

2D i 3D proračun građevne jame

Belošević, Dora

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:046007>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Dora Belošević

2D i 3D proračun građevne jame

Diplomski rad

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Sveučilišni diplomski studij građevinarstva

Smjer: Urbano inženjerstvo

Podzemne građevine i tuneli

**Dora Belošević
JMBAG: 0114030149**

2D i 3D proračun građevne jame

Diplomski rad

Rijeka, srpanj 2022.

ZAHVALA

Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Sanji Dugonjić Jovančević i komentoru dr. sc. Mirku Grošiću na savjetima, smjernicama i uloženom vremenu prilikom izrade ovog rada.

Također, zahvaljujem kolegama Marku Šperandi i Damiru Vidoviću na stručnim savjetima prilikom izrade proračunskih modela u programskom paketu PLAXIS ustupljenom od strane Geotech d.o.o. Rijeka.

Zahvaljujem prijateljima i kolegama koji su studiranje učinili zabavnijim i lakšim.

Na kraju, posebna zahvala ide mojoj obitelji i mom Lazaru koji su mi pružili najveću podršku i bili vjetar u leđa.

IZJAVA

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

Ime i prezime

Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta „Unaprjeđenje modela stjecanja stručnih kompetencija učenjem uz rad kroz izradu diplomskog rada (GraDiS)“.

Voditelj projekta: izv. prof. dr. sc. Silvija Mrakovčić

Financijer projekta: Sveučilište u Rijeci - programska linija *A3 Praktične kompetencije za budućnost*

2D i 3D analiza građevne jame

Sažetak

Numeričko modeliranje u današnje vrijeme dobiva sve širu primjenu u geotehnici i u građevini općenito. Upotrebom mnogih numeričkih metoda (poput metode konačnih elemenata ili metode konačnih razlika) omogućeno je pojednostavljenje realnih geotehničkih situacija. Na pojednostavljenim, dvodimenzionalnim ili trodimenzionalnim modelima vrše se razni proračuni kojima se analizira ponašanje realnih modela. Ovakvom analizom omogućen je odabir optimalnih rješenja geotehničkih problema. U ovom radu prikazana je numerička analiza provedena na dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim modelima građevne jame locirane u Novigradu. Analize se vrše upotrebom metode konačnih elemenata za dva tipa iskopa, iskop u nagibu i vertikalni iskop (pilotsku stijenu) sa svim dodatnim ojačanjima. Za oba tipa iskopa izrađeni su 2D i 3D modeli na kojima se provode analiza sigurnosti i analiza naprezanja i deformacija, a dobiveni rezultati se međusobno uspoređuju.

Ključne riječi: numeričko modeliranje, metoda konačnih elemenata, građevna jama, iskop u nagibu, pilotska stijena

2D and 3D construction pit analysis

Abstract

Nowadays, numerical modelling has an extensive use in geotechnics and construction in general. By using many of the numerical methods (such as finite element method or finite difference method) it is possible to simplify real-life geotechnical problems. A variety of calculations can be made on simplified, two-dimensional and three-dimensional models. Those calculations are used to analyse behaviour and to choose the best solution for real-life geotechnical problems. This thesis presents numerical analysis conducted on two-dimensional and three-dimensional models of a construction pit located in Novigrad. Analyses are made by the use of finite element method (FEM) for two types of excavation, slope excavation and vertical excavation (pile wall) with additional strengthening elements. 2D and 3D models are made for both types of excavation. Stability analysis and stress-strain analysis are conducted on every model and the obtained results of conducted analyses are compared.

Key words: numerical modelling, finite element method, construction pit, slope excavation, pile wall

SADRŽAJ

POPIS TABLICA

POPIS SLIKA

1.	UVOD	1
2.	PODZEMNA GRADNJA	2
2.1.	Općenito o podzemnoj gradnji	2
2.2.	Vrste podzemnih građevina	3
2.3.	Građevne jame	4
3.	NUMERIČKI PRORAČUN GRAĐEVNIH JAMA	13
3.1.	PLAXIS kao software općenito	13
3.2.	PLAXIS 2D I 3D	15
4.	PRIMJER PROJEKTA – GRAĐEVNA JAMA ZA HOTEL BLU MARE U NOVIGRADU	17
4.1.	Hotel Blu Mare u Novigradu	17
4.2.	Geološke i geotehničke značajke lokacije	17
4.3.	Osiguranje građevne jame	22
5.	2D I 3D PRORAČUN U PLAXIS-U	27
5.1.	2D proračun u PLAXIS-u	28
5.1.1.	Iskop u nagibu 2V:1H	34
5.1.2.	Pilotska stijena	36
5.2.	3D proračun u PLAXIS-u	38
5.2.1.	Iskop u nagibu 2V:1H	38
5.2.2.	Pilotska stijena	40
6.	PRIKAZ I USPOREDBA REZULTATA	45
6.1.	Rezultati dobiveni 2D proračunom	45
6.1.1.	Iskop u nagibu 2V:1H	45
6.1.2.	Pilotska stijena – Slučaj 1	47
6.1.3.	Pilotska stijena – Slučaj 2	49
6.1.4.	Dimenzioniranje pilota	52
6.2.	Rezultati dobiveni 3D proračunom	62
6.2.1.	Iskop u nagibu 2V:1H	62
6.2.2.	Vertikalni iskop	64
6.3.	Usporedba rezultata 2D i 3D analize	68
7.	ZAKLJUČAK	70

POPIS TABLICA

Tablica 1: Podjela podzemnih građevina s obzirom na namjenu [3]	3
Tablica 2: Podjela tunela s obzirom na namjenu [3]	3
Tablica 3 : Zahtijevane značajke betona za pilote [1]	26
Tablica 4: Značajke mikropilota [1]	26
Tablica 5: Značajke sidara [1]	26
Tablica 6: Vrijednosti parametara tla – crvenica [1]	31
Tablica 7: Vrijednosti parametara stijene – vapnenac [1]	32
Tablica 8: Parametri elementa – mikropilot [1]	33
Tablica 9: Parametri elementa - susjedni objekt [1]	33
Tablica 10: Parametri horizontalne grede UPN 140 [1]	42
Tablica 11: Parametri naglavne grede UPN 160 [1]	42
Tablica 12: Parametri samobušivog sidra (Anchor element) [1]	42
Tablica 13: Parametri samobušivog sidra (Embedded beam element) [1]	43
Tablica 14: Parametri pilota [1]	43
Tablica 15: Proračunske vrijednosti parametara tla i stijene [1]	45
Tablica 16: Karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene [1]	46
Tablica 17: Vrijednosti GSU i GSN dobivene proračunom	55
Tablica 18: Vrijednosti GSU i GSN dobivene proračunom	60
Tablica 19: Proračunske vrijednosti parametara tla i stijene [1]	62
Tablica 20: Karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene [1]	63
Tablica 21: Usporedba rezultata proračuna 2D i 3D modela iskopa u nagibu 2V:1H	68
Tablica 22: Usporedba rezultata proračuna 2D i 3D modela pilotske stijene	68

POPIS SLIKA

Slika 1: Osiguranje građevne jame mlaznim betonom i štapnim sidrima [8]	5
Slika 2: Preklapanje čeličnih talpi	6
Slika 3: Čelične talpe [10]	6
Slika 4: Pilotska stijena s pilotima na razmaku "a"	7
Slika 5: Pilotska stijena s preklopljenim pilotima	7
Slika 6: Postupak izvođenja armiranobetonske dijafragme [13]	8
Slika 7: Osiguranje iskopa kombinacijom štapnih sidara s mrežom i mlaznim betonom [16] ..	9
Slika 8: Postupak izvođenja mlazno injektiranih stupnjaka [15]	10
Slika 9: Shema iskopa građevne jame [16]	11
Slika 10: Osiguranje građevne jame čeličnim talpama i razuporama [17]	12
Slika 11: Mreža konačnih elemenata na modelu pilotske stijene	14
Slika 12: Iskop u nagibu 2V:1H - model izrađen u PLAXIS-u 2D	16
Slika 13: Iskop u nagibu 2V:1H - model izrađen u PLAXIS-u 3D	16
Slika 14: Istražni radovi na lokalitetu	18
Slika 15: Pružanje slojeva tla i pilotska stijena (Zona II)	19
Slika 16: Pojava podzemne vode pri iskopu građevne jame [23]	20
Slika 17: Pojava podzemne vode u jami te blizina morske obale [23]	20
Slika 18: Iskopana crvenica na lokalitetu	21
Slika 19: Zone osiguranja građevne jame [23]	22
Slika 20: Shematski prikaz osiguranja građevne jame	22
Slika 21: UPN profili postavljeni na mikropilote (zona II)	24
Slika 22: Samobušiva sidra u pilotskoj stijeni (zona II)	25
Slika 23: Poprečni presjek mikropilota pilotske stijene	25
Slika 24: Zone obuhvata proračuna pilotske stijene i iskopa u nagibu 2V:1H	27
Slika 25: Zone obuhvata proračuna pilotske stijene i iskopa u nagibu 2V:1H	27
Slika 26: Detalj razvijenog pogleda pilotske stijene	29
Slika 27: Mikropiloti na kojima se provodi 2D proračun vertikalnog iskopa (detalj razvijenog pogleda)	30
Slika 28: 2D model iskopa 2V:1H u In-situ fazi	34
Slika 29: 2D model iskopa u fazi Iskopa 2V:1H	35
Slika 30: 2D model vertikalnog iskopa s realnim položajem stijene u In-situ fazi	36

Slika 31: 2D model vertikalnog iskopa s realnim položajem stijene u fazi Vertikalnog iskopa	37
Slika 32: 3D model iskopa u nagibu 2V:1H za In-situ fazu.....	38
Slika 33: 3D model iskopa u nagibu 2V:1H za fazu Iskopa 2V:1H	39
Slika 34: 3D model vertikalnog iskopa za In-situ fazu	40
Slika 35: 3D model vertikalnog iskopa za fazu Vertikalnog iskopa	41
Slika 36: 3D model pilotske stijene s ugrađenim elementima ojačanja	44
Slika 37: Klizna ploha modela iskopa u nagibu 2V:1H	46
Slika 38: Ukupni pomaci modela iskopa u nagibu 2V:1H.....	47
Slika 39: Klizna ploha modela vertikalnog iskopa s povoljnom razinom stijene	48
Slika 40: Horizontalni pomaci modela vertikalnog iskopa s povoljnom razinom stijene.....	49
Slika 41: Klizna ploha za model vertikalnog iskopa s realnim položajem stijene	50
Slika 42: Horizontalni pomaci za model vertikalnog iskopa s realnim položajem stijene	51
Slika 43: Momenti savijanja M za karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene (GSU).....	52
Slika 44: Momenti savijanja M za proračunske vrijednosti parametara tla i stijene (GSN)....	53
Slika 45: Poprečne sile Q za karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene (GSU)	54
Slika 46: Poprečne sile Q za proračunske vrijednosti parametara tla i stijene (GSN)	54
Slika 47: Momenti savijanja M za proračun s karakterističnim vrijednostima parametara tla i stijene (GSU).....	57
Slika 48: Momenti savijanja M za proračun s proračunskim vrijednostima parametara tla i stijene (GSN).....	58
Slika 49: Poprečne sile Q za karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene (GSU)	59
Slika 50: Poprečne sile Q za proračunske vrijednosti parametara tla i stijene (GSN)	59
Slika 51: Klizna ploha modela iskopa u nagibu 2V:1H	63
Slika 52: Ukupni pomaci modela iskopa u nagibu 2V:1H.....	64
Slika 53: Klizna ploha na poprečnom profilu	65
Slika 54: Klizna ploha na poprečnom profilu	66
Slika 55: Horizontalni pomaci modela vertikalnog iskopa	67
Slika 56: Horizontalni pomaci modela vertikalnog iskopa	67

1. UVOD

Podzemne građevine u današnje vrijeme doživljavaju sve širu primjenu, a najčešće je to zbog manjka gradilišnog prostora na površini. Iako su vrlo dobra alternativa klasičnoj, nadzemnoj gradnji, njihovo projektiranje i izvođenje predstavljaju izazov zbog problema karakterističnih podzemnoj izgradnji. Od urušavanja tla do prodora podzemne vode, sve je probleme potrebno uzeti u obzir i odabrati optimalno rješenje koje će biti sigurno tijekom izvođenja i eksploatacije. Sami podzemni objekti najčešće se izvode pod zaštitom građevnih jama, podzemnih geotehničkih konstrukcija čije se izvođenje i osiguranje projektiraju zasebnim geotehničkim projektom. Način osiguranja građevne jame ovisi o njenom obliku, vrsti iskopa, uvjetima na terenu i slično. Elementi koji utječu na ponašanje građevne jame, a samim time i na odabir načina njenog osiguranja, mogu se modelirati i analizirati raznim programima. Numeričkom analizom u apecijaliziranim programima dobiva se uvid u ponašanje geotehničkih konstrukcija na pojednostavljenim 2D i 3D modelima. Upravo je tema ovog rada usporedba rezultata dobivenih proračunima na 2D i 3D modelima građevne jame [1], provedenih u jednom od programskih paketa za numeričko modeliranje u geotehnici, PLAXIS-u.

Rad je podijeljen u pet dijelova. U prvom se dijelu (Poglavlje 2) radi općenito o podzemnoj gradnji, građevnim jamama i oblicima njihove zaštite. U Poglavlju 3 predstavljeno je numeričko modeliranje u geotehnici te je pobliže objašnjen način na koji se geotehnički problemi rješavaju u predmetnom programu, PLAXIS-u. Poglavljem 4 obuhvaćen je konkretan projekt [1] u kojem su detaljno opisani svi koraci koji su potrebni za projektiranje građevne jame. Sve karakteristike i geometrija građevne jame, koji su služili kao ulazni podaci za proračun u PLAXIS-u, preuzeti su iz samog projekta [1] te obrađeni u Poglavlju 5. Numeričkom analizom u PLAXIS-u obuhvaćene su 2D i 3D analiza građevne jame iz projekta [1], nakon čega su njihovi rezultati prikazani i uspoređeni u Poglavlju 6. Usporedba je napravljena kako bi se vidjelo koliko se rezultati 2D i 3D analize istog fizikalnog modela podudaraju ili ne podudaraju te koliko sam model i njegova kompleksnost utječu na konačne rezultate.

2. PODZEMNA GRADNJA

2.1. Općenito o podzemnoj gradnji

Prve asocijacije pri spomenu termina „podzemni objekt“ najčešće su tuneli, podzemne garaže i slični objekti koje ljudi vide i koriste u svakodnevici. Međutim, podzemna gradnja je do danas napredovala u toj mjeri da se skoro pa svaka vrsta objekta može smjestiti ispod površine zemlje, jednim svojim dijelom ili u potpunosti. Od stambenih i poslovnih objekata pa sve do prometnica i ostale infrastrukture, sve je moguće „preseliti“ pod zemlju. No, gdje uopće počinje potreba za podzemnom izgradnjom? Od samih početaka povijesti, ljudi su odabirali podzemlje kao mjesto za stanovanje i zaštitu. Počevši s prirodno nastalim špiljama, ubrzo je počela namjerna izgradnja podzemnih objekata kako za život, tako i za prve početke industrije (rudarstvo, navodnjavanje i slično) [2]. Sve brži napredak tehnologije i znanja omogućili su ljudima da šire granice u kojima je moguće izvesti neki podzemni objekt; visinu, širinu, duljinu, poprečni presjek, visinu nadsloja i tome slično. Podzemna gradnja dolazi sve više u primjenu zbog nedostatka prostora na površini zemlje, pogotovo u urbanim sredinama. Upravo se u ovakvim sredinama javljaju problemi s kojima se suočava geotehnička struka jer su uvjeti za građenje u podzemlju u urbanim sredinama puno stroži. Uz to, možda najveći izazov podzemne gradnje, kao i gradnje općenito, je nepredvidivost samog tla i stijene. Istražnim radovima moguće je dobiti približnu sliku terena, no tek početkom gradnje, praćenjem i dodatnim istražnim radovima može dobiti bolji uvid u geotehnički profil i geotehničke uvjete prisutne na lokaciji. Podzemna gradnja nameće se kao sve bolja alternativa tradicionalnoj gradnji, unatoč mišljenju da je mnogo skuplja i, u nekim slučajevima, njezino korištenje nosi veći rizik. Podzemnom izgradnjom iskorištava se prostor u podzemlju koji, u usporedbi s tradicionalnom nadzemnom gradnjom, dovodi do očuvanja energije, mogućnosti izvedbe složenijih projekata, dužeg vijeka trajanja građevina i ekološki prihvatljivijih rješenja. Ono što je uz iskorištenost i nedostatak prostora najveći argument za podzemnu gradnju jest smještanje infrastrukture podzemno radi korištenja nadzemnog prostora za parkove, trgove, urbane sredine drugačijih sadržaja i namjene [3].

2.2. Vrste podzemnih građevina

Podzemni objekti se mogu svrstati u dvije kategorije: podzemne građevine i tunele. Razlika je primarno u dimenzijama. Kod tunela, koji su svrstani u linijske objekte, njihova je duljina značajno veća od njihove širine i visine, dok se kod podzemnih građevina te dimenzije međusobno ne razlikuju u tom razmjeru [2]. U Tablicama 1 i 2 prikazana je podjela podzemnih građevina i tunela u kategorije ovisno o njihovoj namjeni [3].

Tablica 1: Podjela podzemnih građevina s obzirom na namjenu [3]

PODJELA PODZEMNIH GRAĐEVINA S OBZIROM NA NAMJENU
Za skladištenje radioaktivnog otpada
Skloništa, garaže, skladišta, sportski i kulturni sadržaji
Električne strojarne
Skladištenje plina i tekućina

Tablica 2: Podjela tunela s obzirom na namjenu [3]

PODJELA TUNELA S OBZIROM NA NAMJENU		
PROMETNI	HIDROTEHNIČKI	KOMUNALNI
Cestovni	Vodovodni	Električni vodovi
Pješački	Melioracijski	Telefonski vodovi
Brodski	Kanalizacijski	Plinovodi
Željeznički	U sklopu hidrocentrala	Toplovodi
Tuneli mješovite namjene		

Izvođenje podzemnih etaža i građevina te dubokih temelja zahtijeva izvedbu radova u dubljim dijelovima tla i stijenske mase. Zbog ograničenog prostora na površini, pogotovo u urbaniziranim područjima, građevne jame nameću se kao idealno rješenje za navedene radove. Zbog svog velikog raspona u vidu dubine, primjenjuju se i kao plitki iskopi (npr. za temelje) te duboki iskopi (npr. za podzemne objekte). Ovisno o tipu tla i samoj dubini, mijenja se i način osiguravanja samih jama. Osiguravanjem i zaštitom građevnih jama omogućava se sigurno izvođenje radova na budućem objektu. Uz siguran rad, pravilnom zaštitom građevne jame,

spriječava se i eventualno oštećenje temelja i konstrukcija susjednih objekata te sigurna gradnja građevinskog objekta unutar jame (lažni tuneli, stambeni i drugi objekti).

2.3. Građevne jame

Građevna jama kao geotehnička konstrukcija, služi primarno kao privremeni prostor u kojemu se izvodi temeljenje buduće građevine. Osim temeljenja, služi i u svrhu izvedbe podzemne građevine za koju je projektirana. Sve češće se građevne jame izvode tako da nakon gradnje ostaju trajan dio same građevine [4]. Kao što je već spomenuto u prethodnom poglavlju, gradnja u urbanim sredinama predstavlja niz izazova i problema. Nedostatak prostora za građenje na površini rezultira „spuštanjem“ etaža građevina ili pak izgradnjom kompletnih objekata ispod razine zemlje. Ono što se nameće kao specifičan problem gradnje u urbanim sredinama je izvođenje objekata, a samim time i građevnih jama, uz postojeću infrastrukturu, često povijesnog značaja. U ovakvim slučajevima vrlo je bitno pravilno izvođenje i osiguranje same jame kako ne bi došlo do oštećenja objekata u njenoj neposrednoj blizini. Iz tog razloga bitno je već u fazi projektiranja pretpostaviti moguće utjecaje i ponašanje građevne jame [5]. Ovisno o nizu faktora poput vrste tla, dubine i oblika jame, prisutnosti podzemne vode te raspoloživosti okolnog prostora, određuje se način na koji će se zaštititi građevna jama [6]. Neki od klasičnih načina osiguranja građevne jame koji se izvode u praksi su sljedeći:

a) *Osiguranje mlaznim betonom*

Mlazni beton, odnosno *torkret*, izvodi se na način da se beton posebne recepture nanosi na podlogu kompresorskim pumpama, pri čemu se razlikuju suhi i mokri postupak ugradnje. Mlazni beton se najčešće koristi za zaštitu kosih ili vertikalnih zemljanih podloga [7]. Pri osiguranju pokosa u kojima prevladava sitnozrnati materijal, često se koristi u kombinaciji sa zaštitnim mrežama s utezima. U tom se slučaju mlazni beton ugrađuje kao zaštitni sloj debljine od 3 do 5 cm. Na lokacijama na kojima se očekuje nestabilnost i ispadanje većih blokova, mlazni se beton izvodi u kombinaciji sa štapnim sidrima i armaturnom mrežom. Tada se nanosi u debljini od 10 do 15 cm, a duljina i količina sidara projektira se ovisno o kvaliteti i stanju stijenske mase [8]. Osiguranje građevne jame kombinacijom mlaznog betona i štapnih sidara prikazano je na Slici 1.

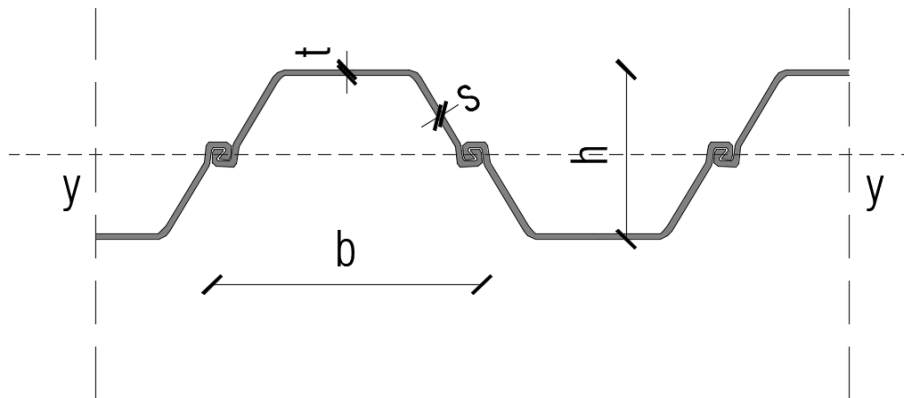


Slika 1: Osiguranje građevne jame mlaznim betonom i štapnim sidrima [9]

Pri izvedbi pilotskih stijena, kao jednog od načina osiguranja jama, mlazni beton se može koristiti kao dodatna zaštita. Pilotska stijena s pilotima na razmaku (objašnjeno pod „c““) obično se izvodi u tlima u kojima nema opasnosti od urušavanja materijala između pilota. Međutim, ukoliko je potrebno, na izvedenu pilotsku stijenu se može ugraditi dodatni sloj mlaznog betona s ciljem dodatne stabilizacije materijala [10] Kako bi se spriječilo nastajanje hidrostatskih tlakova između betona i stijenskog materijala, potrebno je na pravilan način postaviti drenažni sustav.

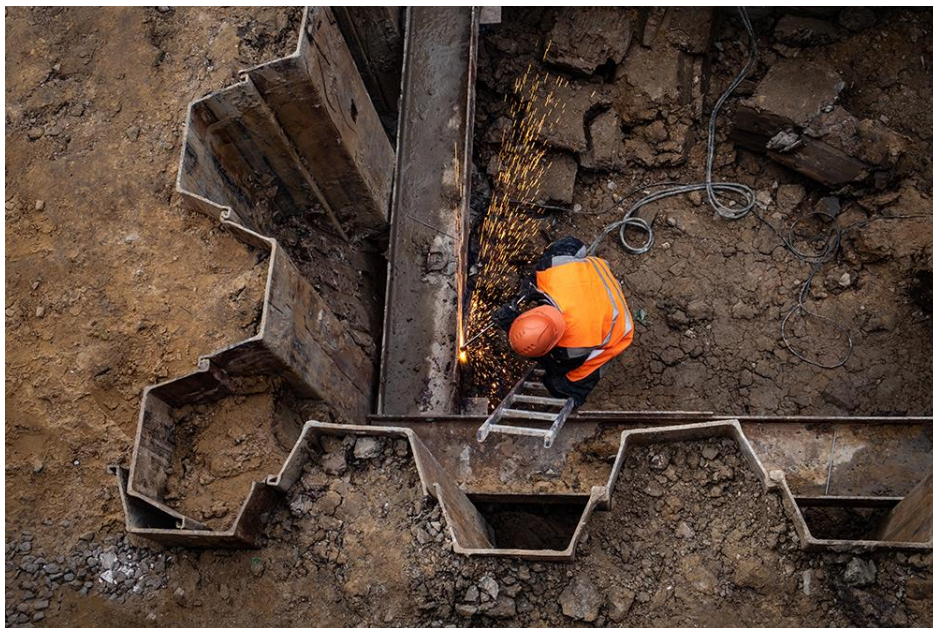
b) Osiguranje čeličnim talpama

Čelične talpe, poznate kao i *Larssenove platice*, koriste se za jame manjih ili srednjih dubina. Jedan karakterističan poprečni presjek čelične talpe prikazan je na Slici 2, na kojoj se vidi njena širina „b“, te debljine čeonih i bočnih stijenki „t“ i „s“.



Slika 2: Preklapanje čeličnih talpi

Pogodne su za sitnozrnati homogeni materijal ili za područja s visokom saturacijom vode jer međusobnim brtvljenjem mogu osigurati vodonepropusnost. Kod krutih gлина ili prahova, talpe se zabijaju u tlo, dok se u krupnozrnata tla vibriraju. Na Slici 3 prikazane su talpe ugrađene u tlu.

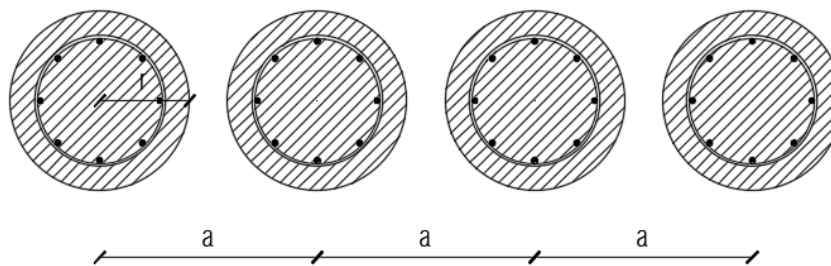


Slika 3: Čelične talpe [11]

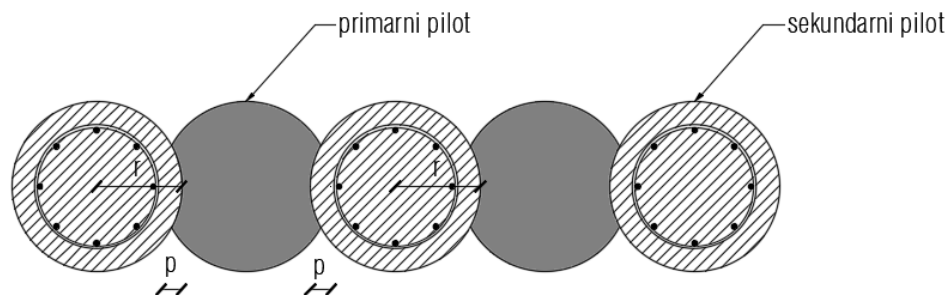
U slučajevima većih dubina građevnih jama, talpe se mogu dodatno osigurati i sidrima. Nakon završetka radova čelične se talpe vade iz tla, što je prednost jer se mogu iskoristiti pri izvedbi budućih projekata [12].

c) *Osiguranje pilotskom stijenom*

Piloti su tip dubokih temelja čija je duljina znatno veća od njihovog poprečnog presjeka, a koriste se kako bi se horizontalna i vertikalna opterećenja prenijela u duboke nosive slojeve temeljnog tla. Pilotske stijene izvode se kao privremene ili trajne potporne konstrukcije u temeljnom tlu, a izvode se tako da se prvo u tlu izbuši rupa promjera budućeg pilota [10]. Potom se u rupu ugrađuje potrebna armatura, nakon čega se ugrađuje beton *kontraktor* postupkom. Piloti mogu biti izvedeni tako da su međusobno udaljeni za određeni razmak „a“ (vidljivo na Slici 4) ili se mogu izvoditi na način da se preklapaju. Potonji način izvodi se tako da se prvo izvode primarni piloti koji se ne armiraju, a zatim se izvode sekundarni piloti koji se armiraju. Primarni i sekundarni piloti međusobno se preklapaju na određenoj širini „p“ (vidljivo na Slici 5). U slučaju prikazanom na Slici 5 pilotska stijena je nepropusna.



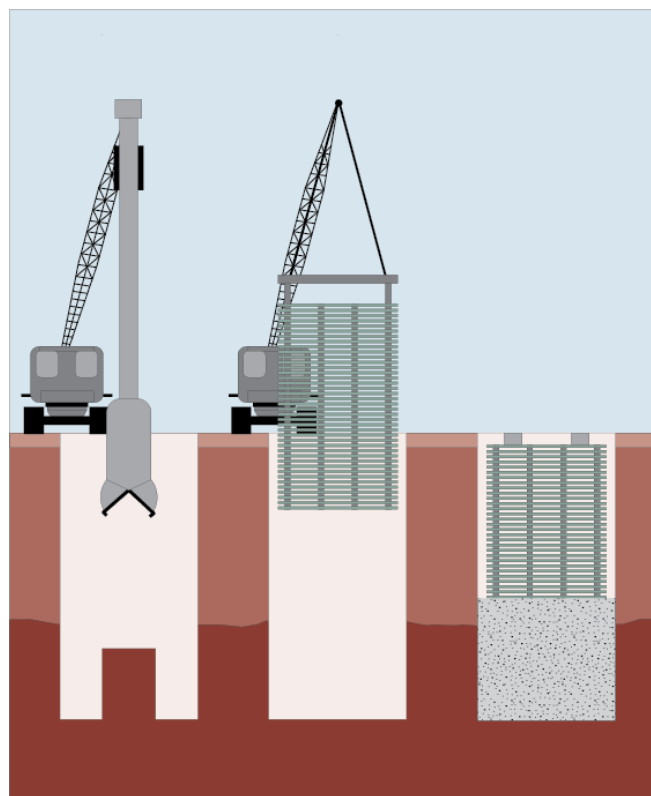
Slika 4: Pilotska stijena s pilotima na razmaku "a"



Slika 5: Pilotska stijena s preklapljenim pilotima

d) Osiguranje armiranobetonskom dijafragmom

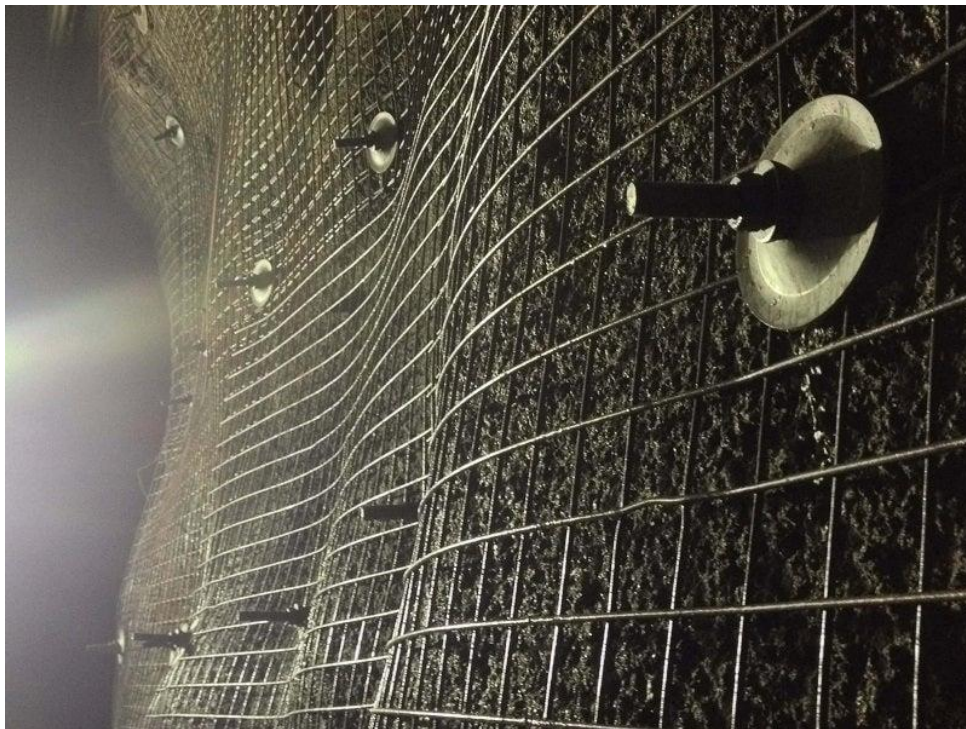
Armiranobetonska dijafragma tip je zaštite građevnih jama većih dubina. Uobičajena debljina dijafragme kreće se od 0,5 do 1,2 m. Koristi se pri zaštiti vertikalnih iskopa, najčešće u urbanim sredinama, pri nedostatnom gradilišnom prostoru ili visokoj razini podzemne vode. U odnosu na prethodno navedene tipove osiguranja, u ovom slučaju osiguranje građevne jame izvodi se prije njenog samog iskopa. Armiranobetonske dijafragme izvode se u panelima. Prvo se izvode „neparni“, a potom „parni“ paneli. Iskop panela izvodi se mehaničkom grabilicom, nakon čega se iskop puni isplakom (bentonit) kako ne bi došlo do erozije iskopanog materijala. U iskop se potom ugrađuju armaturni koševi nakon čega se izvodi betoniranje panela *kontraktor* postupkom. Nakon što „neparni“ paneli dosegnu potrebnu čvrstoću, isti se postupak ponavlja s „parnim“ panelima koji naliježu na „neparne“ te zajedno tvore kontinuirani armiranobetonski zid. Nakon kompletne izvedbe panela, oni se međusobno povezuju naglavnom gredom nakon čega je moguće krenuti s iskopom građevne jame. Postupak izvedbe armiranobetonske dijafragme prikazan je na Slici 6. [13]



Slika 6: Postupak izvođenja armiranobetonske dijafragme [14]

e) Osiguranje štapnim sidrima

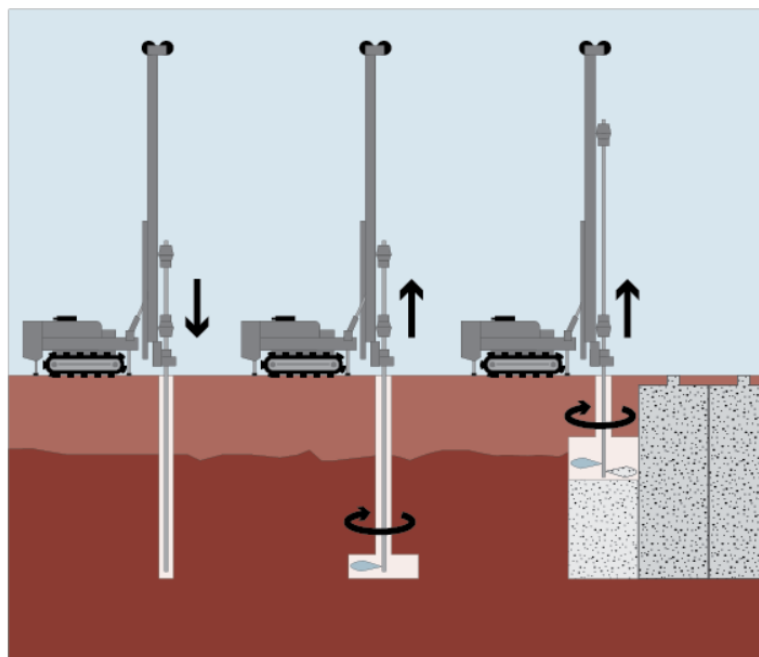
Štapna sidra su jedan od osnovnih sustava ojačanja stijenske mase, a koriste se i u podzemnim i u otvorenim iskopima. Sidra se općenito dijele na *aktivna* i *pasivna*. Kod aktivnih sidara unosi se sila prednapinjanja pa se aktivira samo sidro, dok se kod pasivnih prednapinjanje ne provodi već se ona aktiviraju pomacima stijenske mase. Osim za osiguranje građevnih jama, štapna sidra koriste se i za osiguranje pokosa, u tunelogradnji i rudarstvu. Štapna sidra, kao način osiguranja stijenske mase, koriste se iz niza razloga od kojih su najčešći: moguća upotreba za bilo koji oblik iskopa, jednostavnost uporabe i u potpunosti mehanizirana ugradnja [15]. Ovisno o kvaliteti stijenske mase, štapna sidra ugrađuju se različitih duljina te na različitim vertikalnim i horizontalnim rasterima, stoga se može zaključiti da je pomoću štapnih sidara vrlo lako mijenjati intenzitet ojačanja stijenske mase [15]. Isto tako, štapna sidra moguće je upotrijebiti u kombinaciji s nekim od drugih tipova osiguranja, primjerice, s mlaznim betonom, mrežama ili podgradnim AB konstrukcijama. Na Slici 7 prikazano je osiguranje iskopa u kojem su kombinirana sidra s mrežom i mlaznim betonom. Štapna sidra razlikuju se prema načinu sidrenja, pa se dijele na: *mehanički usidrena štapna sidra*, *injektirana štapna sidra* i *pletena sidra od čeličnih niti* te *trenjem usidrena štapna sidra*. Najčešće upotrebljavan tip sidara u svijetu, i u građevinarstvu i u rudarstvu, su injektirana štapna sidra.



Slika 7: Osiguranje iskopa kombinacijom štapnih sidara s mrežom i mlaznim betonom [16]

f) *Osiguranje mlazno injektiranim stupnjacima*

Mlazno injektiranje, poznato kao i Jet grouting, metoda je poboljšanja tla, a koristi se za pliće građevne jame. Ovim postupkom se određeni volumen tla pretvara u zemljani mort tako da se visokoenergetskim mlazom tekućine razbija postojeća struktura tla [17]. Za mlazno injektiranje postoje četiri postupka izvedbe, a svakim od njih dobiva se različit promjer samih stupnjaka. Odabir metode ovisi o vrsti tla u kojoj se izvode radovi. Metodom **jednofluidnog** injektiranja nastaju stupovi promjera 0,6 - 1,2 m, a sama metoda pogodna je za šljunke, pijesak i prahove. **Dvofluidno** injektiranje pogodno je za zbijena tla, u kojima nastaju stupovi promjera do 1 m, i za rahla tla, u kojima je promjer stupova do 1,8 m. Najefikasnija metoda za koherentna tla je **trofluidno** injektiranje, kojim nastaju najveći promjeri stupova, od 0,9 do 1,5 m. **Super** injektiranje slično je dvofluidnom postupku. Razlika je što sporom rotacijom alata kod super injektiranja nastaju stupovi vrlo velikih promjera, od 3 do 5 m. Kao što i sami nazivi metoda injektiranja sugeriraju, jednofluidnim postupkom u tlo se injektira samo *injekcijska smjesa*, dvofluidnim i super postupkom ugrađuju se i *injekcijska smjesa i zrak*, dok se trofluidnim injektiranjem u tlo injektiraju *injekcijska smjesa, zrak i voda*. [17]

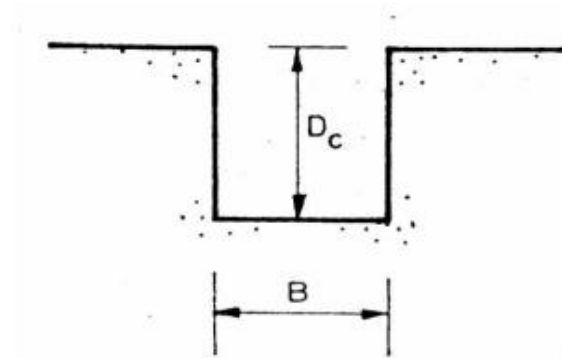


Slika 8: Postupak izvođenja mlazno injektiranih stupnjaka [18]

Sam postupak izvedbe mlazno injektiranih stupnjaka prikazan je na Slici 8, a sastoji se od 3 koraka: u tlu se prvo izvodi bušenje, nakon čega se struktura tla razara i zatim slijedi injektiranje jednim od četiriju prethodno navedenih postupaka [17].

g) *Osiguranje razuporama*

Ovisno o dubini iskopa, građevne jame dijele se na plitke i duboke jame. Kritična dubina D_c (Slika 9), odnosno, dubina do koje je moguće kopati bez razupora definirana je kohezijom, jediničnom težinom tla te koeficijentom aktivnog pritiska tla [19].



Slika 9: Shema iskopa građevne jame [19]

Kritična dubina tla D_c definirana je formulom:

$$D_c = \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot \sqrt{K_a}}$$

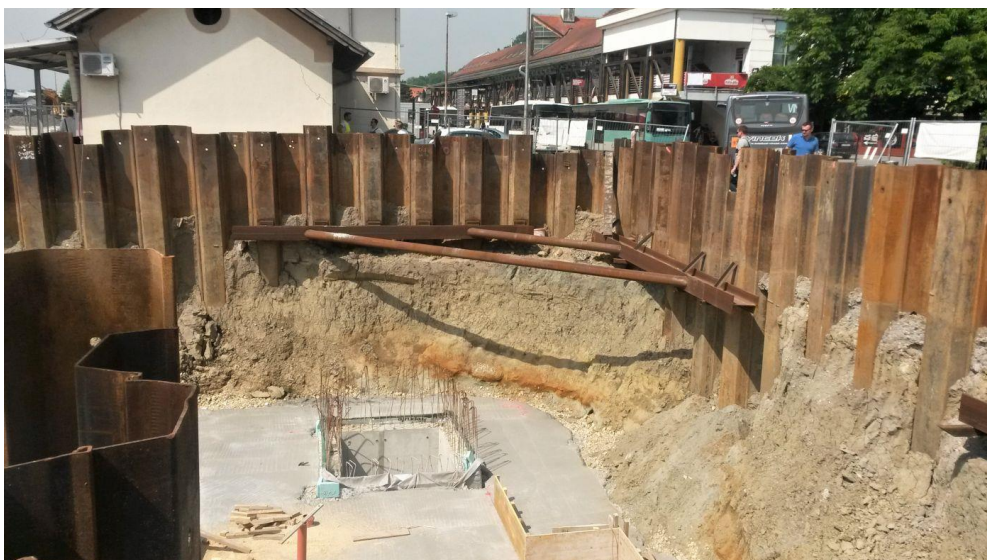
gdje je: D_c = kritična dubina iskopa

c = kohezija

γ = jedinična težina tla

K_a = koeficijent aktivnog pritiska tla.

Terzaghi i Peck 1967 odredili su kritičnu dubinu koja dijeli plitke od dubokih iskopa, D_c . Iz toga slijedi da se građevne jame dubine do one kritične mogu kopati bez razupore, uz iznimku iskopa u glinovitim tlima gdje dubina iskopa bez razupore može biti dvostruko veća od kritične. Razupore se najčešće koriste u slučajevima osiguranja građevnih jama dijafragmama, pilotskim stijenama i čeličnim talpama. Najčešće su drvene ili metalne, a postavljaju se između dvije nasuprotne ili susjedne stijenke građevne jame, kao što je prikazano na Slici 10.



Slika 10: Osiguranje građevne jame čeličnim talpama i razuporama [20]

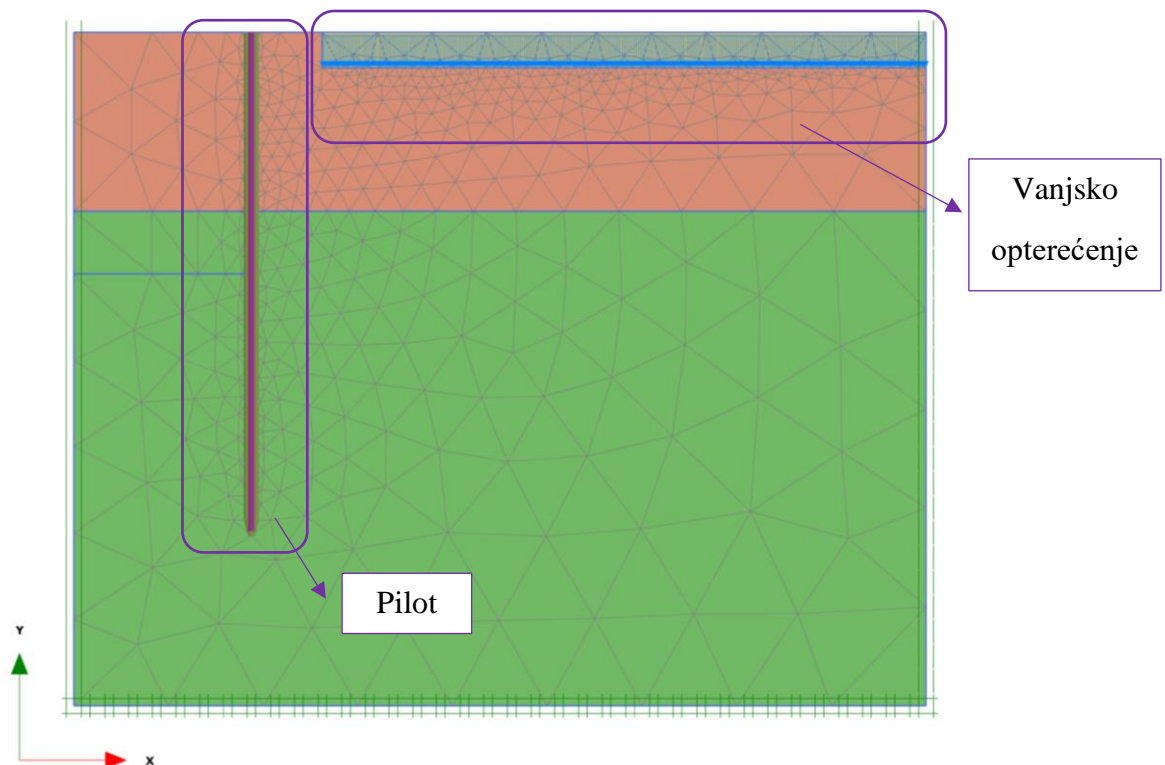
3. NUMERIČKI PRORAČUN GRAĐEVNIH JAMA

Građevnu jamu, privremenu ili trajnu, potrebno je proračunati kako bi se odabralo optimalno rješenje u vidu njenog osiguranja. Geotehničkim istražnim radovima i inženjerskogeološkim radovima dobivaju se podaci s terena na temelju kojih se izrađuje proračunski model. Na modelu se tada vrši proračun, odnosno, *analiza stabilnosti* i *analiza naprezanja i deformacija* za odabrane situacije. Analizom stabilnosti dobivaju se podaci o globalnom *faktoru sigurnosti* te izgledu *klizne plohe* modela. Analizom naprezanja i deformacija dobivaju se podaci o *pomacima*, odnosno, deformacijama modela. U slučajevima analize trajnih potpornih konstrukcija, također se provodi i proračun potresne otpornosti. Sam proračun moguće je provoditi na *dvodimenzionalnim* ili *trodimenzionalnim* modelima. Dvodimenzionalna (2D) pretpostavka ravninskog stanja naprezanja jest da se presjek nastavlja u beskonačnost duž osi okomite na presjek koji se proračunava. Trodimenzionalni (3D) pristup pruža mogućnost preciznije izrade modela na kojem se mogu prikazati promjene geometrije i geoloških slojeva te dodatna opterećenja. Većina programa koja se bavi proračunom ne samo građevnih jama, već geotehničkih problema općenito, temelji se na dvodimenzionalnom modeliranju. Analize se provode upotrebom *metode konačnih elemenata* ili *metode konačnih razlika* te imaju široku primjenu; od proračuna dubokih i plitkih temelja, pa sve do proračuna tunela i potpornih konstrukcija. Neki od programa za geotehničke proračune koji danas imaju široku uporabu su FLAC, GeoStudio, GEO5, Rocscience i **PLAXIS**, koji je predmet ovog diplomskog rada.

3.1. PLAXIS kao software općenito

1970-ih godina u Nizozemskoj provedena su istraživanja o primjeni metode konačnih elemenata i konstitutivnih modela u geotehnici. Na upit nizozemskog Ministarstva javnih poslova istraživanja su provedena od strane profesora i studenata doktorskih studija Tehničkog Sveučilišta u Delftu, a samo istraživanje sastojalo se od predviđanja mogućih pomaka nizozemske brane „Oosterschelde“ koja je predstavljala ključnu ulogu u zaštiti od poplava. Istraživanja su rezultirala kodom kojim je omogućena provedba elasto-plastičnih proračuna ravninskih naprezanja na elementima visokog reda. Daljnjom nadogradnjom koda omogućeno je rješavanje aksijalno simetričnih problema. U ovoj fazi razvitka koda je prvi put upotrijebljen naziv „PLAXIS“ koji je skraćenica za engleski termin „Plasticity Axis-Symmetry“. 1986. godina bila je prekretnica za PLAXIS jer je nizozemsko Ministarstvo javnih poslova u suradnji s Tehničkim Sveučilištem u Delftu pokrenulo program s ciljem promoviranja upotrebe **Metode konačnih elemenata (MKE)** u geotehnici, nakon čega PLAXIS doživljava sve širu upotrebu.

Svaka fizikalna pojava prisutna u prirodi, može se izraziti putem *rubnih uvjeta* i *pripadajućih matematičkih jednadžbi*. Matematički se MKE može objasniti kao numerička metoda kojom se rješava skup povezanih diferencijalnih jednadžbi. Inženjerski, MKE jest numerička metoda kojom se rješava skup povezanih diferencijalnih jednadžbi dobivenih aproksimiranjem nepoznatih varijabli kontinuiranog područja skupom nepoznatih varijabli u konačnom broju diskretnih točaka, odnosno, *čvorova* tog polja [21]. Osnovni korak jest diskretizacija područja koje se proračunava, a sama diskretizacija izvodi se podjelom modela na mrežu konačnih elemenata. U odnosu na stvarno ponašanje proračunske konstrukcije, u MKE dolazi do pojave *pogreške modela* i *pogreške diskretizacije*. Pogreške modela mogu se ukloniti izradom preciznijeg i kvalitetnijeg proračunskog modela, dok se pogreške diskretizacije eliminiraju postavljanjem kvalitetnije, finije, gušće mreže konačnih elemenata [21]. Na Slici 11 prikazan je primjer mreže konačnih elemenata (izrađena u PLAXIS 2D) na primjeru pilotske stijene. Vidljivo je kako je mreža modela srednje gustoće, uz dodatno progušćenje uz kritične elemente, u ovom slučaju pilot i vanjsko opterećenje.

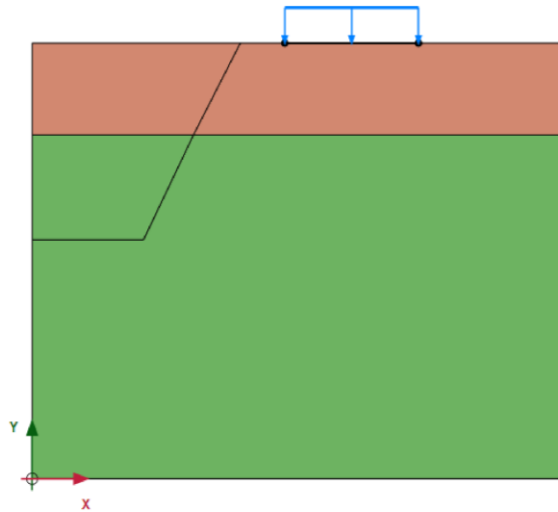


Slika 11: Mreža konačnih elemenata na modelu pilotske stijene

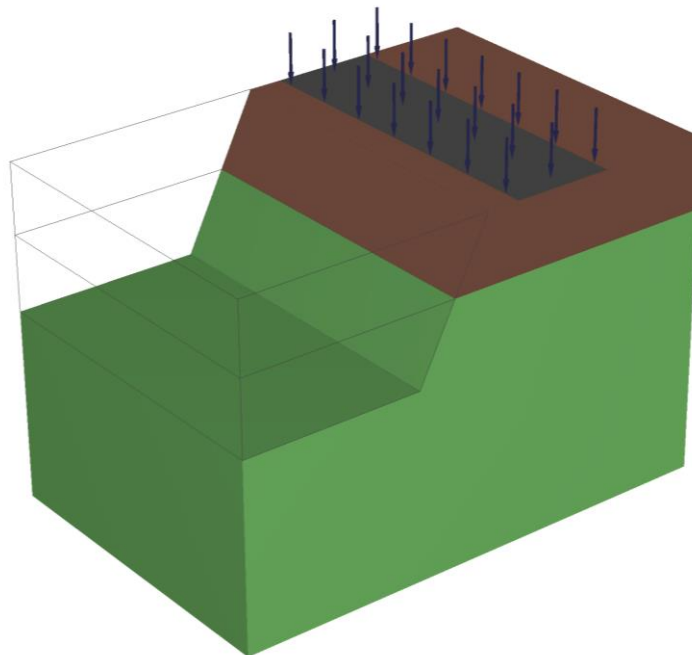
3.2. PLAXIS 2D I 3D

PLAXIS 2D i 3D dva su programa za provedbu proračuna na dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim modelima geotehničkih problema. U oba programa moguće je provesti analize naprezanja i deformacija, analize stabilnosti, proračune potresne otpornosti i sl. putem metode konačnih elemenata (MKE). Prvi korak izrade proračunskog modela u PLAXIS-u je postavljanje njegove geometrije. U 2D verziji geometrija proračunskog modela se postavlja putem linija, točaka i poligona u rubrici **Structures**. Geometrija se postavlja putem x i y-osi, a pretpostavka jest da se model nastavlja u beskonačnost duž osi okomite na x-y ravninu. U PLAXIS-u 3D geometrija modela postavlja se preko početne bušotine (**borehole**) u rubrici **Soil**, nakon čega je potrebno odrediti duljinu, visinu i širinu samog modela. Nakon zadane geometrije, u obje verzije PLAXIS-a slijedeći je korak zadavanje materijalnih svojstava putem rubrike **Materials**. Svaki od elemenata modela moguće je zadati preko neke od opcija koje PLAXIS 2D i 3D nude. Primjerice, elementi tla i stijene zadaju se putem opcije **Soil and interfaces**, a štapni elementi, koji predstavljaju grede, sidra, pilote i sl., putem opcija **Beam** i **Embedded beam**. Također, u rubrici **Materials** potrebno je svakom od elemenata modela zadati njegove pripadajuće karakteristike i parametre bitne za daljnji proračun. Tako se, primjerice, elementima tla i stijene zadaju vrijednosti parametara kohezije c' i kuta unutarnjeg trenja ϕ' , dok se štapnim elementima zadaju odgovarajuće krutosti EA . Nakon što su zadani svi elementi potrebni za proračun, u modelu se zadaju vanjska opterećenja opcijom **Load**, kojom se ucrtavaju točkasta, linijska ili plošna opterećenja. Rubrikom **Flow conditions** zadaju se uvjeti podzemne vode, koja može ili ne mora utjecati na proračun. Primjerice, ukoliko se razina podzemne vode nalazi ispod linije dna iskopa, njeno djelovanje neće imati utjecaj na sam iskop. Slijedeći korak jest „**meshing**“, odnosno, model je potrebno „izmrežiti“ pomoću rubrike **Mesh**. Mreža modela može biti gušća ili rjeđa, ovisno o elementima koji su bitni za proračun. Gušćom mrežom dobivaju se precizniji rezultati proračuna i obrnuto. Prije samog proračuna, u modelu je potrebno zadati proračunske faze. Proračunske faze zadaju se rubrikom **Staged construction**, a simuliraju realne korake pri izvođenju geotehničkih konstrukcija. Za svaku fazu izvodi se odgovarajući tip proračuna. PLAXIS 2D i 3D nude nekoliko proračunskih tipova, od kojih su u proračunu građevne jame u predmetnom radu korišteni **Safety** i **Plastic** tip proračuna. Plastic tip koristi se za analizu naprezanja i deformacija kojom se dobivaju vrijednosti pomaka u modelima. Radi se zapravo o elastoplastičnoj dreniranoj i nedreniranoj analizi u kojoj se konsolidacija ne uzima u obzir. Safety tip proračuna koristi se pri analizi stabilnosti kojom se dobivaju vrijednosti faktora sigurnosti u modelima. Vrijednost faktora sigurnosti proračunava

se metodom redukcije parametara na vrijednosti pri kojima dolazi do sloma materijala. Provedenim proračunima na 2D i 3D modelima, dobivaju se određene vrijednosti potrebne za projektiranje osiguranja i izvođenja geotehničkih konstrukcija. Na Slikama 12 i 13 prikazani su dvodimenzionalni i trodimenzionalni modeli istog iskopa u nagibu 2V:1H, obrađenog u kasnijim poglavljima.



Slika 12: Iskop u nagibu 2V:1H - model izrađen u PLAXIS-u 2D



Slika 13: Iskop u nagibu 2V:1H - model izrađen u PLAXIS-u 3D

4. PRIMJER PROJEKTA – GRAĐEVNA JAMA ZA HOTEL BLU MARE U NOVIGRADU

4.1. Hotel Blu Mare u Novigradu

Projekt, koji ovaj diplomski rad opisuje, je lociran u Novigradu, točnije, u povijesnoj jezgri grada Novigrada. Radi se o izgradnji novog objekta ugostiteljsko turističke namjene smještajnog tipa, odnosno hotela. Hotel se sastoji od pet etaža, od kojih su četiri nadzemne i jedna podzemna. Buduća građevina smještena je unutar parka koji se nalazi između postojećeg objekta i gradskog zida. Upravo zbog lokacije građenja i gabarita novog objekta, projektira se građevna jama u kojoj će se hotel izvoditi i koja će omogućiti lakši pristup građevinskoj mehanizaciji. Geotehnički dio predmetnog izvedbenog projekta jest osiguranje građevne jame, čije će rješenje biti prikazano u sljedećim poglavljima.

4.2. Geološke i geotehničke značajke lokacije

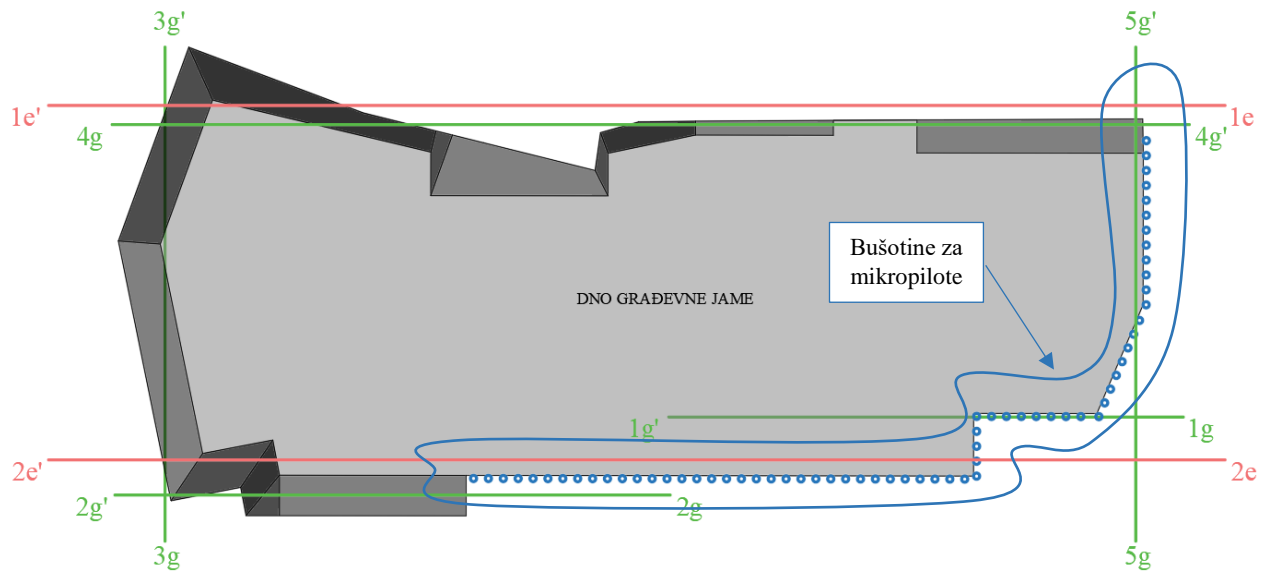
Prvi korak geotehničkog dijela projekta jest izvođenje istraživačkih radova na predmetnoj lokaciji. Na istraživačkom lokalitetu nalazi se postojeća građevina, u ruševnom stanju, koju je potrebno ukloniti prije no što se počne s izgradnjom novog objekta. Pregledom terena u okolini, uočeno je postojanje nabačaja visine 3-4 m koji se formirao između obale mora i platoa na kojem se nalazi postojeća građevina. Na svim pregledanim lokalitetima prisutni su nabačaj i naslage crvenice na vapnenačkoj stijenskoj podlozi.

Nakon terenskog pregleda lokacije, obavljena su georadarska snimanja georadarskim instrumentom pulseEKKO PRO i antenskim setom. Snimljeni georadarski profili, kojih je ukupno pet, raspoređeni su na način da se „pokrije“ čim veća zona planirane gradnje. Time se omogućuje precizno uočavanje geoloških pojava koje bi mogle utjecati na temeljenje i izgradnju budućeg objekta. Dubina snimanja iznosi dvadesetak metara [22]. Položaj georadarskih profila označen je na Slici 14, a označeni su oznakama 1g-1g' do 5g-5g'.

Geolektričnim snimanjem snimljena su dva profila, 1e-1e' i 2e-2e', označenima na Slici 14. Cilj ovog postupka jest dobivanje podataka o otpornosti materijala, zajedno s detaljnom geološkom građom. Posebice se ovdje gledala debljina crvenice i nabačaja. Snimanje je obavljeno geoelektričnim instrumentom Syscal Kid Switch 24 [22].

Primarno je, s obzirom na postojeći objekt i pristupačnost lokacije, izvedeno pet istraživačkih bušotina kojima su dobiveni neki podaci o pružanju geoloških slojeva. Međutim, u kasnijoj fazi

projekta, dobiveni su podaci od ukupno 66 bušotina, na mjestu kojih će se izvesti mikropiloti, kojima je dobiven precizniji uvid u stvarno pružanje slojeva na terenu. Položaj bušotina izvedenih za mikropilote prikazan je na Slici 14.



Slika 14: Istražni radovi na lokalitetu

Dobivenim podacima iz bušotina određena je linija pružanja stijenske mase i slojeva crvenice. Uz stijensku masu (vapnenac) i crvenicu (Slika 15), uočeno je lokalno pojavljivanje „džepova“ trošne stijene kao i kaverni. Rezultatima snimanja također su uočeni kavernozi sustavi koji su na dubini većoj od četiri metra saturirani podzemnom (morskom) vodom. Postojanje vode je i očekivano na ovoj lokaciji budući da se nalazi uz samu obalu mora. Na temelju podataka dobivenih bušenjem, izrađen je razvijeni pogled građevne jame (Slika 26) u kojoj se, obzirom na geološke slojeve, projektira pilotska stijena (obrađeno u kasnijim poglavljima).

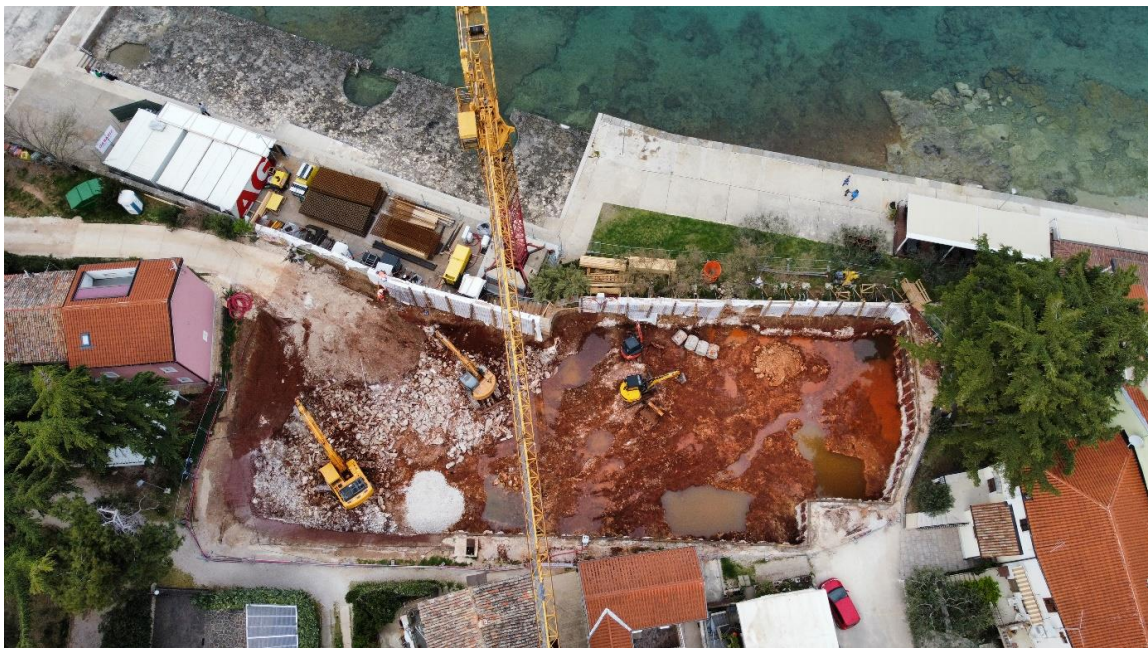


Slika 15: Pružanje slojeva tla i pilotska stijena (Zona II)

Kao što je i spomenuto, očekivano je pojavljivanje vode na predmetnoj lokaciji s obzirom da se iskop izvodi vrlo blizu obale mora. To je i vidljivo na Slikama 16 i 17 gdje se može vidjeti lokalno pojavljivanje vode (u ovom slučaju mora) prilikom izvođenja samog iskopa. Konkretni problem vode sanira se zapunjavanjem rupa (koje su trenutno ispunjene vodom) betonom i kamenom. [1]



Slika 16: Pojava podzemne vode pri iskopu građevne jame [23]



Slika 17: Pojava podzemne vode u jami te blizina morske obale [23]

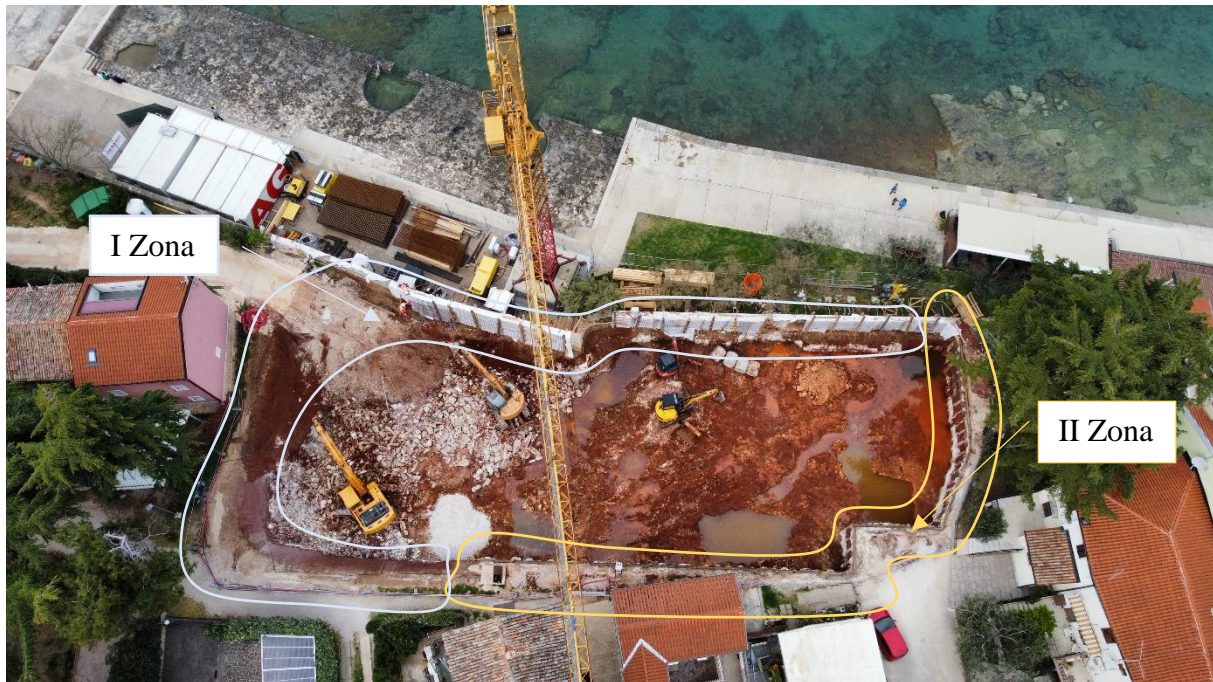
Sumirajući sva provedena ispitivanja na lokalitetu, utvrđena su tri tipa temeljnog tla. Prva je zemlja *crvenica*, karakteristična za područje Istre. Crvenica (prikazana na Slici 18) je okarakterizirana kao glinovit materijal koji je mjestimično pomiješan s kršjem vapnenaca. Drugi materijal je *nabačaj*, koji je uočen na cijelom istraživanom području. I treći je materijal *vapnenac*, uslojeni i pločasti. Vapnenac je na kontaktu sa crvenicom slabije okršen, mjestimice kavernoazan, dok s većom dubinom prelazi u sve kompaktniju stijensku masu [1].



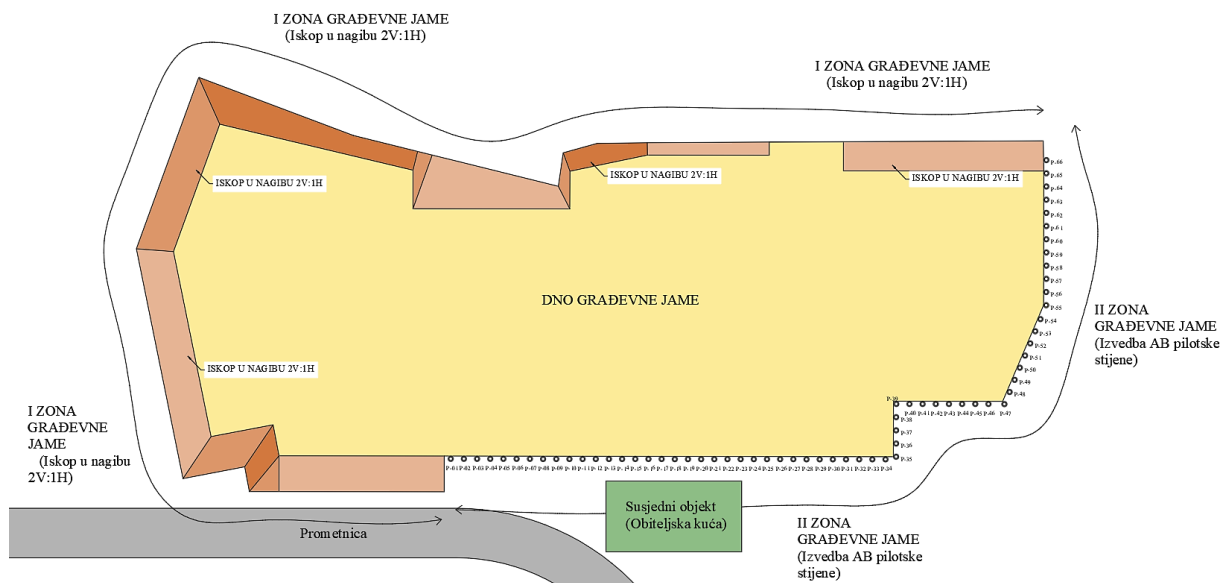
Slika 18: Iskopana crvenica na lokalitetu

4.3. Osiguranje građevne jame

Osiguranje građevne jame projektom je podijeljeno u dvije zone, prikazane na Slikama 19 i 20. Prva zona obuhvaća izvedbu iskopa u stabilnoj geometriji (2V:1H) i zaštitu pokosa PE folijom. Druga zona obuhvaća izvedbu vertikalnog iskopa građevne jame i osiguranje jame izvedbom pilotske stijene od mikropilota [1].



Slika 19: Zone osiguranja građevne jame [23]



Slika 20: Shematski prikaz osiguranja građevne jame

Prije početka iskopa i osiguranja građevne jame, potrebno je izvesti prethodne radove. Primarno je potrebno pripremiti gradilište na način da se dopremi i instalira oprema i mehanizacija potrebna za izvedbu radova. Po završetku radova lokaciju treba dovesti u prvobitno stanje. Nakon toga, potrebno je osigurati gradilište, u ovom slučaju rub iskopa, na način da se postavi privremena čelična ograda visine do 2,50 m koja će biti uklonjena nakon završetka radova. Zatim je potrebno izvesti geodetsko iskolčenje, visinsko i položajno. Geodetsko iskolčenje provodi se na temelju podataka iz projekta [1], a sama iskolčenja moraju biti osigurana od oštećenja te jasno vidljiva tokom izvođenja radova. Uz to, potrebno je locirati i obilježiti instalacije na samoj lokaciji. Njihovo je obilježavanje potrebno kako bi se tokom izvođenja radova izbjeglo njihovo oštećenje. Zatim se kreće s iskopom, pod nagibom u prvoj i vertikalnim u drugoj zoni. Zahtijeva se točnost iskopa od +5,0 cm na 1,0 m duljine. Iskop se izvodi prema visinskim kotama i nagibima koji su određeni projektom [1].

U sjeverozapadnom dijelu prve zone (Slika 19) izvodi se strojni iskop u zoni postojeće potporne konstrukcije. Zbog potporne konstrukcije, iskop je potrebno izvoditi s povećanim oprezom kako bi se spriječilo njeno eventualno oštećenje. Ovisno o stanju potporne konstrukcije, potrebno je predvidjeti skele za njeno osiguranje. Kako bi se osigurala privremena stabilnost iskopa, isti se izvodi u privremenom nagibu 2V:1H, a zbog osiguranja erozijske stabilnosti kosina dijelova građevne jame, postavlja se građevna PVC folija u svrhu zaštite od djelovanja atmosferilija. Folija se sidri betonskim blokovima u kruni i dnu kosine, a po zaizvodetku radova se potpuno uklanja [1].

U drugoj zoni (Slika 19) izvodi se vertikalni strojni iskop ispred pilotske stijene. Osiguranje građevne jame u ovoj zoni predviđeno je postavljanjem 66 mikropilota od armiranog betona. Iz bušotina koje su izvedene u svrhu ugradnje mikropilota dobiveni su podaci o pružanju geoloških slojeva, kao što je objašnjeno u prethodnom potpoglavlju. Mikropiloti se izvode kao konstruktivni elementi nazivnog promjera $D=330$ mm u pokrivaču od crvenice i $D=310$ mm u vapnenačkoj stijenskoj masi. S obzirom na nepravilnu liniju stijenske mase, piloti se međusobno razlikuju u svojim duljinama, krećući se tako od $L=5,40$ m do $L=8,40$ m (Slika 20). Osni razmak pilota iznosi 80,0 cm. Piloti se izvode betonom razreda tlačne čvrstoće C 30/37, a betoniranje je potrebno izvoditi u neprekidnom radu po cijeloj dužini *kontraktor* postupkom. Beton je nakon zaizvodetka ugradnje potrebno vibrirati. Zbog svog malog promjera, piloti se ne armiraju armaturnim koševima, već čeličnim profilima, u ovom slučaju IPE 160 u duljini od 6,0 m. Čelični profili IPE u određenoj duljini „vire“ iznad pilota (Slika 21) te se na njih

postavljaju UPN 160 profili, kao naglavne grede, kako bi se dodatno ojačala potporna konstrukcija. Obje klase čeličnih profila izrađene su od čelika S235 [1].

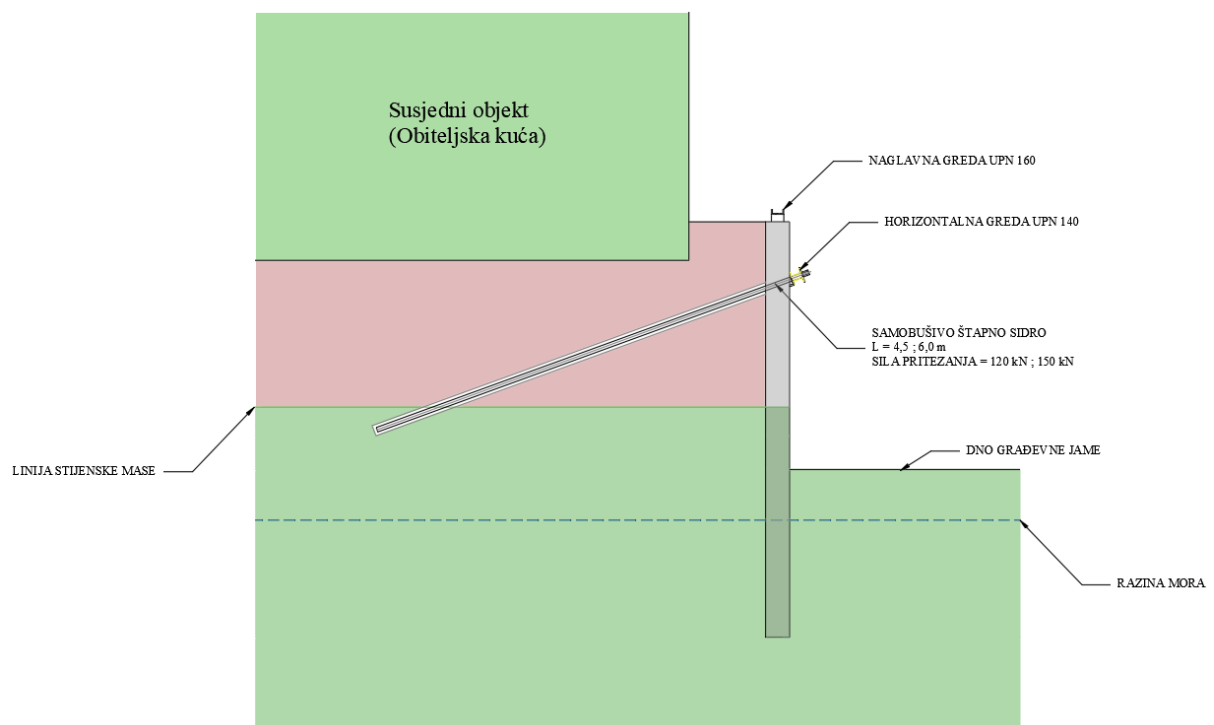


Slika 21: UPN profili postavljeni na mikropilote (zona II)

Projektom je definirano lokalno postavljanje samobušivih sidara (Slika 22) na pozicijama gdje je uočena veća debljina crvenice. U konkretnom slučaju, samobušiva sidra su duljine $L = 4,5$ m ili $L = 6,0$ m, a injektiraju se u svojoj cijeloj duljini. Čelična samobušiva sidra izvode se tako da se postavljaju između dva čelična profila UPN 140, čelika klase S355 [1]. Na Slici 23 prikazan je jedan karakterističan poprečni presjek pilotske stijene na kojem se vide sva dodatna, prethodno opisana, ojačanja. Poprečni presjek rađen je na poziciji označenoj na Slici 22, ispod susjednog objekta kod kojeg je dodatno ojačanje u vidu sidara i horizontalnih greda predviđeno projektom [1].



Slika 22: Samobušiva sidra u pilotskoj stijeni (zona II)



Slika 23: Poprečni presjek mikropilota pilotske stijene

Ostale tehničke značajke potrebne za potpornu konstrukciju prikazane su u Tablicama 3, 4 i 5. Parametri prikazani u tablicama preuzeti su iz projekta [1].

Tablica 3 : Zahtijevane značajke betona za pilote [1]

Zahtijevane značajke betona za pilote:	
Razred tlačne čvrstoće betona:	C 30/37
Razred izloženosti:	XA1
Najveći sadržaj klorida:	Cl 0,2
Maksimalno zrno agregata:	$d_{\max} = 16,0 \text{ mm}$
Minimalna količina cementa:	300 kg/m ³
Razred konzistencije:	S4 (sa dodatkom za poboljšanje ugradivosti)

Tablica 4: Značajke mikropilota [1]

Značajke mikropilota:	
Nazivni promjer:	D = 330 mm i D = 310 mm
Duljina pilota:	L = 5,40 – 8,40 m
Armatura:	IPE 160

Tablica 5: Značajke sidara [1]

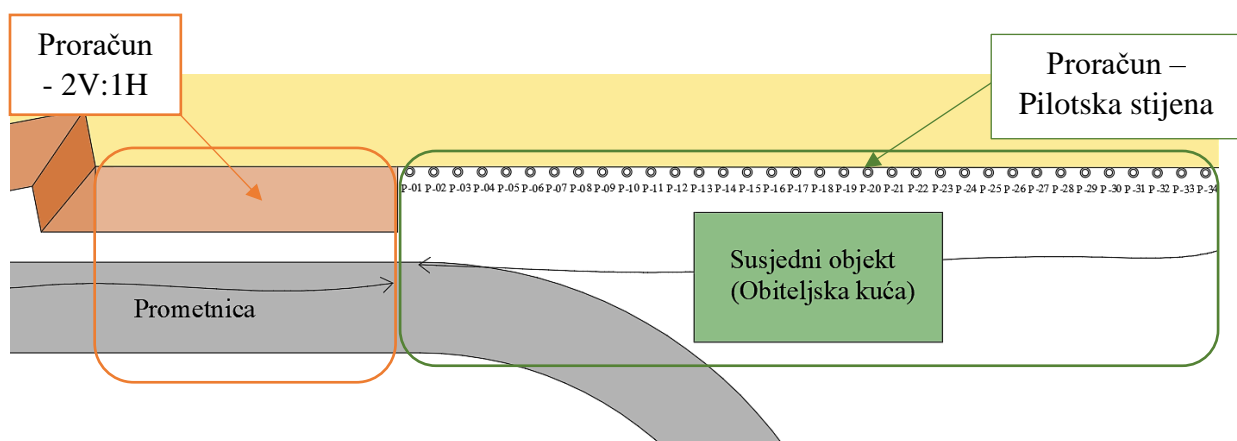
Značajke sidara:	
Duljina sidara:	4,5 m i 6,0 m
Duljina sidrišne dionice:	duljina sidra
Minimalni nominalni promjer sidra:	38,0 mm
Horizontalni razmak:	2,40 m
Nagib sidara:	20°
Minimalni promjer bušotine:	115,0 mm
Minimalna sila pri popuštanju:	350,0 kN
Sila pritezanja:	120 kN (4,5 m) i 150 kN (6,0 m)

5. 2D I 3D PRORAČUN U PLAXIS-U

2D i 3D proračuni građevne jame podijeljeni su na dva dijela, sukladno zonama I i II (Slika 24 i 25) koje su predviđene projektom, odnosno, proračuni su izvedeni za iskop u nagibu 2V:1H i za pilotsku stijenu. Proračuni za iskop u nagibu 2V:1H i pilotsku stijenu izvode se na južnom dijelu građevne jame (Slika 24). Zone obuhvata proračuna shematski su prikazane na Slici 25.



Slika 24: Zone obuhvata proračuna pilotske stijene i iskopa u nagibu 2V:1H [23]

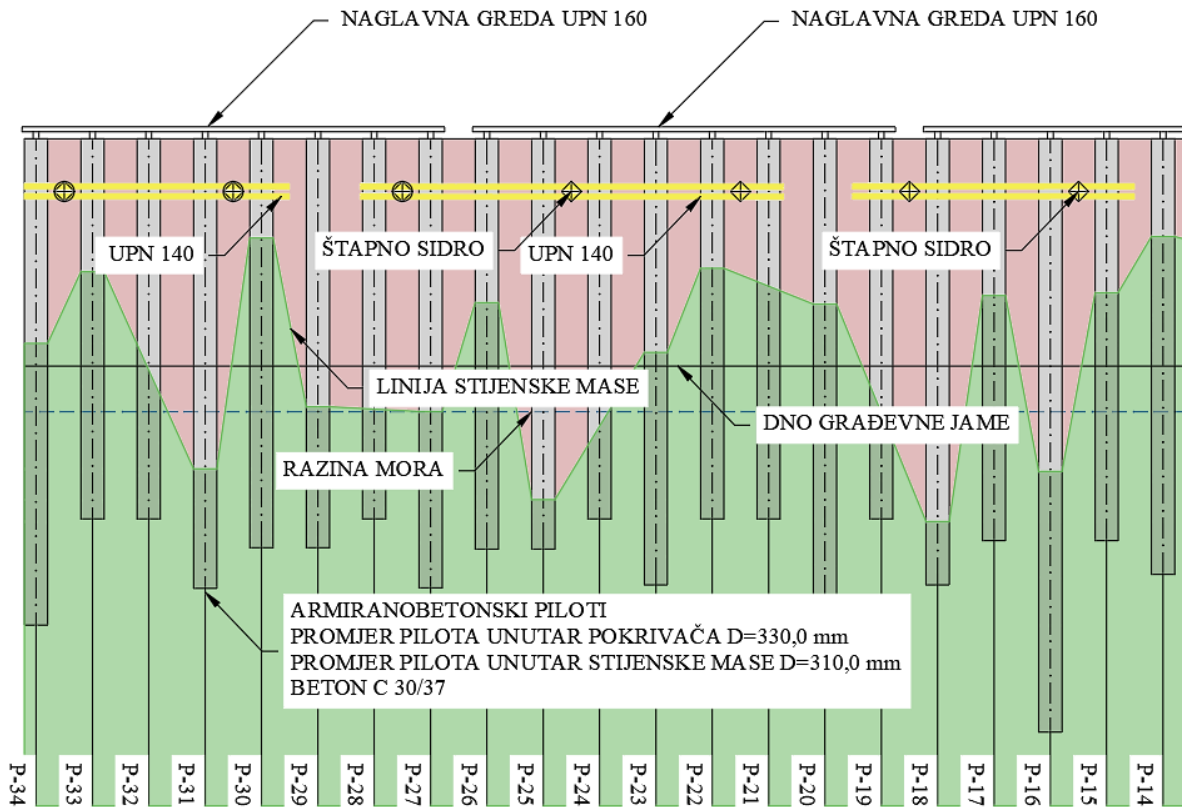


Slika 25: Zone obuhvata proračuna pilotske stijene i iskopa u nagibu 2V:1H

Proračuni za sve modele (2D i 3D) izvode se i s karakterističnim i s proračunskim vrijednostima parametara tla i stijene. Vrijednosti parametara tla i stijene prikazane su u Tablicama 6 i 7. Karakteristične vrijednosti parametara koriste se za *analizu naprezanja i deformacija*, kojom se za kritičnu fazu proračuna dobivaju podaci o pomacima modela. Proračunske vrijednosti parametara koriste se za *analizu stabilnosti* za kritičnu fazu proračuna, kojom se dobivaju podaci o faktoru sigurnosti te izgledu klizne plohe. Osim podataka o pomacima, faktorima sigurnosti i izgledu kliznih ploha, 2D proračunom pilotske stijene dobiveni su podaci o momentima savijanja i poprečnim silama duž pilota. Dobivene vrijednosti momenata savijanja i poprečnih sila iskorištene su za dimenzioniranje samih pilota (6.1.4.). Za konkretan slučaj građevne jame nisu provedeni proračuni potresne otpornosti, zbog toga što se radi o potpornoj konstrukciji privremene prirode. 2D analizom provedena su tri, a 3D analizom provedena su dva proračuna.

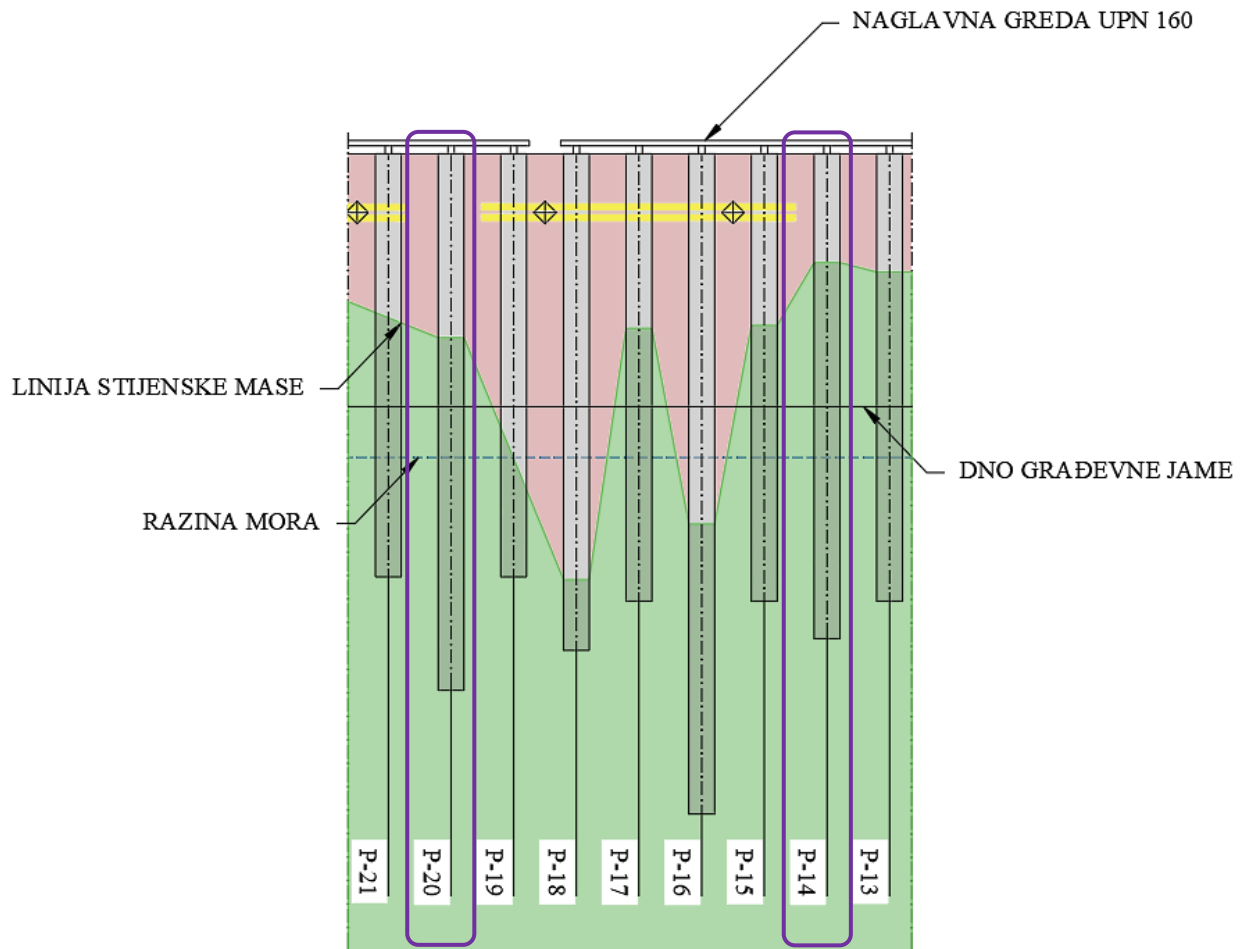
5.1. 2D proračun u PLAXIS-u

Zbog geometrije i geologije građevne jame, u PLAXIS-u 2D izvedena su tri proračuna. Prvi proračun provodi se za iskop u nagibu u stabilnoj geometriji 2V:1H. Iskop u nagibu 2V:1H nalazi se na poziciji na kojoj na njega djeluje površinsko opterećenje obližnje prometnice. Zona obuhvata proračuna iskopa u nagibu 2V:1H prikazana je na Slici 21. S obzirom da za iskop u nagibu ne postoje podaci o pružanju geoloških slojeva, oni su aproksimirani. Odnosno, temeljem podataka dobivenih istražnim bušotinama [22], aproksimirana je srednja linija stijenske mase koja je primijenjena u 2D modelu iskopa u nagibu 2V:1H. Za vertikalni iskop, odnosno, pilotsku stijenu, provedena su dva proračuna. Proračuni se provode u zoni označenoj na Slikama 24 i 25 u kojima na pilotsku stijenu djeluje vanjsko opterećenje od susjednog objekta. S obzirom na vrlo nepravilnu liniju stijenske mase, izrađena su dva modela različite geometrije. Temeljem podataka s terena [22] izrađen je razvijeni pogled pilotske stijene, čiji je detalj prikazan na Slici 26. Duljina mikropilota L nije konstantna već se mijenja ovisno o položaju stijene. Uz pilote i liniju stijene, na Slici 26 također su prikazana i sva potrebna dodatna ojačanja (čelični profili UPN160 i UPN 140 te čelična štapna sidra) opisana u potpoglavlju 4.3.



Slika 26: Detalj razvijenog pogleda pilotske stijene

U modelu prikazanom u potpoglavlju 6.1.2., proračun je izveden na mikropilotu P-14 (Slika 27). U tom se slučaju mikropilot sa 75% svoje duljine nalazi u stijeni, dok je ostalih 25 % izvedeno u tlu i dalje u radu će se na njega referirati kao na „*Slučaj 1*“. Drugi proračun, prikazan u potpoglavlju 6.1.3., izvodi se na mikropilotu P-20 (Slika 27), koji je sa 60% svoje duljine položen u stijenu, dok je preostalih 40% u tlu. Na ovaj model će se dalje u radu referirati kao na „*Slučaj 2*“. Mikropilot iz Slučaja 1 nalazi se u povoljnijem položaju od mikropilota iz Slučaja 2. Iako su duž pilotske stijene lokalno postavljena štapna sidra, proračuni vertikalnog iskopa izvedeni su na dva mikropilota bez takvog dodatnog ojačanja. Mikropiloti P-14 i P-20 (Slika 27) odabrani su za proračun jer na njih djeluje vanjsko opterećenje susjednog objekta, odnosno, opterećenje obiteljske kuće. Proračuni na mikropilotima P-14 i P-20 se provode kako bi se pokazalo koliko i utječe li uopće razina stijenske mase na pomake, faktor sigurnosti i izgled klizne plohe.



Slika 27: Mikropiloti na kojima se provodi 2D proračun vertikalnog iskopa (detalj razvijenog pogleda)

Parametri tla i stijene jednaki su za sve proračune, dok se za vertikalni iskop dodaju parametri mikropilota i susjednog objekta. U rubrici *Structures* u PLAXIS 2D izrađena su dva tipa tla (*Soil and interfaces*), **Crvenica** i **Vapnenac**. Ovo su dvije vrste tla koje se pružaju kroz sve 2D i 3D modele, a njihovi parametri prikazani su u Tablicama 6 i 7.

Tablica 6: Vrijednosti parametara tla – crvenica [1]

<i>Crvenica</i>	<i>Proračunski parametri</i>	<i>Karakteristični parametri</i>
Identification:	Crvenica	Crvenica
Material model:	Hardening soil	Hardening soil
Drainage type:	Drained	Drained
Color:		
γ_{unsat} :	20,00 kN/m ³	20,00 kN/m ³
γ_{sat} :	20,00 kN/m ³	20,00 kN/m ³
e_{init} :	0,50	0,50
E_{50}^{ref} :	10,00E3	10,00E3
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$:	10,00E3	10,00E3
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$:	30,00E3	30,00E3
c'_{ref} :	12,00 kN/m ²	15,00 kN/m ²
ϕ' :	18,76 °	23,00 °
v'_{ur} :	0,20	0,20

U Tablici 6 prikazane su i karakteristične i proračunske vrijednosti parametara tla, crvenice. Karakteristične vrijednosti parametara za ovo tlo su $c' = 15 \text{ kN/m}^2$, dok je $\phi' = 23^\circ$. Parametri su reducirani na proračunske vrijednosti $c' = 12 \text{ kN/m}^2$ i $\phi' = 18,76^\circ$ vodeći se **proračunskim pristupom 3** u skladu s HRN EN 1997-1 [24]. Redukcija je provedena koristeći parcijalne faktore sigurnosti za parametre tla $\gamma_\phi=1,25$ i $\gamma_c=1,25$. Proračuni su provedeni koristeći karakteristične vrijednosti kako bi se dobili podaci o pomacima modela. Proračuni s proračunskim, reduciranim vrijednostima provedeni su kako bi se dobili podaci o faktorima sigurnosti i izgledu kliznih ploha u svim modelima. Parametri tla (Tablica 6) i stijene (Tablica 7) preuzeti su iz projekta. [1]

Tablica 7: Vrijednosti parametara stijene – vapnenac [1]

<i>Vapnenac</i>	<i>Proračunski parametri</i>	<i>Karakteristični parametri</i>
Identification:	Vapnenac	Vapnenac
Material model:	Hoek-Brown	Hoek-Brown
Drainage type:	Drained	Drained
Color:		
γ_{unsat} :	24,00 kN/m ³	24,00 kN/m ³
γ_{sat} :	25,00 kN/m ³	25,00 kN/m ³
ϵ_{init} :	0,50	0,50
E'_{rm} :	1,000E6	1,000E6
ν'_{nu} :	0,30	0,30
σ_{ci} :	35,71E3 kN/m ²	50,00E3 kN/m ²
m_i :	8,00	8,00
GSI:	25,00	25,00

Isto kao i kod crvenice, u Tablici 7 su prikazane i karakteristične i proračunske vrijednosti parametara stijene, odnosno vapnenca. Kod vapnenca je karakteristična vrijednost parametra $\sigma_{\text{ci}} = 50,00\text{E}3 \text{ kN/m}^2$ redukcijom svedena na proračunsku vrijednost $\sigma_{\text{ci}} = 35,71\text{E}3 \text{ kN/m}^2$. Redukcija parametara je također napravljena prema **proračunskom pristupu 3** u skladu s HRN EN 1997-1 [24] smanjujući karakteristične vrijednosti parcijalnim faktorom za parametre tla $\gamma_{\text{su}}=1,40$ [1]. Kao i za prethodni materijal, u proračunima su korištene i karakteristične i proračunske vrijednosti.

Treći element, koji je prisutan samo u proračunu vertikalnog iskopa, je element *mikropilota* koji je zadan kao *Plate* element, također u rubrici *Structures*.

Tablica 8: Parametri elementa – mikropilot [1]

Identification:	Mikropilot
Color:	
Material type:	Elastic
EA1:	502,3E3 kN/m
EA2:	502,3E3 kN/m
EI:	2173 kN m ² /m
W:	0,1970 kN/m/m
$v_{(nu)}$:	0,30

Četvrti element je također prisutan samo u proračunu vertikalnog iskopa, odnosno, pilotske stijene. Radi se o susjednom objektu (u ovom slučaju obiteljska kuća) koji djeluje na stabilnost iskopa, no zadan je kao *Soil* element sa svojim pripadajućim parametrima. Parametri mikropilota (Tablica 8) i susjednog objekta (Tablica 9) preuzeti su iz projekta [1].

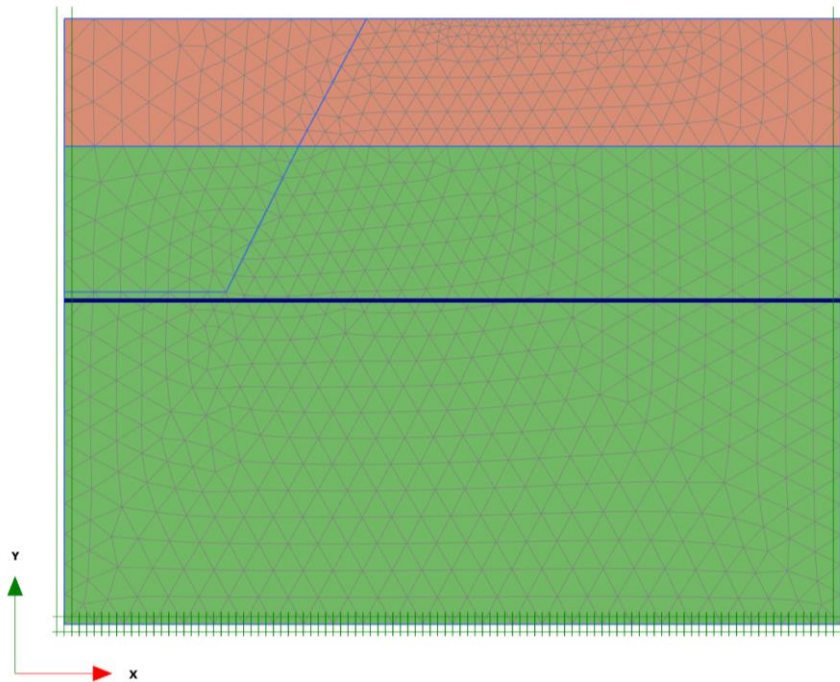
Tablica 9: Parametri elementa - susjedni objekt [1]

Identification:	Susjedni objekt
Material model:	Linear elastic
Drainage type:	Drained
Color:	
γ_{unsat} :	1,000E-3 kN/m ³
γ_{sat} :	1,000E-3 kN/m ³
e_{init} :	0,500
E':	10,00E6 kN/m ²
$v'_{(nu)}$:	0,2000

Ono što je potrebno spomenuti jest zadavanje opterećenja u 2D modelima. Pri proračunu za iskop u nagibu 2V:1H opterećenje koje djeluje na stabilnost iskopa zadano je na samom vrhu modela jer se ono gleda kao prometno opterećenje, koje djeluje samo površinski. Za razliku od prometnog opterećenja, u modelima s pilotskom stijenom (vertikalni iskop) u obzir se uzima opterećenje susjednog objekta. Ono nije zadano površinski, već na dubini koja je jednaka donjoj koti temelja objekta. Opterećenje se zadaje na ovaj način jer je susjedni objekt ukopan u odnosu na vrh iskopa građevne jame.

5.1.1. Iskop u nagibu 2V:1H

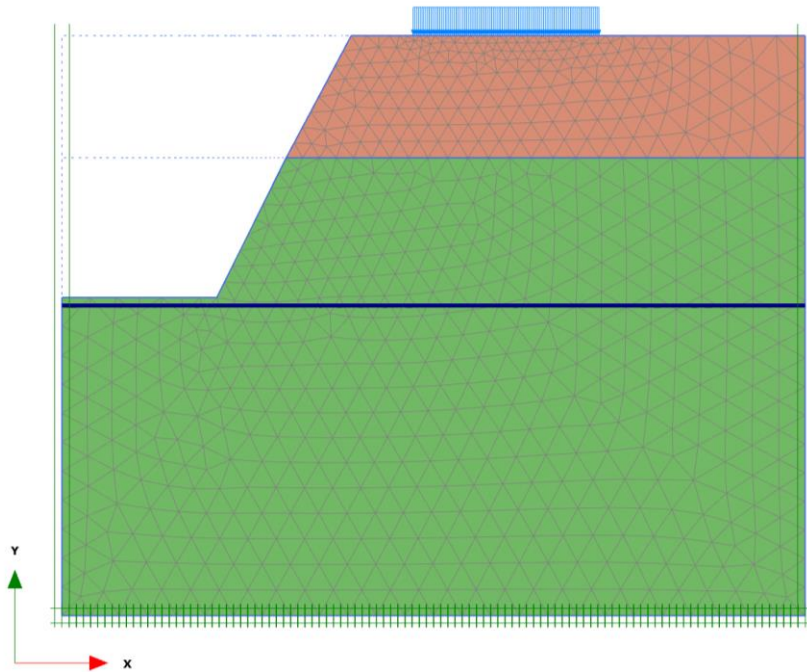
Prvi korak izrade modela u PLAXIS 2D je postavljanje geometrije i svojstava materijala. Za iskop u nagibu 2V:1H odabran je jedan karakteristični presjek, iz zone obuhvata označene na Slikama 24 i 25, sa srednjom razinom stijenske mase dobivene aproksimacijom. Blizu vrha iskopa nalazi se prometno opterećenje koje utječe na stabilnost iskopa i treba ga uključiti u proračun. Linija podzemne vode (mora) također se ucrtava na modelu. Iako je podzemna voda prisutna, ona ne utječe na proračun jer se nalazi ispod dna iskopa, odnosno, ispod dna građevne jame. Visina iskopa uzeta je kao $H = 4,35$ m, a razina podzemne vode nalazi se na otprilike 0,15 m ispod dna iskopa (dna građevne jame). Prometno opterećenje u modelu je postavljeno na udaljenost od 1,0 m od vrha iskopa, a djeluje na širini od 3,0 m proračunskim jednoliko raspodijeljenim opterećenjem od $q_{ed} = 10,00 * 1,3 = 13,00$ kN/m². [1]



Slika 28: 2D model iskopa 2V:1H u In-situ fazi

Model je podijeljen u nekoliko faza (*Phases*). U prvoj fazi prikazano je **In-situ** stanje modela, odnosno, aktivno je samo tlo (crvenica i vapnenac). U drugoj fazi prelazi se na **Aktivaciju opterećenja** na površini, odnosno, aktivira se proračunsko opterećenje od prometa. U trećoj fazi modela izvodi se **Iskop 2V:1H**, a u četvrtoj fazi provodi se **Analiza stabilnosti** samog iskopa. Na Slici 28 prikazan je izgled mreže konačnih elemenata (MKE) izrađenog modela u

In-situ fazi proračuna, dok je na Slici 29 prikazan izgled MKE izrađenog modela za fazu *Iskopa 2V:1H*.

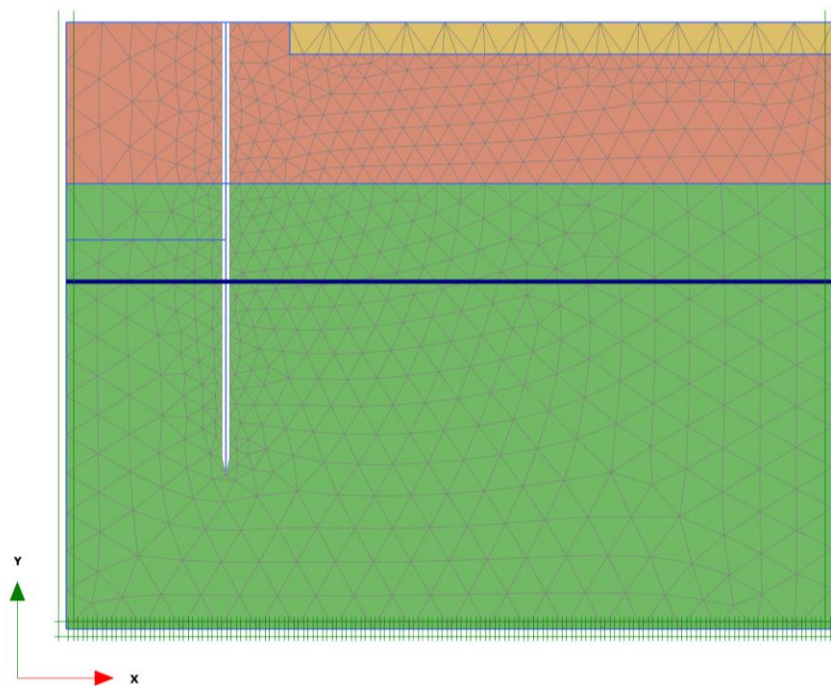


Slika 29: 2D model iskopa u fazi *Iskopa 2V:1H*

Proračun modela iskopa u nagibu 2V:1H radi se za dva slučaja: za karakteristične i za proračunske parametre tla i stijene (Tablica 6 i 7). Primjenom karakterističnih vrijednosti parametara dobivaju se podaci o pomacima modela za **kritičnu fazu**, u ovom slučaju fazu ***Iskopa 2V:1H***. Proračunom s proračunskim, reduciranim parametrima dobivaju se podaci o faktoru sigurnosti i kliznoj plohi modela za **kritičnu fazu**, fazu ***Analize stabilnosti***.

5.1.2. Pilotska stijena

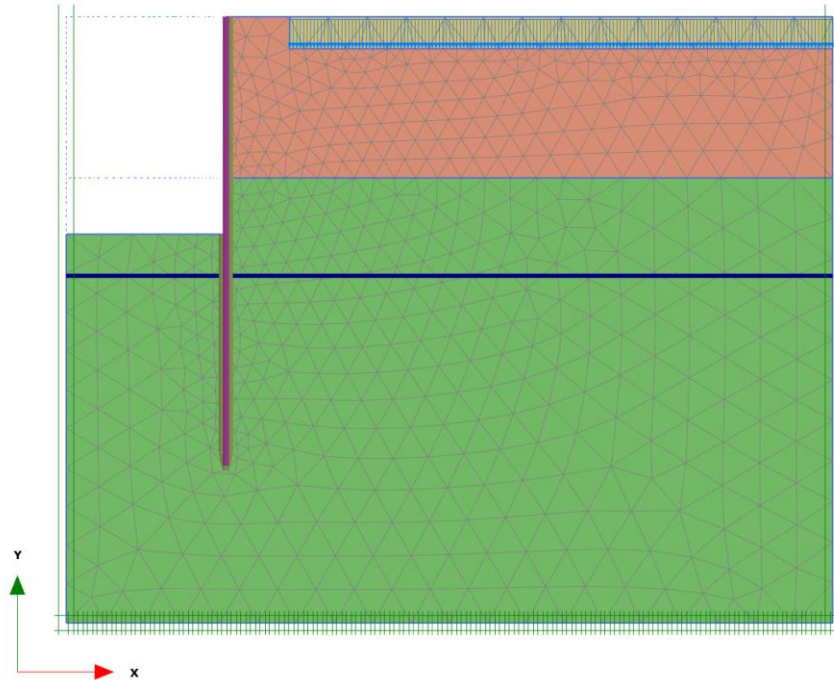
Linija stijenske mase u građevnoj jami je vrlo nepravilna, zbog čega dolazi do situacije da su neki mikropiloti u povoljnijem položaju od ostalih. Srednja linija stijenske mase aproksimirana je na temelju podataka iz razvijenog pogleda (Slika 26). Proračuni pilotske stijene provode se na dva modela različitih geometrijskih karakteristika u vidu visine stijenske mase. Dva se proračuna izvode kako bi se prikazalo koliko i utječe li uopće visina stijenske mase na faktor sigurnosti, izgled klizne plohe i pomake modela. Pretpostavka je da piloti, koji su većim dijelom svoje ukupne dužine ukopani u stijensku masu, imaju povoljnija svojstva u vidu horizontalnih pomaka i faktora sigurnosti u odnosu na ostale. Isto kao i kod modela za iskop u nagibu, i u sljedećim se modelima prvo postavljaju geometrijska svojstva i karakteristike tla te opterećenje. U ovom se slučaju opterećenje od susjednog objekta postavlja da djeluje na koti od 0,50 ispod površine tla. Usvojena je proračunska vrijednost stalnog korisnog opterećenja postojećeg objekta iza građevne jame od $q_{ed} = 45,0 * 1,0 = 45,0 \text{ kN/m}^2$ [1].



Slika 30: 2D model vertikalnog iskopa s realnim položajem stijene u In-situ fazi

Oba modela za vertikalni iskop podijeljena su u četiri faze kao i prethodni model: **In-situ**, **Aktivacija pilota i opterećenja**, **Vertikalni iskop** i **Analiza stabilnosti**. Na Slikama 30 i 31 prikazane su faze mreža konačnih elemenata izrađenog modela za Situaciju 1. Na Slici 30 prikazana je *In-situ* faza proračuna u kojoj su modelu aktivni samo tlo i stijena. Na Slici 31

prikazana je faza *Vertikalnog iskopa* modela u kojoj su aktivni tlo, stijena, vanjsko opterećenje i pilot te je proveden vertikalni iskop.



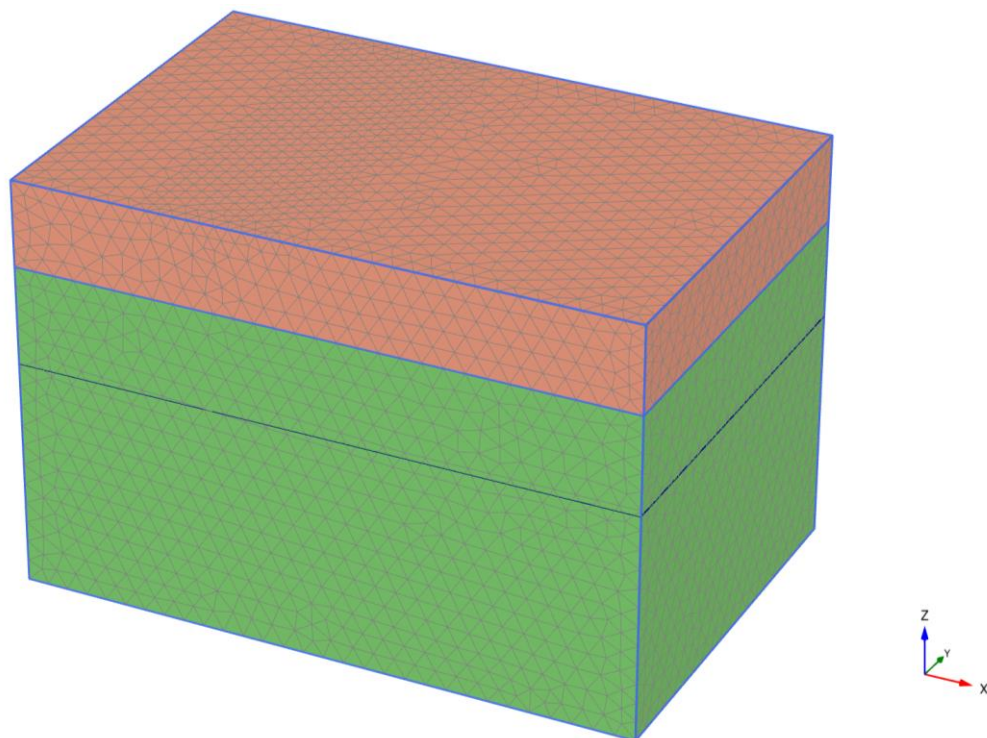
Slika 31: 2D model vertikalnog iskopa s realnim položajem stijene u fazi *Vertikalnog iskopa*

Kao i za 2D proračun iskopa u nagibu 2V:1H, na oba modela pilotske stijene proračun se provodi i s karakterističnim i s proračunskim parametrima. Karakterističnim vrijednostima parametara u proračunu se dobivaju podaci o pomacima modela za *kritičnu fazu*. Za pilotsku stijenu u oba slučaja to je faza *Vertikalnog iskopa*. Korištenjem proračunskih vrijednosti parametara tla i stijene dobivaju se vrijednosti faktora sigurnosti i izgled kliznih ploha u modelima za *kritičnu fazu*, fazu *Analize stabilnosti*.

5.2. 3D proračun u PLAXIS-u

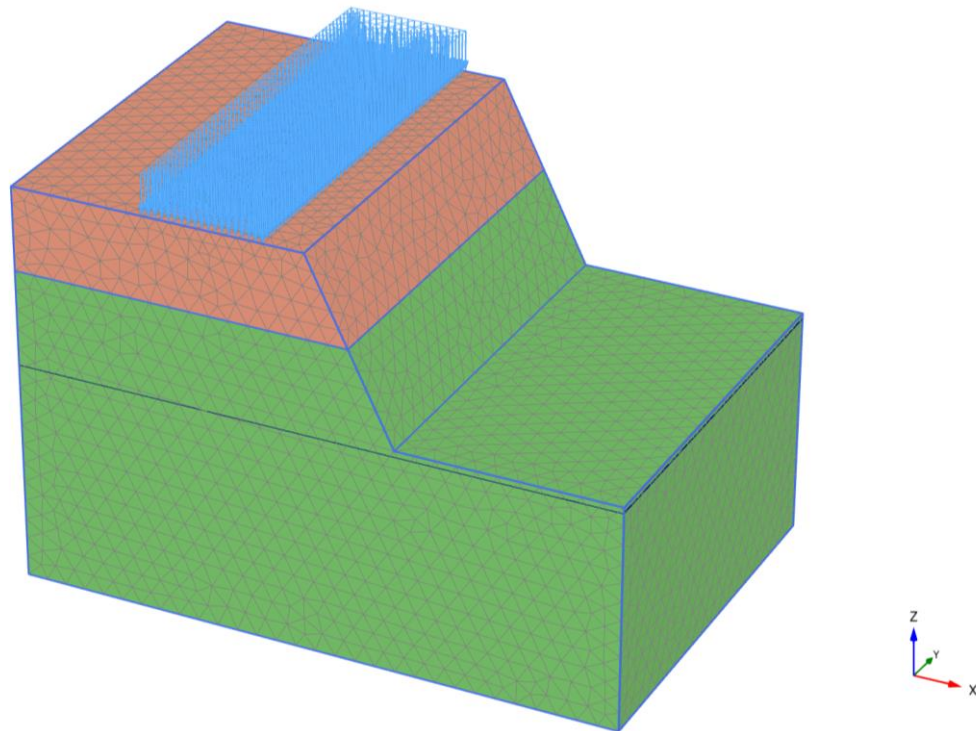
5.2.1. Iskop u nagibu 2V:1H

3D proračun iskopa u nagibu 2V:1H rađen je na poziciji označenoj na Slikama 24 i 25. 3D model iskopa u nagibu pojednostavljen je u svrhu proračuna. Dimenzije modela iznose 10 m po y-osi, 15 m po x-osi te 15 m po z-osi. Parametri tla i stijene jednaki su kao i za 2D proračune, a njihove vrijednosti su prikazane u Tablicama 6 i 7. S obzirom na to da za iskop u nagibu ne postoje podaci o točnom pružanju geoloških slojeva, razina stijenske mase je aproksimirana i konstantna je duž cijelog modela (Slika 32). Isto kao i u 2D proračunu iskopa u nagibu, i u 3D modelu je zadano površinsko opterećenje susjedne prometnice (Slika 33). Opterećenje djeluje u širini od 3,0 m, a postavljeno je 1,0 m od vrha iskopa građevne jame te djeluje proračunskim jednoliko raspodijeljenim opterećenjem $q_{ed} = 10,00 * 1,3 = 13,00 \text{ kN/m}^2$. Visina iskopa iznosi $H = 4,35 \text{ m}$, a razina podzemne vode nalazi se 0,15 m ispod dna građevne jame.



Slika 32: 3D model iskopa u nagibu 2V:1H za In-situ fazu

Sam proračun podijeljen je u nekoliko faza: **In-situ** (prikazana na Slici 32), **Aktivacija opterećenja**, **Iskop 2V:1H** (prikazana na Slici 33) te **Analiza stabilnosti**.

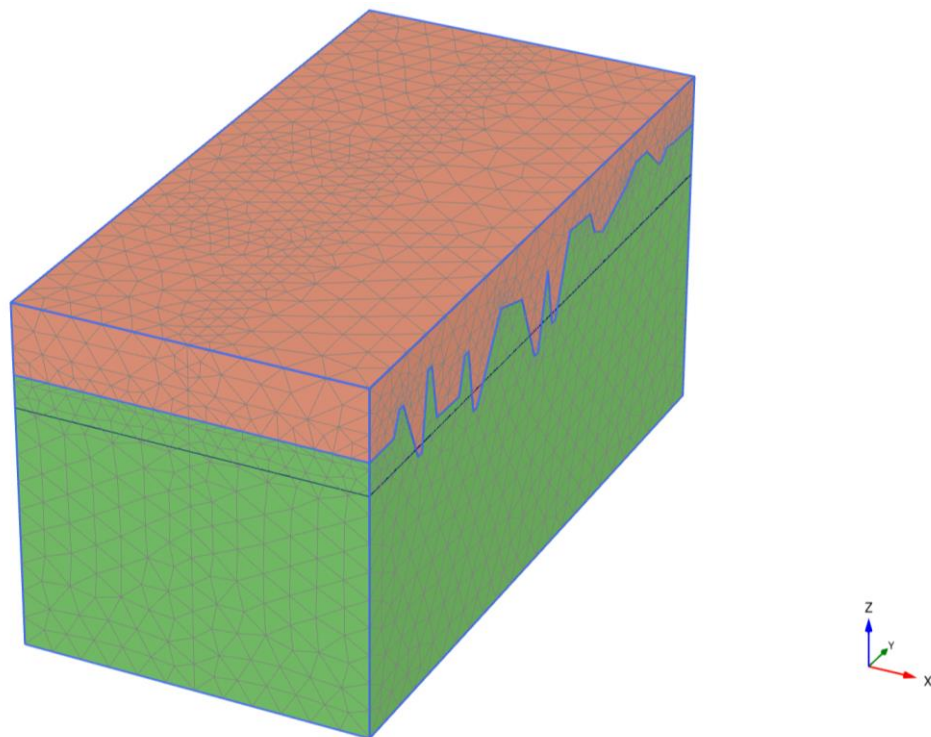


Slika 33: 3D model iskopa u nagibu 2V:1H za fazu Iskopa 2V:1H

U 3D modelu iskopa u nagibu 2V:1H provode se proračuni i s karakterističnim i s proračunskim vrijednostima parametara tla. Korištenjem karakterističnih vrijednosti parametara tla dobivaju se podaci o pomacima modela za **kritičnu fazu**, fazu **Iskopa 2V:1H**. Proračunski parametri koriste se kako bi se proračunom dobili podaci o kliznoj plohi modela i faktoru sigurnosti za **kritičnu fazu**, fazu **Analize stabilnosti**.

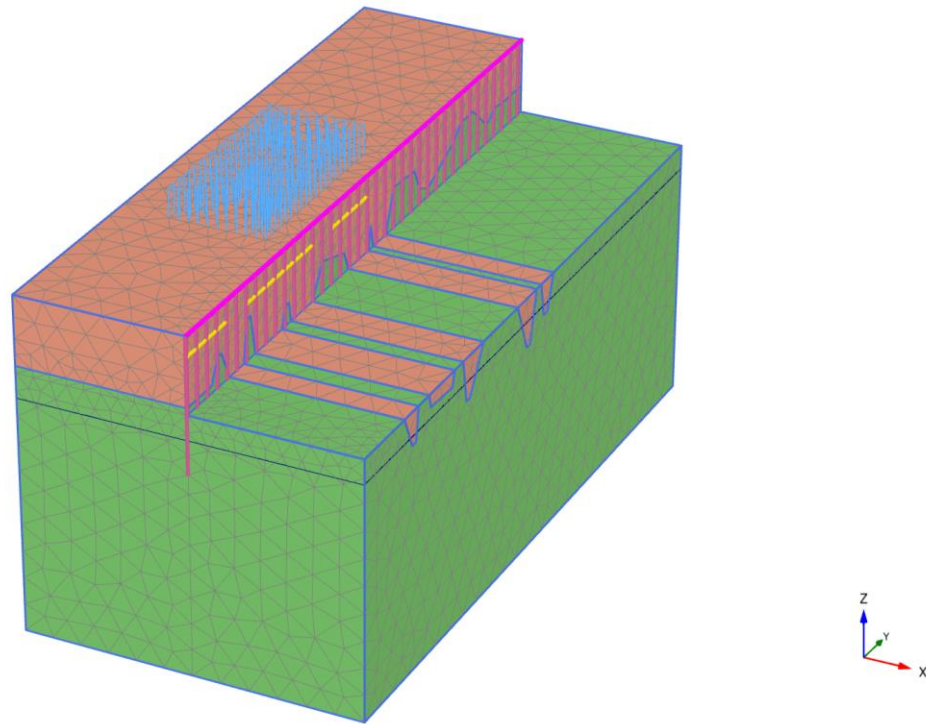
5.2.2. *Pilotska stijena*

Za razliku od 2D proračuna pilotske stijene u kojem su izvedena dva modela, na pilotima P-14 i P-20, 3D proračun pilotske stijene obuhvaća samo jedan model i to pilotsku stijenu od pilota P-1 do pilota P-34 (Slika 26). Proračun se izvodi na jednom modelu iz razloga što je u 3D modelu moguće prikazati realno pružanje linije stijene. Sam model dug je 30 m (po y-osi), širok 15 m (po x-osi) i dubok 15 m (po z-osi). Opterećenje od susjednog objekta postavljeno je na udaljenosti 1,0 m od vrha iskopa, a djeluje po površini dimenzija 8,2 x 4,3 m. Opterećenje ne djeluje površinski već na dubini od 0,50 m ispod površine terena. Dubina od 0,50 m jednaka je donjoj koti temelja obiteljske kuće, a za opterećenje je usvojena proračunska vrijednost stalnog korisnog opterećenja od $q_{ed} = 45,0 * 1,0 = 45,0 \text{ kN/m}^2$.



Slika 34: 3D model vertikalnog iskopa za In-situ fazu

Za 3D proračun vertikalnog iskopa izvode se slijedeće faze: **In-situ** (prikazana na Slici 34), **Aktivacija vanjskog opterećenja**, **Aktivacija pilotske stijene i naglavne grede**, **Iskop za sidra**, **Ugradnja sidara i horizontalnih greda**, **Vertikalni iskop** (Prikazan na Slici 35) i **Analiza stabilnosti**.



Slika 35: 3D model vertikalnog iskopa za fazu Vertikalnog iskopa

3D proračun pilotske stijene sastoji se od nekoliko faza više u odnosu na 2D proračun istog. Razlog tomu je uvođenje novih elemenata u 3D analizi pilotske stijene. Osim mikropilota, koji su prisutni u 2D proračunu pilotske stijene, u 3D proračunu modelirane su naglavna greda UPN 160, horizontalne grede UPN 140 i samobušiva štapna sidra. 2D analizom pilotske stijene obuhvaćena su dva mikropilota bez ugrađenih štapnih sidara i naglavne te horizontalne grede. U pojednostavljenom 3D modelu pilotske stijene, grede i štapna sidra postavljeni su na pripadajuće pozicije određene projektom [1]. Svakom od elemenata ojačanja dodani su pripadajući parametri preuzeti iz projekta [1], a prikazani u Tablicama 10-14. Horizontalna greda UPN 140 (Tablica 10) i naglavna greda UPN 160 (Tablica 11) modelirane su kao *Beam* elementi. U projektu [1] su kao dodatno ojačanje korištene dva profila UPN 140 između kojih je učvršćeno sidro. Zbog toga su u proračunu vrijednosti parametara profila UPN 140 pomnožene sa dva (Tablica 10).

Tablica 10: Parametri horizontalne grede UPN 140 [1]

Identification:	Dvije horizontalne greda UPN 140
Color:	
Material type:	Elastic
E:	200,0E6 kN/m ²
γ :	78,50 kN/m ³
A:	4,080E-3 m ²
I ₂ :	125,4E-8m ⁴
I ₃ :	1210,0E-8 m ⁴

Tablica 11: Parametri naglavne grede UPN 160 [1]

Identification:	Naglavna greda UPN 160
Color:	
Material type:	Elastic
E:	200,0E6 kN/m ²
γ :	78,50 kN/m ³
A:	2,400E-3 m ²
I ₂ :	0,08530E-5 m ⁴
I ₃ :	0,9250E-5 m ⁴

Samobušivo sidro modelira se u dvije faze: prva faza modelira se kao *Anchor* element (Tablica 12), a druga kao *Embedded Beam* element (Tablica 13). Dio modeliran kao *Anchor* element obuhvaća prvih 1,0 m sidra i odnosi se na slobodnu dionicu sidra promjera 38 mm. Dio modeliran kao *Embedded Beam* obuhvaća ostatak sidra i odnosi se na sidrišnu dionicu sidra promjera 115 mm. Vrijednosti parametara samobušivog sidra prikazane su u Tablicama 12 i 13. Vrijednosti parametara samobušivog sidra preuzete su iz projekta [1].

Tablica 12: Parametri samobušivog sidra (*Anchor element*) [1]

Identification:	Samobušivo sidro 38 mm
Color:	
Material type:	Elastic
EA:	148,0E3 kN

Tablica 13: Parametri samobušivog sidra (Embedded beam element) [1]

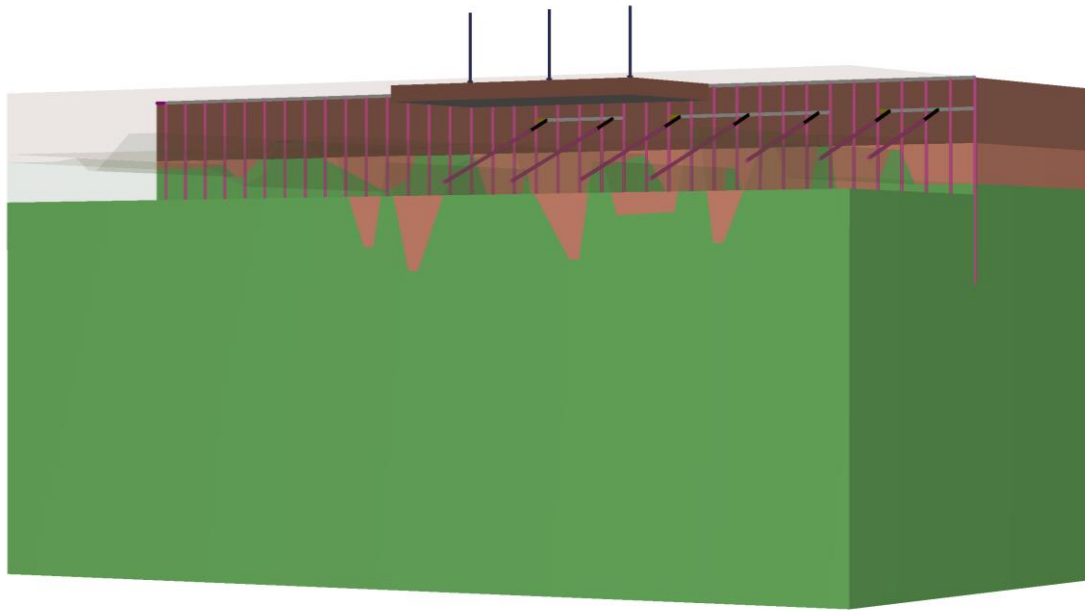
Identification:	Sidrišna dionica 115 mm
Color:	
Material type:	Elastic
E:	14,25E6 kN/m ²
γ :	0,00 kN/m ³
Predefined beam type:	Massive circular beam
Diameter:	0,115 m
A:	0,01039 m ²
I ₂ :	8,585E-6 m ⁴
I ₃ :	8,585E-6 m ⁴

U 2D proračunima (Potpoglavlje 5.1.) elementi mikropilota modelirani su kao *Plate* element, no u 3D proračunu pilotske stijene, mikropiloti su modelirani kao *Embedded beam* elementi. Vrijednosti parametara mikropilota za 3D proračun preuzete su iz projekta [1] i prikazane u Tablici 14.

Tablica 14: Parametri pilota [1]

Identification:	Piloti
Color:	
Material type:	Elastic
E:	30,00E6 kN/m ²
γ :	5,00 kN/m ³
Predefined beam type:	Massive circular beam
Diameter:	0,31 m
A:	0,07548 m ²
I ₂ :	0,4533E-3 m ⁴
I ₃ :	0,4533E-3 m ⁴

Na Slici 36 prikazana su ugrađena štapna sidra, mikropiloti i naglavna te horizontalna greda na 3D modelu pilotske stijene.



Slika 36: 3D model pilotske stijene s ugrađenim elementima ojačanja

Korištenjem karakterističnih vrijednosti parametara tla i stijene (Tablica 6), dobivaju se podaci o pomacima u 3D modelu pilotske stijene za *kritičnu fazu*, fazu *Vertikalnog iskopa*. Proračunom s reduciranim vrijednostima (Tablica 7) dobivaju se podaci o faktoru sigurnosti i izgledu klizne plohe u modelu za *kritičnu fazu*, fazu *Analize stabilnosti*.

6. PRIKAZ I USPOREDBA REZULTATA

6.1. Rezultati dobiveni 2D proračunom

6.1.1. Iskop u nagibu 2V:1H

Proračunima na 2D modelu iskopa u nagibu 2V:1H provedene su analiza stabilnosti i analiza naprezanja i deformacija. Analizom stabilnosti dobiveni su faktor sigurnosti F_s i klizna ploha, a analizom naprezanja i deformacija dobiveni su pomaci modela.

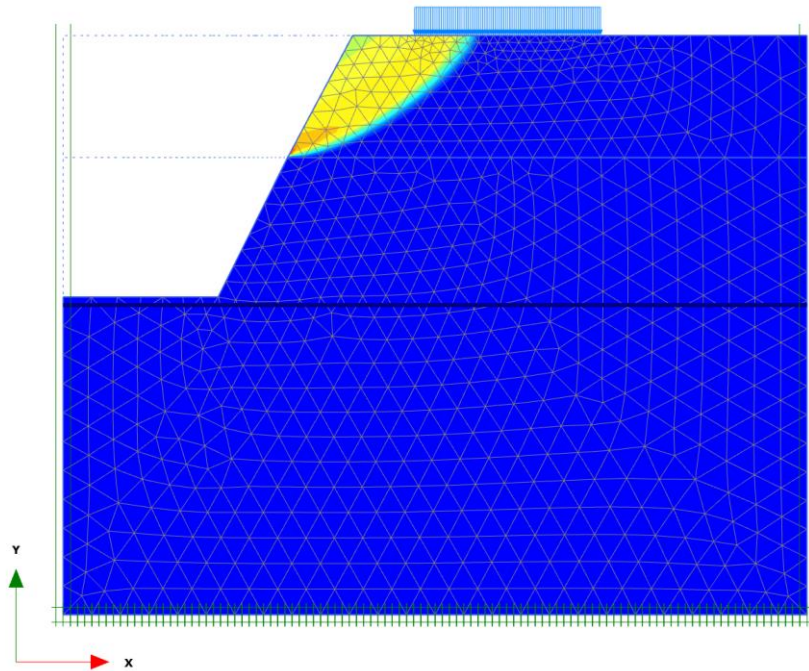
a) Iskop u nagibu 2V:1H – Analiza stabilnosti

Analiza stabilnosti izvodi se za model s proračunskim vrijednostima parametara tla i stijene. Redukcijom karakterističnih vrijednosti parametara tla i stijene prema **Projektnom pristupu 3** [24] dobivene su njihove proračunske vrijednosti. Projektni pristup 3 primjenjuje se na djelovanja i na parametre tla, a u Hrvatskoj se koristi za sve geotehničke proračunske situacije [24]. Parametri, prikazani u Tablici 15, su preuzeti iz projekta [1].

Tablica 15: Proračunske vrijednosti parametara tla i stijene [1]

Materijal:	Parametar:	Proračunska vrijednost:
Crvenica	c'	12,00 kN/m ²
Crvenica	φ'	18,76°
Vapnenac	σ_{ci}	35,71E3 kN/m ²

Proračunom je dobiven podatak o vrijednosti faktora sigurnosti koji, da bi zadovoljio aspekt stabilnosti, mora biti veći od granične vrijednosti 1,0. Za 2D model iskopa u nagibu 2V:1H faktor sigurnosti iznosi $F_s = 1,81$ te model zadovoljava početni uvjet. Drugi podatak dobiven analizom stabilnosti jest izgled klizne plohe u modelu, a prikazan je na Slici 37.



Slika 37: Klizna ploha modela iskopa u nagibu 2V:1H

Iz Slike 37 vidljivo je kako se klizna ploha nalazi u zoni crvenice. Ovakav izgled klizne plohe je i očekivan s obzirom da je crvenica materijal sa znatno nižim parametrima čvrstoće od donje ležećeg vapnenca.

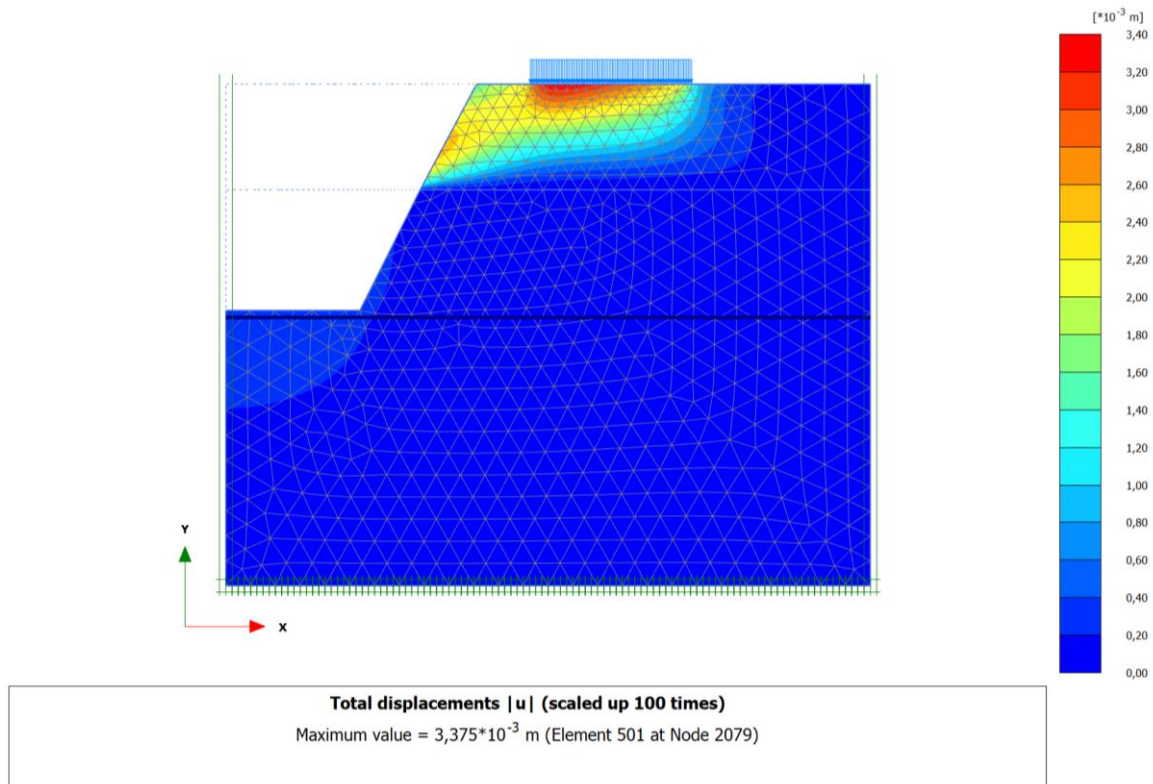
b) *Iskop u nagibu 2V:1H – Analiza naprezanja i deformacija*

Nakon analize stabilnosti, na istom je modelu provedena analiza naprezanja i deformacija s karakterističnim vrijednostima parametara tla i stijene. Parametri su preuzeti iz projekta [1], a prikazani su u Tablici 16.

Tablica 16: Karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene [1]

Materijal:	Parametar:	Karakteristična vrijednost:
Crvenica	c'	15,00 kN/m ²
Crvenica	φ'	23°
Vapnenac	σ_{ci}	50,00E3 kN/m ²

Analizom naprezanja i deformacija dobiveni su podaci o pomacima modela. Na Slici 38 prikazani su ukupni pomaci zabilježeni u najkritičnijoj fazi proračuna, odnosno, u fazi samog iskopa (*Faza Iskopa 2V:1H*, 5.1.1.)



Slika 38: Ukupni pomaci modela iskopa u nagibu 2V:1H

Na Slici 38 prikazan je maksimalni pomak modela, a iznosi $|u| = 3,375 \cdot 10^{-3}$ m, odnosno, otprilike 3,4 mm.

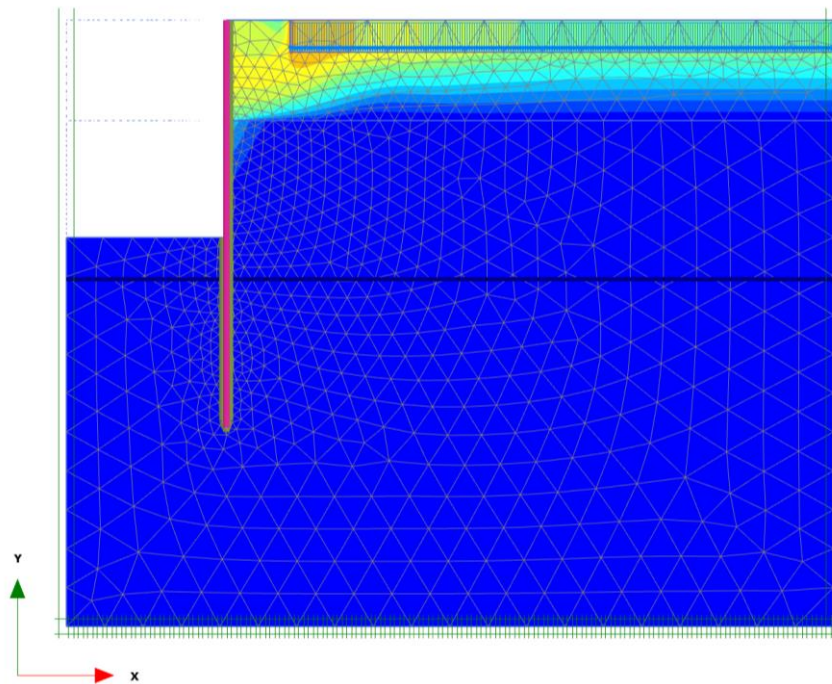
6.1.2. Pilotska stijena – Slučaj 1

Jednako kao i kod proračuna prikazanog u potpoglavlju 6.1.1., za model pilotske stijene također se provode dva proračuna. Prvi je proračun analiza stabilnosti, a drugi analiza naprezanja i deformacija. Proračun pilotske stijene prikazan u ovom potpoglavlju izrađen je na mikropilotu P-14, prikazanom na Slici 27. Iako su duž pilotske stijene lokalno ugrađena štapna sidra, u ovom potpoglavlju opisani su rezultati dobiveni proračunom na mikropilotu bez takvog dodatnog ojačanja.

a) Pilotska stijena – Slučaj 1 : Analiza stabilnosti

Analiza stabilnosti provedena je koristeći proračunske, reducirane vrijednosti parametara tla i stijene, preuzetih iz projekta [1], a prikazanih u Tablici 15.

Proračunom s proračunskim vrijednostima parametara tla i stijene dobivaju se podaci o faktoru sigurnosti i kliznoj plohi modela pilotske stijene. Kao i u potpoglavlju 6.1.1., faktor sigurnosti mora zadovoljiti početni uvjet, odnosno mora biti veći od $F_s = 1,0$. Faktor sigurnosti dobiven proračunom iznosi $F_s = 2,72$, čime je početni uvjet zadovoljen.

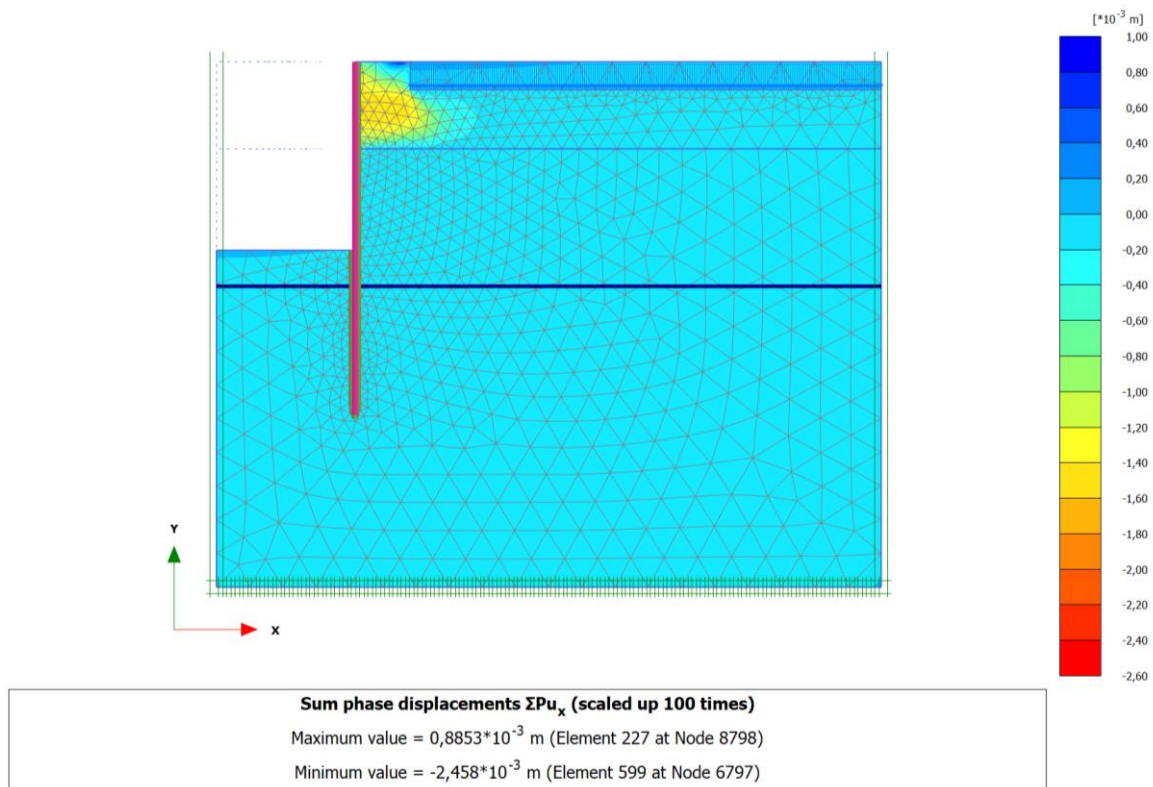


Slika 39: Klizna ploha modela vertikalnog iskopa s povoljnom razinom stijene

Na Slici 39 prikazana je klizna ploha modela pilotske stijene za Slučaj 1. Iz Slike je vidljivo kako je klizna ploha dominantno u sloju crvenice i vrlo malo u stijenskoj masi.

b) Pilotska stijena – Slučaj 1 : Analiza naprezanja i deformacija

Nakon analize stabilnosti, na istom je modelu pilotske stijene napravljena analiza naprezanja i deformacija koristeći karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene. Parametri su preuzeti iz projekta [1], a prikazani su u Tablici 16. Analizom naprezanja i deformacija dobiveni su podaci o horizontalnim pomacima, gledani za najkritičniju fazu (**Faza Vertikalnog iskopa**, 5.1.2.) Minimalni i maksimalni zabilježeni pomaci prikazani su na Slici 40.



Slika 40: Horizontalni pomaci modela vertikalnog iskopa s povoljnom razinom stijene

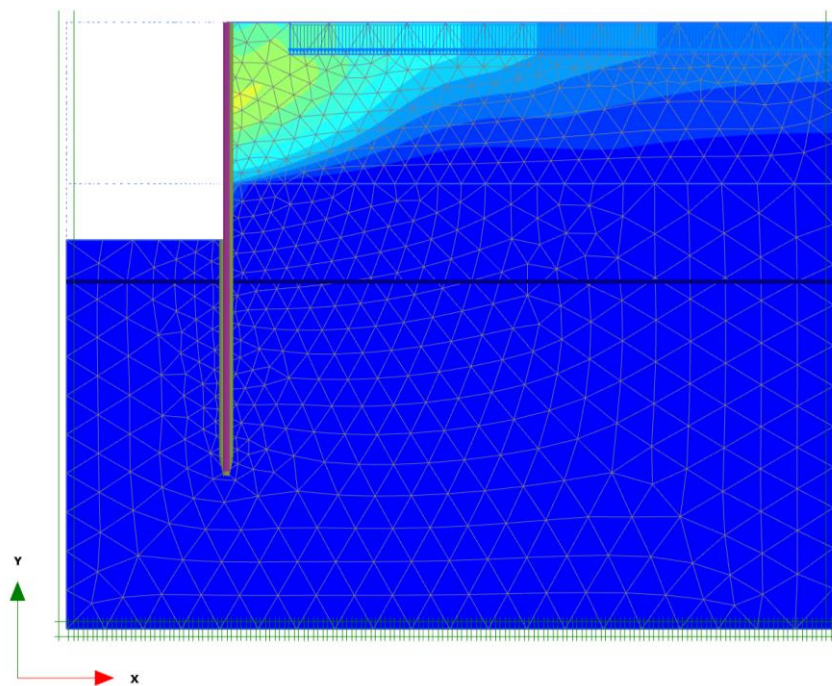
Najveći zabilježeni horizontalni pomak modela (Slika 40) iznosi $\Sigma P u_x = -2,458 \cdot 10^{-3}$ m, odnosno, otprilike 2,5 mm. Negativan predznak maksimalne vrijednosti znači da se radi o pomaku modela prema građevnoj jami.

6.1.3. Pilotska stijena – Slučaj 2

Proračuni u ovom potpoglavlju jednaki su onima prikazanima u potpoglavlju 6.1.2. Razlika je u razini stijenske mase samog modela. Dva slučaja 2D proračuna pilotske stijene napravljena su kako bi se njihovi rezultati međusobno usporedili i kako bi se prikazalo koliko pomaci i faktor sigurnosti ovise o razini stijenske mase. Proračun opisan u ovom potpoglavlju napravljen je na mikropilotu P-20, prikazanom na Slici 27. Mikropilot P-20, isto kao ni mikropilot P-14 (6.1.1.) nema dodatno osiguranje u vidu štapnog sidra.

a) *Pilotska stijena – Slučaj 1 : Analiza stabilnosti*

Analiza stabilnosti za pilotsku stijenu za slučaj 2 provedena je s proračunskim reduciranim parametrima tla i stijene preuzetima iz projekta [1], a prikazanima u Tablici 15. Analizom stabilnosti dobivaju se podaci o izgledu klizne plohe modela i faktoru sigurnosti, koji kao i za slučajeve u potpoglavljima 6.1.1. i 6.1.2., mora biti veći od granične vrijednosti $F_s = 1,0$. Faktor sigurnosti za pilotsku stijenu za slučaj 2 iznosi $F_s = 2,42$, čime iskop zadovoljava s aspekta stabilnosti.

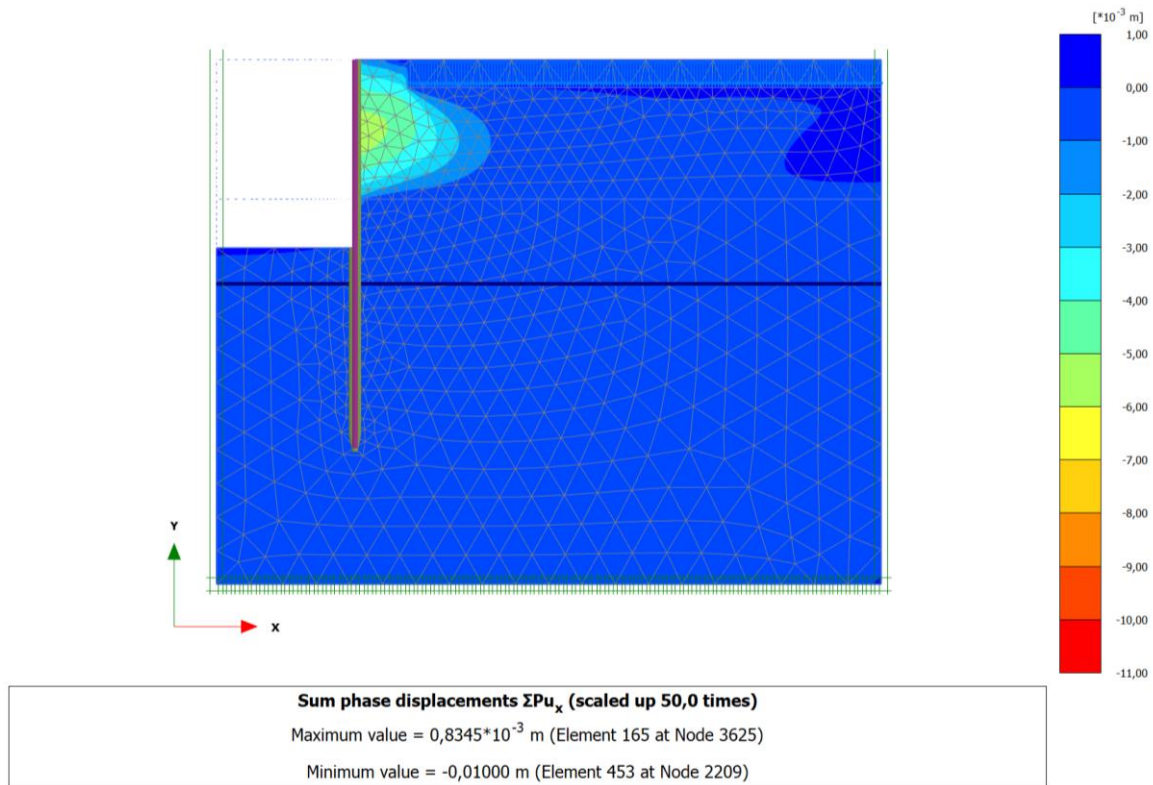


Slika 41: Klizna ploha za model vertikalnog iskopa s realnim položajem stijene

Na Slici 41 prikazana je klizna ploha za model pilotske stijene za slučaj 2, dobivena proračunom s reduciranim vrijednostima parametara tla i stijene. Klizna ploha javlja se u zoni slabijeg materijala, crvenice.

b) *Pilotska stijena – Slučaj 2 : Analiza naprezanja i deformacija*

Analiza naprezanja i deformacija provedena je nakon analize stabilnosti, koristeći karakteristične vrijednosti parametara tla, prikazane u Tablici 16. Analizom naprezanja i deformacija dobiveni su podaci o horizontalnim pomacima modela, a prikazani su na Slici 42.



Slika 42: Horizontalni pomaci za model vertikalnog iskopa s realnim položajem stijene

Maksimalni očitani horizontalni pomak modela, prikazan na Slici 42, iznosi $\Sigma Pu_x = -0,01$ m, odnosno, 10 mm. Negativan predznak maksimalne vrijednosti znači da se radi o pomaku modela prema iskopu.

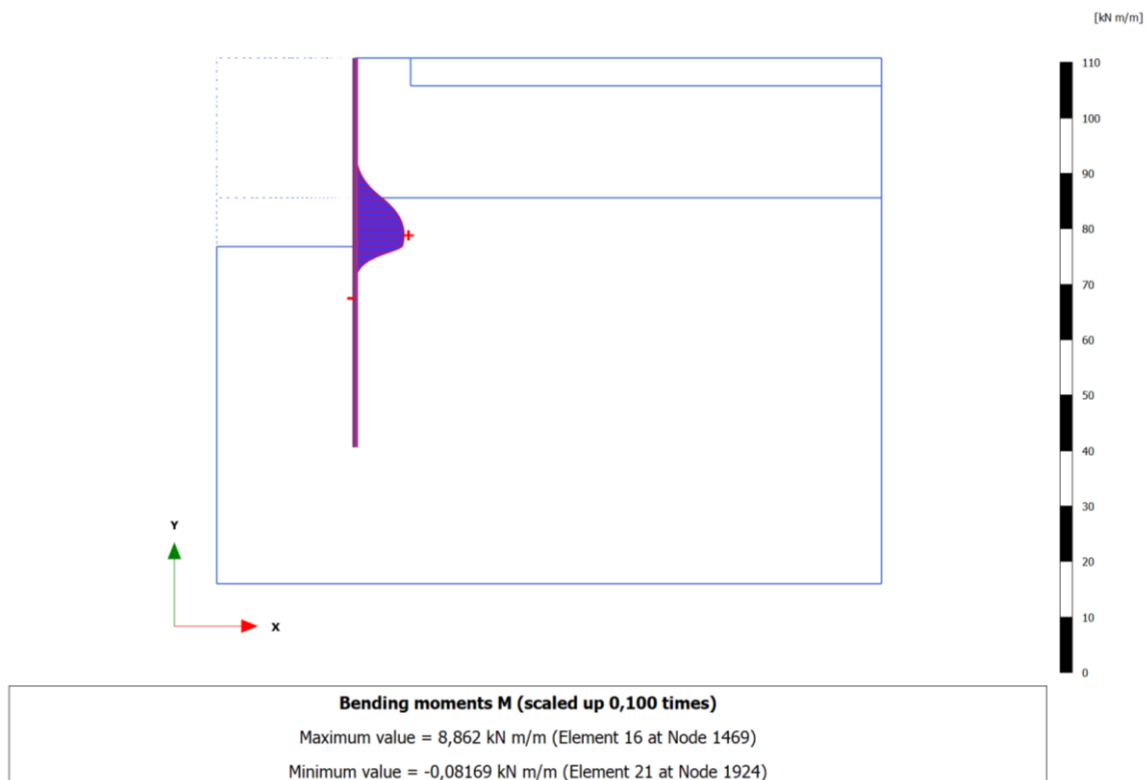
Uspoređujući rezultate dobivene proračunima prikazanim u potpoglavljima 6.1.2. i 6.1.3., vidljivo je kako razina stijenske mase utječe na faktor sigurnosti i pomake modela, čime je potvrđena početna pretpostavka. Faktor sigurnosti za Pilotsku stijenu - Slučaj 2 iznosi $F_s = 2,722$, dok za Pilotsku stijenu - Slučaj 1 iznosi $F_s = 2,420$. Odnosno, faktor sigurnosti modela iskopa s povoljnom razinom stijene je za **12,5% veći** od faktora sigurnosti za model iskopa s realnom razinom stijene. Isto tako, horizontalni pomaci modela prikazani na Slici 41 iznose $\Sigma Pu_x = 10$ mm, dok horizontalni pomaci modela prikazani na Slici 39 iznose $\Sigma Pu_x = 2,458$ mm. Iz ovog slijedi da su horizontalni pomaci modela iskopa s *realnim* položajem stijene **4 puta** veći od horizontalnih pomaka modela iskopa s *povoljnim* položajem stijene.

6.1.4. Dimenzioniranje pilota

2D proračunima vertikalnog iskopa, prikazanima u potpoglavljima 6.1.2. i 6.1.3. dobiveni su i podaci o vrijednostima poprečnih sila i momenata savijanja u mikropilotima. Proračunom u kojem su korištene proračunske, reducirane vrijednosti parametara tla i stijene (Tablica 15) dobivene su vrijednosti za granično stanje nosivosti **GSN**. Proračunom u kojem su korištene karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene (Tablica 16) dobivene su vrijednosti za granično stanje uporabivosti **GSU**. Dobivene vrijednosti GSN i GSU su mjerodavne za dimenzioniranje pilota. Dimenzioniranje mikropilota provedeno je za slučaj vertikalnog iskopa s realnom razinom stijene i za slučaj vertikalnog iskopa s povoljnom razinom stijene.

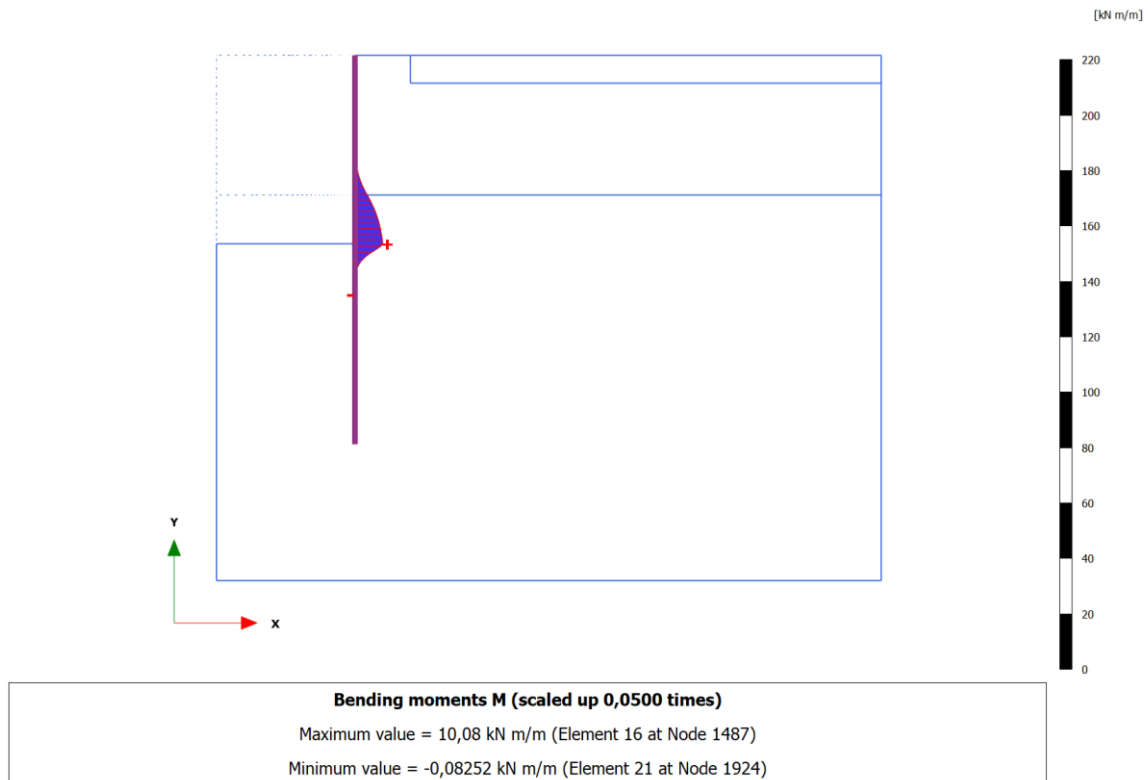
a) Dimenzioniranje pilota – Pilotska stijena - Slučaj 1

Momenti savijanja u mikropilotu dobiveni korištenjem karakterističnih vrijednosti parametara tla i stijene (Tablica 15) prikazani su na Slici 43. Maksimalni zabilježeni moment u mikropilotu iznosi **$M = 8,862 \text{ kN m/m}$** .



Slika 43: Momenti savijanja M za karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene (GSU)

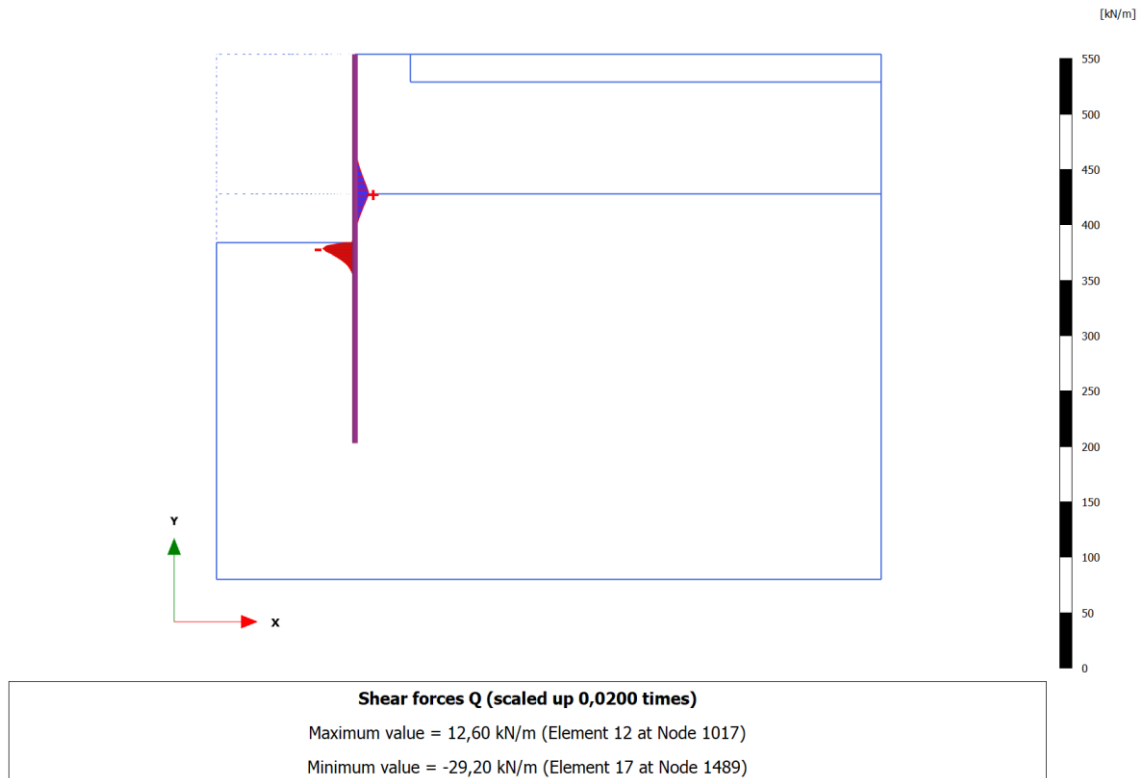
Momenti savijanja u mikropilotu dobiveni korištenjem proračunskih reduciranih vrijednosti parametara tla i stijene (Tablica 16) prikazani su na Slici 44. Maksimalni moment savijanja u mikropilotu iznosi $M = 10,08 \text{ kN m/m}$.



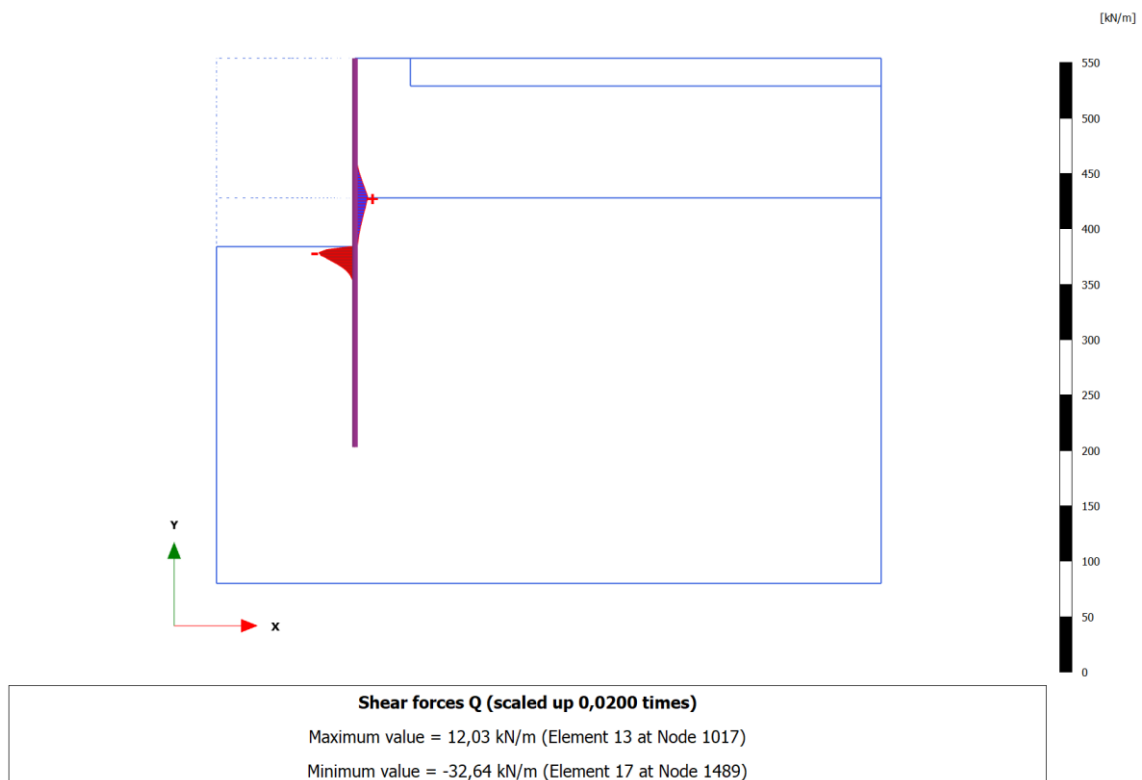
Slika 44: Momenti savijanja M za proračunske vrijednosti parametara tla i stijene (GSN)

Vrijednosti poprečnih sila u mikropilotu dobivenih korištenjem karakterističnih vrijednosti parametara tla i stijene prikazane su na Slici 44. Maksimalna vrijednost poprečne sile prikazana na Slici 45 iznosi $Q = 29,20 \text{ kN/m}$.

Korištenjem proračunskih reduciranih vrijednosti parametara tla i stijene dobivene su vrijednosti poprečnih sila u mikropilotu, a maksimalna zabilježena vrijednost iznosi $Q = 32,64 \text{ kN/m}$ (Slika 46).



Slika 45: Poprečne sile Q za karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene (GSU)



Slika 46: Poprečne sile Q za proračunske vrijednosti parametara tla i stijene (GSN)

Vrijednosti momenata savijanja i poprečnih sila dobivene 2D proračunom za slučaj vertikalnog iskopa s realnom razinom stijene prikazane su u Tablici 17. Dobivene vrijednosti su mjerodavne za dimenzioniranje pilota te se s njima ide u daljnji proračun. Poprečne sile Q (Slike 45 i 46) u proračunu će biti označene kao poprečne sile V .

Tablica 17: Vrijednosti GSU i GSN dobivene proračunom

M_{GSU}	8,862 kN m/m
M_{GSN}	10,08 kN m/m
V_{GSU}	29,20 kN/m
V_{GSN}	32,64 kN/m

Moment savijanja u pilotskoj stijeni

$$M_{Ed} = \max(1,35 * M_{GSU}; M_{GSN}) = \max(1,35 * 8,862; 10,08) = \max(11,96; 10,08)$$

$$M_{Ed} = \underline{11,96 \text{ kN m/m}}$$

Poprečna sila u pilotskoj stijeni

$$V_{Ed} = \max(1,35 * V_{GSU}; V_{GSN}) = \max(1,35 * 29,20; 32,64) = \max(39,42; 32,64)$$

$$V_{Ed} = \underline{39,42 \text{ kN/m}}$$

Faktor 1,35 koristi se u izračunima kao parcijalni faktor za trajno nepovoljno djelovanje sukladno proračunskom pristupu 3 [24]. Vrijednost 0,80 m u sljedećim proračunima označava osni razmak između mikropilota. Vrijednosti momenta savijanja i poprečne sile u pilotskoj stijeni, izračunate u prethodnom koraku, dobivene su kao vrijednosti za m' pilota. U sljedećem koraku potrebno ih je pomnožiti s osnim razmakom 0,80 m kako bi se dobile vrijednosti za jedan pilot.

Moment savijanja u mikropilotu

$$M_{Ed} = 0,80 \text{ m} * 11,96 \text{ kN m/m} = \underline{9,57 \text{ kNm}}$$

Poprečna sila u mikropilotu

$$V_{Ed} = 0,80 \text{ m} * 39,42 \text{ kN/m} = \underline{31,54 \text{ kN}}$$

U mikropilote se kao ojačanje ugrađuju čelični profili IPE 160 klase čelika S235. U nastavku su prikazani proračuni kojima se dokazuje otpornost presjeka na savijanje i na poprečnu silu.

Otpornost presjeka na savijanje

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} * f_y = 123,90 \text{ cm}^3 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 = 29,11 \text{ kNm},$$

gdje je $W_{pl,y}$ plastični moment otpora, a f_y granica popuštanja čelika (klase S235).

$$\underline{M_{Ed} = 9,57 \text{ kNm} < M_{pl,Rd} = 29,11 \text{ kNm}} \text{ i presjek zadovoljava!}$$

Otpornost presjeka na poprečnu silu

$$V_{pl,z,Rd} = A_{v,z} * f_y / 3^{0,5} = 9,66 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,732 = 131,06 \text{ kN},$$

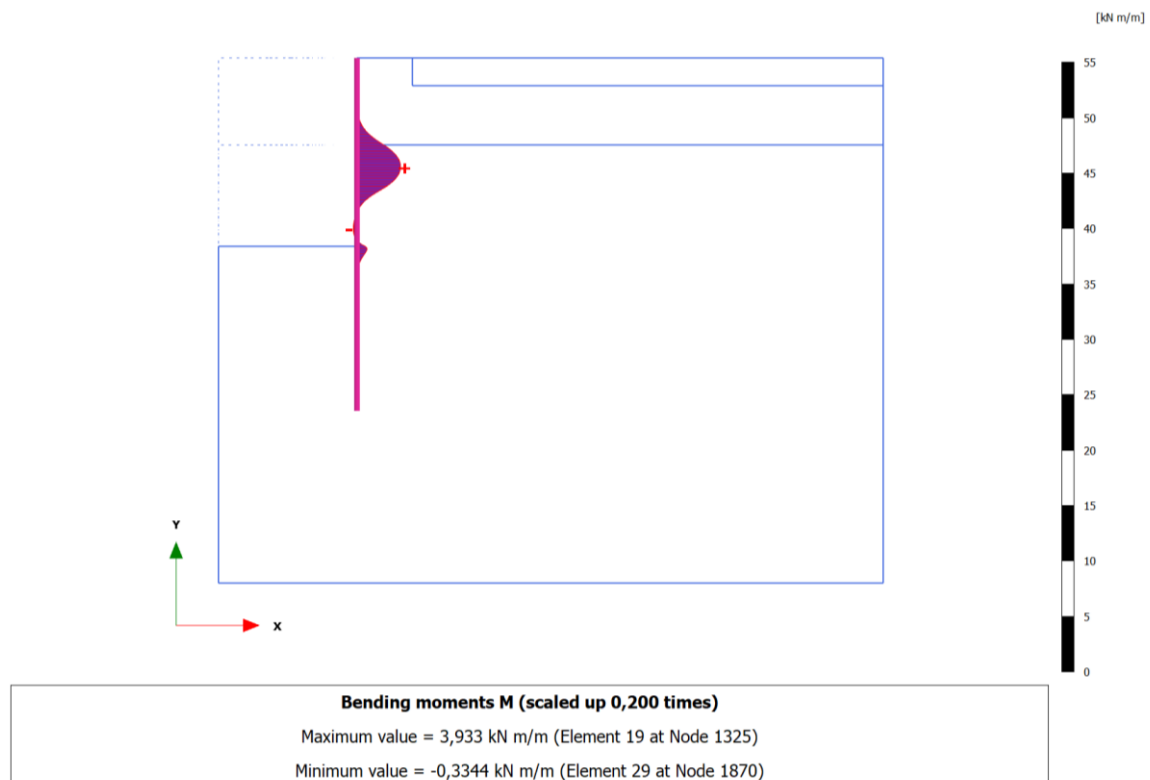
gdje je f_y granica popuštanja čelika (S235), a $A_{v,z}$ posmična poizvodina presjeka u smjeru
osi z.

$$\underline{V_{Ed} = 31,54 \text{ kN} < V_{pl,z,Rd} = 131,06 \text{ kN}} \text{ i presjek zadovoljava!}$$

b) *Dimenzioniranje pilota – Pilotska stijena - Slučaj 2*

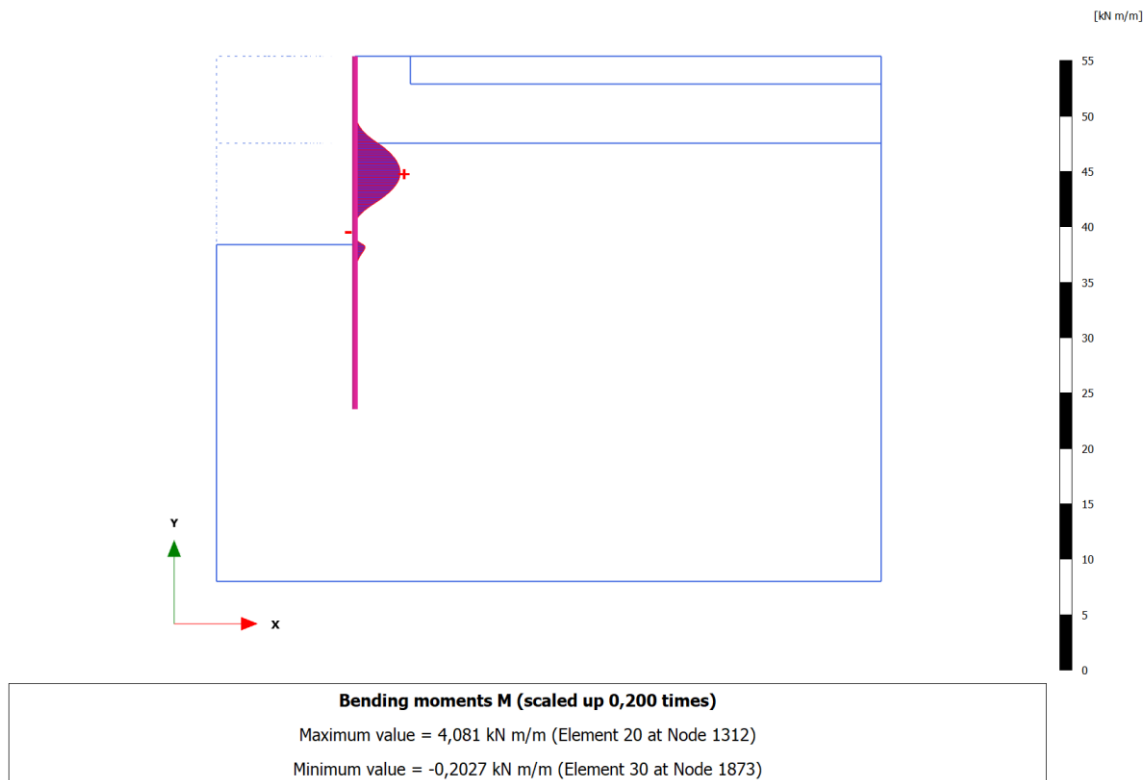
Nakon dimenzioniranja pilota za slučaj vertikalnog iskopa s realnom razinom stijene, isto je napravljeno za slučaj vertikalnog iskopa s povoljnom razinom stijene. Proračunima su dobivene vrijednosti momenata savijanja i poprečnih sila u mikropilotu, koje su mjerodavne za daljnje dimenzioniranje pilota.

Proračunom u kojem su korištene karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene (Tablica 15), dobivene su vrijednosti momenata savijanja u mikropilotu te prikazane na Slici 47. Maksimalna vrijednost momenta savijanja iznosi $M = 3,933 \text{ kN m/m}$.



Slika 47: Momenti savijanja M za proračun s karakterističnim vrijednostima parametara tla i stijene (GSU)

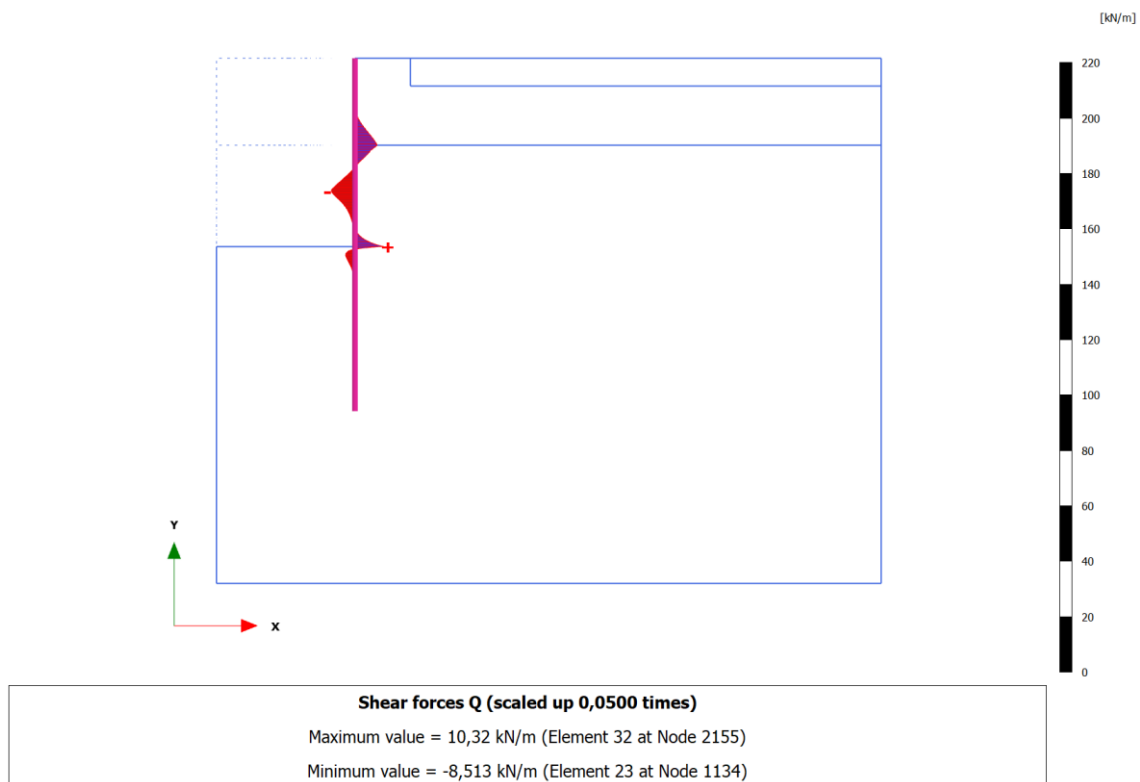
Proračunom u kojem su korištene proračunske, reducirane vrijednosti parametara tla i stijene (Tablica 16) dobivene su vrijednosti momenata savijanja u mikropilotu, a prikazane su na Slici 48. Najveći moment savijanja prikazan na Slici 48 iznosi $M = 4,081 \text{ kN m/m}$.



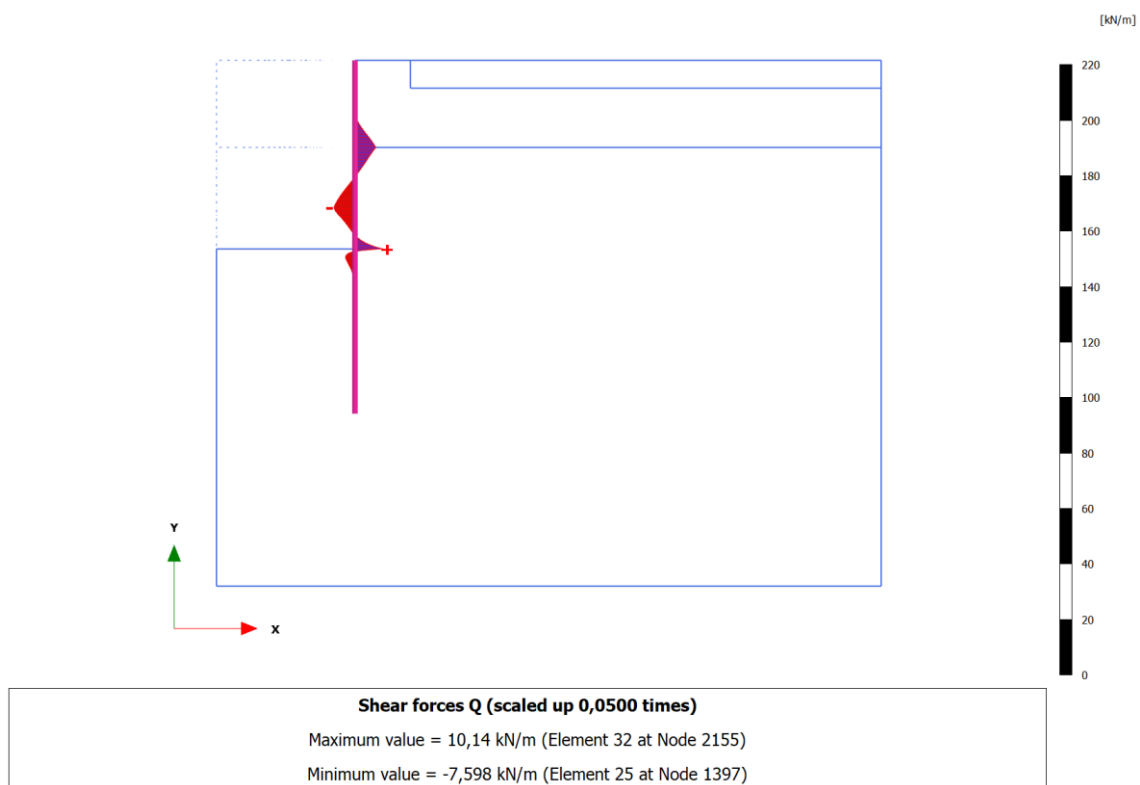
Slika 48: Momenti savijanja M za proračun s proračunskim vrijednostima parametara tla i stijene (GSN)

Vrijednosti poprečnih sila dobivenih proračunom u kojem su korištene karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene prikazane su na Slici 49. Maksimalna zabilježena vrijednost poprečne sile u mikropilotu iznosi $Q = 10,32 \text{ kN/m}$.

Korištenjem proračunskih vrijednosti parametara tla i stijene dobivene su vrijednosti poprečnih sila u mikropilotu koje su prikazane na Slici 50. Najveća zabilježena poprečna sila u mikropilotu (Slika 50) iznosi $Q = 10,14 \text{ kN/m}$.



Slika 49: Poprečne sile Q za karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene (GSU)



Slika 50: Poprečne sile Q za proračunske vrijednosti parametara tla i stijene (GSN)

Vrijednosti momenata savijanja i poprečnih sila dobivene 2D proračunom za slučaj vertikalnog iskopa s povoljnom razinom stijene prikazane su u Tablici 18. Dobivene vrijednosti su mjerodavne za dimenzioniranje pilota te se s njima ide u daljnji proračun.

Tablica 18: Vrijednosti M_{GSU} i M_{GSN} dobivene proračunom

M_{GSU}	3,933 kN m/m
M_{GSN}	4,081 kN m/m
V_{GSU}	10,32 kN/m
V_{GSN}	10,14 kN/m

Moment savijanja u pilotskoj stijeni

$$M_{Ed} = \max(1,35 * M_{GSU} ; M_{GSN}) = \max(1,35 * 3,933 ; 4,081) = \max(5,31 ; 4,081)$$

$$M_{Ed} = \underline{5,31 \text{ kN m/m}}$$

Poprečna sila u pilotskoj stijeni

$$V_{Ed} = \max(1,35 * V_{GSU} ; V_{GSN}) = \max(1,35 * 10,32 ; 10,14) = \max(13,93 ; 10,14)$$

$$V_{Ed} = \underline{13,93 \text{ kN/m}}$$

Isto kao i za prethodni proračun (6.1.4., a)), koristi se parcijalni faktor 1,35 za trajno nepovoljno djelovanje [24]. Rezultati M_{Ed} i V_{Ed} su dobiveni za m' pilota te ih je potrebno pomnožiti s osnim razmakom mikropilota 0,80 m kako bi se dobile vrijednosti za pojedinačni pilot.

Moment savijanja u mikropilotu

$$M_{Ed} = 0,80 \text{ m} * 5,31 \text{ kN m/m} = \underline{4,25 \text{ kNm}}$$

Poprečna sila u mikropilotu

$$V_{Ed} = 0,80 \text{ m} * 13,93 \text{ kN/m} = \underline{11,14 \text{ kN}}$$

U mikropilote se kao ojačanje ugrađuju čelični profili IPE 160 klase čelika S235. U nastavku su prikazani proračuni kojima se dokazuje otpornost presjeka na savijanje i na poprečnu silu.

Otpornost presjeka na savijanje

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} * f_y = 123,90 \text{ cm}^3 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 = 29,11 \text{ kNm},$$

gdje je $W_{pl,y}$ plastični moment otpora, a f_y granica popuštanja čelika (klase S235).

$$\underline{M_{Ed} = 4,25 \text{ kNm} < M_{pl,Rd} = 29,11 \text{ kNm}} \text{ i presjek zadovoljava!}$$

Otpornost presjeka na poprečnu silu

$$V_{pl,z,Rd} = A_{v,z} * f_y / 3^{0,5} = 9,66 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,732 = 131,06 \text{ kN},$$

gdje je f_y granica popuštanja čelika klase S235, a $A_{v,z}$ posmična poizvodina presjeka u smjeru osi z.

$V_{Ed} = 11,14 \text{ kN} < V_{pl,z,Rd} = 131,06 \text{ kN}$ i presjek zadovoljava!

6.2. Rezultati dobiveni 3D proračunom

6.2.1. Iskop u nagibu 2V:1H

3D proračunima na modelu iskopa u nagibu 2V:1H provedene su analiza stabilnosti i analiza naprezanja i deformacija. Analizom stabilnosti dobiveni su podaci o faktoru sigurnosti i ukupnim pomacima modela.

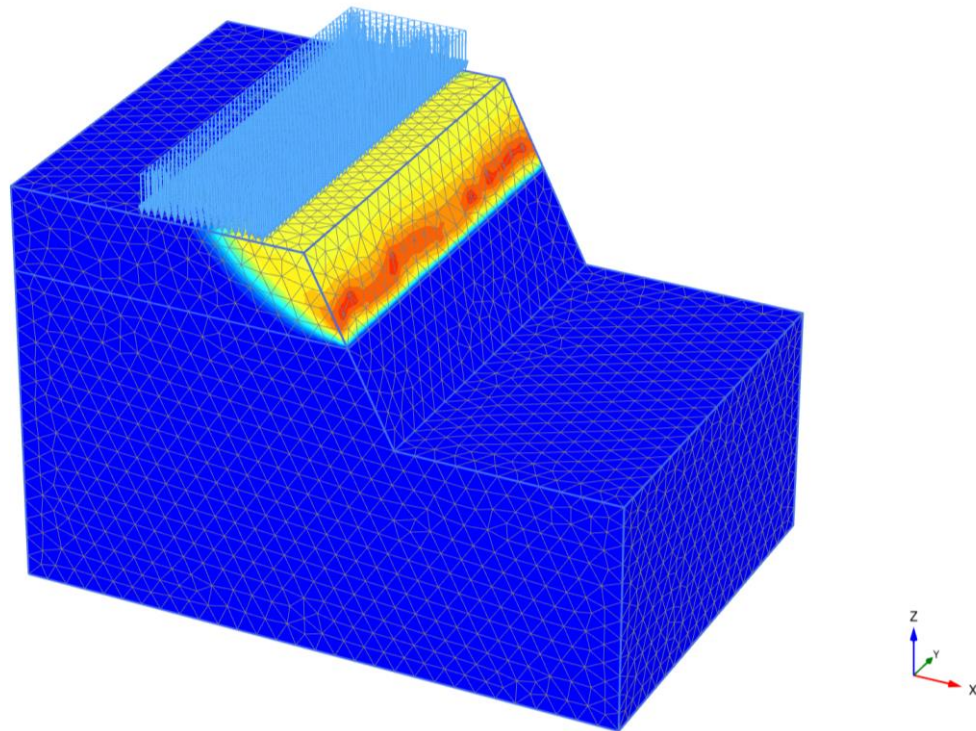
a) Iskop u nagibu 2V:1H – Analiza stabilnosti

Analiza stabilnosti modela iskopa u nagibu provodi se koristeći se proračunskim, reduciranim parametrima tla i stijene. Parametri su reducirani prema Proračunskom pristupu 3 [24], a preuzeti su iz projekta [1] te prikazani u Tablici 19. Proračunski pristup 3 primjenjuje se na djelovanja i parametre tla, a u Hrvatskoj se koristi za sve geotehničke proračunske situacije [24].

Tablica 19: Proračunske vrijednosti parametara tla i stijene [1]

Materijal:	Parametar:	Proračunska vrijednost:
Crvenica	c'	12,00 kN/m ²
Crvenica	φ'	18,76°
Vapnenac	σ_{ci}	35,71E3 kN/m ²

Analizom stabilnosti dobivena je vrijednost faktora sigurnosti 3D modela iskopa u nagibu koja mora biti veća od granične, odnosno, veća od $F_s = 1,0$. Faktor sigurnosti dobiven analizom stabilnosti 3D modela iskopa u nagibu 2V:1H iznosi $F_s = 1,83$ te model time zadovoljava s aspekta stabilnosti. Na Slici 51 prikazan je izgled klizne plohe modela, gledane za kritičnu fazu (Faza *Iskopa 2V:1H*, 6.1.1.) Klizna ploha (Slika 51) prisutna je samo u zoni materijala crvenice.



Slika 51: Klizna ploha modela iskopa u nagibu 2V:1H

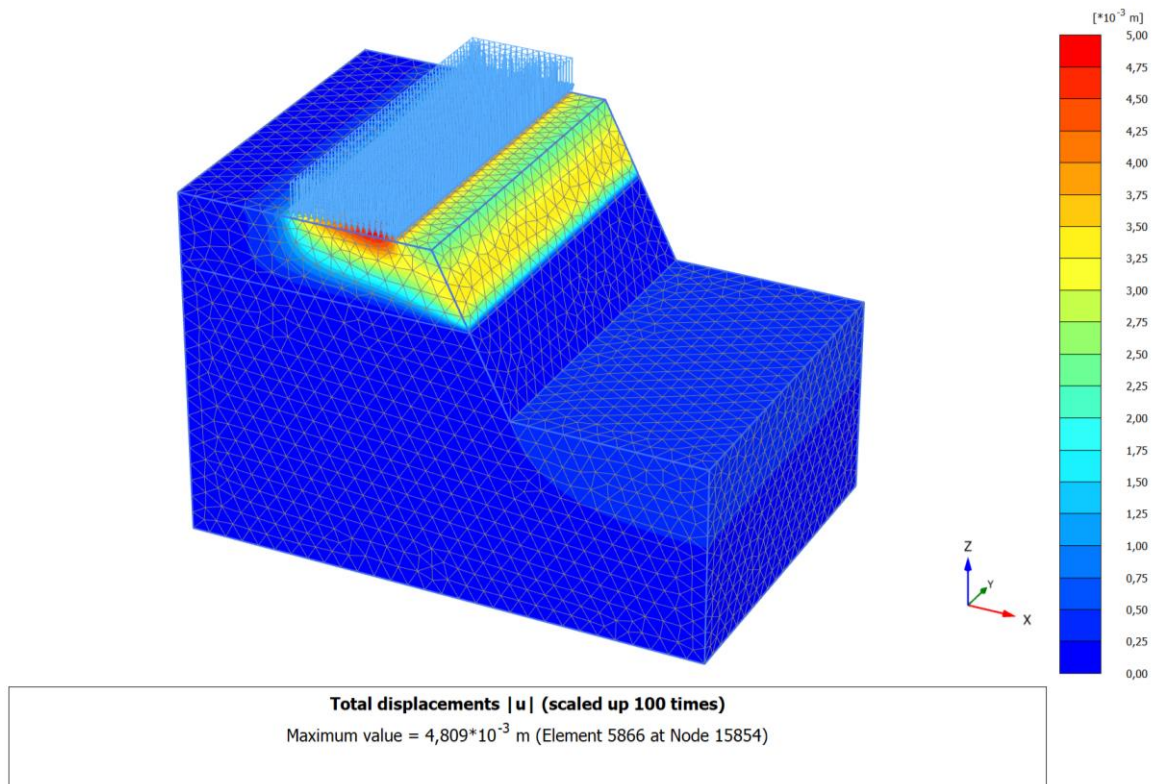
b) Iskop u nagibu 2V:1H – Analiza naprezanja i deformacija

Nakon analize stabilnosti, na istom modelu se provodi analiza naprezanja i deformacija redukcijom karakterističnih vrijednosti parametara tla i stijene. Karakteristične vrijednosti parametara preuzete su iz projekta [1], a prikazane su u Tablici 20.

Tablica 20: Karakteristične vrijednosti parametara tla i stijene [1]

Materijal:	Parametar:	Karakteristična vrijednost:
Crvenica	c'	15,00 kN/m ²
Crvenica	φ'	23°
Vapnenac	σ_{ci}	50,00E3 kN/m ²

Proračunom u kojem se koriste karakteristične vrijednosti parametara tla, dobivaju se podaci o ukupnim pomacima modela, koji su prikazani na Slici 52.



Slika 52: Ukupni pomaci modela iskopa u nagibu 2V:1H

Maksimalni zabilježeni ukupni pomak modela, prikazan na Slici 52, iznosi $|u| = 4,809 \cdot 10^{-3}$ m, odnosno, 4,8 mm. Pomaci modela kreću se prema iskopu.

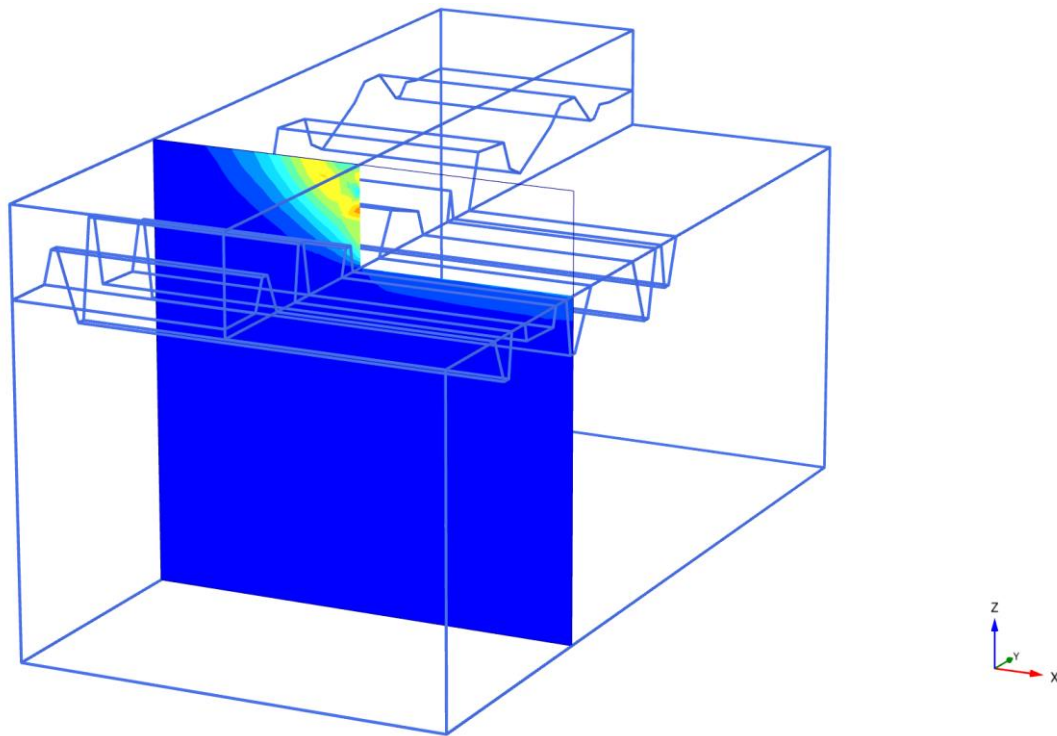
6.2.2. Vertikalni iskop

3D proračun vertikalnog iskopa rađen je na jednom modelu na kojem je prikazana realna linija pružanja stijenske mase. Za razliku od 2D proračuna vertikalnog iskopa, u 3D proračun uključena su sva dodatna ojačanja u vidu naglavnih greda i štapnih sidara. Proračunom su obuhvaćene analiza sigurnosti i analiza naprezanja i deformacija.

a) Vertikalni iskop – Analiza stabilnosti

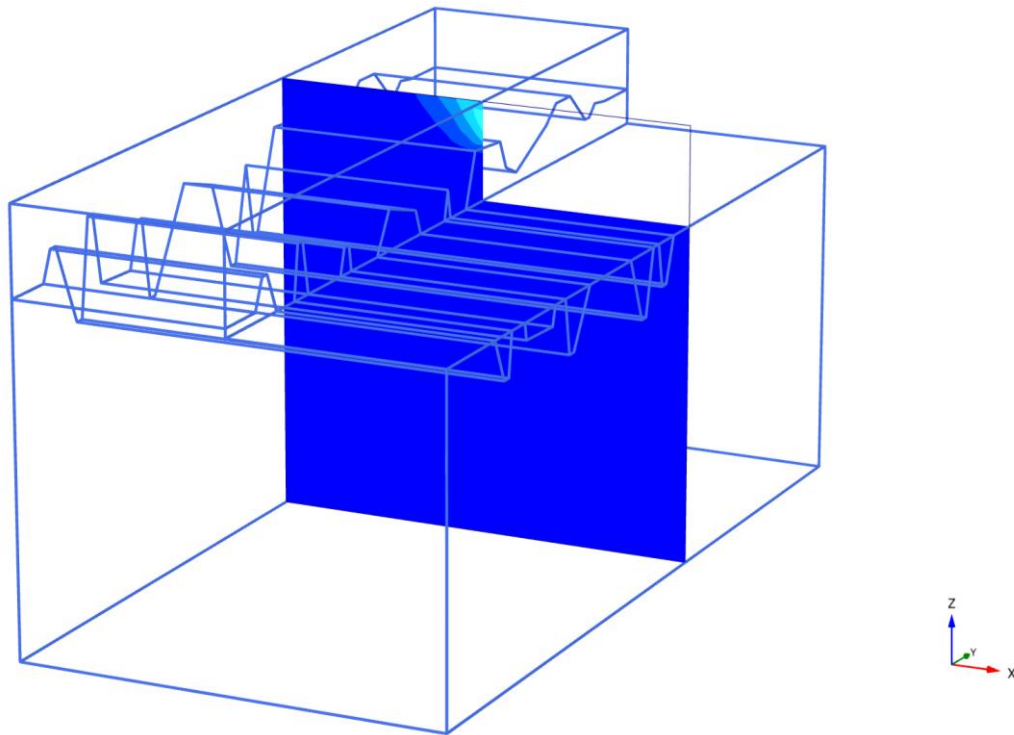
U analizi stabilnosti korištene su proračunske, reducirane vrijednosti parametara tla i stijene, prikazane u Tablici 19. Analizom stabilnosti dobiveni su podaci o izgledu klizne plohe u modelu i faktoru sigurnosti. Faktor sigurnosti mora biti veći od granične vrijednosti $F_s = 1,0$ kako bi model iskopa zadovoljio s aspekta stabilnosti. Faktor sigurnosti dobiven analizom stabilnosti za 3D proračun vertikalnog iskopa iznosi $F_s = 1,42$, čime je početni uvjet zadovoljen i iskop je stabilan.

Klizna ploha modela, dobivena analizom stabilnosti, razlikuje se od profila do profila. Na Slici 53 prikazan je poprečni profil na kojem je prikazana njegova klizna ploha. Ovakav širok oblik klizne plohe karakterističan je za profile na kojima djeluje vanjsko opterećenje, u ovom slučaju opterećenje od susjednog objekta.



Slika 53: Klizna ploha na poprečnom profilu

Dubina same klizne plohe ovisi o liniji stijenske mase. Klizna ploha prisutna je dominantno u zoni crvenice. Sukladno tome, klizna će ploha djelovati dublje na mjestima gdje je razina stijene niža i obrnuto. Na Slici 54 prikazana je klizna ploha na profilu u kojem je linija stijene smještena visoko u odnosu na dno iskopa i u kojem ne postoji djelovanje vanjskog opterećenja. Vidljivo je kako je klizna ploha plića i uža u odnosu na kliznu plohu prikazanu na Slici 53.

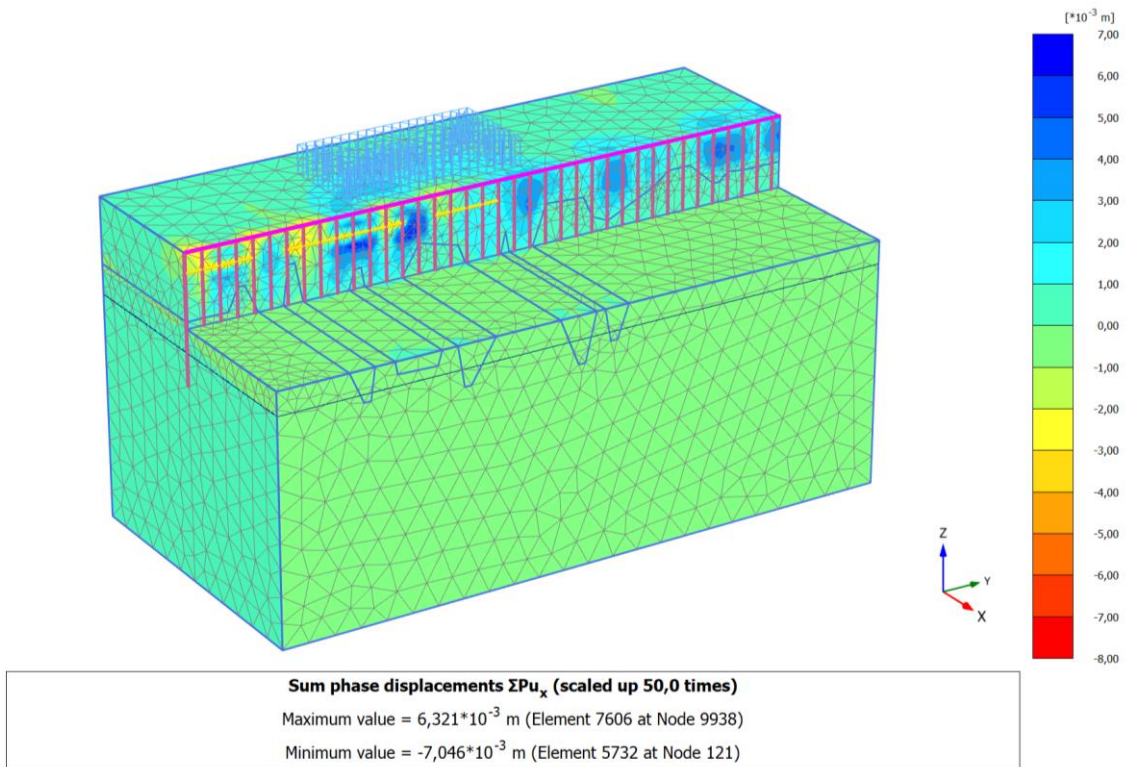


Slika 54: Klizna ploha na poprečnom profilu

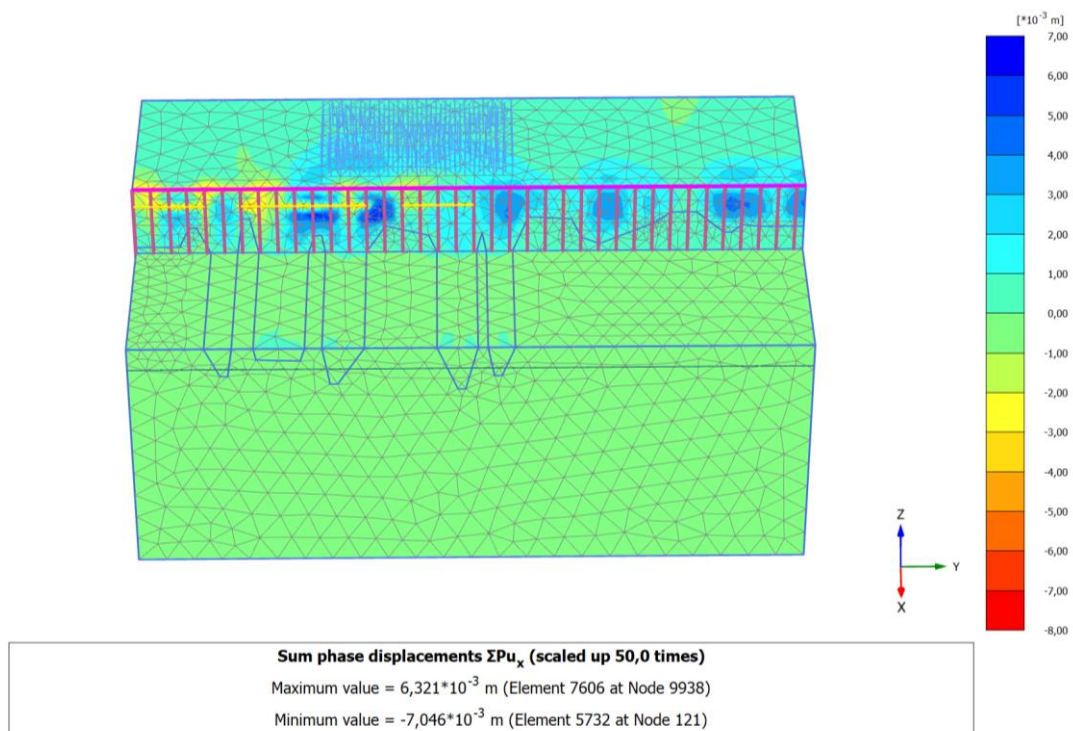
b) Vertikalni iskop – Analiza naprezanja i deformacija

Nakon analize stabilnosti, na istom modelu provedena je analiza naprezanja i deformacija. Analizom naprezanja i deformacija dobiveni su podaci o pomacima modela. Horizontalni pomaci modela vertikalnog iskopa prikazani su na Slikama 55 i 56.

Maksimalni zabilježeni horizontalni pomak u smjeru iskopa, prikazan na Slikama 55 i 56, iznosi $\Sigma P u_x = 6,321 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, odnosno, 6,3 mm i kreće se prema iskopu. Na Slikama 55 i 56 vidljivo je kako horizontalni pomak prati liniju stijenske mase. Odnosno, horizontalni pomaci najizraženiji su i najveći u zoni crvenice. Također, najveći zabilježeni horizontalni pomaci na modelu iznose $\Sigma P u_x = -7,046 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, odnosno, 7,05 mm, a kreću se od iskopa. Ovi pomaci zabilježeni su na mjestima gdje je postavljeno dodatno ojačanje u vidu sidara.



Slika 55: Horizontalni pomaci modela vertikalnog iskopa



Slika 56: Horizontalni pomaci modela vertikalnog iskopa

6.3. Usporedba rezultata 2D i 3D analize

Na svakom od 2D i 3D modela, obrađenih u 5. i 6. poglavlju, provedene su analize naprezanja i deformacija i analize stabilnosti. Analizom naprezanja i deformacija dobivene su vrijednosti *pomaka* modela, dok su analizom stabilnosti dobivene vrijednosti *faktora sigurnosti* i izgleda klizne plohe.

Rezultati dobiveni proračunima na 2D i 3D modelu iskopa u nagibu 2V:1H prikazani su u Tablici 21.

Tablica 21: Usporedba rezultata proračuna 2D i 3D modela iskopa u nagibu 2V:1H

Iskop u nagibu 2V:1H	2D model	3D model
Ukupni pomak modela $ u $	$3,375 \cdot 10^{-3}$ m (3,4 mm)	$4,809 \cdot 10^{-3}$ m (4,8 mm)
Faktor sigurnosti F_s	1,81	1,83

Iz Tablice 21 vidljivo je kako su ukupni pomaci modela $|u|$ veći za 3D model iskopa u nagibu, odnosno, **1,4 puta veći** od ukupnih pomaka zabilježenih analizom 2D modela istog. Faktor sigurnosti neznatno je veći za 3D model nego za 2D model iskopa u nagibu.

Nakon proračuna iskopa u nagibu, provedena je analiza na 2D i 3D modelima pilotske stijene. Za 2D proračun provedena je analiza za dva slučaja, dok je za 3D proračun analiza provedena na jednom modelu. U Tablici 22 prikazane su maksimalne zabilježene vrijednosti horizontalnih pomaka ΣP_x i faktori sigurnosti dobiveni proračunima 2D i 3D modela pilotske stijene.

Tablica 22: Usporedba rezultata proračuna 2D i 3D modela pilotske stijene

Pilotska stijena	2D model – Slučaj 1	2D model – Slučaj 2	3D model
Horizontalni pomaci ΣP_x	$2,458 \cdot 10^{-3}$ m (2,5 mm)	0,01 m (10 mm)	$6,321 \cdot 10^{-3}$ m (6,3 mm)
Faktor sigurnosti F_s	2,72	2,42	1,42

Vrijednosti maksimalnih horizontalnih pomaka ΣP_x i faktora sigurnosti za 2D proračune pilotske stijene (Tablica 22) međusobno se razlikuju zbog geologije i geometrije samih modela (6.1.3.). 2D model – Slučaj 1 razmatra se kao povoljniji od Slučaja 2, stoga je i očekivano da su njegovi horizontalni pomaci biti manji, a faktor sigurnosti veći. Maksimalna vrijednost horizontalnih pomaka (koji se kreću prema iskopu) 3D modela iznosi 6,3 mm, što je otprilike

jednako srednjoj vrijednosti pomaka zabilježenih za Slučaj 1 i Slučaj 2. Isto tako, iz Tablice 22 vidljivo je kako faktor sigurnosti pilotske stijene za 3D model manji od oba faktora sigurnosti dobivenih za 2D modele pilotske stijene.

7. ZAKLJUČAK

Predmet ovog rada je usporedba rezultata proračuna dobivenih analizom 2D i 3D modela građevne jame, a rađenih u programskom paketu PLAXIS. Proračuni su provedeni na postojećoj građevnoj jami lociranoj u Novigradu, čiji su oblici osiguranja određeni projektom [1]. U svrhu usporedbe, proračunom su obuhvaćena tri dvodimenzionalna modela i dva trodimenzionalna modela jame. Građevna je jama podijeljena u dvije zone, ovisno o načinu iskopa. Prvom zonom obuhvaćen je iskop u nagibu 2V:1H, za koji su u proračunu obuhvaćeni jedan 2D model i jedan 3D model na istoj lokaciji. Temeljem podataka s terena određena je dubina geoloških slojeva, a geometrija iskopa preuzeta je iz projekta [1]. Oba modela iskopa u nagibu 2V:1H geometrijski su vrlo jednostavna, a na njih djeluje jedino vanjsko opterećenje obližnje prometnice. Iz rezultata dobivenih proračunima, a obrađenih u potpoglavlju 6.3. vidljivo je kako su vrijednosti, posebice vrijednosti faktora sigurnosti, dobivene 2D i 3D analizom, vrlo slične. Ukupni pomaci su veći za trodimenzionalni model, no veći je i faktor sigurnosti. Druga zona obuhvaća vertikalni iskop građevne jame na mjestu kojeg se izvodi pilotska stijena u vidu načina osiguranja samog iskopa. Zbog nepravilnog oblika stijenske mase na lokaciji, dvodimenzionalnom analizom obuhvaćena su dva različita iskopa pilotske stijene. Modeli su izrađeni za nepovoljan i povoljan slučaj stijene kako bi se vidjelo koliko linija stijenske mase utječe na rezultate proračuna. Trodimenzionalnom analizom obuhvaćen je jedan model pilotske stijene u kojem su prikazana sva potrebna ojačanja (štapna sidra, naglavne i horizontalne grede te mikropiloti) i realna linija pružanja stijene. U sva tri modela prikazano je i vanjsko opterećenje obližnjeg objekta koje djeluje na iskop. U rezultatima prikazanima u potpoglavlju 6.3. vidljivo je kako se rezultati 2D i 3D modela pilotske stijene razlikuju u većoj mjeri od onih dobivenih za slučaj iskopa u nagibu 2V:1H. 2D model pilotske stijene za slučaj 1 prikazuje povoljno stanje stijene na lokaciji, što je vidljivo i iz rezultata. Slučaj 2 prikazuje nepovoljnije stanje stijene na lokaciji. Horizontalni pomaci modela proračunati za slučaj 1 su četiri puta manji od onih za slučaj 2. Također, u slučaju 1, faktor sigurnosti je veći, što je i za očekivati s obzirom na višu razinu linije stijenske mase u odnosu na onu iz slučaja 2. Rezultati 2D analize pilotske stijene, kako je već rečeno, provedeni su za jedan povoljan te za jedan nepovoljniji slučaj pilotske stijene. Tako je za očekivati da će svi ostali rezultati horizontalnih pomaka i faktora sigurnosti duž pilotske stijene „padati“ u domenu između vrijednosti dobivenih ovim dvjema analizama. 3D model pilotske stijene najkompleksniji je od svih obrađenih. 2D analizom modela pilotske stijene nisu obuhvaćena sva dodatna ojačanja koja su prisutna duž jame. 3D model napravljen je tako da prikazuje realno pružanje stijenske mase te

sva postojeća ojačanja na lokaciji. Vrijednost faktora sigurnosti dobivena 3D analizom je puno manja od onih dobivenih 2D analizom na istoj lokaciji. Isto tako, maksimalni zabilježeni horizontalni pomak u 3D modelu jednak je srednjoj vrijednosti horizontalnih pomaka zabilježenih na 2D modelima pilotske stijene. Generalno, modeli rađeni i proračunati za slučaj iskopa u nagibu 2V:1H geometrijski i geološki su puno jednostavniji i međusobno puno sličniji od modela rađenih za pilotsku stijenu. 3D analizom pilotske stijene prikazano je nekoliko dodatnih elemenata koji nisu prisutni u 2D modelima, a utječu na rezultate proračuna. Zona II, u kojoj se izvodi pilotska stijena, mnogo je kompleksnija od Zone I (i geološki i geometrijski) te je zbog toga teško izdvojiti jedan ili dva profila kojima bi se moglo prikazati ponašanje kompletne pilotske stijene. Ono što se nameće kao zaključak rada jest da za jednostavne geotehničke slučajeve nije nužno raditi trodimenzionalne modele, već se mjerodavni rezultati mogu dobiti proračunima na 2D modelima. Upravo je takva situacija vidljiva analizom rezultata dobivenih proračunima za iskop u nagibu 2V:1H, gdje se vrijednosti rezultata 2D i 3D analize razlikuju u vrlo malom postotku. Što se tiče zahtjevnijih geotehničkih slučajeva, kao što je pilotska stijena obrađena u ovom radu, analiza na 3D modelu nameće se kao bolje rješenje upravo zbog toga što su u obzir uzeti svi elementi ojačanja i osiguranja te kompleksna geometrija modela koje bi teže bilo prikazati dvodimenzionalnim modelima.

POPIS LITERATURE

- [1] Geotech, »Projekt osiguranja građevne jame,« Rijeka, 2022.
- [2] I. Vrkljan, Podzemne građevine i tuneli, Rijeka: Građevinski fakultet u Rijeci, 2003.
- [3] S. Dugonjić Jovančević, »Merlin, Materijali s predavanja,« 4. Listopad 2021. [Mrežno]. Available: <https://moodle.srce.hr/2021-2022/>. [Pokušaj pristupa 4. Listopad 2021.].
- [4] T. Roje-Bonacci, Potporne građevine i građevne jame, Split, Zagreb: Građevinsko-arhitektonski fakultet u Splitu, IGH, 2005.
- [5] D. E. F. B. A. A. Horodecki Grzegorz, »Geotehnički problemi projektiranja i ponašanja građevnih jama,« *GRAĐEVINAR*, svez. 5, br. 55, pp. 263-268, 2003.
- [6] L. Perić, »Zaštita građevnih jama zidom od mlaznog betona i štapnih sidara,« *GRAĐEVINAR*, svez. 1, br. 60, pp. 1-11, 2008.
- [7] Webgradnja.hr, »Beton kao građevni materijal,« webgradnja.hr, [Mrežno]. Available: <http://www.webgradnja.hr>. [Pokušaj pristupa 24 Svibanj 2022].
- [8] Geotehnika-konsolidacija, »geotehnika-konsolidacija.hr,« geotehnika-konsolidacija.hr, 2014. [Mrežno]. Available: <http://www.geotehnika-konsolidacija.hr>. [Pokušaj pristupa 24 Svibanj 2022].
- [9] Geotech.hr, »Osiguranje građevne jame – Roxanich Heritage Wine Hotel i vinski podrum,« Geotech.hr, 4 Listopad 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/>. [Pokušaj pristupa 24 Svibanj 2022].
- [10] Geotech.hr, »Geotech, Pilotska stijena,« 23. Kolovoz 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/>. [Pokušaj pristupa 12. Travanj 2022].
- [11] Atik.hr, »Projekti zaštite iskopa građevinskih jama,« Atik.hr, 2020. [Mrežno]. Available: <https://atik.hr/>. [Pokušaj pristupa 24 Svibanj 2022].
- [12] T. Ivšić, »5. Potporne konstrukcije,« 2012. [Mrežno]. Available: <https://www.grad.unizg.hr/>. [Pokušaj pristupa 12 Travanj 2022].
- [13] Geotech.hr, »Geotech, Izvedba armiranobetonskih dijafragmi,« 21. Listopad 2021. [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/>. [Pokušaj pristupa 12. Travanj 2022].
- [14] Geotech.net.au, »Diaphragm wall,« geotech.net.au, [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.net.au/index.html>. [Pokušaj pristupa 24 svibanj 2022].
- [15] M.-S. K. V. S.-N. Željko Arbanas, »Kontrola kvalitete štapnih sidara,« *Građevinar*, svez. 57, br. 11, pp. 859-867, 2005.
- [16] Normet, »Mining technology: Innovations in rock reinforcement: improving stability and maintaining load bearing capacity,« [Mrežno]. Available: <https://www.mining->

- technology.com/sponsored/innovations-in-rock-reinforcement-improving-stability-and-maintaining-load-bearing-capacity/. [Pokušaj pristupa Lipanj 2022].
- [17] Geotech.hr, »Jet grouting – kako se provjeravaju projektni zahtjevi?,« 23 Siječanj 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/jet-grouting/>. [Pokušaj pristupa 24 Svibanj 2022].
- [18] Geotech.net.au, »Jet grouting,« geotech.net.au, [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.net.au/index.html>. [Pokušaj pristupa 24 Svibanj 2022].
- [19] E. Nonveiller, *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Zagreb: Školska knjiga, 1979.
- [20] Geotech.hr, »Sile u razuporama u ugrađenim potpornim konstrukcijama,« Geotech.hr, 28 Listopad 2019. [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/>. [Pokušaj pristupa 24 Svibanj 2022].
- [21] M. Meštrović, *METODA KONAČNIH ELEMENATA*, Zagreb, 2020.
- [22] GEOS, »Izvjješće o rezultatima inženjersko-geološko-geotehničkih istraživanja na K.Č. 124, 125 i 160/1 K.O. Novigrad,« Rovinj, 2012.
- [23] Strabag d.o.o., 2022.
- [24] Eurokod 7: Geotehničko projektiranje - 1.dio: Opća pravila - nacionalni dodatak.
- [25] S.-L. S. A.-N. Z. J. C. Yie-Tong Chin, »Foundation Pit Collapse on 8 June 2019 in Nanning, China; A Brief Report,« *Safety*, 2019.
- [26] S.-L. S. A.-N. Z. A.-N. Z. Yie-Tong Chin, »Foundation Pit Collapse on 8 June 2019 in Nanning,« *Safety*, svez. 5, br. 68, pp. 1-8, 2019.