment savijanja i poprečne sile.

Ključne riječi: građevna jama, potporna konstrukcija, aktivni tlak, pasivni otpor, GEO5 Demo

Abstract

To dimension the supporting structure, it is necessary to know the amounts of internal forces that occur inside the structure. In order to determine the internal forces, it is necessary to know the forces acting on the supporting structure, then to calculate the internal forces through them. These calculations for simple conditions can be performed manually, but if more complex conditions arise, the calculations often become too complicated to solve manually. Then it is the turn of software geotechnical programs such as GEO5 that easily calculate the required parameters. In this thesis, the emphasis is placed on examples of modeling of the rock in various soil models and groundwater conditions, and without it. The method of modeling a culvert using the two programs Designing a Collapse and Checking a Collapse is displayed. The programs allow calculations of the foundation depth of the supporting structure, bending moments, transverse forces and possible forces in the anchors, if defined. Also, the programs allow the dimensioning of the barrier rock. Reinforcements of reinforced concrete piles and diaphragms, or checking the bearing capacity of steel slats at the bending moment and transverse force.

Keyword: construction pit, supporting structure, active pressure,

passive resistance GEO5 Demo

Korištene kratice:

m	metar
mm	milimetar
kN	kilonjutn
kNm	kilonjutn metar
M	moment
kPa	kilopaskal
Fs	faktor sigurnosti
$\mathbf{D_k}$	kritična dubina
$\mathbf{K_A}$	koeficijent aktivnog tlaka
$\mathbf{K_P}$	koeficijent pasivnog otpora
$\mathbf{P_A}$	sila aktivnog tlaka
$\mathbf{P_P}$	sila pasivnoh otpora
$\boldsymbol{\sigma}$	naprezanje
$\boldsymbol{\varphi}$	kut unutarnjeg trenja
$\boldsymbol{\rho}$	gustoća
c	kohezija
$\boldsymbol{\gamma}$	obujamska težina
$\boldsymbol{\gamma'}$	uronjena obujamska težina
v	brzina
h	hidraulički potencijal
z	geodetska visina
i	hidraulički gradijent
$\mathbf{i_{cr}}$	kritični hidraulični gradijent
k	koeficijent propusnosti tla

Sadržaj:

1. Uvod 1
2. Metode izvedbe građevne jame 2
2.1. Izvedba građevne jame bez podgrađivanja 3
2.1. Zaštita berlinskim ziđem 6
2.2. Zaštita pilotima 6
2.3. Zaštita žmurjem 7
2.4. Armirano betonska dijafragma 10
2.5. Mlazno injektiranje 12
2.6. Top-down metoda 13
3. Djelovanja na potpornu konstrukciju 14
3.1. Aktivni tlak i pasivni otpor 14
3.1.1. Rankineovo stanje naprezanja 14
3.1.2. Utjecaj kohezije na aktivni pritisak i pasivni otpor 20
3.1.3. Utjecaj vode na aktivan pritisak 21
3.1.4. Utjecaj dodatnog opterećenja iza potporne konstrukcije na aktivno naprezanje 23
3.2. Djelovanje podzemne vode 24
3.2.1. Hidraulički slom tla 24
3.2.2. Doticaj vode u građevnu jamu 27
4. Određivanje dubine zabijanja, momenata i sila zagatnih stijena 28
4.1. Proračun prema Nonveiller-u 28
4.1.1. Konzolna zagatna stijena 28
4.1.2. Stijene sa zategom 31
4.2. Proračun prema formulama iz literature 34
4.2.1. Konzolna zagatna stijena 34
4.2.2. Stijene sa zategama 38
5. Prikaz modeliranja zagatne stijene pomoću softverskog paketa GEO5 Demo .. 40
5.1. Modeliranje pomoću programa „Dizajn zagatne stijene“ 40
5.1.1. Prikaz postupka modeliranja 40
5.1.2. Ručna provjera rezultata unutrašnjih sila 48
5.1.3. Usporedba rezultata 49
5.2. Modeliranje pomoću programa „Provjera zagatne stijene“ 50
5.2.1. Primjer provjere zagatne stijene 50

6. Rezultati i analiza proračuna 55
6.1. Utjecaj kuta unutarnjeg trenja na dubinu zabijanja i unutarnje sile 55
6.2. Utjecaj debljine slojeva na unutrašnje sile i pomake..... 57
6.3. Utjecaj veličine poprečnog presjeka na pomake 61
6.4. Utjecaj položaja i kuta sidrenja sidra na unutarnje sile i pomake..... 63
6.4.1. Utjecaj kuta sidrenja sidra na unutarnje sile i pomake 64
6.4.2. Utjecaj dubine sidrenja na unutarnje sile i pomake 68
6.5. Faktori sigurnosti hidrauličkog gradijenta 72
7. Zaključak 76
Literatura 77

1. Uvod

Za izradu građevina često je potreban iskop građevne jame. Građevna jama je privremena građevina koja mora omogućiti izvedbu temelja i/ili dijela podzemnih etaža građevina za koju je projektirana. Taj prostor mora biti siguran za rad i dostupan ljudima i strojevima. Izbor najboljeg rješenja izvedbe građevne jame ovisi o građevini, karakteristikama terena, prisutnosti vode u tlu ili podzemne vode i o drugim ambijentalnim okolnostima. Svaka građevna jama koja se radi u složenijim uvjetima okoline, s utjecajem podzemne vode, u urbanima sredinama ili zahtjevnijim tlima, geotehnička je građevina za koju je potrebno izraditi projekt, kao i za svaku drugu građevinu. Projekt zaštite građevne jame je dokument u kojem se definira geotehnički model s rješenjem za prethodno definirani projektni zadatak.

Prije samog projektiranja i izvedbe određene zaštitne konstrukcije, potrebno provesti geotehničke istražne radove u tlu koji se sastoje od terenskih i laboratorijskih istražnih radova. Pomoću ovih radova saznajemo u kakvom se tlu planira raditi određena građevina. Nizom pokusa i ispitivanja dobiju se svi potrebni parametri tla preko kojih dobijemo profil tla u kojem se izvodi građevina. Na temelju tih podataka može se pristupiti projektiranju zaštitne konstrukcije.

Projektiranje zaštitne konstukcije počinje odabirom tipa zaštitne konstrukcije. Zatim se na temelju modela proračunavaju dubina temeljenja ili zabijanja potporne konstrukcije unutarnje sile i eventualne sile u sidrima ukoliko su projektom predviđena. Određivanje tih parametara relativno je lako ukoliko se radi o jednostavnom profilu tla, no ukoliko se radi o vrlo slojevitom tlu proračun se dosta komplicira. U svrhu olakšanja proračuna postoji niz softverskih paketa u kojima se modelira zaštita građevne jame. Jedan od takvih softverskih paketa je GEO5. Softverski paket GEO5 sastoji se od tridesetak programa koji omogućuju rješavanje svih geotehničkih probelma. Svi programi imaju isto sučelje i međusobno su kompatibilni što ih čini jednostavnim za korištenje.

Program “Dizajn zagatne stijene“ služi za brzo modeliranje zidova koji nisu sidreni i za izradu osnovnog modela sidrenih potpornih zidova (zagatni piloti, vojni piloti, dijafragme i zidovi na pilotima). Rezultati prikazuju potrebnu duljinu sidrenja, unutarnje sile na konstrukciju i sile u sidrima. Program pruža potrebne provjere za AB, čelične i drvene poprečne presjeke.

Program “Provjera zagatne stijene“ služi za napredno modeliranje ugradbenih potpornih zidova koristeći metodu eleasto-plastične nelinearne analize. Omogućuje modeliranje realnog ponašanja konstrukcije koristeći faze gradnje, kako bi se izračunale deformacije i pritisci na konstrukciju. To omogućuje provjeru stabilnosti unutarnjih sidara ili provjeru poprečnih presjeka (čelik, AB, drvo), te nosivost sidara.

2. Metode izvedbe građevne jame

Građevna jama iskopan je prostor u tlu u kojem se odvijaju radovi. Taj prostor mora bit siguran, suh i dovoljnih dimenzija da omogućuje nesmetane radove u tom prostoru. Građevne jame imaju široku primjenu od plićih građevnih jama za postavu raznih instalacija kroz tlo do velikih i dubokih jama za izvedbu podzemnih garaža i sličnih građevina. Kako bi se omogućili takvi uvijeti rada nerijetko se mora izvesti zaštita pokosa građevne jame različitim metodama.

Metode izrade građevne jame ovise o [1]:

- osobinama materijala u kojem se gradi
- dubini temelja ispod površine terena
- položaju temeljne plohe prema najvišoj razini podzemne vode
- dubini temelja ispod površine terena
- hidroloških i hidrauličkih uvjeta na gradilištu
- osobinama materijala u koje kopamo
- dostupnih metoda, pazeći na ekonomičnost, trajanje i sigurnost izvedbe

Uspravni iskopi najčešće se izvode u urbanim sredinama gdje nema dovoljno prostora za izvedbu kosih pokosa. Prilikom takvih iskopa potrebno je izvesti zaštitu pokosa kako bi se spriječilo urušavanje.

Najčešće metode zašite uspravnih pokosa građevne jame su:

- zaštita berlinskim zidom
- bušeni i zabijeni piloti na međusobnom razmaku ili bez njega
- zaštita zabijenim talpama (žmurjem)
- armirano betonska dijafragma
- mlazno injektiranje
- Top Down metoda

2.1. Izvedba građevne jame bez podgrađivanja

Plitki iskopi (do 2,0 m dubine) mogu se izvoditi bez zaštite. Oni su uvijek privremene građevine te se ta činjenica koristi pri njihovom izvođenju. One se ne smatraju građevinama za koje bi trebalo izraditi projekt, te se izvode iskustveno. U literaturi se mogu naći prijedlozi za nagibe pokosa koji ovise o vrsti materijala. Weissenbach, (1975.) navodi nagibe prema DIN 4124 kako slijedi u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Kut nagiba pokosa prema DIN 4124.

Vrsta tla	Kut nagiba pokosa $\beta[°]$	Pokos 1/n
Nevezano i vrlo slabo vezano tlo	45	1 : 1
Čvrsto i polučvrsto koherentno tlo	60	1 : 0,58
Meka stijena	80	1 : 0,18
Čvrsta stijena	90	uspravno

.

U Koherentnim tlima se svojstvo kohezije koje omogućava izvedbu uspravnih zasjeka bez podgrade. Kritična dubina , D_k, zasjeka može se proračunati iz jednadžbe koja glasi:

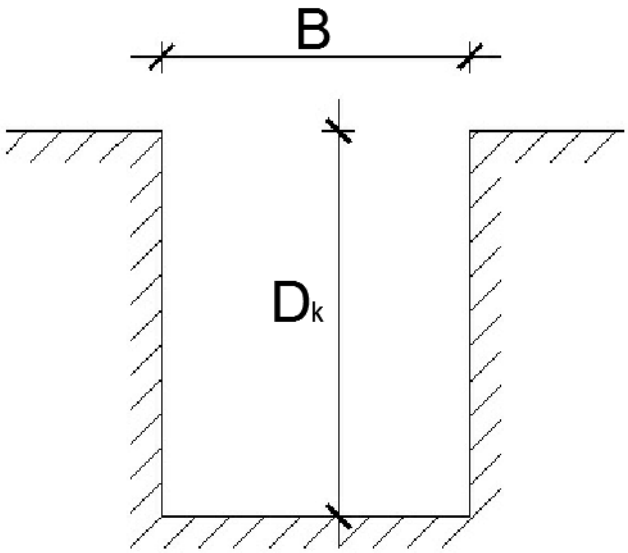
$$D_k = \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot \sqrt{K_a}}, \quad (1.1)$$

gdje je:

c – kohezija,

γ – obujamska težina tla

K_a – koeficijent aktivnog tlaka



Slika 2.1. Iskop do dubine D_k, do koje nema pritiska na podgradu.

Teoretski pritiska na podgradu nema do dubine , $2 \cdot D_k$, sve dok se ne javi vlačna pukotina. To znači da se u nekim slučajevima, kao što je na primjer izvedba kanala za instalacije koji se mogu brzo zatrpati, može iskop bez podgrade izvoditi i dublje od kritične dubine, D_k , uz uvjet da iskop ostane otvoren vrlo kratko.

U nekoherentnim tlima nije moguće izvesti iskop uspravnih stjenki bez podgrađivanja. Nekoherentno tlo nema nikakvu vlačnu čvrstoću i može stabilno stajati samo uz odgovarajući pokos koji je ovisan o kutu unutarnjeg trenja tla i o visini kosine. Najmanji mogući kut unutarnjeg trenja tla je kut prirodnog pokosa. On se javlja kod rahlo nasutog materijala. U prirodi se ovaj kut javlja rijetko zato jer je tlo u prirodi zbijenije od rahlog stanja i rijetko se javljaju čisti nekoherentni materijali. S druge strane teško je izravno (pokusom smicanja) odrediti kut trenja prirodnog nekoherentnog materijala. Za plitke iskope ovo se može odrediti iskustveno.

Kod pokosa građevne jame mora se zadovoljiti uvjet:

$$\frac{1}{n} = \frac{tg\ \varphi}{F_s}, \tag{1.2}$$

gdje je:

φ – kut unutarnjeg trenja,

F_s – faktor sigurnosti

Ukoliko se iskop građevne jame vrši tako da je dio građevne jame ispod razine podzemne vode, potrebno je ublažiti nagib pokosa koji se nalazi ispod površine vode, uz pretpostavku da se voda crpi iz građevne jame.

Zbog djelovanja strujne sile (uz pretpostavku tečenja usporedo s nagibom kosine) na ovaj dio pokosa, nagib kosine mora zadovoljiti uvjet [2]:

$$\frac{1}{n} = \frac{(\rho - \rho_w)}{\rho} \cdot \frac{tg\,\varphi}{F_s}, \tag{1.3}$$

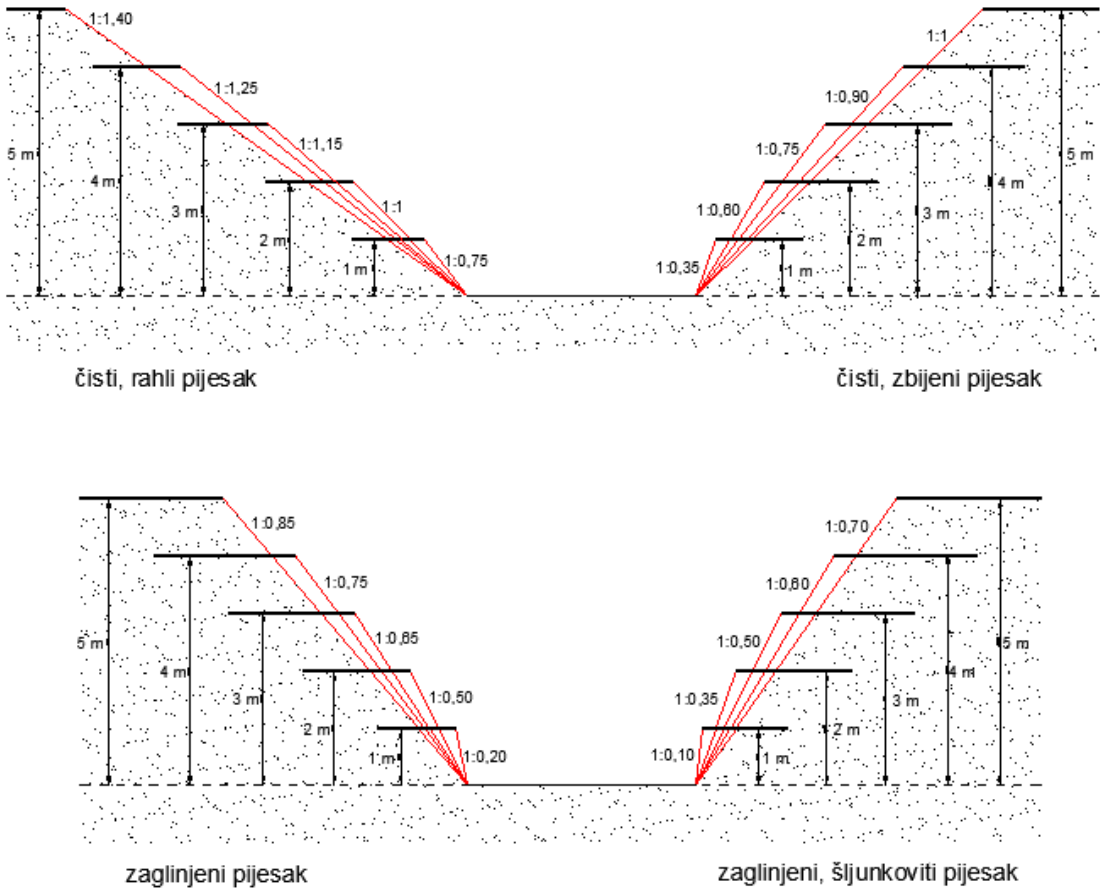
gdje je:

ρ – gustoća tla

ρ_w – gustoća vode

φ – kut unutarnjeg trenja,

F_s – faktor sigurnosti



Slika 2.2. Nagibi pokosa građevne jame u nekoherentnim tlima.

2.1. Zaštita berlinskim ziđem

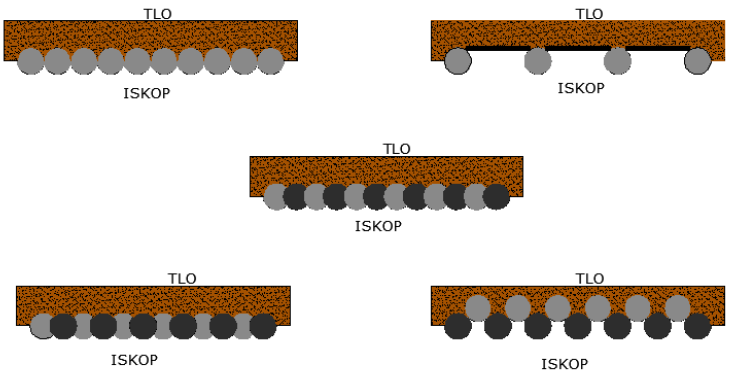
Berlinsko ziđe je podgrada, koja se sastoji od stupova – vodilica zabijenih u tlo na određenom razmaku do potrebne dubine. Između vodilica se umeću platice, koje se postepeno spuštaju, prateći napredovanje iskopa. Platice mogu biti drvene, metalne ili armiranobetonske. Berlinsko ziđe koristi se kada je građevna jama iznad razine podzemne vode, zbog toga što voda prolazi na spojevima platica, odnosno berlinsko ziđe nije vodonepropusno. Ove građevine dimenzioniraju se samo na pritisak tla.



Slika 2.3. Berlinsko ziđe.

2.2. Zaštita pilotima

Zaštita građevne jame pilotima može se izvesti tehnikom bušenih pilota, ali i zabijenih pilota. Piloti se mogu izvesti jedan uz drugog, na manjim razmacima kako bi pridržavali tlo ili na većim razmacima, no tada se između njih postavljaju platice kako bi pridržavale tlo. Ukoliko se želi postići vodonepropusnost tada se piloti postavljaju u više redova ili se međusobno zasijecaju jedan u drugog. Na slici 2.4. prikazani su mogući načini izvedbe pilotske zaštite. Pilote je moguće armirati, ali pritom treba pripaziti na detalje postavljanja armature kod pilota koji se međusobno preklapaju. Također, mogu se armirati svaki drugi pilot odnosno onaj koji su čitavi, a piloti koji su zasječeni ostaju ne armirani.

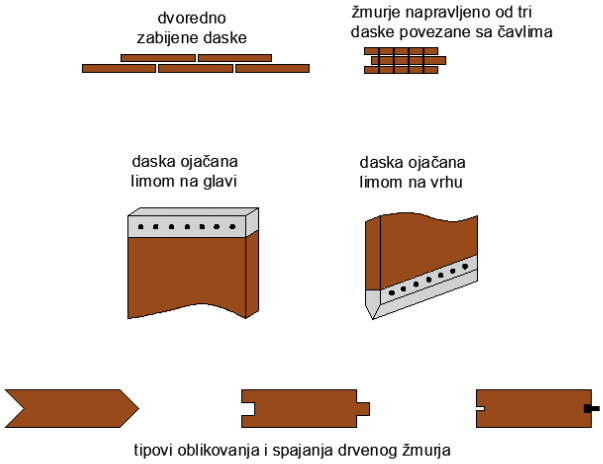


Slika 2.4. Načini izvedbe pilota.

2.3. Zaštita žmurjem

Žmurje, ili češće poznato kao talpe, je vrlo vitka vertikalna građevinska konstrukcija zabijena u tlo koja preuzima pritisak tla i osigurava stabilnost vertikalne stijene, a nerijetko služi za zaštitu od podzemne vode. Žmurje je jednostruki zagatni zid koji je sastavljen od pojedinačnih elemenata, koji su međusobno tako spojeni da kod zabijanja ne dođe do odstupanja od zamišljene ravnine zida. Žmurje možemo definirati i kao oblik prethodno izvedene zaštitne obloge kasnije iskopanih stranica građevne jame s razmjerno uskim, duljim i vitkim talpama. One se prije iskopa zabijaju pomoću vibratora u tlo neposredno jedna uz drugu po plohi stranica iskopa građevne jame.

Prvi načini zaštite bili su sa drvenim žmurjem početkom 19. stoljeća. Drvena žmurja zabijaju se u tlo, a spajaju se na način pero i utor. Mogu se postavljati u jedan ili više redova kako bi se osigurala što veća sigurnost, a smanjila mogućnost prodora materijala u građevnu jamu. Danas se drveno žmurje (talpe) rijetko koriste zbog skupoće, ali i limitirane duljine žmurja. Stoga se drvena žmurja koriste do dubine od otprilike 8 metara.



Slika 2.5.. Detalji drvenog žmurja.

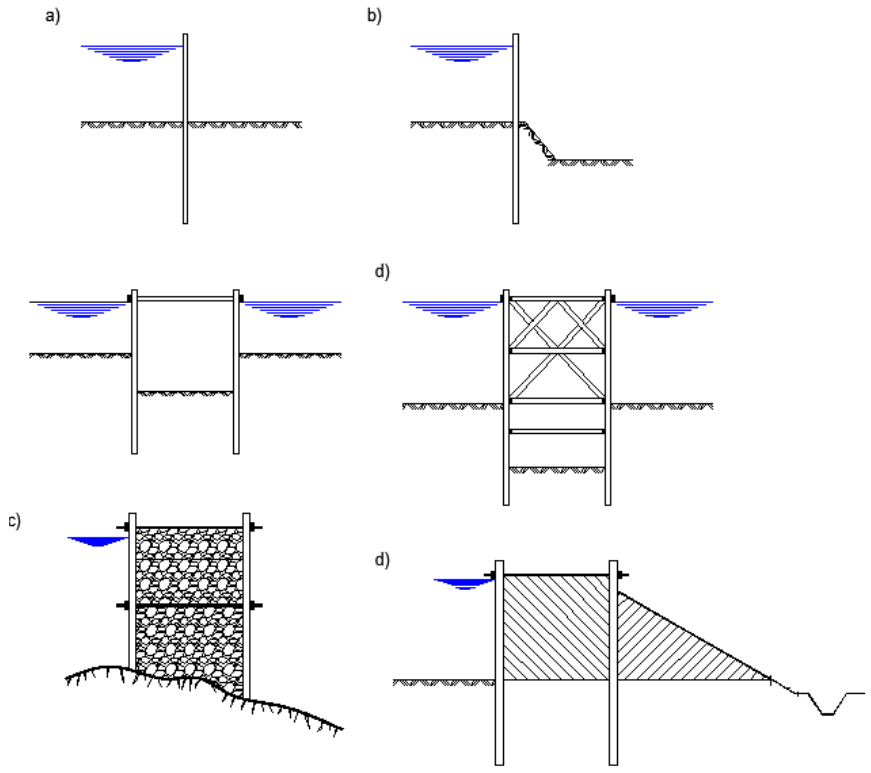
Čelično žmurje primjenjivo je je svugdje gdje se može zabiti u tlo. Za takve su radove pogodni pijesci, meke do polučvrste gline, morski i riječni mulj i slični materijali. Čelično žmurje nije moguće koristit ako se u tlu u koje se žmurje zabija mogu pojaviti krupniji komadi kamena. Čelično žmurje sastoji se od niza čeličnih komada, debljine do 10 mm, raznih oblika i profila, međusobno spojeni spojnicama. Profili se međusobno spajaju tako što se svaka sljedeća platica koja se zabija u tlo najprije namjesti u žlijeb koji služi kao vodilica. Za zabijanje platica potrebna je određena energija koja se postiže moćnim strojevima za zabijanje. Čelično žmurje ima mogućnost nastavljanja jedno na drugo, stoga se mogu upotrebljavati do dubine 20 m i više. Zagati od čeličnog žmurja mogu biti privremene i trajne građevine. Za veće dubine građevnih jama (više od 5 m) platice se zbog ekonomičnosti najčešće osiguravaju geotehničkim sidrima. Ako su privremene građevine, nakon završetka radova platice se ponovno vade, a rupe i oštećenja repariraju. Višestruka upotreba istih platica snižavaju cijenu radova, jer se isti materijal koristi nekoliko puta.



Slika 2.6. Zabijeno čelično žmurje

Čelična žmurja mogu biti zabijena jednoredno ili dvoredno, a mogu se zabijati i čelijasta žmurja. Jednoredno čelično žmurje koristi se kod manjih dubina vode, kao slobodno stojeća zagatna stjena, (slika 2.7., primjer a) i b)). Primjer sa slike 2.7. b), na strani gradilišta ima zemljanu bermu za povećanje stabilnosti. Za veće dubine koristi se razuprto žmurje (primjeri na slici 2.7. c) i d) ,ako je njihov međusoban razmak relativno malen.

Dvoredno žmurje koristi se kada nije moguće žmurje razupirati. Koristi se uglavnom za zaštitu gradilišta smještenih u dubokoj vodi. Sastoje se od dva reda čeličnog žmurja. Ova su dva reda međusobno povezana zategama i privremenim razuporama. Žmurje može biti zabijeno u tlo, ali i samo oslonjeno na stijensku podlogu. Između ova dva reda žmurja nasipa se materijal te tako nastaje gravitacijska građevina koja mora biti vododrživa, (slika 2.7.. e) i f)).



Slika 2.7. Primjeri zabijanja čeličnog žmurja.

Ćelijasti zagati se koriste za veće zahvate, kada nema prostora za nasip ili kada bi nasip zbog dubine vode bio ekonomski neopravdan. Ima ih raznih vrsta, prema tlocrtnom izgledu, poprečnim presjecima, dodatnim nasipima i tako dalje. Svi se izvode tako da se zabije čelično žmurje u zatvorene oblike i zatim puni materijalom. Na slici 2.8. prikazan je jedan ćelijasti zagat.



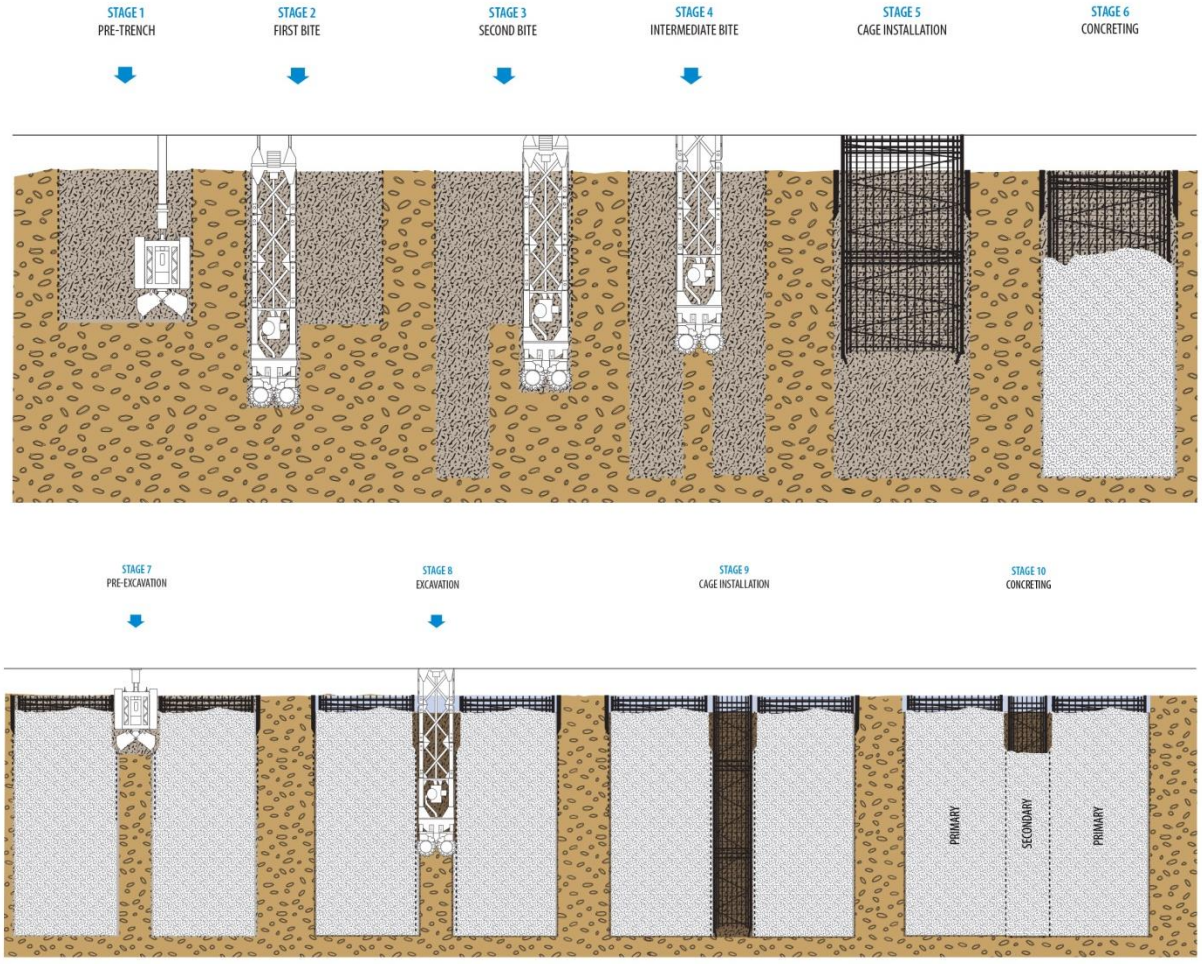
Slika 2.8. Ćelijasti zagat.

2.4. Armirano betonska dijafragma

Armirano betonske dijafragme su betonski zidovi koji okružuju građevnu jamu sa svih strana i uvijek ostaju kao trajni dijelovi građevine. Te mogu služiti kao daljnja veza za povezivanjem s međukatnom konstrukcijom objekta. Armirano-betonske dijafragme često se rade kao sidrene armirano betonske dijafragme koje mogu biti projektirane tako da stjenka ostaje trajna, a sidra privremena. Opterećenje koje u početku nose sidra, kasnije na sebe preuzima sama međukatna konstrukcija zgrade.

Dijafragme izvedene u tlu trebaju biti tako izvedene da sigurno preuzmu aktivne tlakove tla, dok se horizontalne sile nastale djelovanjem tla preuzimaju putem injektiranih zatega ili vodoravnih elementa koji se izvode u unutar prostora dijafragme. Armirano-betonske dijafragme se koriste u dubokim jamama jer mogu sezati i do dubine veće od 30 metara, što je zabijanjem klasičnih talpi i zagata teško ostvarivo.

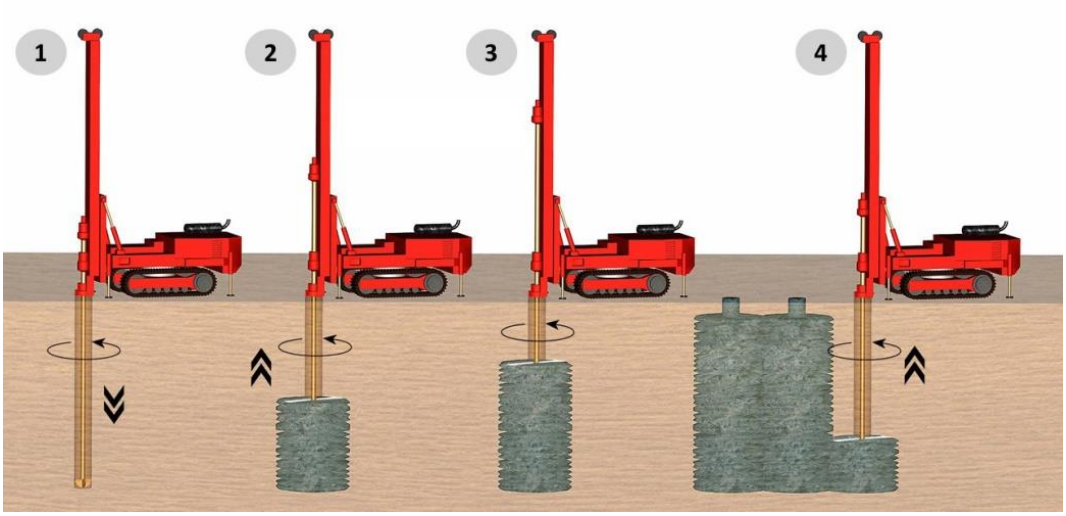
Izvođenje dijafragmi započinje kopanjem žlijebnog kanala, u kojem se kasnije izvode rovovi za betoniranje stijena dijafragme. Iskop zida se radi isprekidano, u parnim segmentima, prilikom čega se neparni segmenti kopaju tek nakon što su parni segmenti u potpunosti izvedeni. Nakon izvedbe iskopa pristupa se montaži armature. Armatura se najčešće postavlja kod onih dijafragmi koje će kasnije biti sastavni dio objekta. Nakon postave armature počinje betoniranje pomoću kontraktor postupka. Uz same rubove segmenta stijenke stavljaju se cijevi dimenzija jednakim ukupnoj debljini same dijafragme. Što osigurava kvalitetan i „ čist“ spoj kasnije s neparnim segmentom koji se kopa i betonira nakon izvođenja parnog segmenta. Nakon izvođenja armirano-betonske dijafragme žlijebni kanal se može ispuniti betonom i imati ulogu armirano-betonske grede koja povezuje zidove dijafragme te preuzimati na sebe momente savijanja tla.



Slika 2.9.. Proces izvođenja armiranobetonske dijafragme.

2.5. Mlazno injektiranje

Mlazno injektiranje, više poznato kao „ jet grouting“ , je metoda poboljšanja tla kojom se određeni volumen tla pretvara u zemljani mort pri čemu se razbija struktura tla pomoću visoko energetskog mlaza tekućine. Normalna veličine tlaka koja se koristi ja mlazno injektiranje je između 450 i 500 bara, a pritom se može doseći brzina injekcijskog mlaza oko 300 m/s ili 1080 km/h. Mlazno injektiranje se može koristiti kao zaštita stjenke građevne jame, a može služiti kao vodonepropusna zavjesa u tlu i služiti kao zaštita od podzemne vode.



Slika 2.10. Proces mlaznog injektiranja ***(jet grouting)****.*

Za mlazno injektiranje postoje četiri vrste postupka:

- jednofluidni sustav (injekcijska smjesa)
- dvofluidni sustav (injekcijska smjesa + zrak ili voda)
- trofluidni sustav (injekcijska smjesa + zrak + voda)
- super injektiranje (bazira se na dvofluidnom sustavu)

Kada se mlazno injektiranje izvodi **jednofluidnim postupkom**, injekcijska smjesa se pod velikim brzinama upumpava u okolno tlo. Na taj način nastaju stupovi promjera 0,6 – 1,2 m. Postupak se može uspješno primijeniti u šljuncima, pijescima i prahovima, dok je u glinama manje efikasan.

Dvofluidnim postupkom istovremeno se injektira i injekcijska smjesa i zrak koji povećava efikasnost injektiranja. Mogu se postići promjeri do 1 m u zbijenim tlima i do 1,8 m u rahlim.

Kod **trofluidnog postupka** injekcijska smjesa, zrak i voda se istovremeno pumpaju u tlo. Na ovaj način mogu se postići kvalitetniji stupovi većeg promjera (0,9 – 1,5 m). Trofluidno injektiranje je najefikasniji sustav za koherentna tla.

2.6. Top-down metoda

Top-down metoda u Hrvatskoj još u velikoj primjeni. Spomenuta metoda zaštite iskopa ne koristi geotehnička sidra, već se napreduje prema dolje s razupiranjem pomoću stropnih ploča.

Prednosti ovog tipa građenje podzemnih dijelova građevine su slijedeći:

- sigurnost rješenja tj. eliminiranje utjecaja na susjedne zgrade
- ušteda na vremenu jer se eliminira vrijeme potrebno za izvedbu velikog broja geotehničkih sidara. U vezi s tim dobiva se na vremenu ishođenja suglasnosti vlasnika okolnih zgrada za izvedbu sidara.
- dijafragma predstavlja obodni nosivi zid ukopanog dijela zgrade, tj. otpada potreba izvedbe horizontalne izolacije i novog podrumskog zida
- ušteda u vremenu i troškovima izvedbe monolitnih stropnih ploča na razinama razupiranja

Kod izvedbe građevine top-down metodom prvo se izvodi armiranobetonska dijafragma, zatim se kreće sa iskopom prve etaže građevine. Kada se izvrši iskop buše se tlo i postavljaju se piloti. Nakon ugradnje svih pilota postavlja se oplata stropne ploče, zatim armatura i betoniranje stropne ploče. Prilikom betoniranja važno je ostaviti otvore u stropnoj konstrukciji kako bi se prilikom kopanja donje etaže mogao odvoziti iskopani materijal. Nakon betoniranja prve stopne ploče može se krenuti sa iskopom donje etaže, ali i izradom gornje etaže tako se štedi na vremenu. Za svaku podzemnu etažu ponavlja se proces izvedbe.



Slika 2.11. Izvedba podzemne garaže top-down metodom , „Cvjetni trg“, Zagreb.

3. Djelovanja na potpornu konstrukciju

Potporne konstrukcije za zaštitu građevne jame najčešće su zagatne stijene. Njihova težina nema preveliku ulogu prilikom zaštite jame već sama sposobnost odupiranja momentu savijanja koje prouzrokuje tlo koje zaštita pridržava te podzemna voda.

Sile koje djeluju na potpornu konstrukciju mogu se raspodijeliti na dvije osnovne a to su:

- Sila aktivnog pritiska tla
- Sila pasivnog otpora tla.

Ostale sile koje mogu djelovati na potpornu konstrukciju su:

- Hidrostatski tlak
- Hidrodinamički tlak
- Seizmički inducirane sila

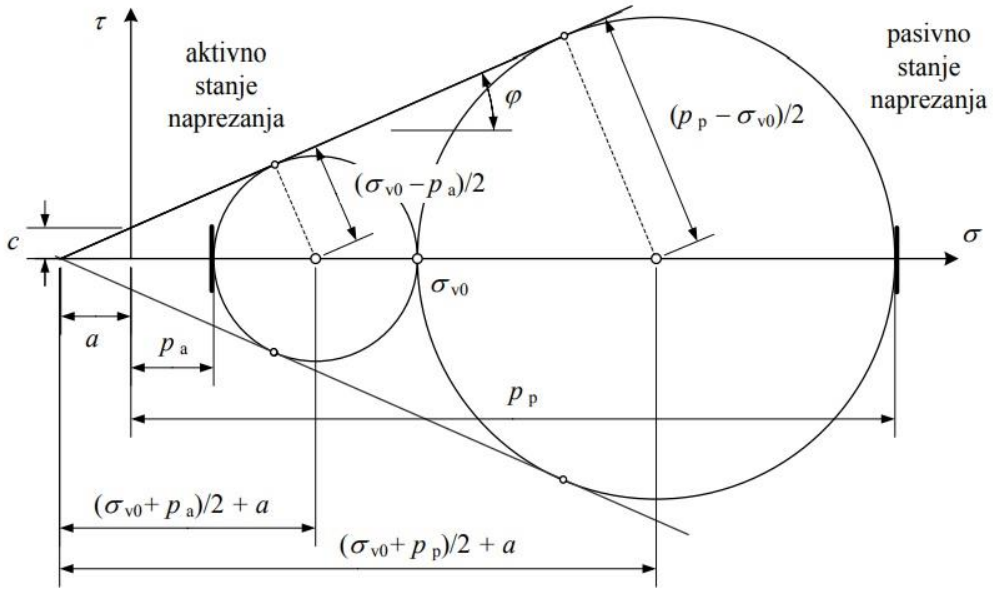
3.1. Aktivni tlak i pasivni otpor

3.1.1. Rankineovo stanje naprezanja

Kada je tlo prije iskopa horizontalno, relativno je jednostavno odrediti početna naprezanja u tlu. Znajući da su vertikalna naprezanja na određenoj dubini jednaka umnošku težine tla γ i udaljenosti od razine terena *z, odnosno* $\sigma_v = \gamma \cdot z$ *,* možemo odrediti horizontalna naprezanja. Početna naprezanja $\sigma_{h,0}$ jednaka su umnošku vertikalnih naprezanja sa koeficijentom tlaka mirovanja K_0, odnosno $\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$. Dakle, koeficijent tlaka mirovanja je omjer horizontalnog i vertikalnog efektivnog naprezanja, koja smo dodatno označili indeksom nula kako bismo naglasili da se radi o početnom stanju naprezanja na terenu.

Pretpostavimo li da smo prilikom troosnog pokusa dobili efektivna vertikalna naprezanja $\sigma_{v,0}$ i horizontalna naprezanja $\sigma_{h,0}$ koja odgovaraju početnom stanju naprezanja u tlu na terenu, na dubini s koje je uzorak izvađen. Zatim u sljedećoj fazi pokusa vertikalno opterećenje ostaje konstantno, a horizontalno se opterećenje smanjuje (uz otvoreni dren). Budući da se radi o rasterećenju uzorka, volumen uzorka raste. Horizontalno rasterećenje uzorka provodi se do sloma tla. To znači da anvelopa sloma tangira odgovarajuću Mohrovu kružnicu naprezanja, kao što je prikazano na slici 3.1. manjom, lijevom kružnicom. H naprezanje pri slomu označeno je s p_a i naziva se Rankinevim aktivnim tlakom. To je minimalno horizontalno naprezanje za dano vertikalno naprezanje $\sigma_{v,0}$.

Ako sada ponovimo isti pokus, ali u posljednjoj fazi pokusa povećavamo horizontalno opterećenje, s konstantnim vertikalnim opterećenjem (uz otvoreni dren), doći će do smanjenja volumena uzorka. Horizontalno opterećenje uzorka provodi se do sloma tla. To znači da anvelopa sloma tangira odgovarajuću Mohrovu kružnicu naprezanja, kao što je prikazano na slici 3.1. većom, desnom kružnicom. Horizontalno naprezanje pri slomu označeno je s p_p i naziva se Rankinevim pasivnim otporom. To je maksimalno horizontalno naprezanje za dano vertikalno naprezanje $\sigma_{v,0}$.



Slika 3.1. Prikaz aktivnog i pasivnog stanja naprezanja pomoću Mohrove kružnice.

Kako bi dobili silu aktivnog tlaka iz geometrijskih odnosa prikazanih na slici 3.1. slijedi:

$$\frac{\frac{\sigma_{v,0}-p_a}{2}}{\frac{(\sigma_{v,0}+p_a)}{2}+a} = \sin\varphi, \tag{3.1}$$

odnosno;

$$\frac{\sigma_{v,0}-p_a}{\sigma_{v,0}+p_a+2a} = sin\varphi. \tag{3.2}$$

Daljnjim sređivanjem izraza dobije se izraz za silu aktivnog tlaka:

$$p_a = K_a \cdot \sigma_{v,0} - 2c \cdot \sqrt{K_a}\ . \tag{3.3}$$

Gdje je K_a koeficijent aktivnog tlaka izražen kao:

$$K_a = \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} = tg^2(45° - \frac{\varphi}{2}). \tag{3.4}$$

Za izračun sile pasivnog otpora iz geometrijskih odnosa prikazanih na slici 3.1. slijedi:

$$\frac{\frac{\mathrm{p_p}-\sigma_{\mathrm{v},0}}{2}}{\frac{(\sigma_{\mathrm{v},0}+\mathrm{p_p})}{2}+\mathrm{a}} = \sin\varphi\,, \tag{3.5}$$

odnosno;

$$\frac{p_p-\sigma_{v,0}}{\sigma_{v,0}+p_p+2a} = sin\varphi\,. \tag{3.6}$$

Daljnjim sređivanjem izraza dobije se izraz za silu pasivnog otpora:

$$p_p = K_p \cdot \sigma_{v,0} + 2c \cdot \sqrt{K_p} \tag{3.7}$$

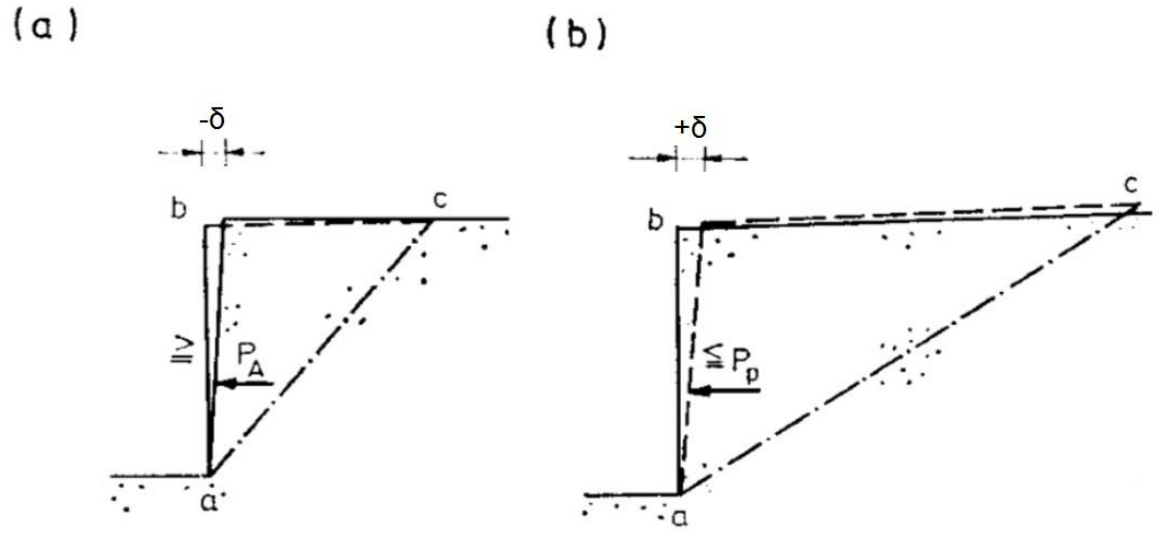
Gdje je K_p koeficijent pasivnog otpora izražen kao:

$$K_p = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} = tg^2(45° + \frac{\varphi}{2}). \tag{3.8}$$

Rankineovi izrazi za sile aktivnog tlaka i pasivnog otpora vrijede uz sljedeće uvijete:

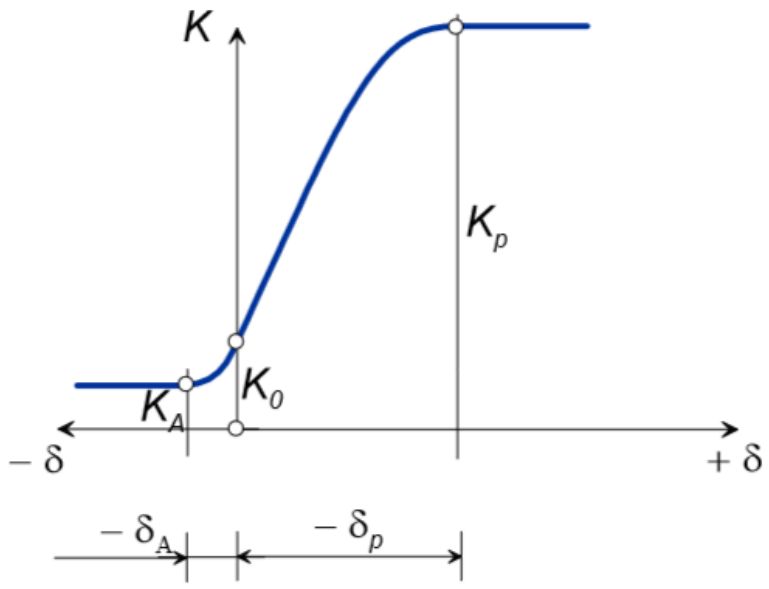
- teren je iza zida je horizontalan
- stražnja strana zida je vertikalna
- zid je gladak, odnosno nema trenja između zida i tla
- zid rotira prema van oko unutarnje donje točke, čime se postiže konstantna relativne horizontalna deformacija aktivnog klina, εh=const.

Kao što smo ranije naveli, aktivno stanje tla nastaje kad se tlo rasterećuje, odnosno kad se naprezanja u tlu smanjuju u odnosu na početno stanje. Takvo stanje nastaje kad se zid pomiče od tla koje pridržava i nastaje pomak -δ kao što je prikazano na slici 3.2. a). Ako bi pomak bio dovoljno velik, a ujedno i deformacija tla, uspostavit će se granično aktivno stanje. Rezultanta napona jest sila aktivnog tlaka P_a. Ukoliko bi na potpornu konstrukciju djelovala neka sila kojom bi konstrukcija potiskivala i zbijala tlo nastao bi pomak +δ kao što je prikazano na slici 3.2. b). Kad bi pomak +δ bio dovoljno velik nastalo bi pasivno stanje naprezanja u tlu. Rezultanta napona tog stanja je sila pasivnog otpora P_p.



Slika 3.2. Prikaz utjecaja pomaka na stanje naprezanja tla.

U slučajevima da se oko zida nalaze zone u kojima se mogu javiti aktivni pritisci i pasivni otpori, treba imati na umu da je za razvoj punog iznosa tih pritisaka potrebna određena deformacija. Deformacija, da se razviju odgovarajući pritisci, se može prikazati i preko koeficijenata K_o, K_A i K_P. Naime, budući da je veličina sila proporcionalna s odgovarajućim koeficijentom, razvoj pritiska s pomakom može se prikazati i dijagramom promjene koeficijenta s pomakom. Promjena koeficijenta bočnog naprezanja, od K_o na K_A i K_P, s pomakom zida, δ , prikazana je na slici 3.3. Treba uočiti da je, za postizanje pune vrijednosti aktivnog pritiska, potreban puno manji pomak nego za pasivni otpor. To postaje važno kod projektiranja potpornih konstrukcija jer se ne može računati s punim iznosom pasivnog otpora (koji nam djeluje povoljno), već ga treba umanjiti s odgovarajućim parcijalnim koeficijentom. Bitno je uočiti da se, od stanja mirovanja na aktivno naprezanje, može prijeći samo ako takav pomak postoji, odnosno, ako ga nema, da treba računati s većim naprezanjem na potporne konstrukcije (kakav je slučaj kod, primjerice, razupora).



Slika 3.2. Promjena koeficijenta bočnog naprezanja, od K_o na K_A i K_P, s pomakom zida

Ukupni aktivan pritisak na zid. Rankineovo stanje nam omogućuje da odredimo raspodjelu aktivnih naprezanja na stražnju stranu zida. Ako se ostvari odgovarajući pomak, i iza zida nastupi aktivno stanje, prema Rankineu, raspodjela aktivnog naprezanja po visini zida je, s K_A, proporcionalna porastu vertikalnih naprezanja. Iz raspodjele se može odrediti ukupna sila aktivnog pritiska i njezin položaj. Aktivni pritisak jednak je površini dijagrama aktivnog naprezanja, a djeluje u njegovom težištu (na trećini visine):

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{Ah} \cdot h = \frac{1}{2} \cdot K_A \cdot \gamma \cdot h \cdot h = \frac{\gamma \cdot h^2}{2} \cdot K_A. \quad (3.9)$$

Odnosno, uvrštavanjem K_A :

$$P_A = \frac{\gamma \cdot h^2}{2} \cdot tg^2(45° - \frac{\varphi}{2}). \quad (3.10)$$

Ako se ostvari odgovarajući pomak, i iza zida nastupi pasivno stanje, prema Rankineu, raspodjela pasivnog naprezanja po visini zida je, s K_P, proporcionalna porastu vertikalnih naprezanja. Iz raspodjele se može odrediti ukupna sila pasivnog otpora i njezin položaj. Pasivni otpor jednak je površini dijagrama pasivnog naprezanja, a djeluje u njegovom težištu (na trećini visine):

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{Ph} \cdot h = \frac{1}{2} \cdot K_P \cdot \gamma \cdot h \cdot h = \frac{\gamma \cdot h^2}{2} \cdot K_P. \quad (3.11)$$

Odnosno, uvrštavanjem K_P :

$$P_P = \frac{\gamma \cdot h^2}{2} \cdot tg^2(45° + \frac{\varphi}{2}). \quad (3.12)$$

3.1.2. Utjecaj kohezije na aktivni pritisak i pasivni otpor

Kada tlo u aktivnom klinu iza zida ima koheziju, c, dobije se:

$$\sigma_{Ah} = \gamma - 2c \cdot \sqrt{K_A}. \tag{3.13}$$

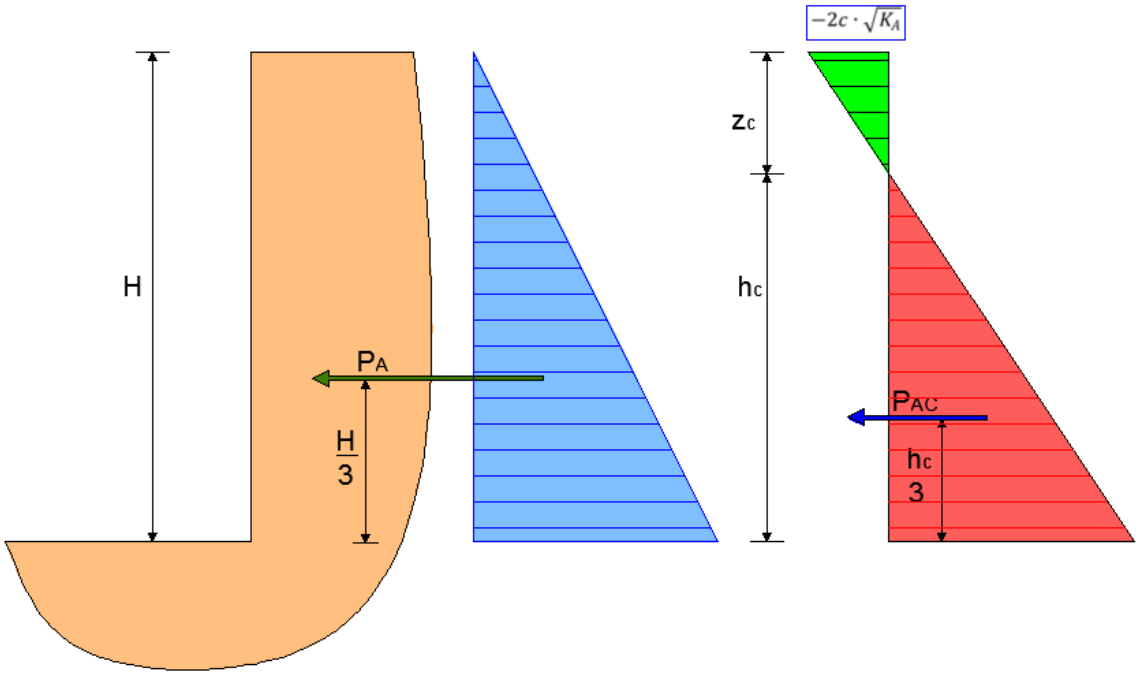
Daljnjim sređivanjem izraza i uvrštavanjem K_A dobije se izraz za horizontalno naprezanje u koherentnim tlima

$$\sigma_{Ah} = \gamma \cdot \ tg^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) - 2c \cdot tg(45° - \frac{\varphi}{2}). \tag{3.14}$$

Sila aktivnog tlaka u koherentnim tlima izračunava se:

$$P_{Ac} = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \cdot tg^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) - 2c \cdot tg(45° - \frac{\varphi}{2}). \tag{3.15}$$

. Očito je da je utjecaj kohezije na pritisak povoljan, tj. da kohezija smanjuje aktivno naprezanje. Osim toga, ukupna rezultanta P_{AC} je niže, pa je i njezin moment manji.



Slika 3.3. Utjecaj kohezije na aktivni pritisak tla.

,

Kada tlo u pasivnom klinu iza zida ima koheziju, c, dobije se:

$$\sigma_{Ph} = \gamma \cdot K_P + 2c \cdot \sqrt{K_P}. \tag{3.16}$$

Daljnjim sređivanjem izraza i uvrštavanjem K_p dobije se izraz za horizontalno naprezanje u koherentnim tlima

$$\sigma_{Ph} = \gamma \cdot \ tg^2\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \cdot tg(45° + \frac{\varphi}{2}). \tag{3.17}$$

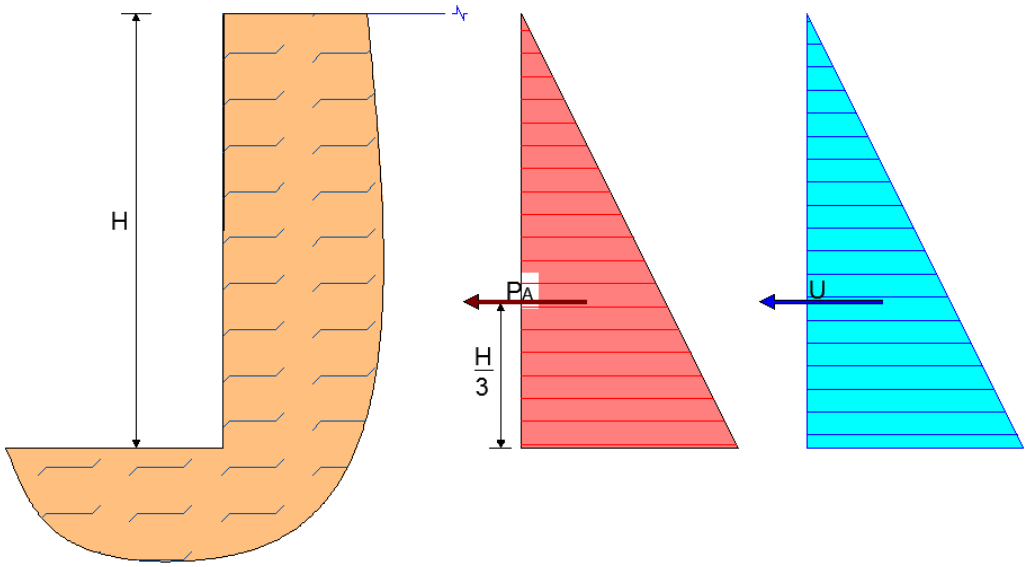
Sila pasivnog otpora u koherentnim tlima izračunava se:

$$P_{Pc} = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \cdot tg^2\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \cdot tg(45° + \frac{\varphi}{2}). \tag{3.18}$$

3.1.3. Utjecaj vode na aktivan pritisak

Aktivan pritisak je do sada određivan za suho tlo u zaleđu potporne konstrukcije Ako u zaleđu ima podzemne vode, vrijede iste formule, samo, umjesto ukupnih (totalnih) treba uvrstiti efektivna naprezanja. Budući da su efektivna manja od ukupnih, dobiju se i manja aktivna naprezanja. S druge strane, međutim, pojavljuje se i horizontalni tlak od vode, koji je, u pravilu veći od aktivnog naprezanja, pa je ukupni efekt djelovanja vode nepovoljniji nego da vode nema.

Voda do razine terena



Slika 3.3. Aktivno naprezanje kad je razina vode u razini terena iza konstrukcije; voda ne teče.

Ukupna horizontalna sila koja djeluje na potpornu konstrukciju je:

$$P_H = P_A + U. \tag{3.19}$$

Znajući da je efektivno naprezanje:

$$\sigma'_h = \sigma'_V \cdot K_A = \gamma' \cdot H \cdot tg^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) = (\gamma - \gamma_W) \cdot H \cdot tg^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right), \tag{3.20}$$

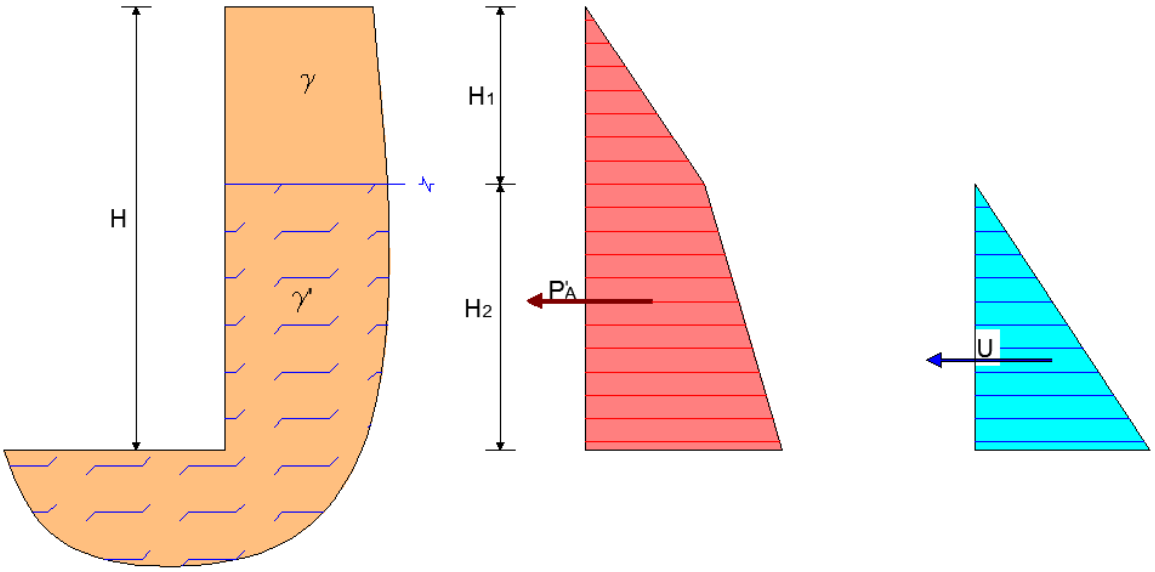
a hidrostatski tlak jednak:

$$u = \gamma_W \cdot H, \tag{3.21}$$

formulu za ukupnu horizontalnu silu možemo zapisati:

$$P_H = \frac{\gamma' \cdot H^2}{2} \cdot tg^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{\gamma_W \cdot H^2}{2}. \tag{3.22}$$

Voda na određenoj dubini



Slika 3.4. Aktivno naprezanje kad je razina vode na određenoj dubini ispod terena.

U slučaju da je voda na nekoj određenoj dubini kao na slici 3.4. tad se ukupna horizontalna sila računa prema formuli:

$$P_H = \frac{\gamma \cdot H_1^2}{2} \cdot K_A + \gamma \cdot H_1 \cdot H_2 \cdot K_A + \frac{\gamma' \cdot H_2^2}{2} \cdot K_A + \frac{\gamma_W \cdot H^2}{2}, \tag{3.23}$$

odnosno;

$$P_H = \frac{\gamma \cdot H_1^2}{2} \cdot tg^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) + \gamma' \cdot H_1 \cdot H_2 \cdot tg^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{\gamma' \cdot H_2^2}{2} \cdot tg^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{\gamma_W \cdot H^2}{2}. \tag{3.24}$$

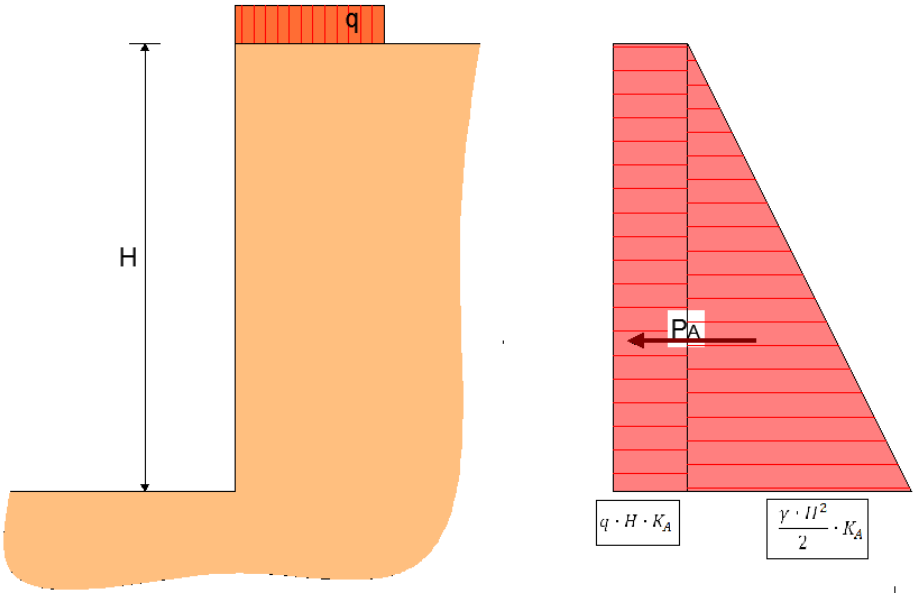
3.1.4. Utjecaj dodatnog opterećenja iza potporne konstrukcije na aktivno naprezanje

Često se na dijelu terena iza potporne konstrukcije pojavljuju dodatna opterećenja od građevina, vozila, dizalica i slično. U tom slučaju horizontalni tlak povećava se za iznos dodatnog opterećenja prema izrazu:

$$P_A = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \cdot K_A + q \cdot H \cdot K_A. \tag{3.25}$$

Uvrštavanjem izraza za koeficijent aktivnog tlaka dobije se:

$$P_A = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \cdot tg^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) + q \cdot H \cdot tg^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right). \tag{3.26}$$



Slika 3.3. Utjecaj dodatnog opterećenja na aktivno naprezanje.

3.2. Djelovanje podzemne vode

Djelovanje vode na građevnu jamu možemo podijeliti na dva faktora:

- Podzemna voda stvara hidrostatski tlak koji djeluje na zaštitu građevne jame
- Podzemna voda zbog razlike potencijala struji kroz tlo u prostor građevne jame što može izazvati hidraulični slom tla

3.2.1. Hidraulički slom tla

Veliki problem u građevnoj jami stvara podzemna voda, te se njoj treba posvetiti posebna pažnja jer može uzrokovati nepovoljne događaje, poput hidrauličkog sloma tla, koji uvelike utječu na daljnju gradnju. Zbog toga posebnu pažnju dajemo hidrauličkoj stabilnosti dna građevne jame. Strujanje vode u jamu kroz tlo može izazvati hidraulički slom tla, pa je potrebno preko strujne mreže provjeriti stvarne gradijente u izlazu vode u jamu i osigurati se od hidrauličkog sloma. Ukoliko postoji razlika potencijala vode u različitim točkama u tlu, voda će teći iz mjesta višeg prema mjestu nižeg visinskog potencijala.

Ukupni potencijal definiran je Bernullijevom jednadžbom, koja prikazuje zbroj triju visina:

$$h = \frac{u}{\gamma_W} + \frac{v^2}{2g} + z, \tag{3.27.}$$

gdje je:

u − porni tlak

γ_W − zapreminska težina vode

u/γw − tlačna(piezometarska visina)

v − brzina

g − ubrzanje sile teže

$\frac{v^2}{2g}$ − brzinska visina

z − geodetska visina

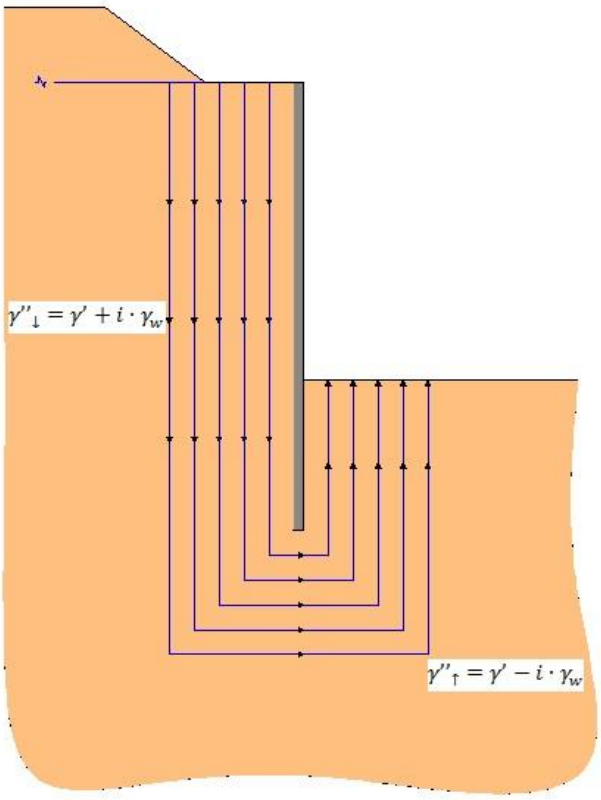
h − hidraulički potencijal

Pošto je brzina kretanja vode u tlu mala, zanemaruje se udio kinetičke energije, pa je ukupni potencijal jednak zbroju geodetskog H_g i piezometarskog potencijala H_P.

$$\frac{v^2}{2g} \approx 0, \tag{3.28}$$

$$h = \frac{u}{\gamma_W} + z. \tag{3.29}$$

Postupak provjere nastupanja hidrauličkog sloma tla sastoji se od određivanja hidrauličkog gradijenta i kritičnih hidrauličnog gradijenta. Na slici 3.4. vidljive su strujnice i ekvipotencijale koje se međusobno sijeku pod pravim kutom. Strujnice opisuju smjer tečenja vode, a ekvipotencijale povezuju sve točke koje imaju isti ukupni potencijal. Kada voda struji iz jedne strane na drugu, tlakovi iza stijene se smanjuju a ispred stijene se povećavaju.



Slika 3.4. idealizirani prikaz toka vode kroz tlo oko zagatne stijene.

Hidraulički gradijent:

$$i = \frac{\Delta h}{L}. \quad (3.30)$$

Kritični hidraulički gradijent:

$$i_{kr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}. \quad (3.31)$$

gdje je:

$\gamma' = \gamma - \gamma_w$

γ' – uronjena jedinična težina tla

γ_w – obujamska težina vode

γ – specifična težina tla

Kako bi ocijenili je li nastupio hidraulički slom tla ili ne potrebno je usporediti hidraulički gradijent s kritičnim hidrauličkim gradijentom.

$i < i_{cr}$ – nije nastupi hidraulički slom

$i > i_{cr}$ – nastupio je hidraulički slom

Maksimalni dopušteni hidraulički gradijent dobije se prema formuli:

$$i_{max,dop} = \frac{i_{kr}}{F_s}. \quad (3.32)$$

gdje je F_s faktor sigurnosti koji ovisi o vrsti materijala od kojeg se sastoji tlo.

Tablica 3.1. faktor sigurnosti za određene materijale.

Faktori sigurnosti prema vrsti materijela	
Materijal:	**Faktor sigurnosti**
Kamen	2,5
Sitni šljunak	4
Pijesak	6
Sitni šljunak,pijesak i prah	8,5

3.2.2. Doticaj vode u građevnu jamu

Doticaj vode u građevnu jamu izračunava se prema formuli:

$$Q = v \cdot A. \tag{3.33}$$

gdje su;

Q- količina vode koja dotječe u građevnu jamu u sekundi (m^3/s , l/s)

v – brzina toka vode

A – površina građevne jame

Promatrajući Darcy-ev zakon tečenja možemo odrediti fiktivnu brzinu toka vode kroz tlo. Ona je proporcionalna gradijentu toka.

Brzinu toka vode kroz tlo izračunavamo pomoću formule:

$$v = k \cdot i\ , \tag{3.34}$$

gdje su;

k – koeficijent propusnosti tla

i – hidraulički gradijent ($i = \frac{\Delta h}{L}$)

Koeficijent propusnosti tla određuje se laboratorijski, a u tablici 3.2. dane su vrijednosti za određene vrste tla.

Tablica 3.2. Koeficijenti propusnosti tla.

Vrsta tla	Oznaka	K (cm/s)
Dobro granuliran šljunak/pijesak	GW-SW	$> 10^{-2}$
Slabo granuliran šljunak /pijesak	GP-SP	$5 \cdot 10^{-4} + 10^{-2}$
Anorganski prah i organski prah niske plastičnosti	ML-OL	$10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$
Praškasti šljunci i pijesci, anorganske gline visoke plastičnosti	GM-SM-MH	$5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-4}$
Zagljineni šljunci i pijesci, Anorganske gline niske do srednje plastičnosti	GC-SC-CL	$5 \cdot 10^{-7} - 10^{-5}$
Anorganske gline niske do srednje plastičnosti, anorganske gline visoke plastičnosti, orhanske gline srednje do visoke plastičnosti	CL-CH-OH	$< 10^{-7}$

4. Određivanje dubine zabijanja, momenata i sila zagatnih stijena

Kad se pristupa dimenzioniranu zagatnih stijena i zatega za njihovo usidrenje potrebno je proračunati:

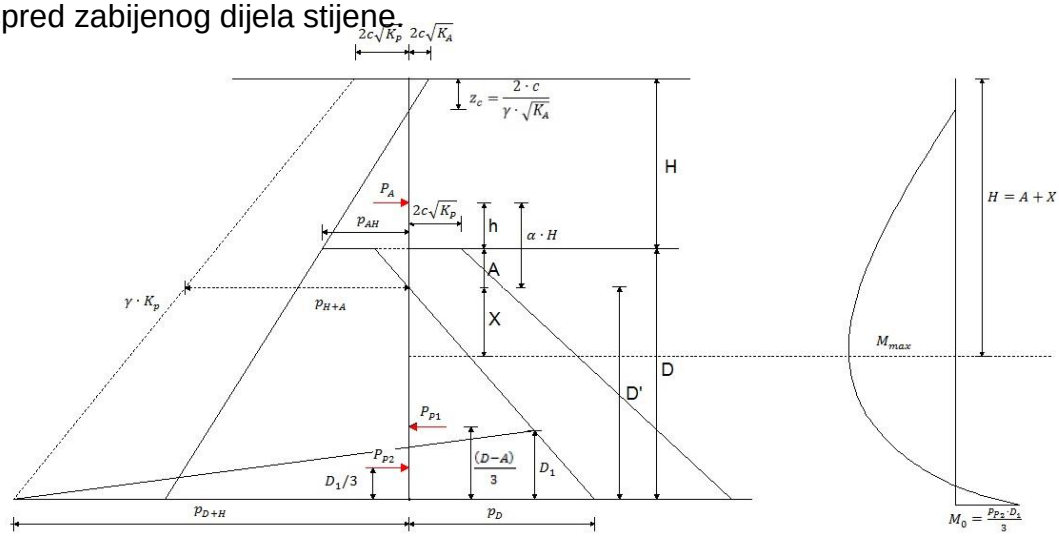
- dubinu zabijanja dovoljnu da se pri zadanim osobinama tla zagatna stijena osigura od jačeg vodoravnog pomicanja, odnosno smanje pomaci
- momente savijanja zagatne stijene potrebne za dimenzioniranje poprečnog presjeka njenih elemenata
- veličine, položaj i broj potrebnih usidrenja
- sile u zategama usidrenih stijena

Uobičajeno je da se ti podaci računaju uz pretpostavku linearne raspodjele aktivnog tlaka i pasivnog otpora tla iza stijene i ispred nje. Budući da je to samo gruba aproksimacija stvarne raspodjele, daju se za različita metode dimenzioniranja iskustveni konkretni koeficijenti kojima se množe takve dobivene sile u zategama i momenti savijanja.

4.1. Proračun prema Nonveiller-u

4.1.1. Konzolna zagatna stijena

Kako navosi Nonveiller [1], stabilnost konzolne zagatne stijene ovisi o prihvatljivoj dubini zabijanja u tlo koja je potreban da se sigurno preuzme velik moment savijanja konzole. Upotreba konzolne stijene ograničena je na male visine jer moment savijanja raste s trećom potencijom visine. Vodoravni pomak gornjeg ruba stijene relativno je velik zbog izražene deformacije potrebne da se aktivira pasivni otpor ispred zabijenog dijela stijene.



Slika 4.1. Sile i momenti savijanja konzolne zagatnme stijene.

Na slici 4.1. konzolna je zagatna stijena visine H zabijena do nepoznate dubine D. Pretpostavljamo općenit slučaj da je ona u koherentnom tlu. Metodama koje smo prikazali u 3. poglavlju izračunamo raspodjelu aktivnog tlaka na stražnjoj strani i pasivnog otpora na njenoj prednjoj strani. Na zabijeni dio stijene djeluje razlika između aktivnog tlaka i pasivnog otpora a u dubini A rezultirajući tlak jednak je nuli.

Tu ćemo dubinu dobiti iz jednakosti aktivnog tlaka i pasivnog otpora:

$$p_{AH} + A \cdot \gamma \cdot K_A = 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_A} + \gamma \cdot A \cdot K_P, \tag{4.1}$$

što daje:

$$A = \frac{p_{AH} - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_A}}{\gamma \cdot K'}, \tag{4.2}$$

uz parametar:

$$K' = K_p - K_A. \tag{4.3}$$

Iz uvjeta za ravnotežu u vodoravnom smjeru izlazi:

$$P_A - P_{P1} + P_{P2} = 0, \tag{4.4}$$

uz:

$$P_A = P(H, A), \tag{4.5}$$

$$P_{P1} = \frac{p_D(D-A)}{2}, \tag{4.6}$$

$$P_{P2} = \frac{(p_{D+H} + p_D)D_1}{2}. \tag{4.7}$$

Dubina D_1, od koje zbog rotacije stijene oko točke O pasivni otpor djeluje sa suprotne strane intenzitetom što odgovara dubini D+H dobit ćemo pomoću:

$$D_1 = \frac{p_D \cdot (D-A) - 2 \cdot P_A}{p_{D+H} + p_D}. \tag{4.8}$$

Iz uvjeta da je $\sum M = 0$ raspisujemo momente pojedinačnih sila:

$$P_A \cdot (D' + \alpha \cdot H) + \frac{(p_{D+H} + p_D) \cdot D_1^2}{6} - \frac{p_D \cdot D'^2}{6} = 0. \tag{4.9}$$

gdje su vrijednosti:

$\alpha \cdot H = A + H,$

$p_{D+H} = p(D, c, \varphi, \gamma),$

$p_D = p(D', c, \varphi, \gamma).$

Budući da je D_1 funkcija kvadrata dubine D', dobiva se jednadžba četvrtog stupnja tipa:

$$D'^4 + A \cdot D'^3 + B \cdot D'^2 - C \cdot D' - E = 0, \tag{4.10}$$

U kojoj su slučaj kad je kohezija jednaka nuli, $c = 0$:

$A = \frac{p_{H+A}}{\gamma \cdot K'}$, $B = \frac{8 \cdot P_A}{\gamma \cdot K'}$,

$C = \frac{6 \cdot P_A}{(\gamma \cdot K')^2} \cdot (2 \cdot \alpha \cdot H \cdot \gamma \cdot K' + p_{H+A})$, $E = \frac{6 \cdot P_A \cdot \alpha \cdot H \cdot p_{H+A} + 4P_A^2}{(\gamma \cdot K')^2}$

Tako će ukupna dubina zabijanja biti jednaka :

$$D = D' + A. \tag{4.11}$$

Dubina u kojoj djeluje maksimalni moment savijanja konzolne stijene dobiva se na mjestu gdje je poprečna sila jednaka nuli.

Poprečna sila jednaka je nuli na nekoj dubini X:

$$P_A - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot X \cdot K', \tag{4.12}$$

Pa tako dubinu X možemo izračunati prema formuli:

$$X = \sqrt{\frac{P_A}{2 \cdot \gamma \cdot K'}}. \tag{4.13}$$

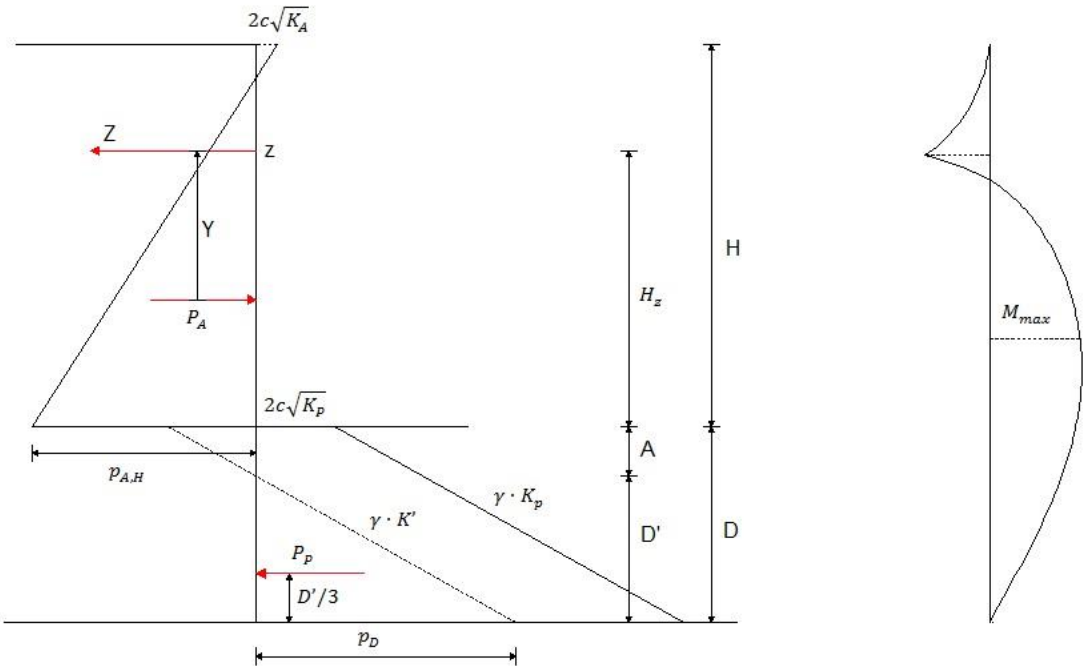
Dakle, izraz za maksimalni moment:

$$M_{max} = P_A \cdot (\alpha \cdot H + X) - \gamma \cdot \frac{X^2}{2} \cdot K'. \tag{4.14}$$

Ako je stijena djelomično uronjena u vodi ili je razina podzemne vode viša od dubine stijene D, mora se u račun raspodjele tlaka p_a i otpora p_p unijeti uzgon, odnosno težina uronjenog tla.

4.1.2. Stijene sa zategom

Kad je dubina iskopa građevne jame H velika, konzolna zagatna stijena vrlo skupa zbog velike dubine zabijanja i velikog momenta savijanja kojega je potrebno savladati. Zato se zagatne stijene veće visine rade s jednom ili više zatega.



Slika 4.2. Sile i momenti usidrene, na donjem kraju slobodne stijene.

Na slici 4.2. shema je zagatne stijene visine H, zabijene do neke dubine D, sa zategom na visini H_z koja podupire iskop. Shematski je prikazana raspodjela aktivnog tlaka iza stijene i pasivnog otpora ispred nje. Takva usidrena zagatna stijena dimenzionira se na dva načina: ako dubina D nije jako velika, stijena je na donjem kraju slobodna; a ako je stijena zabijena do neke veće dubine, njezin je donji kraj uklještен u tlo. Zvod izraza za dubinu zabijanja izvodit ćemo prema [1].

Dubinu A, u kojoj je aktivni tlak iza stijene izjednačen s pasivnim otporom ispred nje, računamo po izvedenoj jednadžbi:

$$A = \frac{p_{AH} - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_A}}{\gamma \cdot K'}, \tag{4.15}$$

uz parametar:

$$K' = K_p - K_A. \tag{4.16}$$

Uz slobodan donji kraj stijene, a prema oznakama na slici 4.1 dobiva se iz ravnoteže momenata $\sum M = 0$ izraz:

$$Y \cdot P_A = \left(H_z + A + \frac{2}{3} \cdot D'\right) \cdot P_P, \tag{4.17}$$

gdje su:

$P_A = P(H, c, \varphi, \gamma)$,

$P_P = P(D, c, \varphi, \gamma)$,

a u slučaju $c = o \rightarrow P_P = \frac{1}{2} \cdot D'^2 \cdot \gamma \cdot K'$.

Sada se izraz za ravnotežu može zapisati:

$$Y \cdot P_A = \left(H_z + A + \frac{2}{3} \cdot D'\right) \cdot P_P = \frac{1}{2} \cdot D'^2 \cdot \gamma \cdot K', \tag{4.18}$$

Na osnovi čega se dobiva kubična jednadžba za dubinu D'

$$D'^3 \cdot \gamma \cdot K' + D'^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot K' \cdot (H_z + A) - Y \cdot P_A = 0. \tag{4.19}$$

Ukupna dubina zabijanja bit će zbroj dubine D' i A :

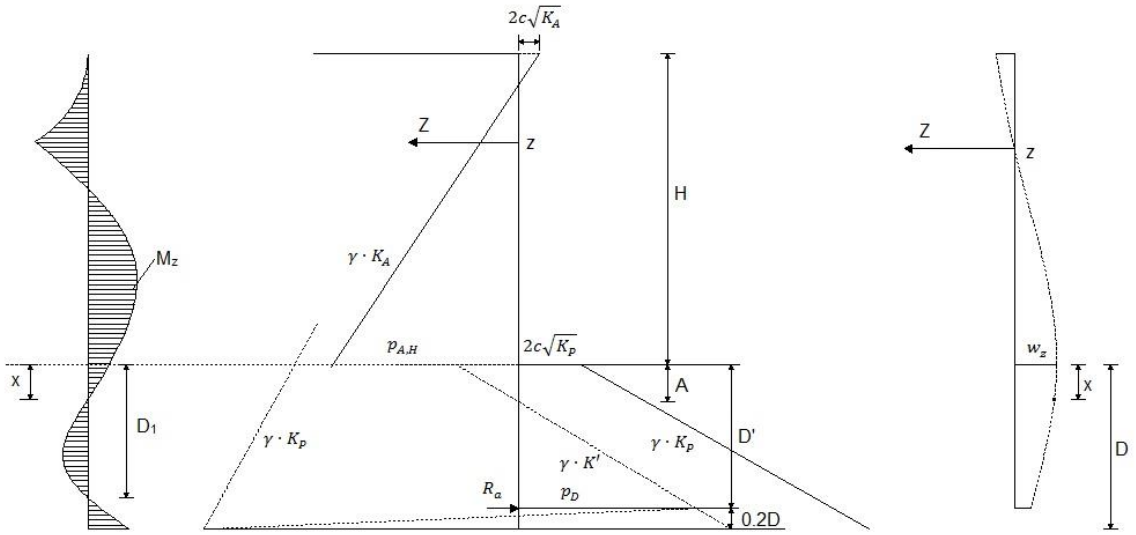
$$D = D' + A. \tag{4.20}$$

Dobivenu dubinu zabijanja potrebno je povećati za određeni faktor sigurnosti kako bi se bilo što više na strani sigurnosti.

Polazeći iz uvjeta ravnoteže horizontalnih sila $\sum F_h = 0$ dobija se sila u zategi (sidru):

$$Z = P_A - P_P. \tag{4.21}$$

Kada je stijena zabijena dublje nego što daje jednadžba (4.20) ona je na donjem kraju ukliještena. Tada je zadatak statički neodređen, pa se preporuča slijedeći postupak određivanja dubine. Odabire se dubina zabijanja D_1, izračuna se opterećenje aktivnim tlakom i pasivnim otporom, zatim se za tu dubinu iz ravnoteže momenata oko točke *z dobije* reakcija R_a, a iz ravnoteže sila u horizontalnom smjeru dobije se reakcija zatege Z. Pomoću tih podataka, najjednostavnije grafički, izračuna se raspodjela momenta M_z. Za stijenu opterećenu momentnim dijagramom nacrta se grafičkom metodom linija savijanja. Crta koja zatvara poligon za liniju savijanja mora proći kroz točke *a* i *z.* Ako se sa prvom odabranom dubinom D_1 to ne postigne, postupak se ponavlja sa dubinom D_2 i dalje sve do potrebnog slaganja između linije koja zatvara poligon opterećenja za dijagram savijanja stijene i oslonca u točki upetosti i u točki usidrenja. Stvarna dubina zabijanja povećava se za 20% tako da je ukupna dubina: *D=1,2D'.*

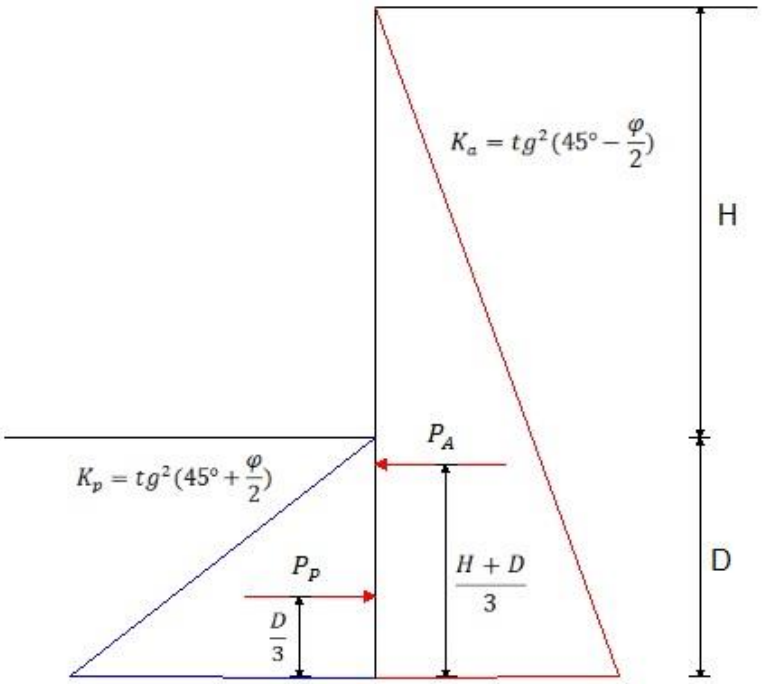


Slika 4.3. Sile, momenti i deformacije usidrene, na donjem kraju upete stijene.

4.2. Proračun prema formulama iz literature

4.2.1. Konzolna zagatna stijena

Promatrat ćemo konstrukciju na slici 4.4. uz pretpostavku da se nalazi u nekoherentnom tlu, $c = 0$.



Slika 4.3. Sile usidrene zagatne stijene.

Kako bi konstrukcija bila u ravnoteži potrebno je da suma momenata oko točke A bude jednaka nuli, $\sum M_A = 0$. Stoga izjednačavamo momente nastale od sila aktivnog tlaka i pasivnog otpora:

$$M_{PA} = M_{PP}. \tag{4.22}$$

Znajući da sila aktivnog tlaka djeluje na trećini ukupne visine konstrukcije, a sila pasivnog otpora na trećini zabijenog dijela konstrukcije izraz možemo zapisati:

$$\mathrm{P_A} \cdot \frac{(\mathrm{H+D})}{3} = \mathrm{P_P} \cdot \frac{\mathrm{D}}{3}. \tag{4.23}$$

Nadalje, uvrštavanjem u formulu izraza za izračun aktivnog tlaka i pasivnog otpora dobivamo slijedeći oblik jednadžbe sa nepoznanicom D:

$$\frac{\gamma \cdot (\mathrm{H+D})^2}{2} \cdot \mathrm{k_A} \cdot \frac{(\mathrm{H+D})}{3} = \frac{\gamma \cdot \mathrm{D}^2}{2} \cdot \mathrm{k_P} \cdot \frac{\mathrm{D}}{3}. \quad (4.24)$$

Sređivanjem jednadžbe dobiva se izraz:

$$\frac{\gamma \cdot (\mathrm{H+D})^3 \cdot \mathrm{k_A} \cdot}{6} = \frac{\gamma \cdot \mathrm{D}^3 \cdot \mathrm{k_P}}{6}. \quad (4.25)$$

Jednadžbu je moguće riješiti na dva načina koje ćemo prikazati u nastavku.

Prvi način rješavanje jednadžbe

Prvo ćemo jednadžbu (4.25) pomnožiti sa 6 kako bi se riješili nazivnika.

Na taj način dobivamo izraz:

$$(\mathrm{H+D})^3 \cdot \gamma \cdot \mathrm{k_A} = \gamma \cdot \mathrm{D}^3 \cdot \mathrm{k_P}. \quad (4.26)$$

Zatim ćemo izraz $(\mathrm{H+D})^3$ raspisati tako da jednedžba poprima ovaj oblik:

$$[H^3 + 3 \cdot H^2 \cdot D + 3 \cdot H \cdot D^2 + D^3] \cdot \gamma \cdot \mathrm{k_A} = \gamma \cdot \mathrm{D}^3 \cdot \mathrm{k_P}. \quad (4.27)$$

Daljnjim sređivanjem jednadžbe dobiva se izraz:

$$\gamma \cdot \mathrm{k_A} \cdot D^3 + \gamma \cdot \mathrm{k_A} \cdot 3 \cdot H \cdot D^2 + \gamma \cdot \mathrm{k_A} \cdot 3 \cdot H^2 \cdot D + \gamma \cdot \mathrm{k_A} \cdot H^3 = \gamma \cdot \mathrm{D}^3 \cdot \mathrm{k_P}. \quad (4.28)$$

Prebacivanjem izraza $\gamma \cdot \mathrm{D}^3 \cdot \mathrm{k_P}$ s desne na lijevu stranu i sređivanjem izraza dobije se konačna kubična jednadžba za određivanje dubine zabijanja:

$$(\gamma \cdot \mathrm{k_A} - \gamma \cdot \mathrm{k_P})D^3 + (\gamma \cdot \mathrm{k_A} \cdot 3H)D^2 + (\gamma \cdot \mathrm{k_A} \cdot 3 \cdot H^2)D + \gamma \cdot \mathrm{k_A} \cdot H^3 = 0. \quad (4.29)$$

Drugi način rješavanja jednadžbe

Prvi korak jednak je kao i kod prvog načina tako da dobijemo izraz:

$$(\mathrm{H}+\mathrm{D})^3 \cdot \gamma \cdot \mathrm{k_A} = \gamma \cdot \mathrm{D}^3 \cdot \mathrm{k_P}. \tag{4.30}$$

Pošto nam je obujamska težina tla jednaka nju možemo zanemariti tako dobijemo oblik jednadžbe:

$$(\mathrm{H}+\mathrm{D})^3 \cdot \mathrm{k_A} = \mathrm{D}^3 \cdot \mathrm{k_P}. \tag{4.31}$$

Sada možemo srediti izraz tako da imamo omjer koeficijenata aktivnog tlaka i pasivnog otpora s jedne strane, a omjer visina sa druge strane:

$$\frac{\mathrm{k_P}}{\mathrm{k_A}} = \frac{(\mathrm{H}+\mathrm{D})^3}{\mathrm{D}^3}. \tag{4.32}$$

Korjenovanjem jednadžbe dobiva se izraz:

$$\sqrt[3]{\frac{\mathrm{k_P}}{\mathrm{k_A}}} = \frac{H}{D} + 1. \tag{4.33}$$

Sređivanjem jednadžbe dobiva se konačan izraz za izračun minimalne dubine zabijanja,preme [4]:

$$D_{min} = \frac{H}{\sqrt[3]{\frac{k_P}{k_A}} - 1}. \tag{4.34}$$

Za određivanje maksimalnog momenta koristit ćemo se spoznajom da se maksimalni moment nalazi na mjestu gdje je zbroj poprečnih sila jednak nuli. Pošto na konstrukciju djeluju aktivni tlak i pasivni otpor potrebno je pronaći dubinu na kojoj su oni izjednačeni

$$\mathrm{P_A} = \mathrm{P_P}, \tag{4.35}$$

odnosno:

$$\frac{\gamma \cdot (\mathrm{H}+\mathrm{x})^2}{2} \cdot \mathrm{k_A} = \frac{\gamma \cdot \mathrm{x}^2}{2} \cdot \mathrm{k_P}, \tag{4.36}$$

gdje je *x* dubina ispod dna iskopa na kojoj su tlakovi izjednačeni.

Daljnjim sređivanjem dobije se izraz:

$$(\mathrm{H}+\mathrm{x})^2 \cdot \gamma \cdot \mathrm{k_A} = \gamma \cdot \mathrm{x}^2 \cdot \mathrm{k_P}. \quad (4.37)$$

Pošto nam je obujamska težina tla jednaka, nju možemo zanemariti tako dobijemo oblik jednadžbe:

$$(\mathrm{H}+\mathrm{x})^2 \cdot \mathrm{k_A} = \mathrm{x}^2 \cdot \mathrm{k_P}. \quad (4.38)$$

Sada možemo srediti izraz tako da imamo omjer koeficijenata aktivnog tlaka i pasivnog otpora s jedne strane, a omjer visina sa druge strane:

$$\frac{\mathrm{k_P}}{\mathrm{k_A}} = \frac{(\mathrm{H}+\mathrm{x})^2}{x^2}. \quad (4.39)$$

Korjenovanjem jednadžbe dobiva se izraz:

$$\sqrt{\frac{\mathrm{k_P}}{\mathrm{k_A}}} = \frac{H}{x} + 1. \quad (4.40)$$

Sređivanjem jednadžbe dobiva se konačan izraz za izračun dubine na kojoj su tlakovi izjednačeni:

$$x = \frac{H}{\sqrt{\frac{\mathrm{k_P}}{\mathrm{k_A}}}-1}. \quad (4.41)$$

Sada možemo postaviti jednadžbu ravnoteže tako da nam suma momenata oko točke *x* bude jednaka nuli $\sum M_x = 0$.

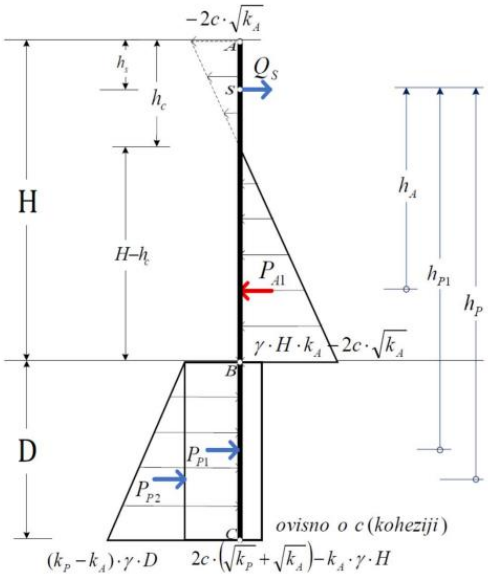
$$P_P \cdot \frac{x}{3} - P_A \cdot \frac{(H+x)}{3} - M_x = 0. \quad (4.42)$$

Iz ovog izraza možemo odrediti izraz za određivanje maksimalnog momenta konstrukcije [4]:

$$M_x = P_A \cdot \frac{(H+x)}{3} - P_P \cdot \frac{x}{3}. \quad (4.43)$$

4.2.2. Stijene sa zategama

Pretpostavimo da zagatna stijena štitit građevnu jamu visine H, u koherentnome tlu te da je na usidrena na nekoj dubini h_s kao što je prikazano na slici 4.4.



Slika 4.4. Sile usidrene zagatne stijene.

Postavimo li jednadžbu tako da zadovoljava uvijet $\sum M_s = 0$ dobit ćemo oblik jednadžbe:

$$\mathrm{P_{A1}\cdot h_A - P_{P1}\cdot h_{P1} - P_{P2}\cdot h_{P2} = 0.} \tag{4.44}$$

Odredimo li krakove sila $\mathrm{P_{A1}}$, $\mathrm{P_{P1}}$ i $\mathrm{P_{P2}}$ promatrajući sliku 4.4., jednadžbu možemo zapisati:

$$\mathrm{P_{A1}\cdot\left(H-l_s-\frac{H-h_c}{3}\right)-P_{P1}\cdot\left(H-l_s+\frac{D}{2}\right)-P_{P2}\cdot\left(H-l_s+\frac{2D}{3}\right)=0,} \tag{4.45}$$

gdje su:

$$\mathrm{P_{A1}=\frac{\gamma\cdot k_A\cdot(H-h_c)^2}{2}},$$

$$\mathrm{P_{P1}=\left[2\cdot c\left(\sqrt{k_P}+\sqrt{k_A}\right)-k_A\cdot\gamma\cdot H\right]\cdot D},$$

$$\mathrm{P_{P2}=\frac{\left(\sqrt{k_P}+\sqrt{k_A}\right)\cdot\gamma\cdot D^2}{2}}.$$

Sređivanjem jednadžbe dobije se kubična jednadžba tipa:

$$A \cdot D^3 + B \cdot D^2 - C \cdot D - E = 0. \quad (4.46)$$

Ukoliko želimo biti na strani sigurnosti tada ćemo u jednadžbu uvrstiti faktor sigurnosti. Na taj način smanjit ćemo sile pasivnog otpora, a samim time povećati dubinu zabijanja. Kada uvrstimo faktor sigurnosti jednadžba poprima slijedeći oblik:

$$\mathrm{P_{A1}} \cdot \left(\mathrm{H} - \mathrm{l_s} - \frac{\mathrm{H}-\mathrm{h_c}}{3}\right) - \frac{\mathrm{P_{P1}}}{\mathrm{Fs}} \cdot \left(\mathrm{H} - \mathrm{l_s} + \frac{\mathrm{D}}{2}\right) - \frac{\mathrm{P_{P2}}}{\mathrm{Fs}} \cdot \left(\mathrm{H} - \mathrm{l_s} + \frac{2\mathrm{D}}{3}\right) = 0. \quad (4.47)$$

Silu u sidru dobit ćemo iz uvjeta ravnoteže $\sum F_h = 0$:

$$\mathrm{P_{A1}} - Q_{s/m} - \mathrm{P_{P1}} - \mathrm{P_{P2}} = 0. \quad (4.48)$$

Sređivanjem izraza dobije se:

$$Q_{s/m} = \mathrm{P_{A1}} + P_{\mathrm{P1}} - \mathrm{P_{P2}}. \quad (4.49)$$

Pošto se sidra postavljaju na nekom određenom razmaku *a* sila u sidru bit će jednaka:

$$Q_s = a \cdot Q_{s/m}. \quad (4.50)$$

5. Prikaz modeliranja zagatne stijene pomoću softverskog paketa GEO5 Demo

GEO5 je softverski paket za rješavanje geotehničkih problema koji se temelji na tradicionalnim analitičkim metodama i metodi konačnih elemenata [9]. Individualni programi provjeravaju specifičan tip konstrukcije, što omogućava njihovu intuitivnost i jednostavnost korištenja. U ovom radu prikazat će se dva programa za modeliranje zagatne stijene.

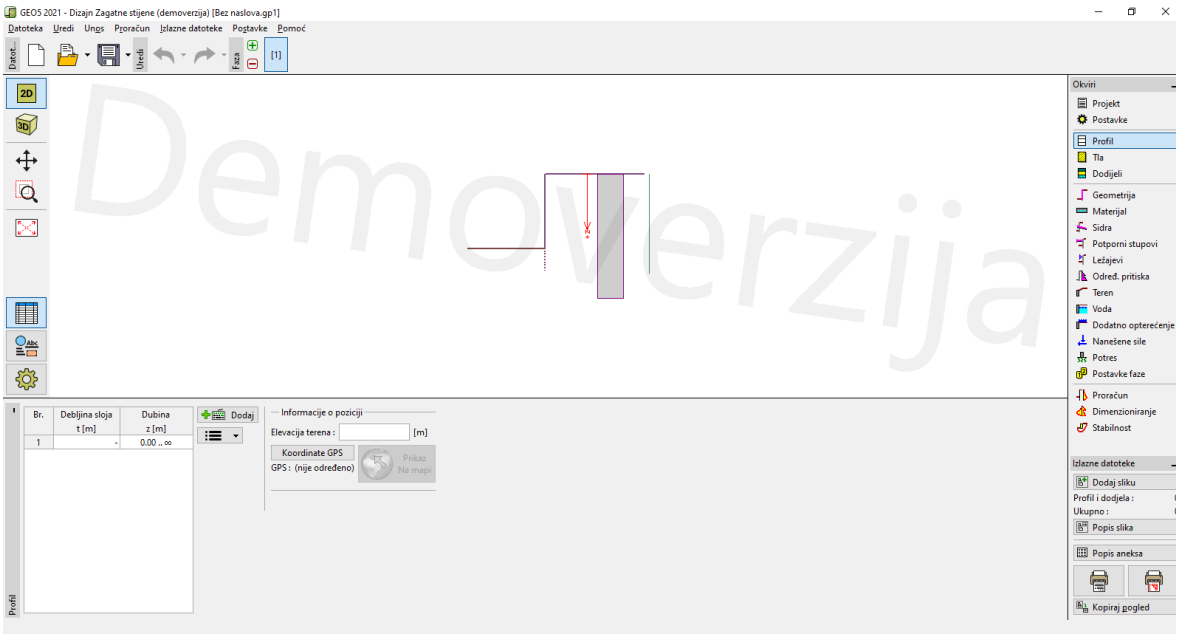
5.1. Modeliranje pomoću programa „Dizajn zagatne stijene“

Program „Dizajn zagatne stijene“ omogućuje lak i jednostavan način modeliranja zagatne stijene. Tijek modeliranja možemo svesti na 4 osnovna koraka:

- Definiranje postavki
- Formiranje modela
- Proračun
- Dimenzioniranje

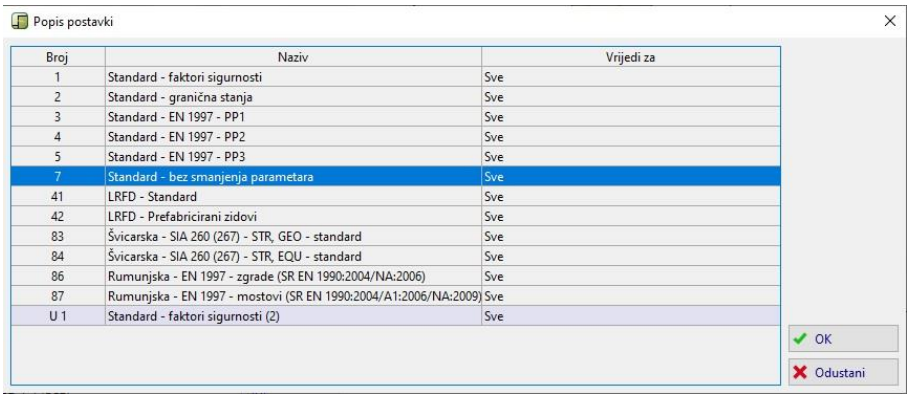
5.1.1. Prikaz postupka modeliranja

Pokretanjem programa „Dizajn zagatne stijene“ otvara se početno sučelje kao što je prikazano na slici 5.1.



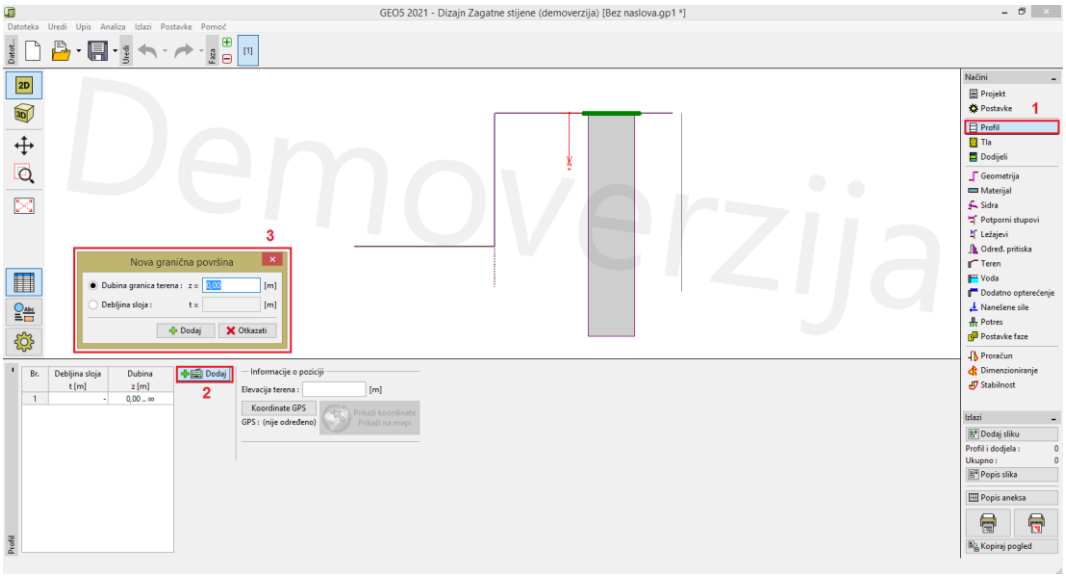
Slika 5.1. Početno sučelje programa GEO5- Dizajn zagatne stijene-Demo.

Prije samoga modeliranja potrebno je definirati norme na temelju kojih će se izvesti proračun. To ćemo učiniti na način da kliknemo na ikonu „postavke“ te nam se otvara prozor kao na slici 5.2. Pritiskom na karticu „odaberite postavke“ prikazat će se 10-ak najkorištenijih normi u svijetu te odabiremo normu prema kojoj ćemo proračunavati. U našem slučaju uzet ćemo standard, gdje nećemo smanjivati parametre. To će nam omogućiti lakšu ručnu kontrolu rezultata.



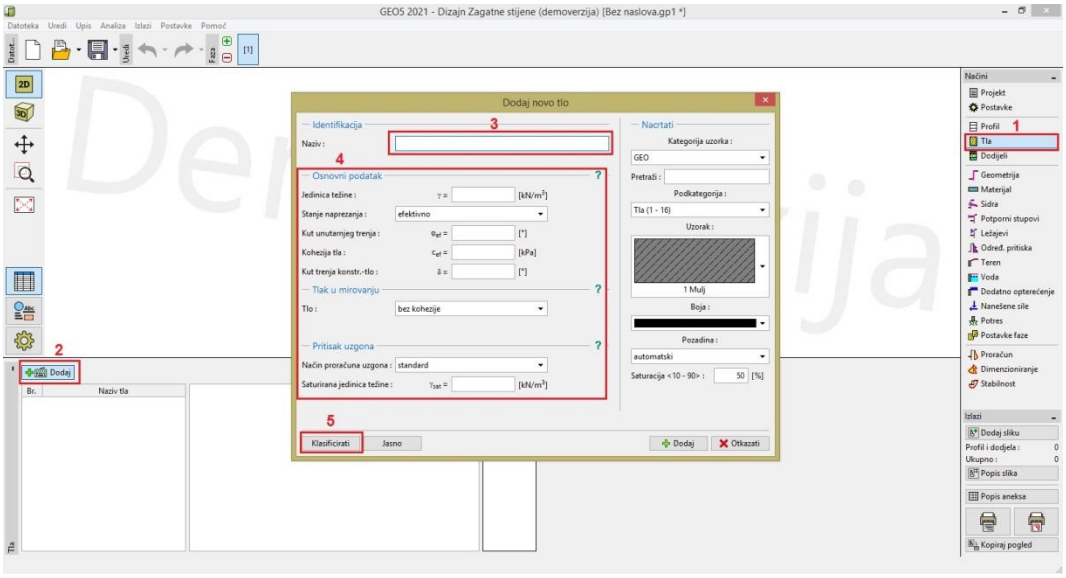
Slika 5.2. Sučelje za odabir normi.

Kad smo definirali normu potrebno je odrediti profil tla. Pritiskom na ikonu „Profil“ pojavljuje nam se prozor u kojem odabiremo dubine pojedinih slojeva tla. Slojeve možemo dodavati s obzirom na teren ili upisivati debljinu svakog sloja. U Našem slučaju uzet ćemo da nam se tlo sastoji od samo jednog sloja.



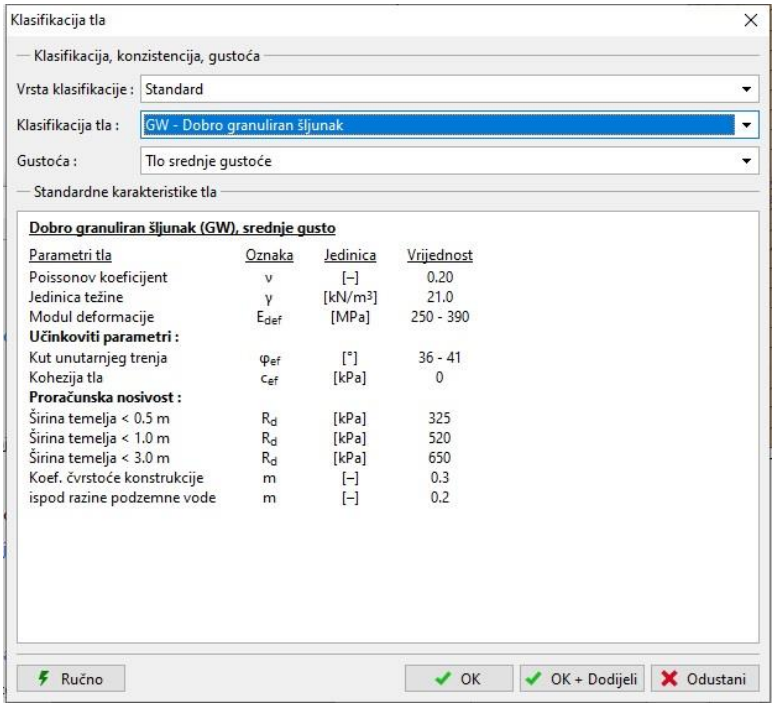
Slika 5.3. Sučelje za odabir debljine slojeva tla.

Kad smo odredili debljine slojeva potrebno je definirati njihove parametre. To ćemo učiniti pritiskom na ikonu „Tla“ te će nam se otvoriti sučelje kao na slici 5.4.



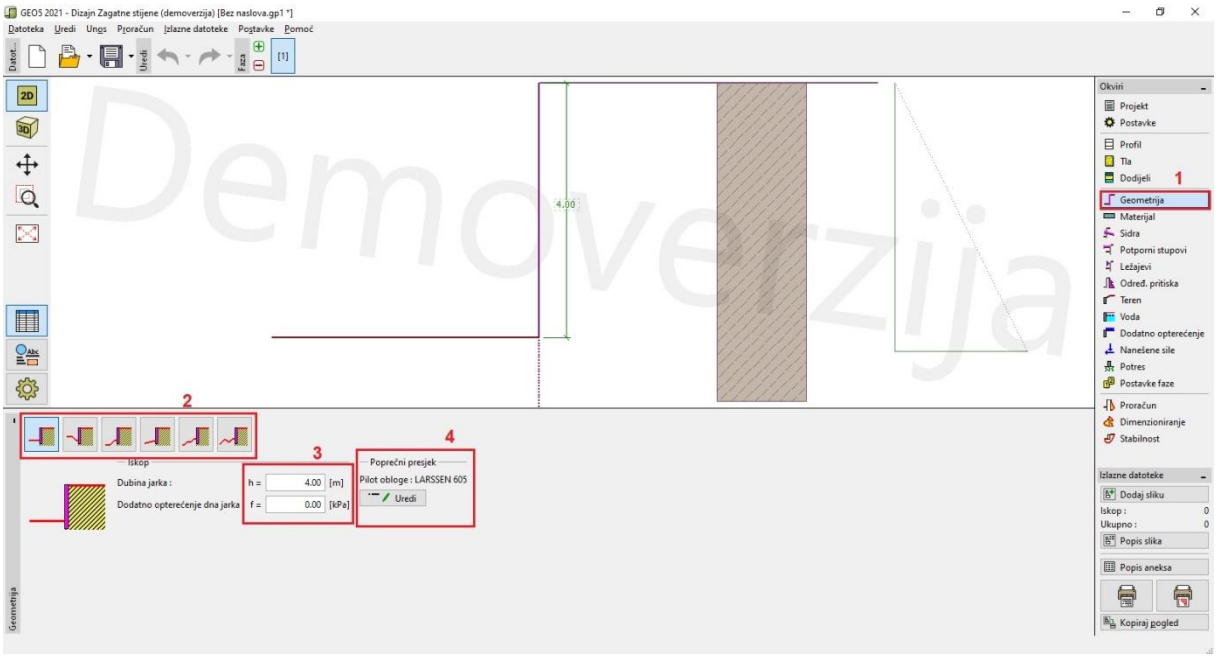
Slika 5.4. Sučelje za odabir parametara slojeva tla.

Pritiskom na Ikonu „Dodaj“ prikazat će nam se skočni prozor u kojem upisujemo naziv tla te njegove karakteristike iz geotehničkih ispitivanje. Ukoliko ne znamo točne parametre tla možemo pritiskom na ikonu „klasificiraj“ odabrati već zadane parametre za klasificirane tipove tla kao što je prikazano na slici 5.5. Mi ćemo u našem slučaju uzeti da nam se tlo sastoji od dobro granuliranog šljunka (GW) Također potrebno je odabrati kut trenja između zida i tla, koji će u našem slučaju iznositi 0°. Pritiskom na ikonu „dodjeli“ svakom sloju dodjeljujemo njegove osobine.



Slika 5.4. Parametri tla-slabo granuliran pijesak.

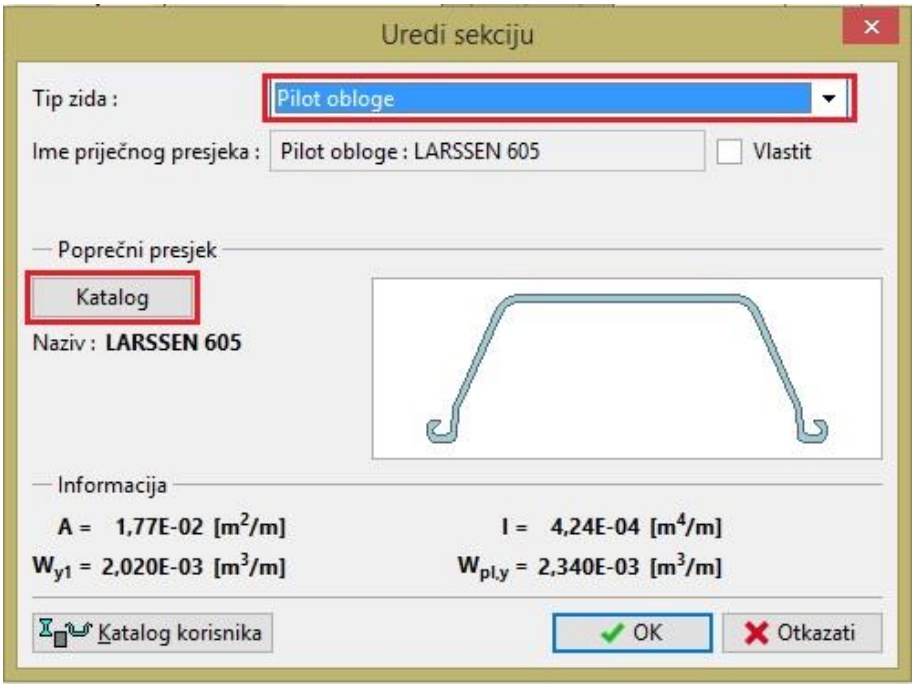
Nakon što smo odredili parametre tla, možemo krenuti sa modeliranjem zagatne stijene. Pritiskom na karticu geometrija otvara nam se sučelje kojim definiramo geometriju zagatne stijene. Ponuđeno je 6 mogućih oblika izvedbe dna građevne jame. Odabire se jedan te se upisuje njegova geometrija i dubina iskopa građevne jame. Također možemo upisati dodatna opterećenja dna građevne jame. Mi ćemo odabrati da je dno građevne jame ravno te će dubina iskopa biti 4 metra.



Slika 5.6. Sučelje za odabir geometrije.

Pritiskom na ikonu „Uredi“ prikazuje nam se prozor u kojem odabiremo tip zagatne stijene. Može se birati između nekoliko tipova izvedbe zagatne stijene poput pilota, armirano betonske dijafragme (Armirano betonski pravokutni zid), talpi (pilot obloge), I profila i slično. Također mogu se definirati geometrija poprečnog presjeka i razmak između elemenata ukoliko se na primjer odlučimo za pilote ili I profile. Mi ćemo u našem slučaju uzeti talpe, odnosno Pilot obloge kako se nazivaju u programu. .

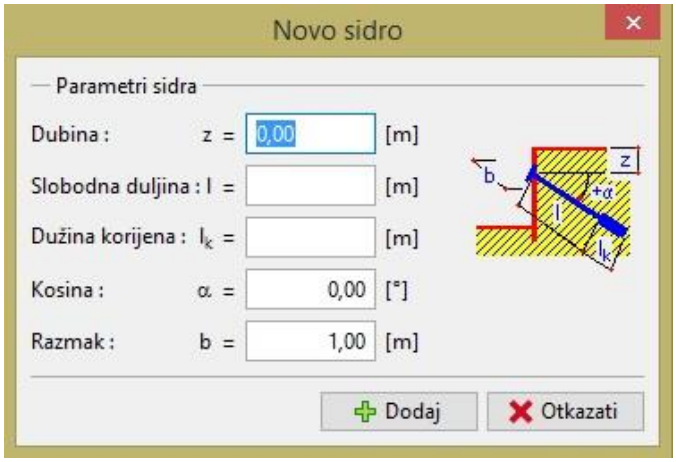
Pritiskom na ikonu „katalog“ otvara nam se prozor sa svim mogućim tipovima žmurja,a mi ćemo koristiti žmurje LARSSEN 605.



Slika 5.7. Prozor za odabir poprečnog presjeka zagatne stijene.

Kad smo definirali geometriju poprečni presjek zagatne stijene potrebno je definirati materijal. Ovisno radi li se o čeličnoj ili armirano betonskoj konstrukciji odabiremo karakteristike materijala. Materijal možemo izabrati iz kataloga ili sami upisati potrebne parametre za čelik, odnosno beton i armaturni čelik. Mi ćemo za naš slučaj uzeti čelik fe 360.

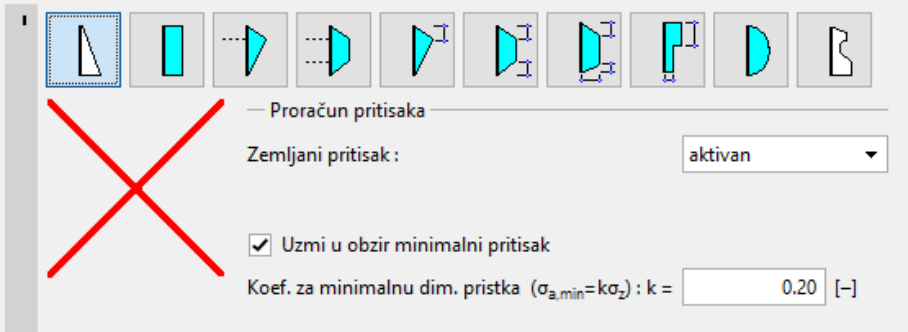
Pritiskom na karticu sidra pokazuje nam se prozor kao na slici 5.8. gdje odabiremo položaj sidra, duljinu slobodne i sidrišne dionice, kut nagiba sidra u odnosu na horizontalu i razmak između sidara. Mi u našem primjeru nećemo koristiti sidra.



Slika 5.8. Prozor za odabir geometrije sidara.

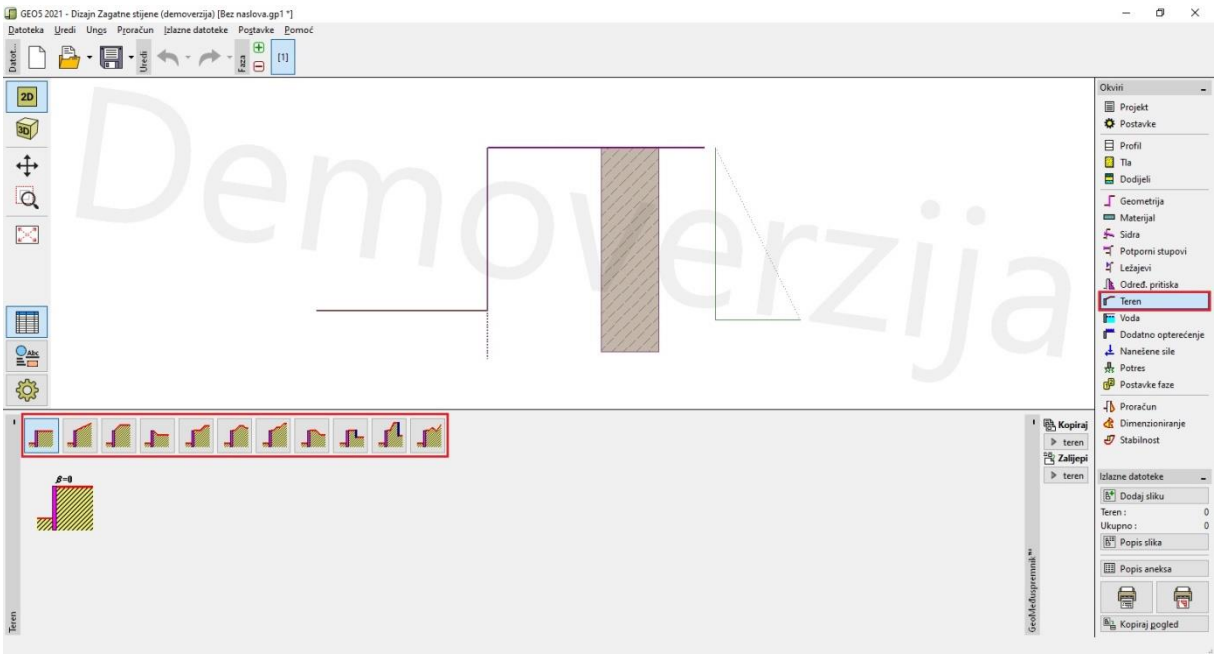
Ukoliko smatramo da su nam potrebne razupore program nam i to omogućuje. Pritiskom na ikonu „Potporni stupovi“ pojavit će se prozor u kojem upisujemo položaj, duljinu, razmak između razupora te kut pod kojim su postavljene razupore. U ovom primjeru smatramo da nam nisu potrebne razupore pa ih nećemo definirati.

Klikom na ikonu „ Pritisak“ odabiremo oblik naprezanja. Mi ćemo odabrati da na konstrukciju djeluje aktivni pritisak. Ostale funkcije prikazane na slici 5.9. služe za preraspodjelu zemljanog pritiska usidrenih i poduprtih zidova.



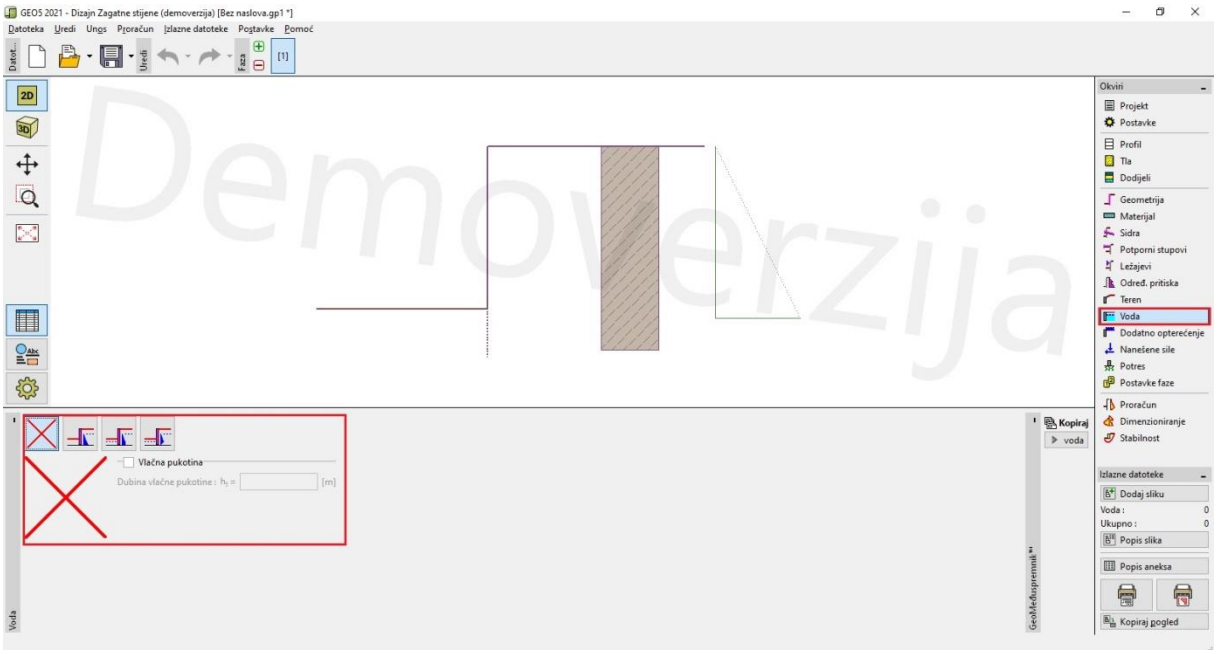
Slika 5.9. Funkcije za preraspodjelu zemljanog pritiska.

Pritiskom na ikonu „teren“ otvorit će se sučelje, kao na slici 5.10., gdje ćemo definirati oblik terena iza zagatne stijene. Pojavit će se izbornik sa 11 mogućih oblika terena, gdje izabiremo jedan oblik terena te zadajemo njegove parametre poput nagiba, dužina nasipa i slično. Mi ćemo u ovom primjeru uzeti da je teren horizontalan.



Slika 5.10. Sučelje za odabir oblika terena .

Naredba „Voda“ omogućuje definirati razinu podzemne vode iza zagatne kao i ispred zagatne stijene. Možemo zadati razinu vode sa obje strane zagata, kao što je prikazano na slici 5.12., ili samo iza zagata. Pretpostavit ćemo da u našem slučaju nema podzemne vode.

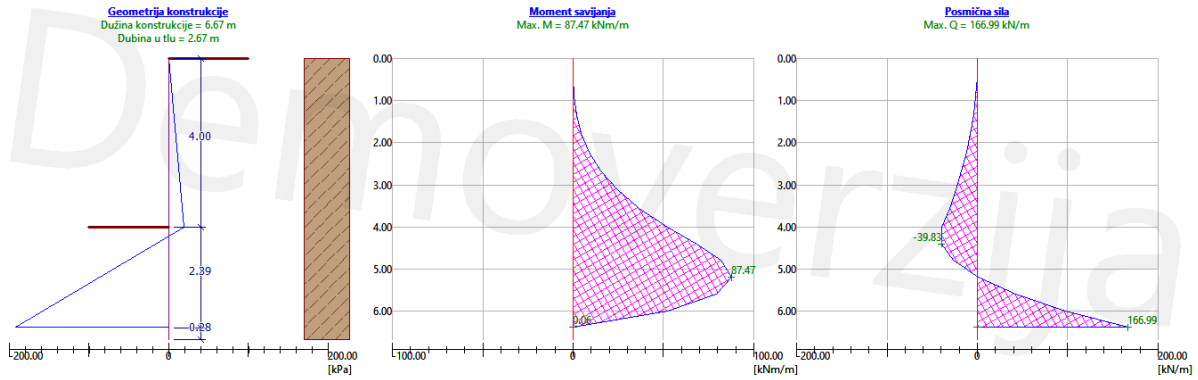


Slika 5.11. Sučelje za definiranje podzemne vode .

Pomoću naredbi „ Dodatno opterećenje“, „Nanešene sile“ i „Potres“ dodjeljujemo dodatna opterećenja i sile koje mogu djelovati na zagatnu stijenu. Naredbom „ dodatno opterećenje“ možemo dodati opterećenja koja djeluju na tlo iza zagatne, poput opterećenja od dizalice, vozila i slično. Pritiskom na ikonu otvara se prozor u kojem definiramo vrstu opterećenja (površinsko, trakasto ,linijsko, trapezno i sl.) i vrstu djelovanja (stalno, promjenjivo, slučajno). Naredbom „Potres“ definira se utjecaj potresa na zagatnu stijenu. U ovom slučaju dodatna opterećenja i sile od potresa ćemo izostaviti.

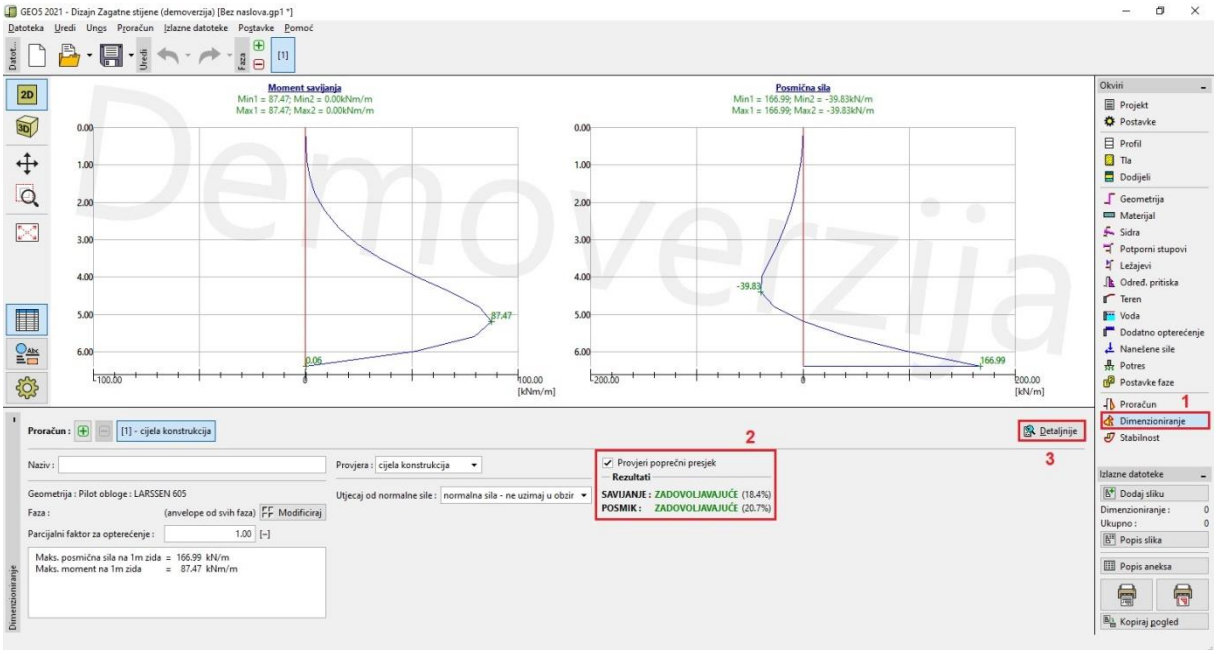
Posljednji korak modeliranja odabir je proračunske situacije koju definiramo pomoću naredbe „postavke faze“. Pritiskom ikonu otvara nam se sučelje gdje odabiremo između stalne, promjenjive, slučajne i seizmičke proračunske situacije. U ovom slučaju ćemo uzeti stalnu proračunsku situaciju. Time smo završili sa modeliranjem zagatne stijene te možemo početi sa proračunom.

Pritiskom na ikonu „Proračun“ program će izvršiti proračun dubine temelja, momenta te poprečne sile u zagatnoj stijeni. Na slici 5.12. prikazani su rezultati za naš primjer. Program je izračunao potrebnu dubinu zabijanja (temeljenja) od 2,67 metara. Maksimalni moment iznosi 87,47 kNm po metru dužine zida, a najveća poprečna sila iznosi 166,99 KN po metru dužine zida.



Slika 5.12. Rezultati proračuna.

Pošto smo odredili maksimalne vrijednosti unutrašnjih sila, a od ranije imamo zadan poprečni presjek, sada možemo pritiskom na ikonu „Dimenzioniranje“ provjeriti zadovoljava li naš poprečni presjek.



Slika 5.13. Prikaz rezultata dimenzioniranja.

Na slici 5.12. vidimo da odabrano žmurje LARSSEN 605 zadovoljava i na savijanje i na posmak. Ukoliko želimo vidjeti detaljnije rezultate, odnosno način proračuna potrebno je pritisnuti na ikonu „detaljnije“ gdje će se prikazati svi proračuni. Pošto je iskoristivost poprečnog presjeka samo 20%, preporuča se žmurje manjeg poprečnog presjeka.

5.1.2. Ručna provjera rezultata unutrašnjih sila

Za provjeru zagazne stijene koristit ćemo jednake parametre kao i u programu „Dizajn Zagatne stijene“. Obujamska težina tla je 21 kN/m^3 , kut unutarnjeg trenja iznosi 38.5°, kohezije nema kao ni trenja između stijene i tla iza stijene. Dubina iskopa bit će 4m.

Za početak potrebno je odrediti koeficijente aktivnog tlaka i pasivnog otpora.

$$K_a = tg^2(45° - \frac{38,5°}{2}) = 0,232$$

$$K_p = tg^2(45° + \frac{38,5°}{2}) = 4,298$$

Sada možemo pomoću izraza (151) odrediti dubinu temeljenja:

$$D_{min} = \frac{H}{\sqrt[3]{\frac{k_P}{k_A}}-1} = \frac{4}{\sqrt[3]{\frac{4,298}{0,232}}-1} = \mathbf{2,43m}$$

Nakon što smo dobili dubinu temeljenja od 2.43 metra možemo odrediti sile aktivnog tlaka i pasivnog otpora.

$$P_A = \frac{\gamma \cdot (\mathrm{H+D})^2}{2} \cdot \mathrm{k_A} = \frac{21 \cdot (4+2,43)^2}{2} \cdot 0,232 = \mathbf{100,72\ kN}$$

$$P_P = \frac{\gamma \cdot \mathrm{D}^2}{2} \cdot \mathrm{k_A} = \frac{21 \cdot 2,43^2}{2} \cdot 4,298 = \mathbf{266,48\ kN}$$

Sada možemo odrediti maksimalnu poprečnu silu koja će se pojaviti u zagatnoj stijeni.

$$\sum F_H = 0$$

$$P_P - P_A - F_H = 0$$

$$F_H = P_P - P_A = 266,48 - 100,72 = \mathbf{165,76\ kN/m}$$

Kako bi smo odredili dubinu u kojoj su poprečne sile izjednačene koristit ćemo formulu 4.14:

$$x = \frac{H}{\sqrt{\frac{k_P}{k_A}} - 1} = \frac{4}{\sqrt{\frac{4,298}{0,232}} - 1} = \mathbf{1,21m}$$

Sada možemo postaviti jednadžbu ravnoteže tako da nam suma momenata oko točke *x* bude jednaka nuli $\sum M_x = 0$.

$$P_{Px} \cdot \frac{x}{3} - P_{Ax} \cdot \frac{(H+x)}{3} - M_x = 0$$

$$M_x = P_{Ax} \cdot \frac{(H+x)}{3} - P_{Px} \cdot \frac{x}{3}$$

$$M_x = \frac{21 \cdot (4+1,21)^2 \cdot 0,232}{2} \cdot \frac{(4+1,21)}{3} - \frac{21 \cdot 1,21^2 \cdot 4,298}{2} \cdot \frac{1,21}{3} = \mathbf{87,56\ kNm/m}$$

5.1.3. Usporedba rezultata

Nakon što smo proveli modeliranje pomoću programa i ručnu provjeru možemo zaključiti da se rezultati previše ne razlikuju. Dubina zabijanja, odnosno temeljenja, dobivena pomoću programa je 2,67 metara dok je ručnom provjerom iznosila 2,43 m, što je razlika od 24 centimetra. To ne predstavlja problem jer bi se u oba slučaja dubina temeljenje uzela 3 metra što bi omogućilo dodatnu sigurnost.

Iznos poprečne sile dobivene programom je 166,99 kN, dok ručnom proračunom iznosi 165,76 kN. To je razlika od 1,24 kN, odnosno 0,74%.

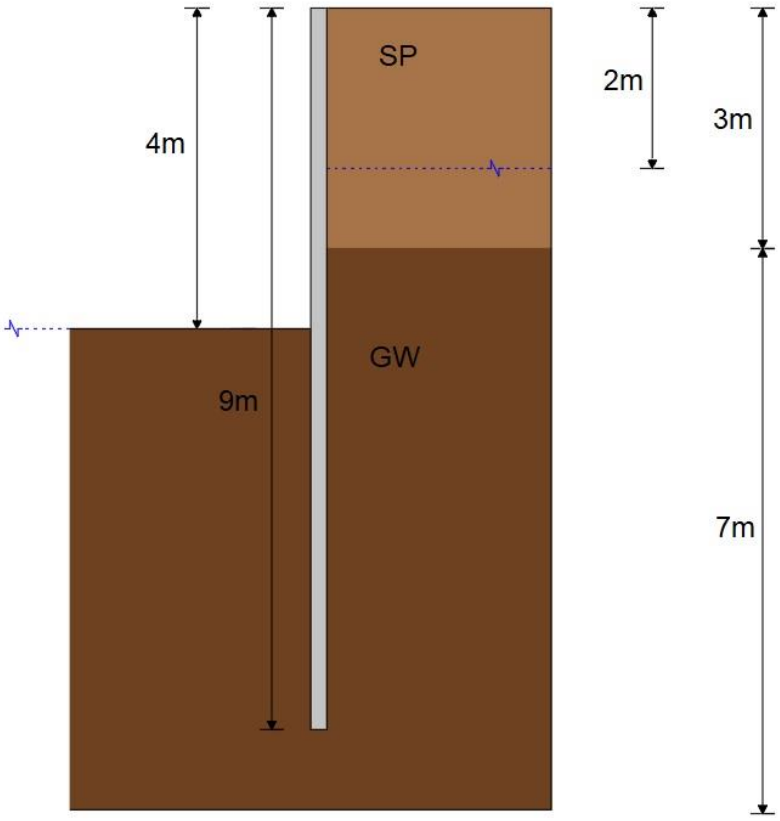
Iznosi momenata gotovo su identični. Moment dobiven pomoću program iznosi 87,47 kNm, dok ručnim proračunom on iznosi 87,56 kNm. Razlika između momenta iznosi 0,09 kN.

5.2. Modeliranje pomoću programa „Provjera zagatne stijene“

Program „Provjera zagatne stijene“ omogućuje nam provjeru već definirane zagatne stijene, odnosno stijene već određene duljine i poprečnog presjeka. Ovaj program služi za napredno modeliranje ugradbenih potpornih zidova koristeći metodu eleasto-plastične nelinearne analize. Omogućuje modeliranje realnog ponašanja konstrukcije koristeći faze gradnje, kako bi se izračunale deformacije i pritisci na konstrukciju. To omogućuje provjeru stabilnosti unutarnjih sidara ili provjeru poprečnih presjeka.

5.2.1. Primjer provjere zagatne stijene

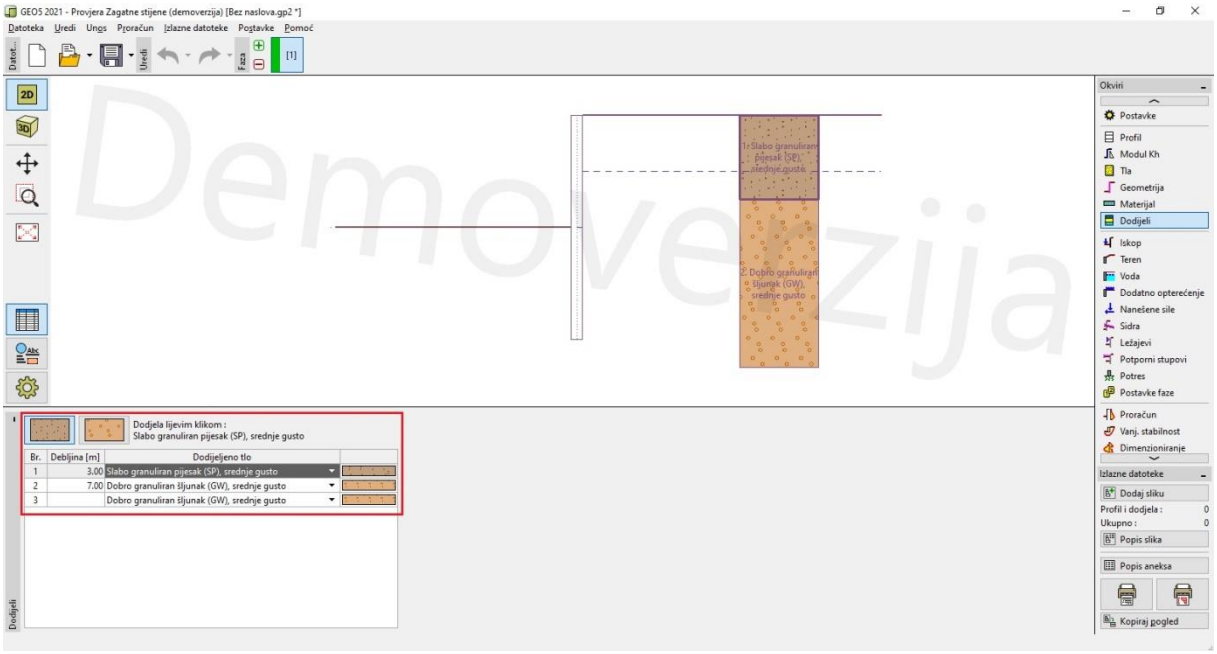
Zamislimo da proračunavamo zagatnu stijenu kao na slici 5.14.



Slika 5.15. Poprečni presjek idejnog rješenja.

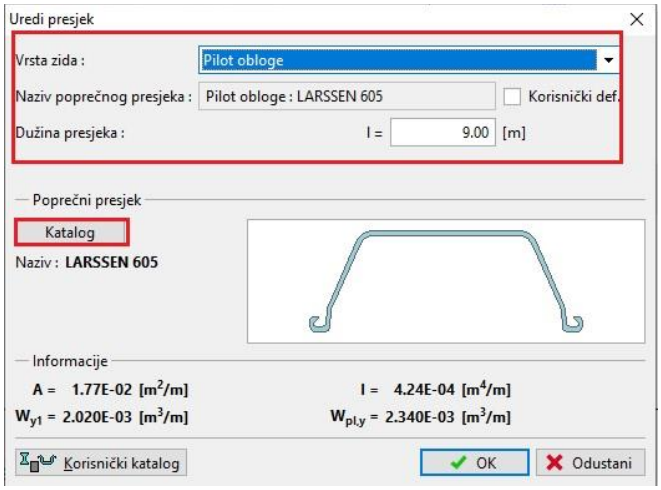
Prvi korak prilikom modeliranja definiranje je postavki na temelju kojih će se provoditi proračun. To ćemo učiniti na način da pritiskom na ikonu „Postavke“ te će nam se pojaviti sučelje u kojem je potrebno odabrati proračunski pristup. Mi ćemo u našem slučaju odabrati Eurokod 7- proračunski pristup 3.

Nakon što smo odabrali proračunski pristup možemo započeti sa modeliranjem zagatne stijene. Kao što je zadano tlo nam se sastoji od dva sloja tla. Sloj dubok je 3 metra i sastoji se od slabo granuliranog pijeska, dok se je drugi sloj dubok 7 metara i sastoji se od dobro granuliranog šljunka. Kut trenja između zagata i tla bit će 10°. Postupak dodavanja tla prikazali smo ranije prilikom modeliranja u programu „Dizajn zagatne stijene“ te ga nećemo detaljnije opisati nego ćemo samo prikazati model tla na slici 5.15. na kojoj se vide debljine slojeva i materijali od kojih se sastoje.



Slika 5.15. Model tla.

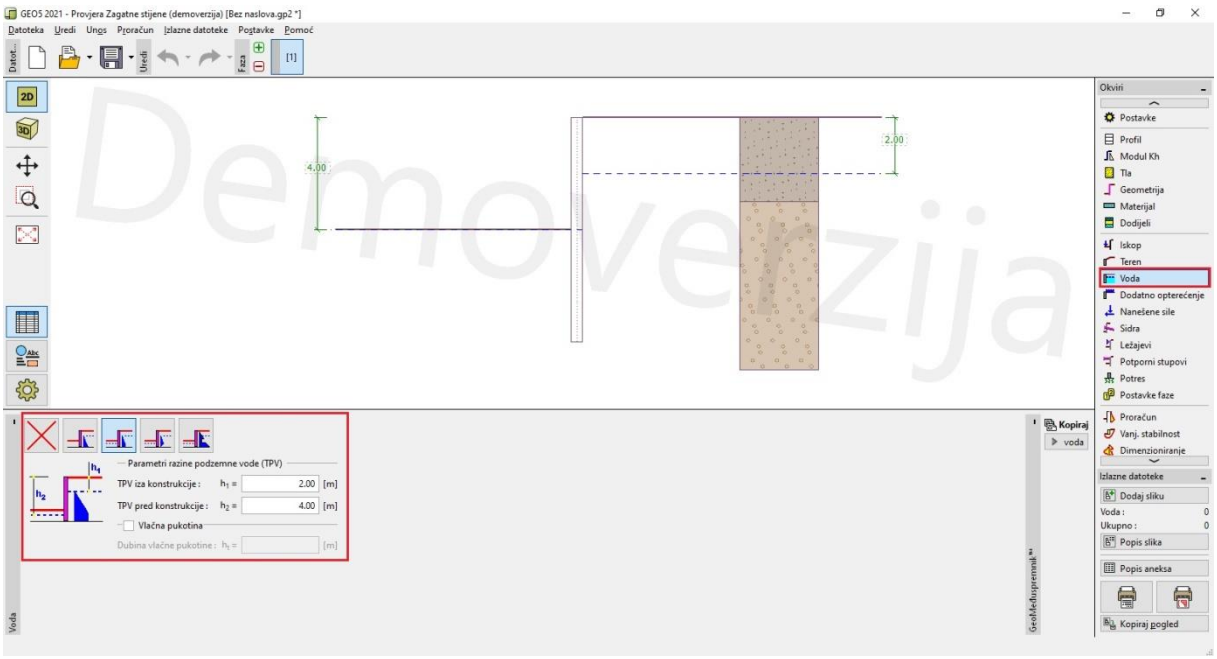
Kad smo definirali parametre tla, potrebno je definirati parametre potporne konstrukcije. To ćemo učiniti na način da u naredbi „geometrija“ definiramo duljinu i poprečni presjek zagatne stijene. Za zaštitu građevne jame postavit ćemo žmurje LARSSEN 605 duljine 8 metara. Karakteristike žmurja prikazane su na slici 5.16.



Slika 5.16. Definiranje poprečnog presjeka.

Sada je potrebno definirati dubinu iskopa. To ćemo učiniti na način da u naredbi „Iskop“ definiramo oblik dna iskopa, dubinu iskopa te unesemo iznos dodatnog opterećenja ukoliko ono postoji. U našem slučaju dno iskopa bit će ravno i horizontalno, a dubina iskopa bit će 4 metra. Također, potrebno je definirati i oblik terena iza zagatne stijene, što ćemo učiniti pomoću naredbe „Teren“. Odabrat ćemo ravni teren, bez nagiba.

Slijedeći korak definiranje je razine podzemne vode. Nju ćemo definirati pomoću naredbe „Voda“. Pošto se radovi u građevnoj jami moraju izvodit u suhom uzet ćemo da je razina podzemne vode s unutarnje strane zagata u razini dna iskopa, a sa stražnje strane se nalazi na -2,00 m u odnosu na teren.

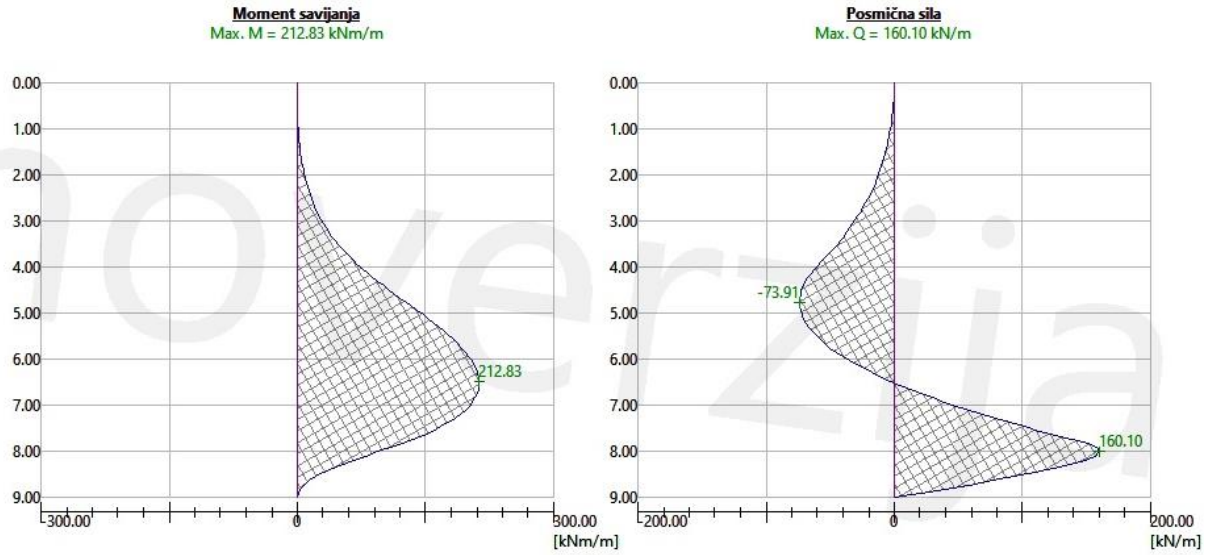


Slika 5.16. Definiranje podzemne vode.

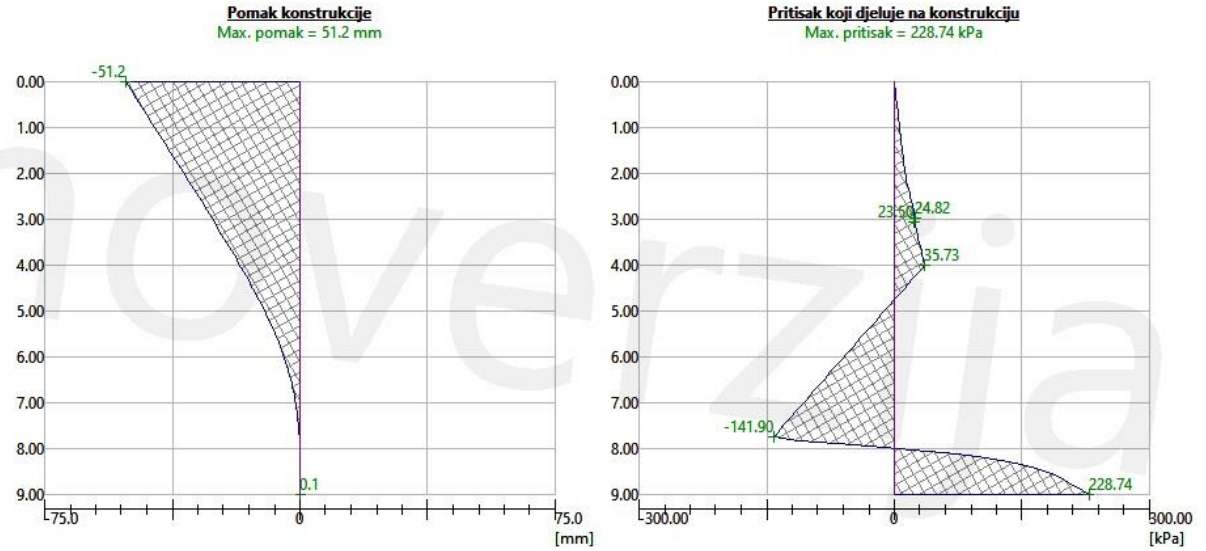
Pošto dodatna opterećenja iza zagata nisu predviđena nećemo ih niti definirati kao niti sidra i ukrute. Posljednji korak prije proračuna je definiranje proračunske situacije. To ćemo učiniti u naredbi „Postavke faze“ gdje ćemo odabrati stalnu proračunsku situaciju. Time je modeliranje zagatne stijene završeno i možemo početi sa proračunom unutrašnjih sila.

Pritiskom na naredbu „Proračun“ program će unutarnje sile, pomake konstrukcije te naprezanja u konstrukciji. Rezultati proračuna prikazina si na slikama 5.17. i 5.18. gdje možemo iščitati da maksimalni moment iznosi 212,83 kNm/m, maksimalna poprečna sila iznosi 160,10 kN/m, maksimalni pomak je 51,20 mm, a maksimalno naprezanje je 228,74 kPa, odnosno 228,74 kN7m^2.

,

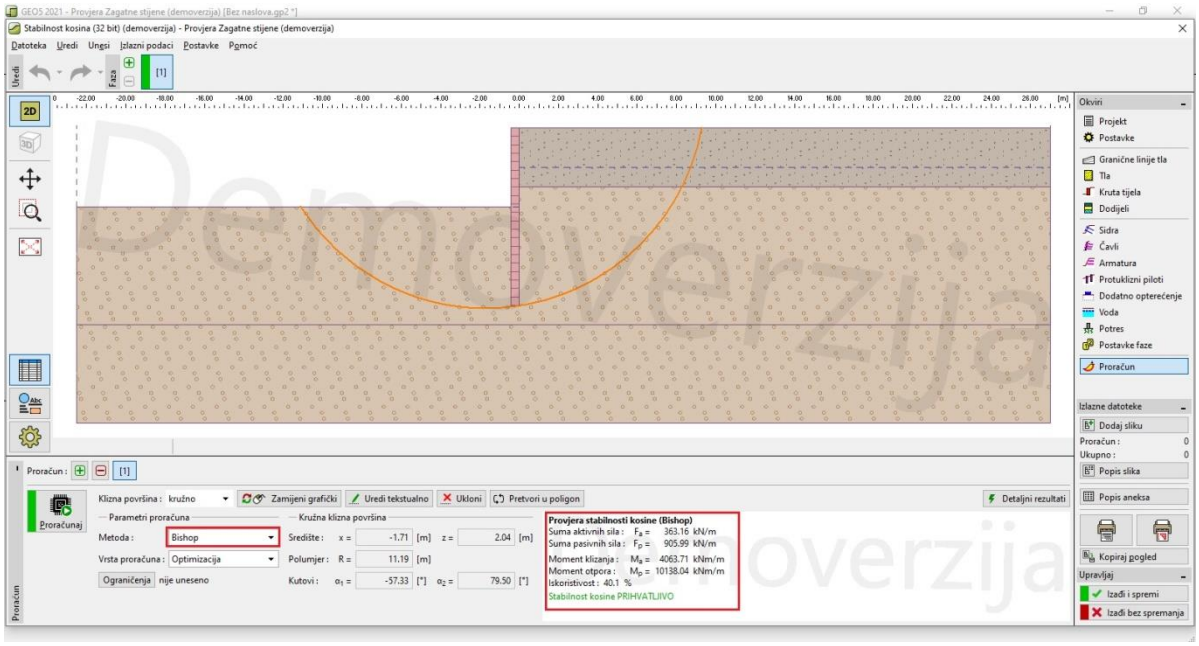


Slika 5.17. Unutrašnje sile.



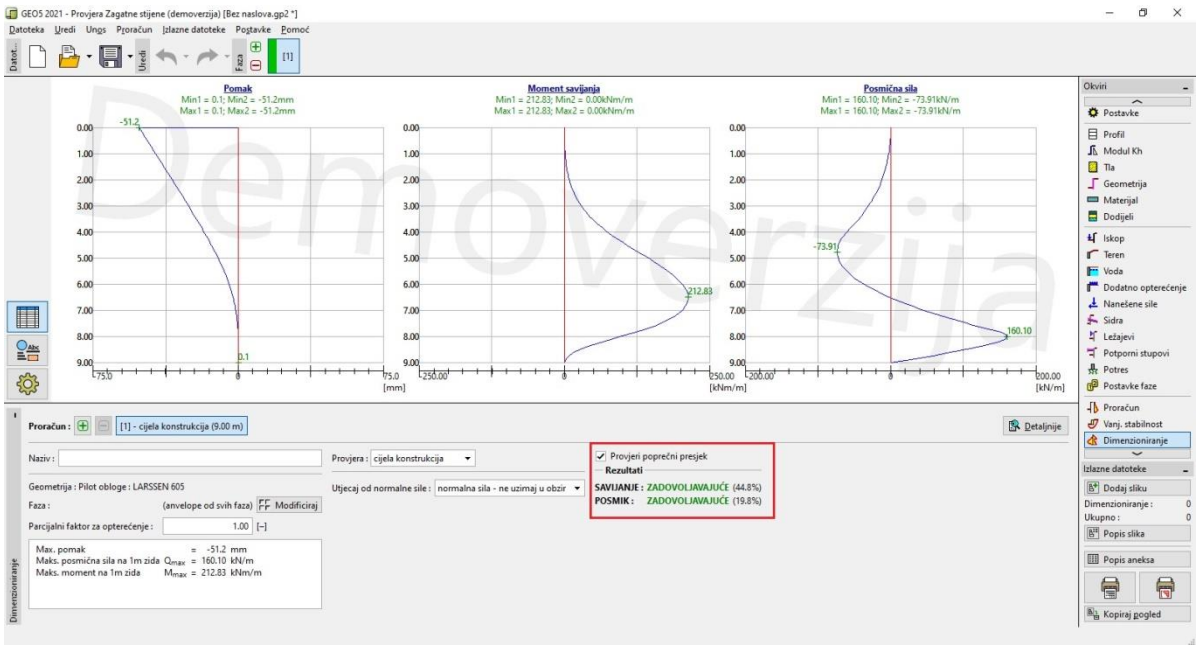
Slika 5.18. pomak i naprezanja.

Sljedeći korak provjera je stabilnosti klizne plohe što ćemo učiniti pomoću naredbe „Vanjska stabilnost“. Pritiskom na naredbu otvara se program „ Stabilnost kosina“ u kojem ćemo provesti proračun stabilnosti. Programu ćemo definirati da proračuna stabilnost prema metodi Bishop. Prema proračunu stabilnost nam zadovoljava, što možemo vidjeti na slici 5.19.



Slika 5.19. Bishop metoda.

Sada možemo izvršiti posljednji korak, a to je dimenzioniranje. Na slici 5.20. vidimo rezultate dimenzioniranja. Vidimo da poprečni presjek zadovoljava na savijanje i na posmak. Iskoristivost presjeka na savijanje je 44,80%, dok na posmak 19,80%.



Slika 5.19. Rezultati dimenzioniranja.

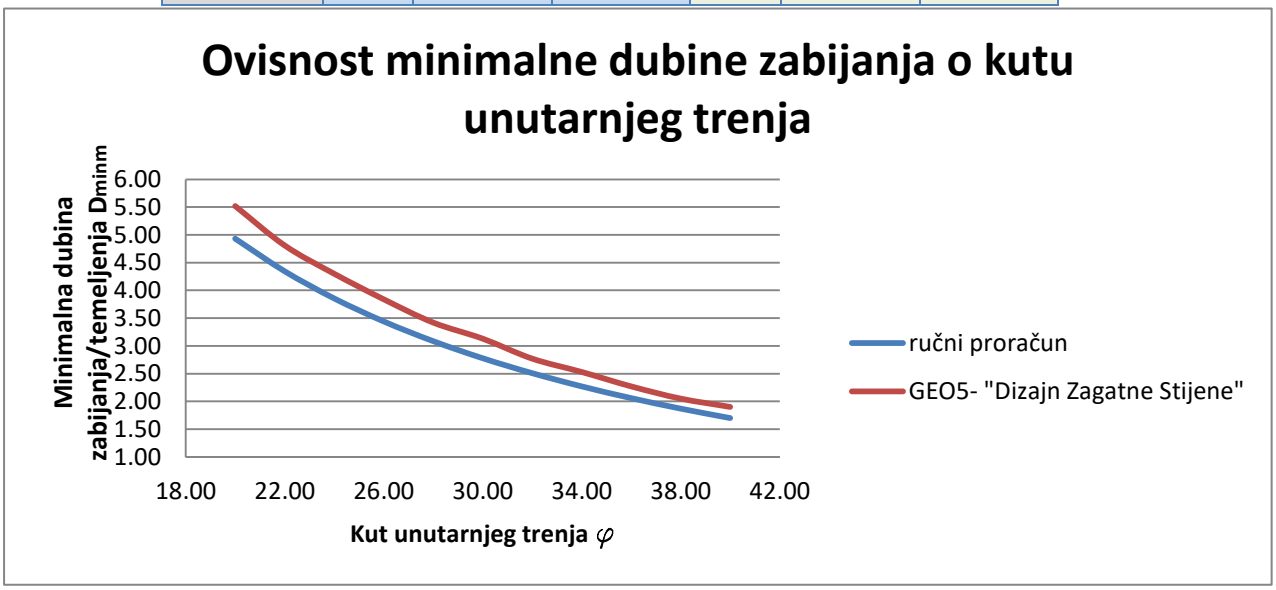
6. Rezultati i analiza proračuna

6.1. Utjecaj kuta unutarnjeg trenja na dubinu zabijanja i unutarnje sile

Pretpostavili smo da se iskop vrši u nekoherentnom tlu, obujamska težina tla je 20,00 kN/m^3, trenja između zida i tla nema, odnosno $\delta = 0$. Dubina iskopa je 5,00 metara, a podzemnu vodu smo zanemariti. Proračun smo vršili pomoću programa „Dizajn zagatne stijene“ te ručno. U oba proračuna krutost konstrukcije nije uzeta u obzir. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 6.1.

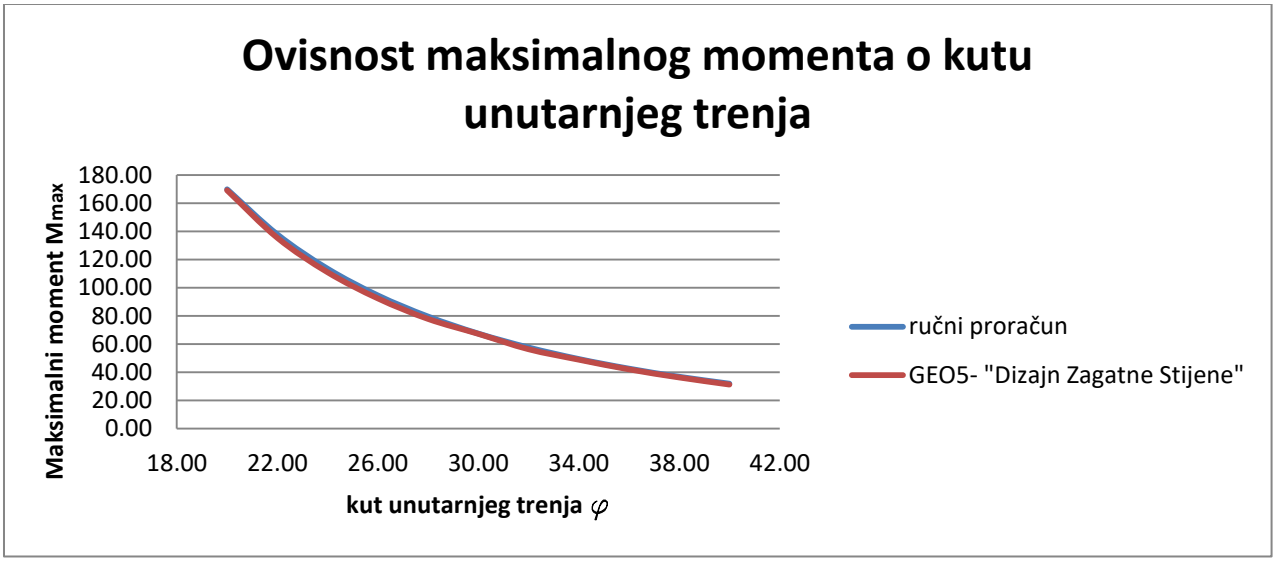
Tablica 6.1 . Rezultati proračuna.

Rezultati Proračuna						
	Ručni Proračun			Dizajn zagatne stijene		
φ	D_{min}	M_{max}	Q_{max}	D_{min}	M_{max}	Q_{max}
20.00	4.93	169.84	187.64	5.52	169.13	187.61
22.00	4.34	137.84	169.47	4.81	135.42	169.24
24.00	3.86	113.51	154.22	4.30	111.01	153.53
26.00	3.44	94.58	141.23	3.84	92.46	141.59
28.00	3.09	79.59	130.00	3.42	77.88	129.98
30.00	2.78	67.50	120.18	3.13	67.30	119.65
32.00	2.51	57.62	111.50	2.77	56.39	111.73
34.00	2.27	49.45	103.77	2.53	48.97	104.10
36.00	2.06	42.62	69.81	2.27	42.10	96.86
38.00	1.87	36.86	90.52	2.05	36.34	91.60
40.00	1.70	31.96	84.77	1.90	31.31	84.09



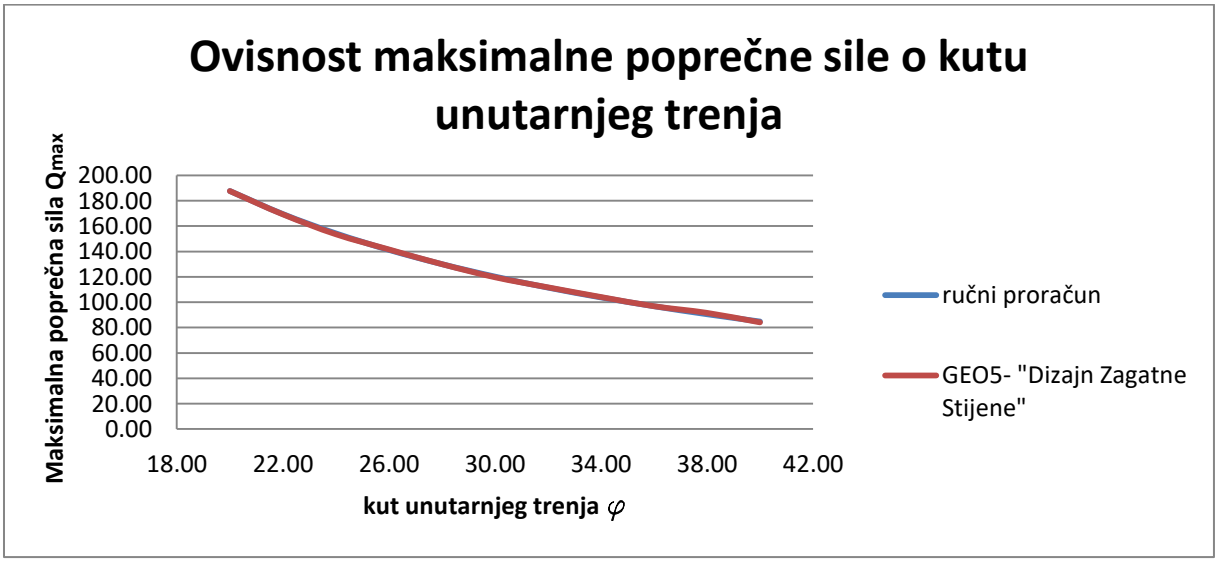
Graf 6.1 . Ovisnost minimalne dubine zabijanja o kutu unutarnjeg trenja

Iz grafa 6.1. možemo iščitati kako se dubina temeljenja zagatne stijenje smanjuje s porastom kuta unutarnjeg trenja. Također, možemo primijetiti kako program određuje nešto veću dubinu temeljenja nego što smo dobili ručnim proračunom. Povećanjem kuta trenja ta razlika se smanjuje.



Graf 6.2. Ovisnost maksimalnog momenta o kutu unutarnjeg trenja.

Maksimalni moment koji djeluje na konstrukciju smanjuje se što je kut unutarnjeg trenja tla veći. Možemo vidjeti da su rezultati dobiveni ručnim proračunom gotovo identični rezultatima dobivenim pomoću programa.

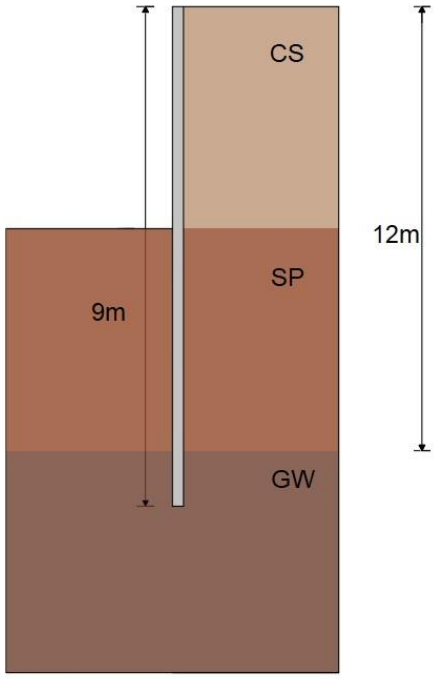


Graf 6.3. Ovisnost maksimalne poprečne sile o kutu unutarnjeg trenja.

Maksimalna poprečna sila smanjuje se što je kut unutarnjeg trenja veći. Možemo vidjeti da su rezultati dobiveni ručnim proračunom gotovo identični rezultatima dobivenim pomoću programa.

6.2. Utjecaj debljine slojeva na unutrašnje sile i pomake

Pomoću softverskog paket GEO5 provjerili smo utjecaj slojevitosti tla na unutrašnje sile. Dubinu iskopa uzeli smo 4 metra, a potporna konstrukcija sastojala se od armirano betonske dijafragme debljine 0,50m, a dužine 9,00m. Tlo se sastojalo od 3 sloja. Prvi sloj bio je pjeskovita glina, drugi sloj slabo granulirani pijesak, a treći sloj bio je dobro granulirani šljunak. Treći sloj nalazi se na dubini 12 m od razine terena i proteže se do neodređene dubine, dok se prvom i drugom sloju mijenjaju debljine.



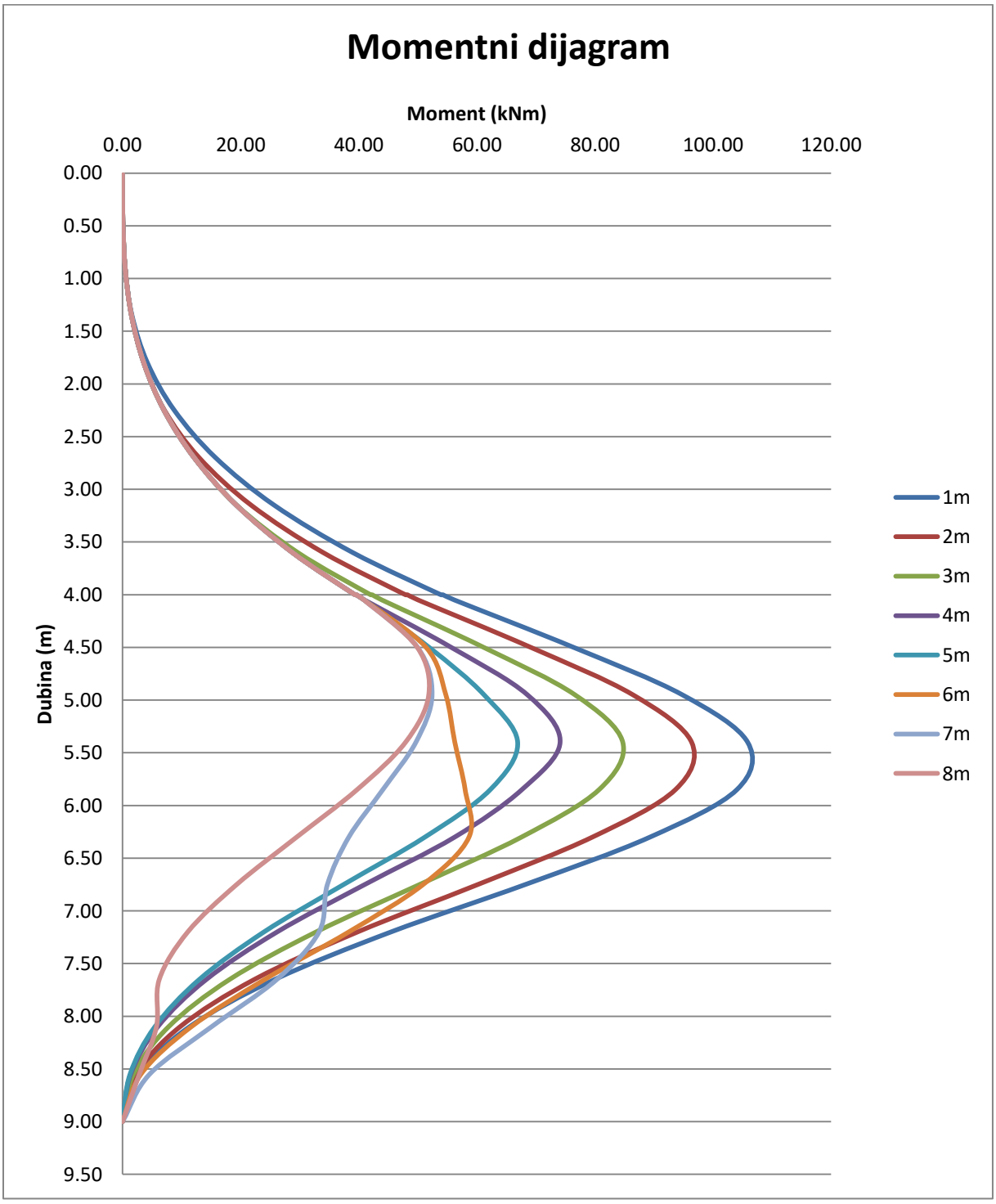
Slika 6.1 Skica slojeva tla.

U tablici 6.2. prikazani su rezultati proračuna izvedenog pomoću programa „Provjera zagatne stijene“

Tablica 6.2. Unutrašnje sile i pomaci.

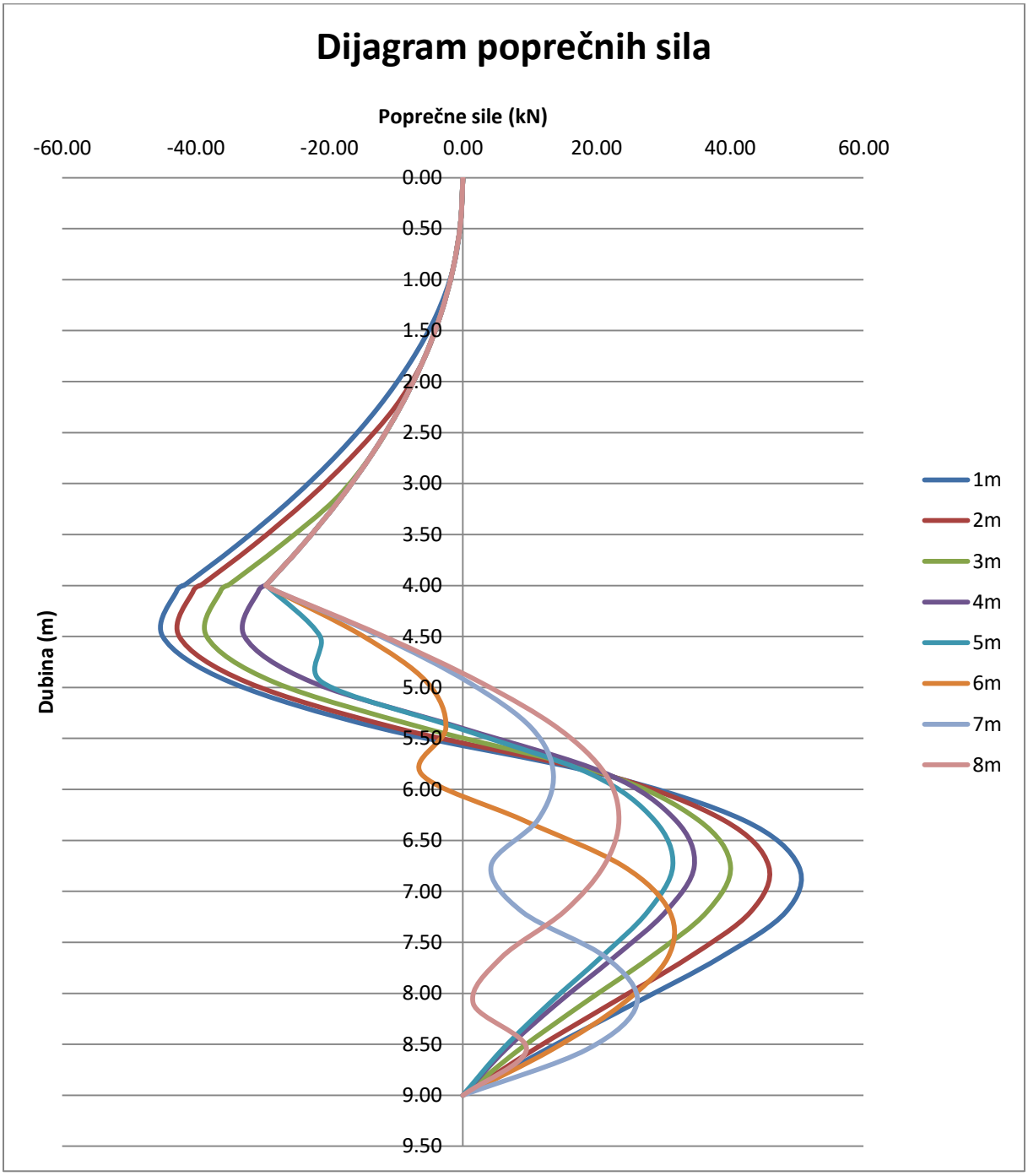
Rezultati proračuna				
debljiina sloja 1 (CS)	debljina sloja 2 (SP)	M_{max}	Q_{max}	s_{max}
1m	11m	106.99	48.77	22.30
2m	10m	96.99	43.99	19.90
3m	9m	84.88	39.00	17.10
4m	8m	74.10	34.70	18.10
5m	7m	66.91	31.44	16.70
6m	6m	65.84	35.57	18.00
7m	5m	53.23	29.65	19.30
8m	4m	53.23	29.54	19.10

Prema grafu 6.3. možemo vidjeti kako se najveći moment javlja kad je debljina prvog sloja 1,00 metar, a najmanji moment se javlja kad je prvi sloj debljine 8,00 metara. Također, možemo utvrditi da su momenti jednakih iznosa do dubine 1,60 metara. Tad se počinju pojavljivati značajnije razlike u momentima. Krivulje momentnog dijagramna imaju pravilan oblik parabole do dubine prvog sloja od 5,00 metara, nakon toga linije poprimaju blage deformacije.

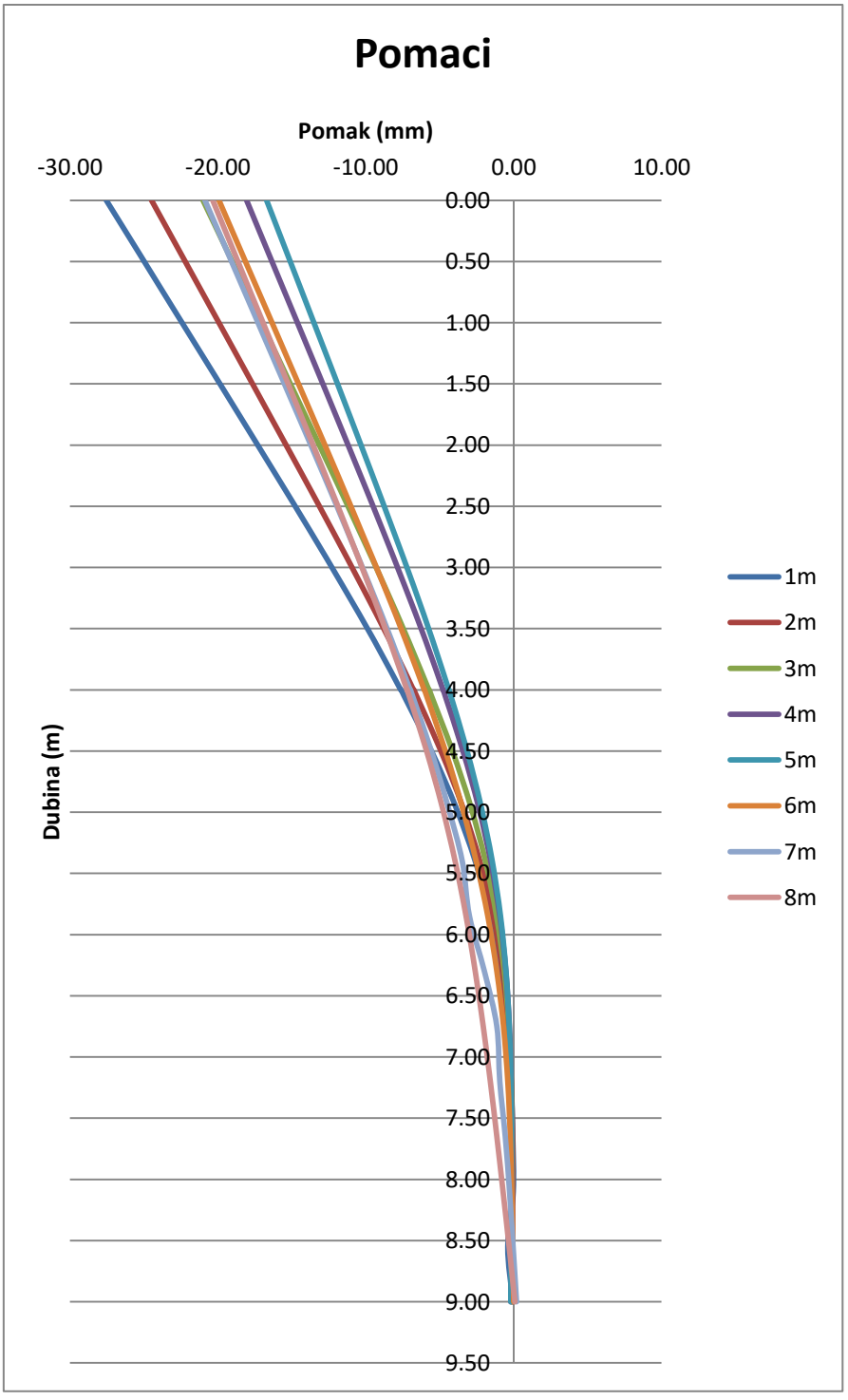


Graf 6.4. Momentni dijagram

Prema grafu 6.4. možemo vidjeti kako se najveće sile, kao i kod momenta, javljaju kad je debljina prvog sloja 1,00 metar, a najmanje kad je prvi sloj debljine 8,00 metara. Možemo utvrditi da su poprečne sile jednakih iznosa do dubine 1,30 metara kad se počinju pojavljivati prve razlike između iznosa poprečnih sila kod primjera gdje je prvi sloj debljine 1,00m. Druga značajnija razlika u iznosu sila javlja se na dubini 2,30 m, gdje se povećavaju iznosi sile primjera u kojem je prvi sloj 2,00m. Najveće razlike u iznosima poprečnih sila javljaju se u primjerima gdje je debljina prvog sloja veća od 4,00m.



Graf 6.5. Dijagram poprečnih sila.

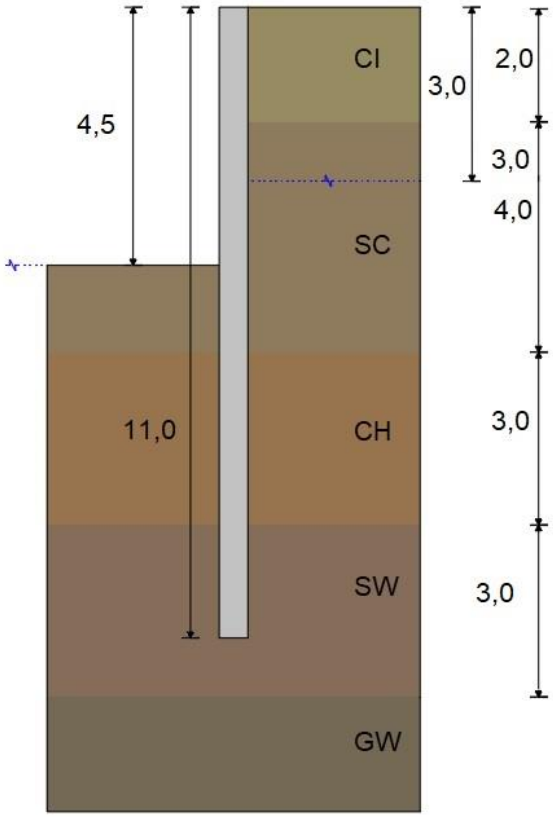


Graf 6.6. Pomaci.

Na grafu 6.6. prikazani su pomaci konstrukcije za svaki primjer debljine slojeva tla. Najveći pomak od 22,30 mm javlja se u slučaju u kojem je debljina prvog sloja 1,00m metar, a najmanji pomak javlja se kad je debljina prvog sloja 4,00 i 5,00 metara.

6.3. Utjecaj veličine poprečnog presjeka na pomake

Pomoću softverskog paket Geo5 provjerili smo utjecaj slojevitosti tla na unutrašnje sile. Dubinu iskopa uzeli smo 4,50 m, a potporna konstrukcija bila je duuljine 9,00m. Tlo se sastojalo od pet slojeva. Prvi sloj bio je glina srednje plastičnosti (CI), drugi sloj glinoviti pijesak (SC), treći sloj glina visoke plastičnosti (CH), četvrti sloj dobro granulirani pijesak (SW), a treći sloj bio je dobro granulirani šljunak (GW). Debljine slojeva vidljive su na slici 6.2., dok se treći sloj nalazi se na dubini 12 m od razine terena i proteže se do neodređene dubine. Razina podzemne vode iza zagatne stijene je na -3,00m od razine terena, dok je s prednje strane voda u razini dna iskopa.



Slika 6.2. Skica modela.

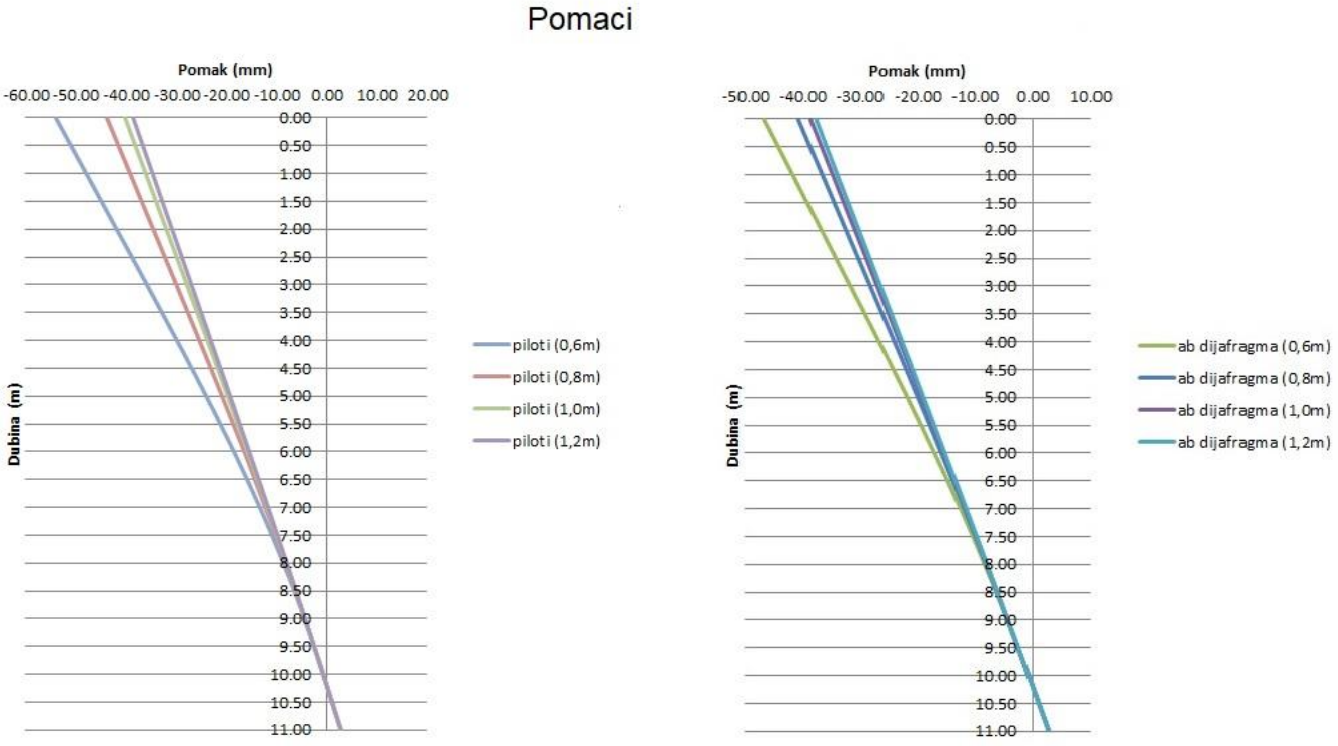
Iz rezultata proračuna prikazanim tablici 6.3. možemo iščitati kako se najveći pomaci pojavljuju kod najmanjih dimenzija poprečnog presjeka, što je i razumljivo jer imaju manju krutost nego veći poprečni presjeci. Zagatne stijene izvedene od pilota daju nešto veće pomake nego ab dijafragme iste dimenzije

Tablica 6.3. Rezultati proračuna.

Rezultati proračuna				
Vrsta:	d	Mmax	Qmax	smax
Ab dijafragma	0.60	163.63	130.45	46.80
	0.80	163.63	130.69	40.80
	1.00	163.63	130.78	38.70
	1.20	163.63	130.81	37.70
Pilot do pilota	0.60	163.63	130.17	54.00
	0.80	163.63	130.57	43.90
	1.00	163.63	130.71	40.20
	1.20	163.63	130.78	38.60

Tablica 6.3. Rezultati proračuna.

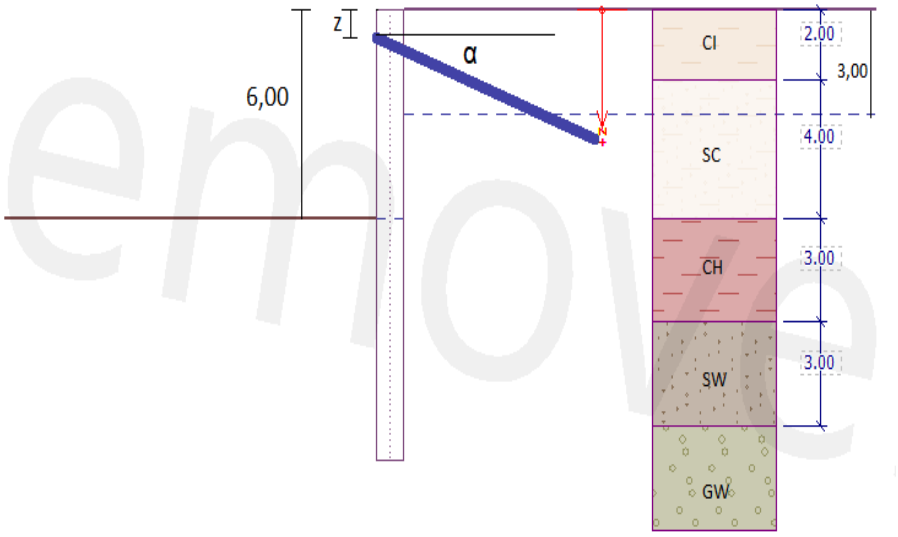
Na grafovima na slici 6.3. prikazani su pomaci za dvije vrste zagatnih stijena. Na lijevom grafu prikazani su pomaci za različite promjere pilota, dok su sa desne strane prikazani pomaci armirano betonskih dijafragmi različitih debljina.



Slika 6.3. Pomaci konstrukcije.

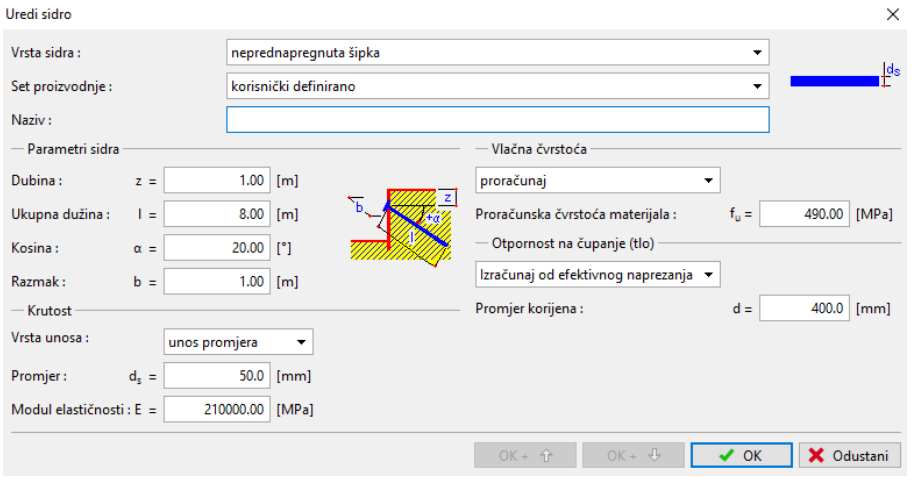
6.4. Utjecaj položaja i kuta sidrenja sidra na unutarnje sile i pomake

U ovom poglavlju prikazat ćemo utjecaje nagiba kuta pod kojim se postavlja i utjecaj dubine na kojoj se sidro nalazi na unutarnje sile i pomake.



Slika 6.4. Skica modela.

Skica modela po kojem se vršio proračun vidljiva je na slici 6.4. Tlo se sastojalo gline srednje plastičnosti (CI), glinovitog pijeska (SC), gline visoke plastičnosti (CH), dobro granuliranog pijeska (SW) i dobro granuliranog šljunka (GW). Dubina iskopa je 6 metara, a razina podzemne vode iza zida je -3,00 m od razine terena, dok je sa prednje strane u razini dna iskopa. Konstrukcija se sastoji od armirano betonske dijafragme, koju dodatno ukrućuje jedan red sidara. U svakom od primjera koristili smo identične parametre sidra koji su prikazani na slici 6.5.



Slika 6.5. Parametri sidra.

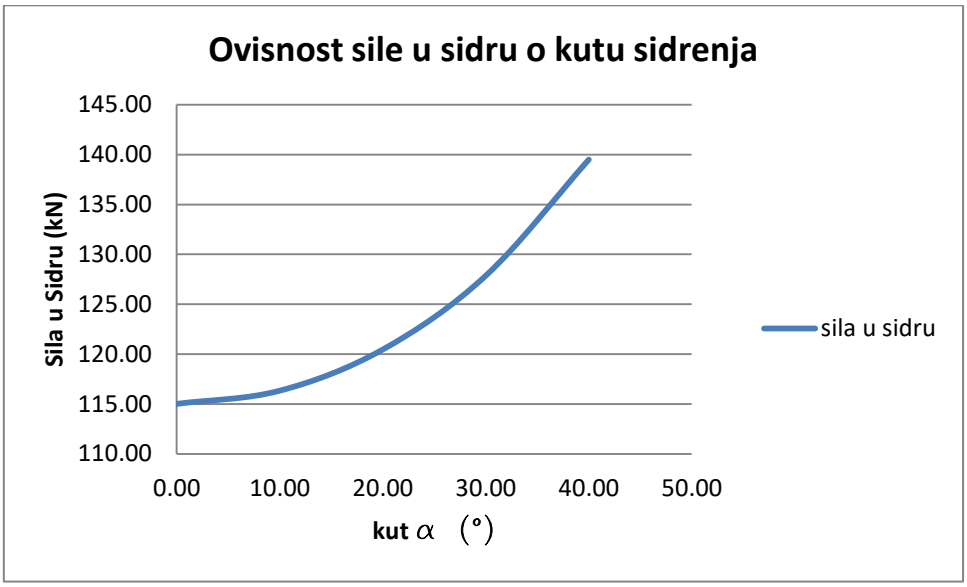
6.4.1. Utjecaj kuta sidrenja sidra na unutarnje sile i pomake

U tablici 6.4. prikazani su rezultati proračuna za određene kutove sidara pri dubini sidrenja z= 2,00 m.

Tablica 6.4. Rezultati proračuna.

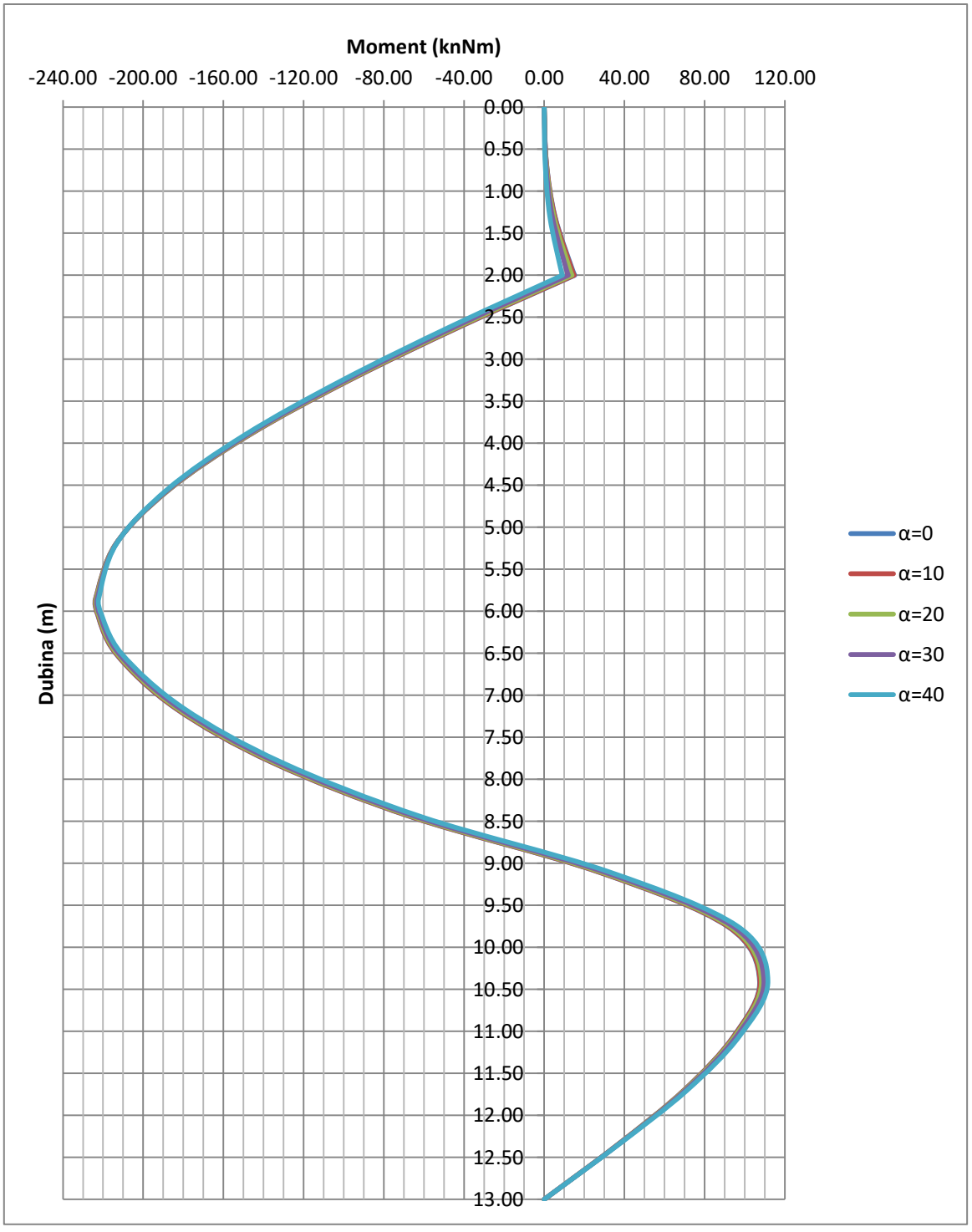
Rezultati poračuna				
α	M_{max}	Q_{max}	S_{max}	F_{sidro}
0.00	223.78	115.81	6.00	115.01
10.00	223.69	115.82	6.00	116.33
20.00	223.42	155.85	6.00	120.46
30.00	222.94	155.93	6.10	127.86
40.00	222.21	156.05	6.20	139.50

Iz tablice možemo iščitat da se momenti razlikuju, ali za jako male vrijednosti kako se kut mijenja. Unutarnje sile se smanjuju kako se povećava kut sidra, dok se sile u sidru povećavaju. Također, povećavaju se i pomaci, ali za jako male vrijednosti (0,1-0,2mm) što se može zanemariti.



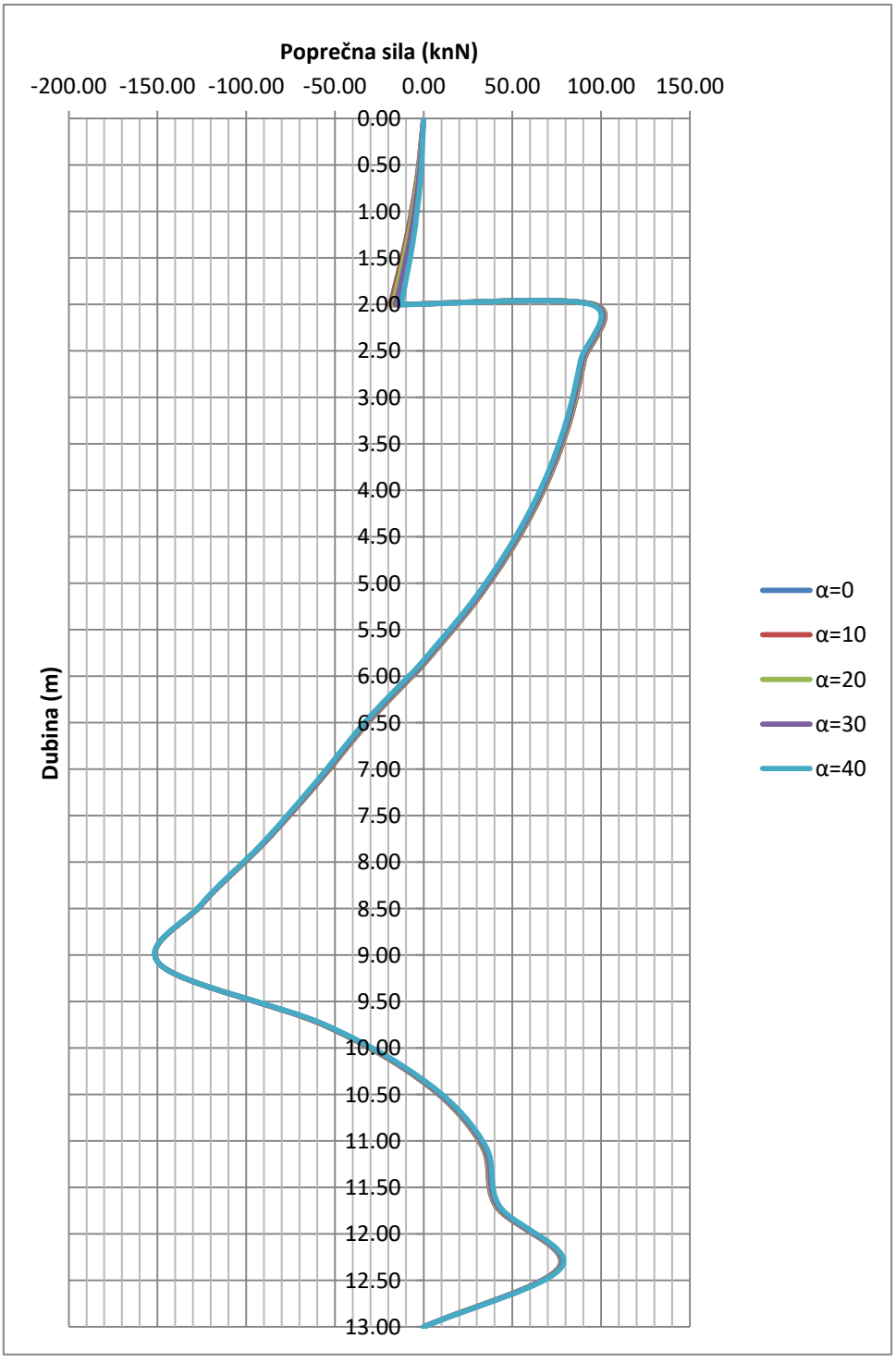
Graf 6.7. Ovisnost sile u sidro o kutu sidrenja.

Na grafu 6.7. prikazana je ovisnost iznosa sile u sidru o veličini kuta sidrenja. Vidimo da je za veći kut sidrenja veća i sila u sidru.



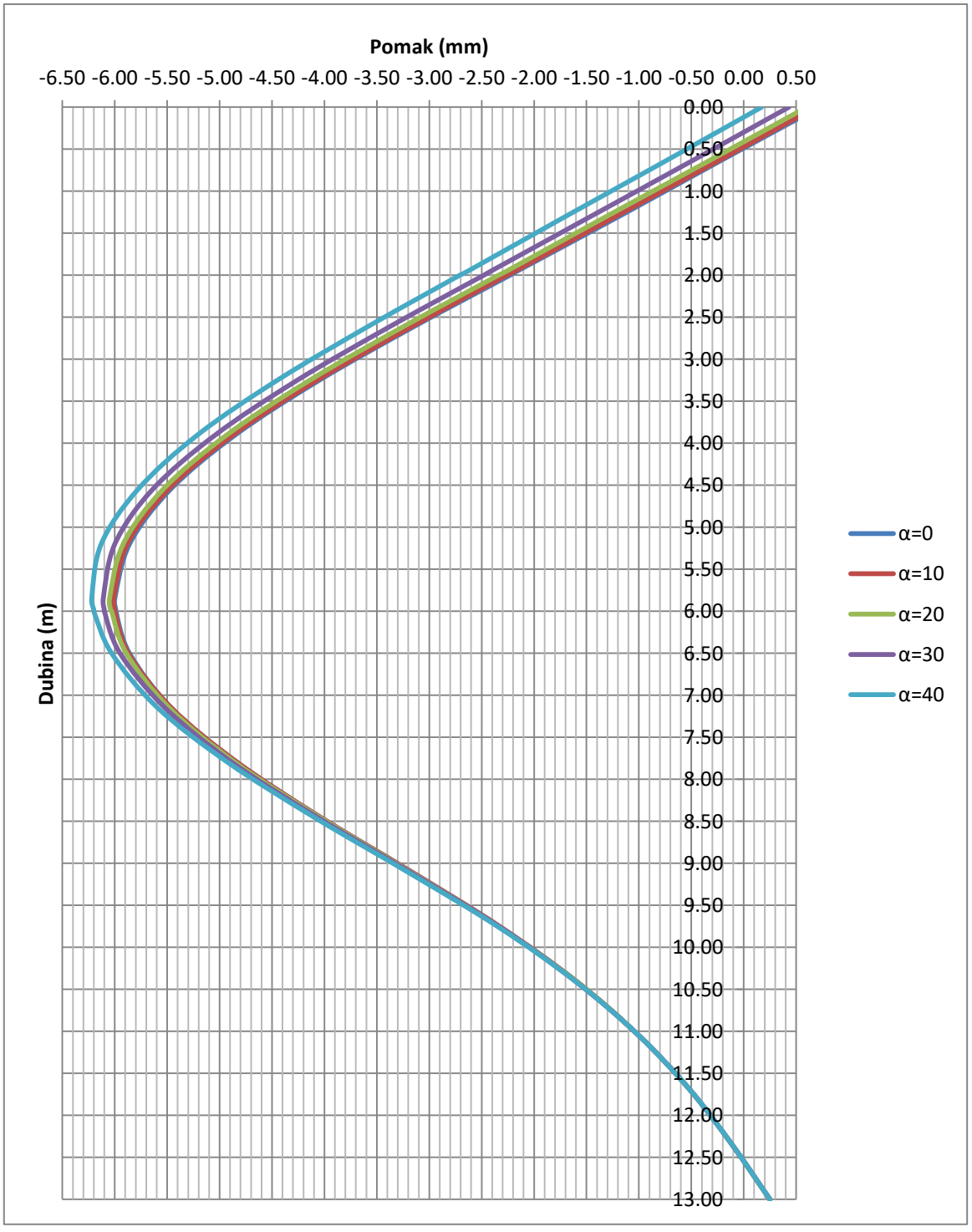
Graf 6.8. Momentni dijagram.

Na grafu 6.8. prikazan je momentni dijagram za sve proračunate kutove sidrenja. Vidljivo je da se iznosi momenata jako malo razlikuju, jedino su vidljive veće razlike na mjestu sidrenja sidra, no te razlike se mogu zanemariti. Možemo zaključiti kako kut sidrenja sidra nema neki značajniji utjecaj na momente.



Graf 6.9. Dijagram poprečnih sila.

Na grafu 6.9. prikazan je poprečnih sila za sve proračunate kutove sidrenja. Vidljivo je da se iznosi poprečnih sila jako malo razlikuju, jedino su vidljive veće razlike na mjestu sidrenja sidra, no te razlike se mogu zanemariti. Možemo zaključiti kako kut sidrenja sidra nema neki značajniji utjecaj na poprečne sile.



Graf 6.10. Pomaci.

Na grafu 6.10. prikazani su pomaci za sve proračunate kutove sidrenja. Vidljivo je da se iznosi pomaka razlikuju, no za male vrijednosti. Najveći pomak javlja se kod kuta α=40°, dok najmanji kod kuta α=0°. Možemo zaključiti kako kut sidrenja sidra ima utjecaja na pomak, ali s obzirom da se radi o vrlo malim pomacima a njihovim razlikama (ukupna razlika je 0,20 mm), možemo ustanoviti da nema neki značajniji utjecaj.

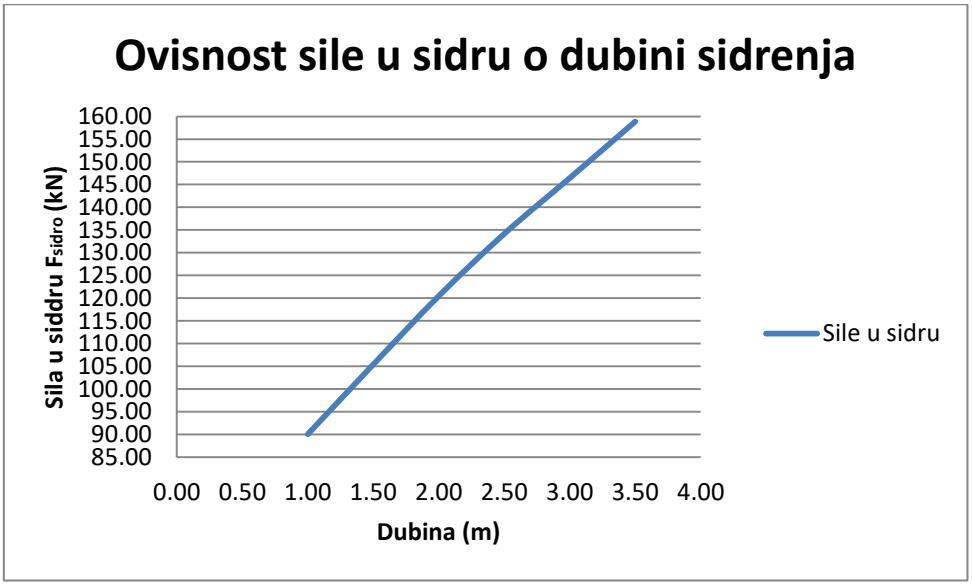
6.4.2. Utjecaj dubine sidrenja na unutarnje sile i pomake

U tablici 6.5. prikazani su rezultati proračuna za određene dubine sidrenja za kut sidrenja α=20°.

Tablica 6.4. Rezultati proračuna.

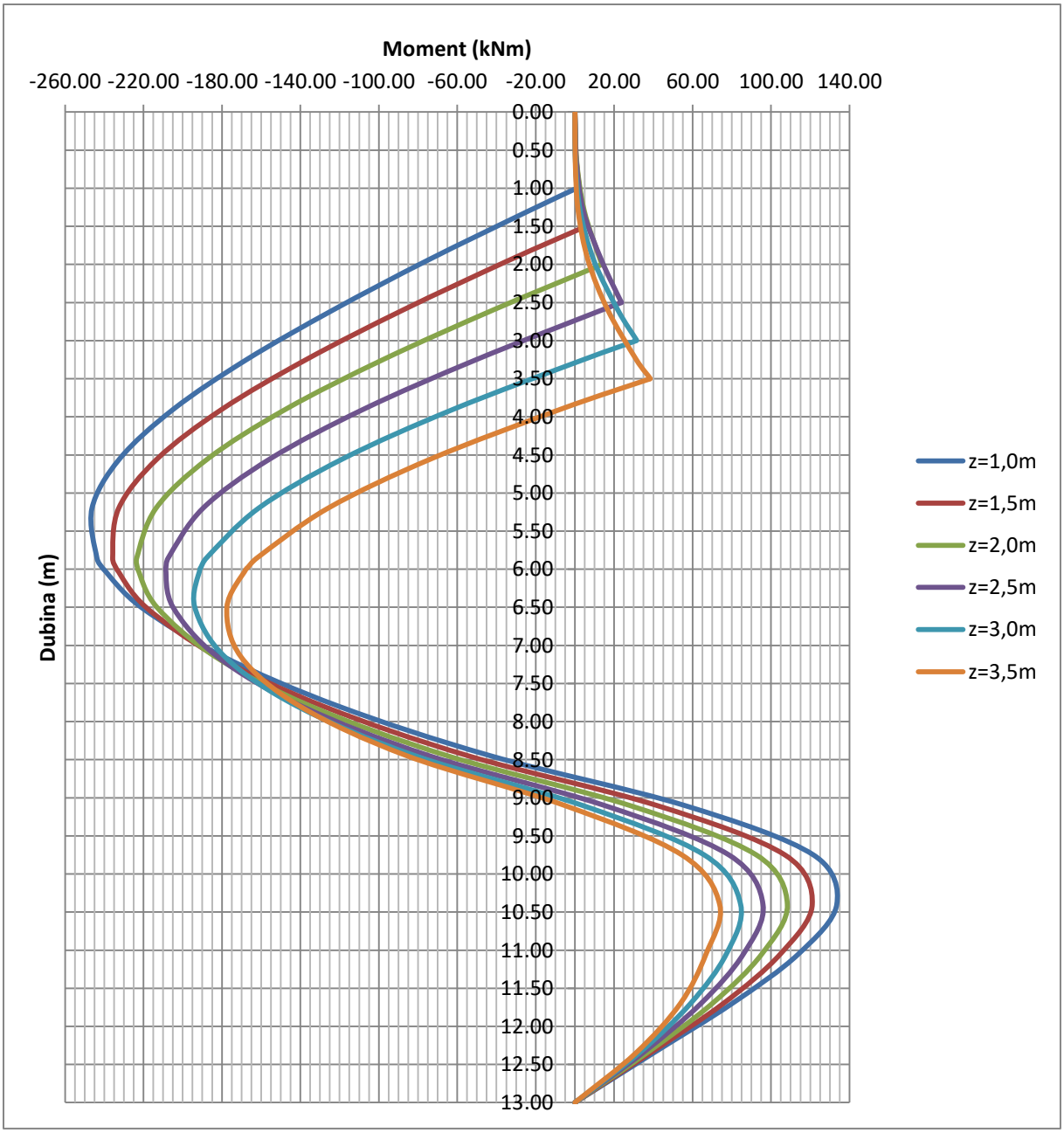
Rezultati poračuna				
dubina (z)	M_{max}	Q_{max}	S_{max}	F_{sidro}
1.00	247.46	164.59	7.30	90.02
1.50	236.71	160.63	6.70	105.38
2.00	223.42	155.85	6.00	120.46
2.50	208.98	150.50	5.50	134.16
3.00	194.40	144.62	5.00	146.44
3.50	177.82	137.44	4.50	158.87

Iz tablice možemo iščitat da se momenti razlikuju i da se smanjuju što je dubina sidrenja niža. Unutarnje sile se smanjuju kako se povećava dubina sidrenja , dok se sile u sidru povećavaju. Pomaci se smanjuju kako je dubina sidrenja niža.



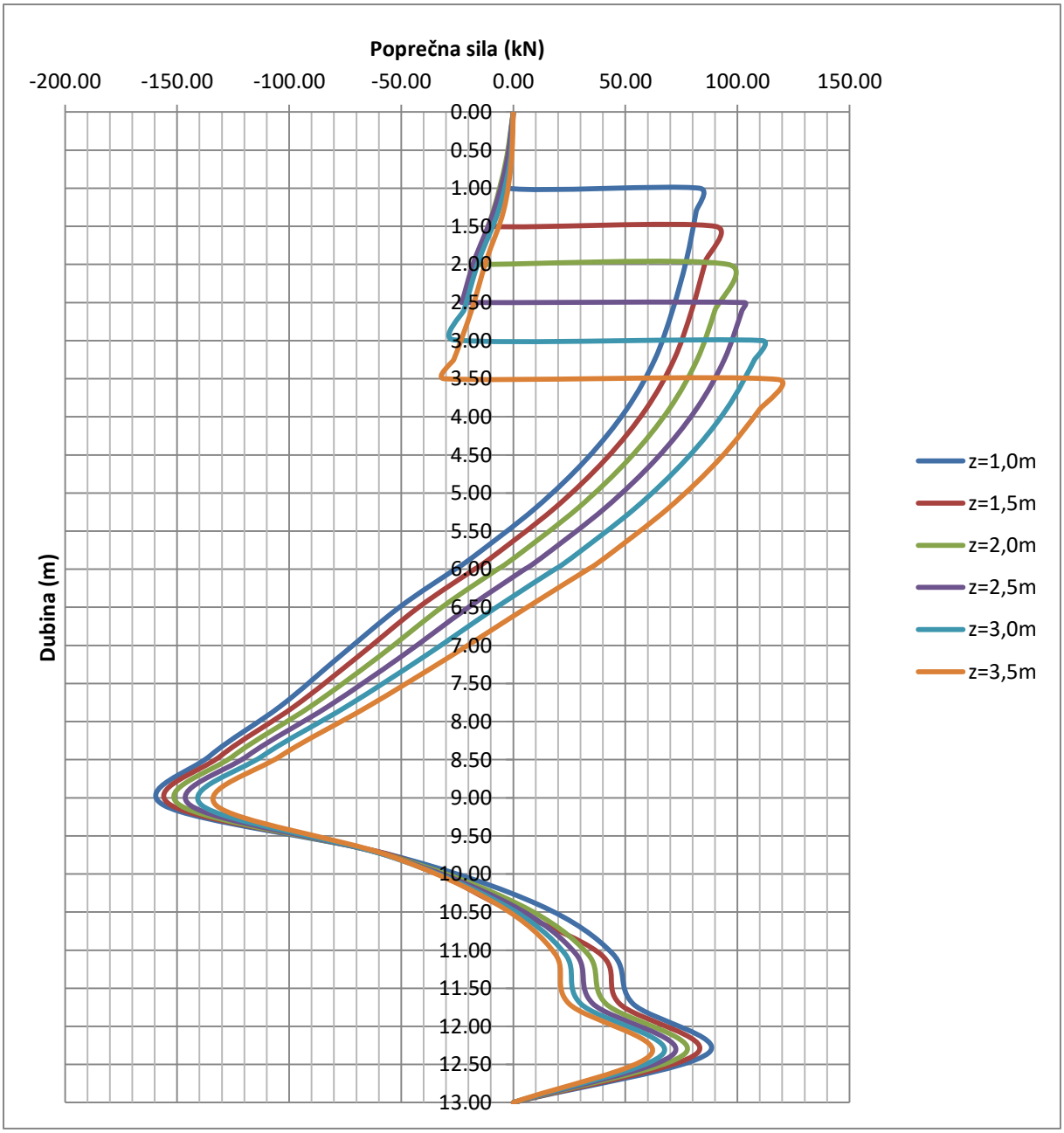
Graf 6.11. Ovisnost sile u sidro o dubini sidrenja.

Na grafu 6.11. prikazana je ovisnost iznosa sile u sidru o dubini sidrenja. Vidimo da iznos sile proporcionalan dubini sidrenja. Sila u sidru linearno raste kako je dubina sidrenja niža.



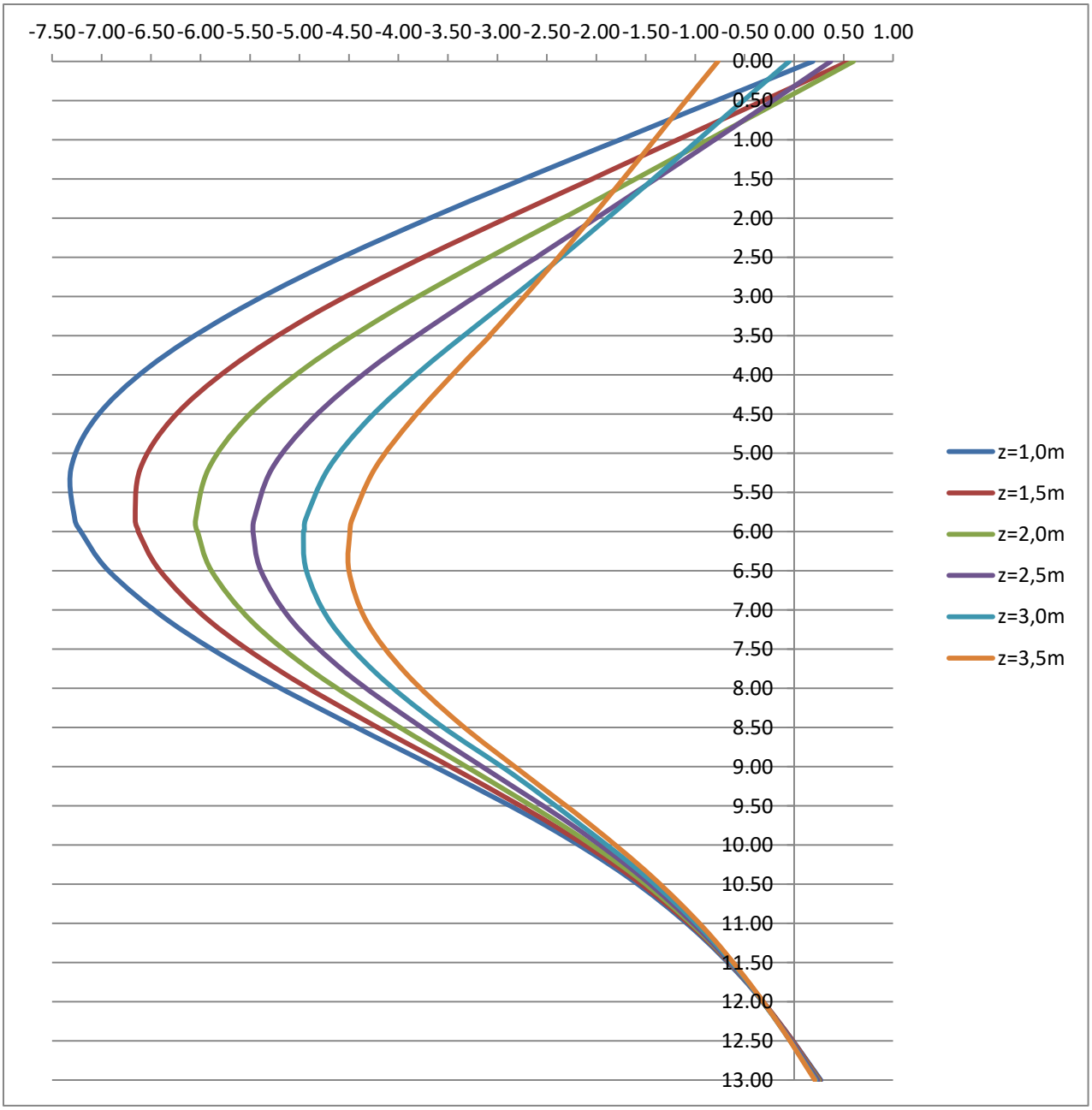
Graf 6.12. Momentni dijagram.

Na grafu 6.12. prikazan je momentni dijagram za sve proračunate dubine sidrenja. Vidljivo je da se iznosi momenata razlikuju ovisno o dubini sidrenja. Najveći moment javlja se pri dubini sidrenja 1,00m (247,46 kNm), a najmanji kod dubine 3,50m (177,82 kNm). Samim time mijenja se i položaj maksimalnog momenta tako se za dubinu sidrenja maksimalni moment nalazi na dubini 5,30m, a za dubinu sidrenja 3,5 maksimalni moment nalazi se na dubini 6,5m. Momenti na mjestu sidrenja također se razlikuju. Tako za dubinu sidrenja 1,00m moment iznosi 0,94 kNm, a kod dubine sidrenja 3,50m iznos momenta je 38,46 kNm.



Graf 6.13. Dijagram poprečnih sila.

Na grafu 6.13. prikazan je dijagram poprečnih sila za sve proračunate dubine sidrenja. Vidljivo je da se iznosi poprečnih sila razlikuju ovisno o dubini sidrenja. Najveća poprečna sila javlja se pri dubini sidrenja 1,00m (164,59 kN), a najmanja kod dubine 3,50m (137,44 kN). Poprečna sila na mjestima sidrenja za dubinu sidrenja 1,00m iznosi 80,07 kN, a kod dubine sidrenja 3,50m iznos poprečne sile je 148,82 kN.

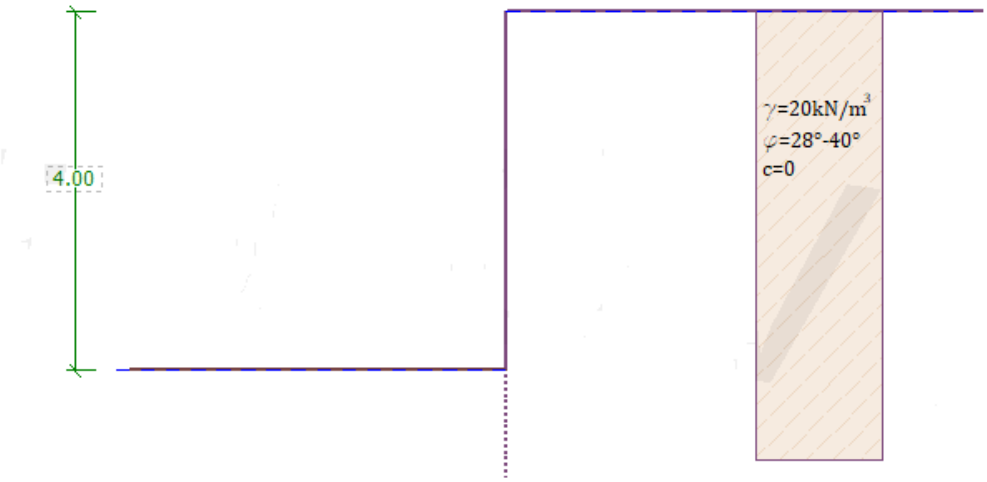


Graf 6.14. Pomaci.

Na grafu 6.14. prikazani su pomaci za sve proračunate dubine sidrenja. Vidljivo je da se iznosi pomaka razlikuju. Najveći pomak javlja se kod dubine 1,0m (7,3mm), dok najmanji kod dubine sidrenja 3,5m (4,5mm). Najveći pomaci javljaju se između dubine 8.85 m i 6,00m. Pomaci na vrhu konstrukcije također se razlikuju za svaku dubinu sidrenja. Pomak za dubinu sidrenja 1,00m iznosi 0,6mm, dok za dubinu sidrenja 3,50m iznosi -0,77mm.

6.5. Faktori sigurnosti hidrauličkog gradijenta

Na temelju duljina konstrukcija za situaciju prikazanu na slici 6.6 dobivenih pomoću programa „Dizajn zagatne stijene“ proračunali smo hidrauličke faktore sigurnosti za različite kutove unutarnjeg trenja te za različite pristupe proračuna. Tlo je nekoherentno sa obujamskom težinom tla 20 kN/m^3, dok se kutovi trenja kreću između 15° i 40°. Dubina iskopa je 4,00m. Razine podzemne vode iza potporne konstrukcije u razini je terena, dok je sa prednje strane u razini dna iskopa. Tip konstrukcije je armirano betonska dijafragma debljine 0,50m.



Slika 6.6. Skica modela za proračun.

U tablici 6.5. prikazani su rezultati proračuna pomoću programa „Dizajn zagatne stijene“. Prikazane su proračunate dubine temeljenja potporne konstrukcije i duljina potporne konstrukcije za odabrane kutove trenja . U posljednjem stupcu prikazani su hidraulički gradijenti za odabrane kutove trenja koje je program proračunao na temelju razlike potencijala i duljine puta vode uz konstrukciju.

Tablica 6.5. Rezultati proračuna pomoću programa „Dizajn zagatne stijene“.

Rezultati proračuna				
kut trenja	proračunski pristup	dubina zabijanja	duljina konstrukcije	hidraulički gradijent
φ		d	L	i
28.00	bez smanjena parametara	11.61	15.61	0.15
	granična stanja	13.14	17.14	0.13
	EC7-PP1	14.68	18.68	0.12
	EC7-PP2	19.78	23.78	0.09
	EC7-PP3	14.60	18.60	0.12
30.00	bez smanjena parametara	10.88	14.88	0.16
	granična stanja	11.96	15.96	0.14
	EC7-PP1	13.63	17.63	0.13
	EC7-PP2	18.13	22.83	0.10
	EC7-PP3	13.60	17.60	0.13
32.00	bez smanjena parametara	9.79	13.79	0.17
	granična stanja	11.17	15.17	0.15
	EC7-PP1	12.14	16.14	0.14
	EC7-PP2	15.83	19.83	0.11
	EC7-PP3	12.37	16.37	0.14
34.00	bez smanjena parametara	9.15	13.15	0.18
	granična stanja	10.31	14.31	0.16
	EC7-PP1	11.24	15.24	0.15
	EC7-PP2	14.52	18.52	0.12
	EC7-PP3	11.45	15.45	0.15
36.00	bez smanjena parametara	8.43	12.43	0.19
	granična stanja	9.52	13.52	0.17
	EC7-PP1	10.28	14.28	0.16
	EC7-PP2	13.12	17.12	0.13
	EC7-PP3	10.76	14.76	0.16
38.00	bez smanjena parametara	7.77	11.77	0.20
	granična stanja	9.03	13.03	0.18
	EC7-PP1	9.42	13.42	0.17
	EC7-PP2	11.90	15.90	0.14
	EC7-PP3	9.80	13.80	0.17
40.00	bez smanjena parametara	7.47	11.47	0.21
	granična stanja	8.28	12.28	0.19
	EC7-PP1	9.00	13.00	0.18
	EC7-PP2	11.30	15.30	0.15
	EC7-PP3	9.19	13.20	0.18

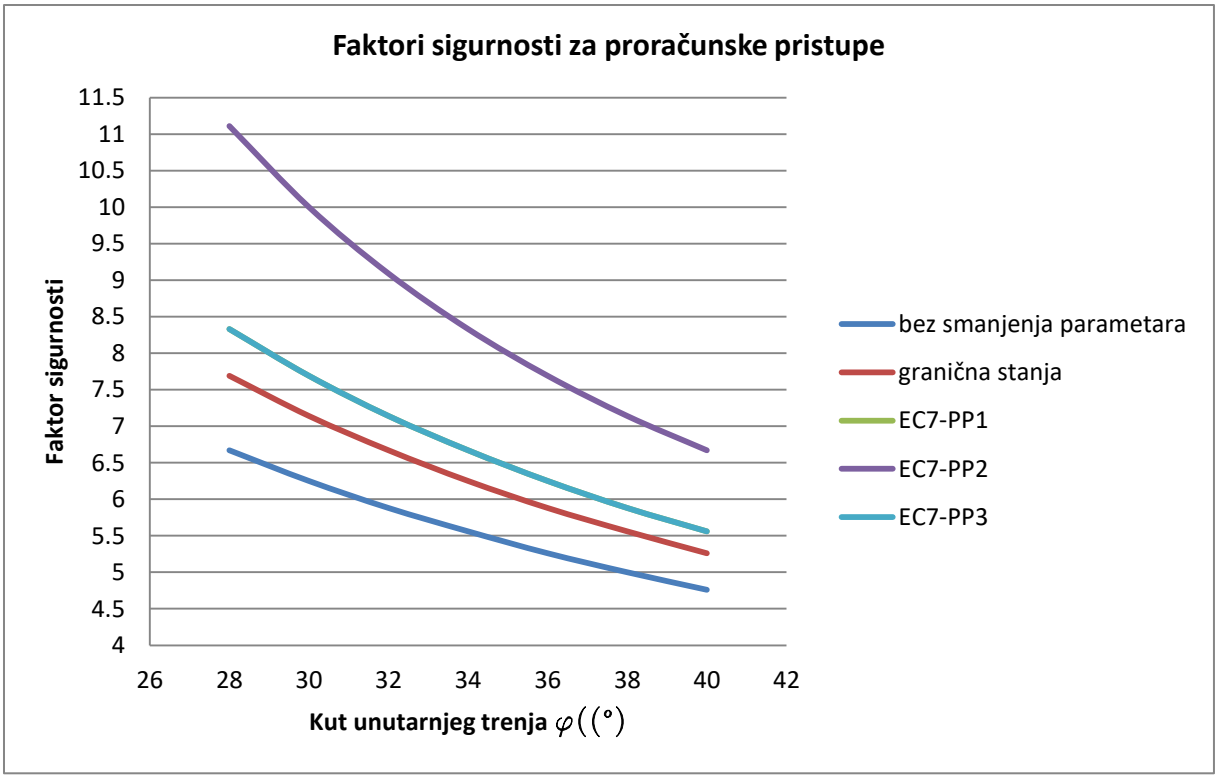
Kako bi smo dobili faktor sigurnosti potrebnije proračunati kritični hidraulički gradijent:

$$i_{kr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{20-10}{10} = 1{,}00$$

Tablica 6.6. Hidraulički faktori sigurnosti za odabrane kutove unutarnjeg trenja i pristupe proračuna.

Rezultati poračuna			
kut trenja	proračunski pristup	hidraulički gradijent	faktor sigurnosti
φ		i	F_{Si}
28.00	bez smanjena parametara	0.15	6.67
	granična stanja	0.13	7.69
	EC7-PP1	0.12	8.33
	EC7-PP2	0.09	11.11
	EC7-PP3	0.12	8.33
30.00	bez smanjena parametara	0.16	6.25
	granična stanja	0.14	7.14
	EC7-PP1	0.13	7.69
	EC7-PP2	0.10	10.00
	EC7-PP3	0.13	7.69
32.00	bez smanjena parametara	0.17	5.88
	granična stanja	0.15	6.67
	EC7-PP1	0.14	7.14
	EC7-PP2	0.11	9.09
	EC7-PP3	0.14	7.14
34.00	bez smanjena parametara	0.18	5.56
	granična stanja	0.16	6.25
	EC7-PP1	0.15	6.67
	EC7-PP2	0.12	8.33
	EC7-PP3	0.15	6.67
36.00	bez smanjena parametara	0.19	5.26
	granična stanja	0.17	5.88
	EC7-PP1	0.16	6.25
	EC7-PP2	0.13	7.69
	EC7-PP3	0.16	6.25
38.00	bez smanjena parametara	0.20	5.00
	granična stanja	0.18	5.56
	EC7-PP1	0.17	5.88
	EC7-PP2	0.14	7.14
	EC7-PP3	0.17	5.88
40.00	bez smanjena parametara	0.21	4.76
	granična stanja	0.19	5.26
	EC7-PP1	0.18	5.56
	EC7-PP2	0.15	6.67
	EC7-PP3	0.18	5.56

U tablici 6.6. prikazani su faktor sigurnosti proračunati pomoću formule; $F_{Si} = \frac{i_{kr}}{i}$, za odabrane kutove unutarnjeg trenja i proračunske pristupe. Faktori sigurnosti kreću se od 4,76 do 11,11, a najčešće je njihova vrijednost između 5,50 i 8.



Graf 6.15. Faktori sigurnosti za proračunske pristupe.

Na grafu 6.15. prikazana je ovisnost faktora sigurnosti o kutu trenja za odabrane proračunske situacije. Vidimo da se za svaku proračunsku situaciju faktor sigurnosti smanjuje kako se povećava kut unutarnjeg trenja. Najveće faktore sigurnosti daje nam Eurokod7-proračunski pristup 2, dok najmanje faktore sigurnosti dobivamo bez smanjenja parametara. Euro kodovi proračunski pristup 1 i 3 ostvaruju jednake faktore sigurnosti za iste kutove unutarnjeg trenja. Sva tri euro kodova proračunska pristupa ostvaruju veće faktore sigurnosti u odnosu na granična stanja, što je i logično jer se euro kod bazira na graničnim stanjima. Svojstva materijala i djelovanja se faktoriziraju kako se nebi dostigla granična stanja.

7. Zaključak

Danas se građevine u urbanim sredinama se sve češće grade u visinu i dubinu nego u širinu. S obzirom na gradnju u blizini postojećih građevina, ozbiljnost pristupa pri izradi građevnih jama od neizmjerne je važnosti. Gradnja građevina u dubinu jedan je od razloga zbog kojeg dolazi do potrebe zaštite iskopa. U takvim okolnostima često se nailazi na niz nepovoljnih situacija kao što su visoka razina podzemnih voda, tla visoke koherentnosti tj. propusnosti, tla manje čvrstoće i slični problemi. Zahvaljujući današnjem razvoju tehnologije sve te probleme moguće je riješiti. Od svih navedenih problema najgorim se može smatrati visoka razina podzemne vode, zahvaljujući raznim građevinskim zahvatima omogućeno je smanjenje stupnja saturacije tla odnosno pornog tlaka, te omogućeno izvođenje radova u „suhom“. U odnosu na te i slične probleme odabiremo najadekvatniju metodu zaštite građevine jame.

Kako bismo odredili tip zaštite građevne jame potrebno je provesti niz proračuna kojima se utvrđuje najadekvatniji tip zaštite. Prije samog proračuna potrebno je provesti geotehničke istražne radove koji se sastoje od ispitivanja na terenu i laboratorijskih ispitivanja. Na temelju geotehničkih ispitivanja dobiva se model tla sa svim parametrima tla. Na temelju tog modela pristupa se modeliranju i proračunu zaštitne konstrukcije.

Kako bi se proveo kvalitetan proračun potrebno je poznavati djelovanja na konstrukciju. Sile djelovanja od tla dijelimo na dvije vrste sila, sila aktivnog tlaka i sila pasivnog otpora. Ukoliko se u tlu u razini građevne jame nalazi podzemna voda tad se pojavljuju sile hidrostatskog tlaka. Proračun sila jednostavan je za jednostavne modele tla no ukoliko se radi o slojevitom tlu proračun se može zakomplicirati.

Osnovni parametri koji su potrebni za provjeru konstrukcije su dubina zabijanja/temeljenja konstrukcije, momenti savijanja konstrukcije, unutrašnje sile te sile u sidrima ukoliko su predviđena. Proračun tih parametara moguće je provesti ručno, no oduzima podosta vremena. Iz toga razloga postoji niz softverskih programa koji omogućuju brzo i jednostavno modeliranje i proračun geotehničkih konstrukcija.

Jedan od takvih paketa je softverski paket GEO5. On se sastoji od niza programa koji omogućuju rješavanje geotehničkih problema. Mi smo u ovom diplomskom radu koristili i prikazali rad u dva programa „Dizajn zagatne stijene“ i „Provjera zagatne stijene“. Programi su vrlo jednostavni za korištenje i međusobno su usklađeni.

Program „Dizajn zagatne stijene“ preporuča se za određivanje dubine temeljenja konstrukcije, dok se program „Provjera zagatne stijene“ preporučuje za modeliranje realnog ponašanja konstrukcije koristeći faze gradnje, kako bi se izračunale deformacije i pritisci na konstrukciju, što omogućuje provjeru stabilnosti unutarnjih sidara ili provjeru poprečnih presjeka (čelik, AB, drvo), te nosivost sidara

Literatura

[1] Noveiler, E. (1981): Mehanika tla i temeljenje građevina., Školska knjiga, Zagreb.

[2] Roje – Bonacci, T.(2005): Potporne građevne i građevne jame, Građevinsko arhitektonski fakultet u Splitu, Split.

[3] Ivandić, K., Bandić, M. i Soldo, B. (2010). Embedded retaining wall limit state analysis according to Eurocode 7. Tehnički vjesnik, 17 (3), 263-271. Preuzeto s https://hrcak.srce.hr/5963

[4] Soldo B. (2014): Geotehničko inženjerstvo, skripta, Sveučilište Sjever, Varaždin.

[5] Kvasnička P, Domitrović D. (2007.): Mehanika tla, interna skripta, Rudarsko-geološko- naftni Fakultet, Sveučilište Zagreb, Zagreb.

[6] Dugonjić Jovančević S., Matešić L. (2014.): Geotehničko inženjerstvo, interna skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.

[7] HRN EN 1997-1, Eurokod 7, Geotehničko projektiranje‑ 1. dio, Opća pravila (EN 1997-1:2004),

[8] HRN EN 1997-2, Eurokod 7, Geotehničko projektiranje ‑ 2. dio, Eurocode 7, Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla, (EN 1997-2:2007)

[9] GEO5 2020 Demo: Softverski paket za rješavanje geotehničkih problema – Programi „ Dizajn zagatne stijene” i “Provjera zagatne stijene”.

Sveučilište
Sjever

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Dejan Strmečki *(ime i prezime)* pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom Modeliranje zaštite građevne jame pomoću softverskog paketa GEO5 *(upisati naslov)* te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Dejan Strmečki
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnost i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Dejan Strmečki *(ime i prezime)* neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom Modeliranje zaštite građevne jame pomoću softverskog paketa GEO5 *(upisati naslov)* čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Dejan Strmečki
(vlastoručni potpis)