

Zaštita građevnih jama zidom od mlaznog betona i štapnih sidara

Ljupko Perić

Ključne riječi

građevna jama,
zid,
mlazni beton,
štapna sidra,
stabilnost,
geotehnička građevina

Key words

foundation pit,
wall,
shotcrete,
ground anchors,
stability, structure

Mots clés

fouille,
mur,
béton projeté,
boulons d'ancrage,
stabilité,
structure géotechnique

Ключевые слова

строительная яма,
стена,
струйный бетон,
стержневые анкеры,
устойчивость,
геотехническое
сооружение

Schlüsselworte

Baugrube,
Wand,
Spritzbeton,
Stabanker,
Stabilität,
bodentechnisches
Bauwerk

Lj. Perić

Stručni rad

Zaštita građevnih jama zidom od mlaznog betona i štapnih sidara

Opisane su i uspoređene prednosti i nedostaci klasičnih tipova zaštite građevnih jama. Detaljnije je prikazana zaštita građevnih jama zidom od mlaznog betona i štapnih sidara. Navedeni su bitni koraci potrebni za provođenje dokaza unutarnje i vanjske stabilnosti ove vrste geotehničkih građevina. Usporednim proračunom naprežanja i deformacija dokazano je da mjerodavna klizna ploha čitavoga nosivog sklopa leži izvan monolita formiranoga na načelu armiranog tla (terrain-armé).

Lj. Perić

Professional paper

Foundation pit protection by shotcrete wall and ground anchors

Advantages and shortcomings of traditional foundation pit protection methods are described and compared. The foundation pit protection by shotcrete wall and ground anchors is presented in greater detail. Essential steps needed to prove internal and external stability of this type of geotechnical structures are formulated. It is demonstrated by comparative stress and strain analyses that the relevant slip plane of the entire load bearing structure lies outside of the monolith formed according to the reinforced earth principle.

Lj. Perić

Ouvrage professionnel

Protection de la fouille par béton projeté et boulons d'ancrage

Les avantages et les inconvénients des méthodes traditionnelles de protection des fouilles sont décrits et comparés. La protection des fouilles par le mur de béton projeté et les boulons d'ancrage est présentée en plus de détail. Les pas essentiels exigés pour démontrer la stabilité interne et externe de ce type des structures géotechniques sont formulés. Il a été établi par analyses comparatives de contraintes et déformations que la surface de glissement pertinente pour la structure portante intégrale se trouve en dehors du monolithe formé selon le principe du terrain armé.

Л. Перич

Отраслевая работа

Защита строительных ям от струйного бетона и стержневых анкеров

В работе описаны и сравнены преимущества и недостатки классических типов защиты строительных ям. Детально показана защита строительных ям стеной из струйного бетона и стержневых анкеров. Наведены существенные шаги, необходимые для приведения доказательств внутренней и внешней устойчивости такого типа геотехнических сооружений. Сравнительным расчётом напряжений и деформаций доказано, что компетентная площадь скольжения целой несущей системы находится вне монолита, формированного на принципе армированного грунта (terrain-armé).

Lj. Perić

Fachbericht

Baugrubenschutz durch Spritzbetonwand und Stabanker

Vor- und Nachteile klassischer Baugrubenschutztypen sind beschrieben und verglichen. Detailliert ist der Baugrubenschutz durch Spritzbetonwand und Stabanker dargestellt. Angeführt sind die wesentlichen Schritte die für die Beweisführung der inneren und äusseren Stabilität derartiger bodentechnischer Bauwerke notwendig sind. Durch vergleichende Berechnung der Spannungen und Verformungen wird bewiesen dass die massgebende Gleitfläche des gesamten Traggefüges ausserhalb des am Prinzip des bewehrten Erdreichs (terrain armé) formierten Monoliths liegt.

Autor: Ljupko Perić, dipl. ing. građ., partner u inženjerskom birou MWV Bauingenieure AG, Baden i Zürich, Švicarska

1 Općenito

Za izradu građevine redovito je potreban iskop građevne jame. Ovisno o dubini i raspoloživosti okolnog prostora, često je u urbanim područjima, ali i izvan njih, potrebno pokos građevne jame zaštititi.

Pri izboru tipa zaštite građevne jame vodi se računa o vrsti tla, prisutnosti i razini podzemnih voda, blizini okolnih građevina, cesta, dubini iskopa, fazama iskopa, dopuštenim deformacijama i sl. Izbor zaštite radnog prostora građevne jame redovito je rezultat kompromisa u procjeni tehničkih prednosti i nedostataka raspoloživih rješenja, ali i cijene.

U praksi se, ovisno o uvjetima u kojima građevna jama nastaje, etablirao velik broj tipova zaštite iskopa od kojih ćemo spomenuti samo one koji su najčešće u uporabi:

- obloge od mlaznog betona osigurane štapnim sidrima
- zabijeni čelični profili (žmurje) od Larsenovih platice
- zaštita od bušenih čeličnih profila s ispunom od betona međuprostora kod nas poznata pod nazivom „berlinski zid“
- bušeni piloti na međusobnom razmaku ili bez njega
- segmentni zidovi
- zatvoreni zidovi- dijafragme i sl.

Većina spomenutih geotehničkih građevina izvodi se u kombinaciji s prednapetim geotehničkim sidrima kojima se kompenzira horizontalni tlak uklonjene mase tla. Međusobni razmak geotehničkih sidara ovisi o dimenzijama glavnih nosivih elemenata koji primaju horizontalni tlak i opterećeni su na savijanje.

Ovdje će biti potanko opisana zaštita građevnih jama mlaznim betonom u kombinaciji sa štapnim sidrima, proračun, detalji i cijena izvođenja, te uvjeti koje pri projektiranju ove vrste geotehničkih građevina treba uzeti u obzir. Također će biti ukratko predstavljene i druge vrste zaštite građevnih jama, njihove opće karakteristike te uspoređene cijene po jedinici ploštine.

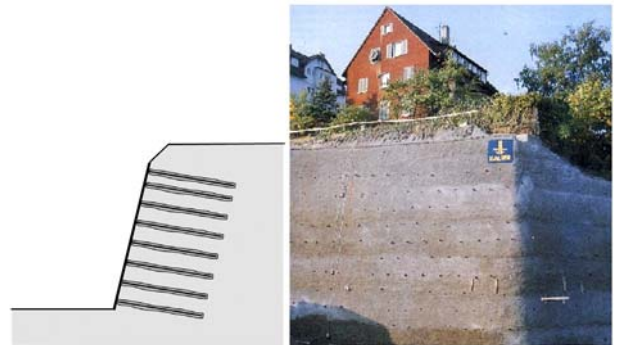
2 Pregled tipova zaštite građevnih jama

2.1 Zid od mlaznog betona i štapnih sidara

Ovaj tip zaštite građevnih jama primjenjuje se za građevne jame manjih i srednjih dubina od 4 do otprilike 12 m, a izveden je i do dubina od 18 m. Izvedba se odvija u visinskim etapama od po 2 m. Na površinu otkopa postavi se armaturna mreža u dva sloja, a potom se mlaznicom spojenom na kompresor i strojem za miješanje i doziranje smjese nanosi mlazni beton sve dok se ne postigne projektirana debljina obloge. Odbačeni dio betona koji se odbije od podloge obuhvaća i do 30 % ukupne

količine utrošenog betona i svakako ga treba uzeti u obzir pri izradi troškovnika.

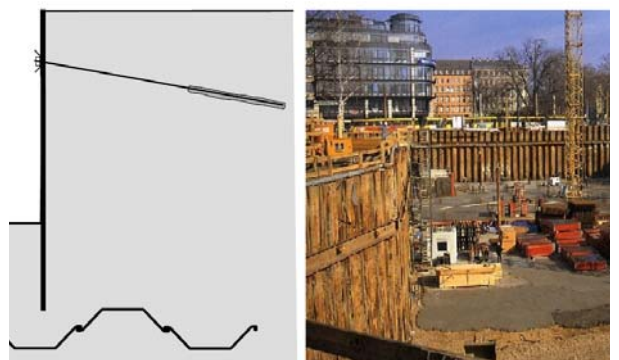
U sljedećoj fazi buše se rupe u koje se postavljaju štapna sidra i injektiraju smjesom za injektiranje. Nakon očvršćivanja smjese za injektiranje, ključem za navijanje u sidro unese se sila od približno $1/10 Z_i \sim 10$ do 20 kN. Potom se izvodi iskop sljedeće etape, a postupak ponavlja. Štapna sidra trajno ostaju u zemlji.



Slika 1. Zid od mlaznog betona osiguran štapnim sidrima [1]

2.2 Zid od Larsenovih platice

Ovaj se tip zaštite građevnih jama manje do srednje visine primjenjuje u homogenim sitnozrnim materijalima. Prikladan je i za zaštitu građevne jame u muljevitom ili vodenom okruženju, recimo za izvođenje temelja u riječnom koritu. Velika im je prednost o što brtvljenjem spojnicama mogu ispuniti uvjet vodonepropusnosti. Profili se međusobno spajaju tako što se svaka sljedeća platica koja se zabija u tlo najprije namjesti u žlijeb koji služi kao vodilica. Za zabijanje platice potrebna je određena energija koja se postiže moćnim strojevima za zabijanje. Uobičajeni su strojevi kojima je masa malja 7 do 10 t, a radna visina pada malja 50, 70 ili 100 cm. Za veće dubine građevnih jama (više od 5 m) platice se zbog ekonomičnosti najčešće osiguravaju geotehničkim sidrima. Nakon završetka radova platice se ponovno vade, a rupe i oštećenja repariraju.



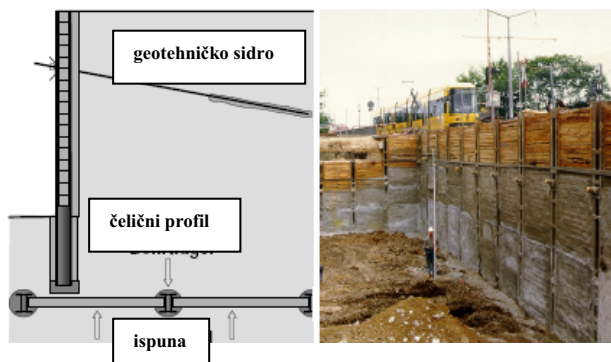
Slika 2. Zid od čeličnog žmurja- platice od Larsenovih profila [1]

Tablica 1. Usporedba različitih tipova zaštite građevnih jama

Tip zaštite građevne jame	Prednosti	Nedostatci
Mlaznim betonom i štapnim sidrima (slika 1.)	<ul style="list-style-type: none"> – jednostavna instalacija – brza izvedba prilagodljivo rješenje glede mogućih preinaka tijekom izvođenja – povoljna cijena od približno. 225 €/m² ~ 1600 kn/m^{2*}) 	<ul style="list-style-type: none"> – moguća pojava deformiranja i do 5 % visine zida H [3] – moguća pojava pukotina na kruni zida – ne preporučuje se u slučaju prisutnosti podzemnih voda – treba izbjegavati u kombinaciji s cestama ili građevinama u blizini građevne jame jer deformiranja zida mogu izazvati pukotine u cesti odnosno građevini
Larsenovim platicama (slika 2.)	<ul style="list-style-type: none"> – jednostavna instalacija – mala vodopropusnost povoljna cijena od približno 225 €/m² ~ 1600 kn/m² *) – nakon izvlačenja moguća ponovna uporaba 	<ul style="list-style-type: none"> – rješenje koje nije moguće izvesti u svim vrstama tala – neprilagodljivo rješenje glede mogućih preinaka tijekom izvođenja – izvođenje povezano s vibracijama – nakon izvlačenja moguća naknadna slijeganja okolnog tla (radi vibracija ali i radi toga što dio materijala poslije vađenja ostane “nalijepljen” na profile, što uzrokuje pojavu praznina u dubljim slojevima tla. Ponovno popunjavanje praznina ima kao posljedicu slijeganje tla) – u blizini postojećih građevina može izazvati pojavu slijeganja tla i pukotine
Bušenim čeličnim profilima s ispunom (berlinski tip zagatnog zida) (slika 3.)	<ul style="list-style-type: none"> – izvedivo u svim vrstama tala – rješenje za građevne jame velikih dubina (oko 25 m) – kruto i robustno rješenje s minimalnim deformiranjima zaštitnog zida – povoljno za skućene prostore relativno povoljni s otprilike 325-380 €/m² ~2350-2800 kn/m² *) eventualno moguća ponovna uporaba (nakon vađenja) 	<ul style="list-style-type: none"> – neprilagodljivo rješenje glede mogućih preinaka tijekom izvođenja – zahtijeva veći utrošak rada primjerice na izradi ispune – kod većih dubina od oko 4-5 m zahtijeva geotehnička sidra – sidra usporavaju gradnju i moraju biti usklađena s katnim pločama buduće građevine kako ne bi ometala gradnju
Bušenim pilotima (slika 4.)	<ul style="list-style-type: none"> – rješenje za građevne jame velikih dubina (do 50 m) – elementi velike krutosti na savijanje – prihvaćaju razmjerno velike horizontalne sile – mala emisija buke i vibracija pri izvođenju 	<ul style="list-style-type: none"> – skupa instalacija – velik broj radnih reški – ograničeni na neplastična odnosno čvrsta tla – relativno skupi od 450 – 650 €/m² ~ 3200 – 4700 kn/m² *)
*) U tablici navedene cijene po m ² zida su prosječne aktualne cijene na području Švicarske, Austrije i Njemačke. Cijene u Republici Hrvatskoj se prema procjeni autora nalaze na razini od približno 70 % od gore navedenih.		

2.3 Zid od bušenih čeličnih profila i ispuna

Zaštita građevnih jama dubina i do 25 m najučinkovitije se realizira primjenom postupka koji je u literaturi [2] poznat i kao „berlinski tip zagatnog zida“. Najprije se na međusobnom razmaku od oko 2 do 3 m izbuše bušotine promjera 36 do 70 cm na potrebnu dubinu. U bušotine zaštićene cijevima spuste se čelični profili. Dio bušotine koji ostaje ispod kote budućega iskopa zapuni se betonom slabije kvalitete (primjerice C12/15), a ostatak bušotine zapuni se pijeskom. Potom se obavlja iskop na razinu prvog reda geotehničkih sidara. Prostor između čeličnih profila se iskopa, pijesak zapunjen u bušotinu ukloni, a u slobodan međuprostor postavi se ispun od

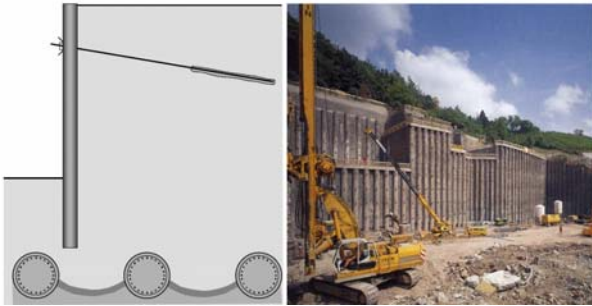


Slika 3. Zid od bušenih čeličnih profila i betonirane ispune („berlinski zid“)[1]

drvenih gredica, predgotovljenih ploča ili se ispun armira i betonira. Nakon izvođenja geotehničkih sidara i njihova natezanja, počinje slijedeća faza iskopa. Čelični profili najčešće u tlu ostaju trajno.

2.4 Zid od bušenih pilota

Zid od bušenih pilota sličan je po načinu izvođenja onom od bušenih profila, samo što se ovdje radi o elementima većih profila betoniranih na licu mjesta. Primjenjuje se za građevne jame dubina i do 50 m. Piloti imaju promjere od 90 do 120 cm, međusobnim razmakom i bez njega. Kako su kod dubokih otkopa sile koje moraju prihvatiti piloti i sidra goleme veličine, preduvjet za ovo rješenje temeljita su prethodna ispitivanja i izvedba probnih geotehničkih sidara. Također se preporučuje razrada više proračunskih modela, parametarska studija variranjem bitnih proračunskih veličina te praćenje izvođenja



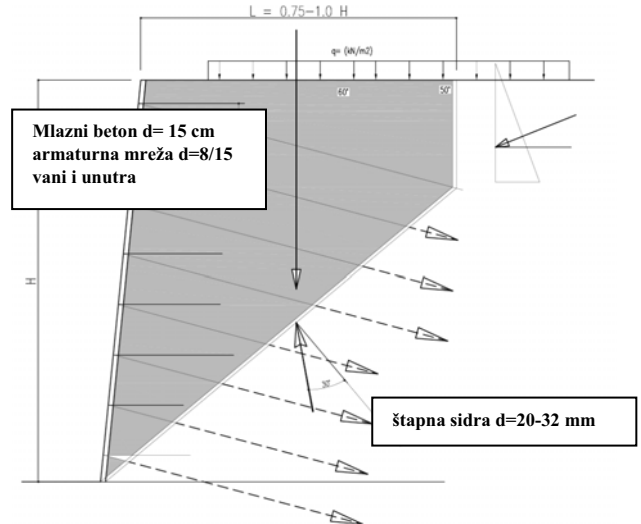
Slika 4. Zid od bušenih pilota s razmakom ili međusobnim preklapanjem profila (njemački Pfahlwand)[1]

permanentnim mjerenjem deformiranja zida odnosno sila u sidrima. U vezi s tim dobro je razraditi i metode prijenosa informacija i propisati potrebne radnje u slučaju prekoračenja kritičnih veličina. Metode praćenja, mjerenja i uzbunjivanja primjenjuju se na mjestima velikih zasjeka, primjerice u gradskim područjima gdje je ugroza ljudskih života i materijalnih dobara relativno velika odnosno kod dubokih zasjeka pri izvođenju građevnih jama na portalima tunela i sl.

3 Temeljni princip zaštite iskopa mlaznim betonom i štapnim sidrima

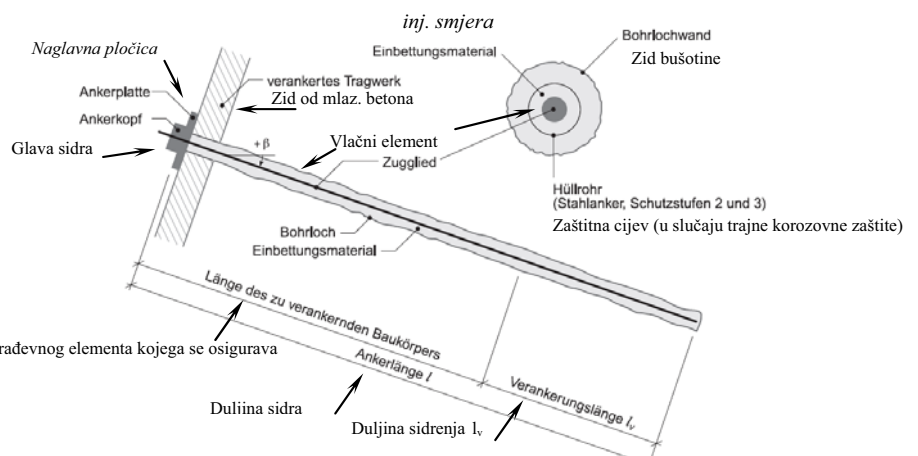
Metoda zaštite građevne jame mlaznim betonom u kombinaciji sa štapnim sidrima razvila se iz metode *Terrain-armé* u 80-im i 90-im godinama prošlog

stoljeća. Temeljni princip ovog tipa geotehničkih objekata razvijen je na TU Karlsruhe i u Institutu Otto Graf u Stuttgartu, a svodi se na to da se masu tla na vertikalnoj stijenci iskopa, bušenjem i injektiranjem



Slika 5. Parametri potrebni za proračun unutrašnje stabilnosti zida od štapnih sidara

štapnih sidara pretvori u gravitacijski potporni zid (monolit) i tako osposobi za prijam horizontalnih sila. Štapna sidra raspoređuju se na relativno gustom razmaku od $a \times b = (1,0-1,5) \times 1,5$ m, a duljina im odgovara $0,75-1,0 H$ zida, što opet po visini zasjeka može biti varirano na različite načine. Pod štapnim sidrom podrazumijevamo jezgru od armaturene šipke koja je unutar injektirane bušotine omotana mortom na čitavoj svojoj duljini. Pri zaštiti građevne jame primjenom štapnih sidara deformiranja zida su potrebna kako bi se aktiviralo trenje na plaštu između bušotine i okolnog tla. Približna je vrijednost očekivanog deformiranja ovog tipa geotehničkih objekata prema [3] otprilike $2,5 \text{ ‰}$ H.



Slika 6. Prikaz štapnoga (nenapetog) sidra - preuzeto iz norme SIA 267 (Geotehnika) [4]

4 Statički proračun i dokaz stabilnosti zida sa štapnim sidrima

4.1 Općenito

Kada se pri iskopu u tlu izvedu bušotine duljine „l“ na međusobnom razmaku od 1 do 2 m, s promjerom bušotine 60 – 80 mm, i kada se u bušotine postave armaturne šipke, a bušotina injektira mortom, dobije se monolit sastavljen od zemlje. Otuda i naziv „armirano tlo“ kojim se sugerira temeljni princip formiranja takve geotehničke građevine. Unutarnju stabilnost monolita premreženog („čavlanog“) injektiranim bušotinama osiguravaju štapna sidra. Zid formiran na temelju principa armiranog tla dokazuje se:

- na vanjsku stabilnost koja podrazumijeva uobičajene dokaze potpornih konstrukcija na prevrtanje, klizanje, nosivost tla i globalnu stabilnost zasjeka i
- na unutarnju stabilnost koja podrazumijeva provjeru štapnih sidara, posmična naprezanja po plaštu bušotine i nosivost obloge od mlaznog betona na savijanje i proboj.

Ovdje će biti prikazana jednostavna metoda ručnog proračuna unutarnje stabilnosti zida dok će ukupna analiza naprezanja i deformacija biti provedena linearno elastičnim proračunom programskim paketom *Larix* tvrtke *Cubus* iz Züricha, odnosno primjenom nešto efikasnijeg modela uporabom nelinearne metode konačnih elemenata s primijenjenim Mohr-Coulombovim modelom tla [5] [6], primjenom programskog paketa *Plaxis* [7] koji je razvijen na sveučilištu Delft u Nizozemskoj.

4.2 Dokazi potrebni za proračun zida od mlaznog betona i štapnih sidara

Pri dimenzioniranju zaštite od mlaznog betona treba provesti sljedeće dokaze:

4.2.1 Dokaz vanjske stabilnosti zamišljenoga gravitacijskoga potpornog zida

- sigurnost glede sloma tla ispod zida (problematično samo u slučaju kada se ispod zida nalazi tlo s vrlo malom posmičnom otpornošću)
- dokaz sigurnosti protiv prevrtanja
- dokaz sigurnosti protiv klizanja
- stabilnost ukupnog zasjeka koja se provodi kao i u slučaju svih drugih geotehničkih građevina jednim od uobičajenih postupaka (Kray, Janbu, Bishop, Fellenius i sl.)

4.2.2 Dokaz unutarnje stabilnosti

- Pronalaženje koeficijenta sigurnosti za kritičnu kliznu plohu i pripadajućih vlačnih sila u štapnim sidrima

- Provjera obloge od mlaznog betona
 - na savijanje
 - na proboj
- Provjera na štapnom sidru
 - provjera posmičnih naprezanja na plaštu bušotine
 - provjera vlačnih naprezanja u poprečnom presjeku armaturne šipke.

U svrhu dokaza da je kritična klizna ploha izvan tijela zamišljenoga potpornog zida, u proračunskom primjeru bit će provedena samo provjera globalne stabilnosti, dok se ostali dokazi iz skupine dokaza vanjske stabilnosti provode za sve uobičajene geotehničke građevine pa ih ovdje nećemo detaljnije obrađivati.

4.3 Dokazi unutarnje stabilnosti

4.3.1 Dokaz savijanja i proboja obloge od mlaznog betona

Za dokaz savijanja stijenke odnosno za potrebe određivanja sile proboja potrebno je odrediti maksimalne sile na stijenku i na štapno sidro.

Momenti savijanja koji djeluju na stijenku određuju se tako što se ukupna sila aktivnog tlaka E_{ah} prevede u silu E_{ah}' (kN/m') koja se potom podijeli na ukupnu visinu zida i na taj način dobije konstantna vrijednost prosječnog aktivnog tlaka e_{ah}' (kN/m²) na stijenku zida. Sidra su zapravo ležajevi ploče opterećene ravnomjerno raspoređenim aktivnim tlakom, a polja ploče imaju raspone koji odgovaraju razmacima sidara od približno 1,5 x 1,5 m.

$$m_{ser} = \frac{e_{ah}' \cdot l^2}{f} \cdot k,$$

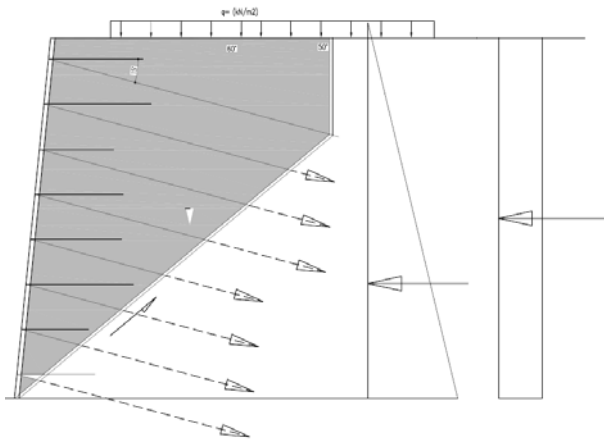
pri čemu je $k \sim 2,0$ koeficijent kojim se uzima u obzir koncentracija utjecaja na ležaju (analogija s točkasto oslonjenim pločama), a $f \sim 8$ do 11,67 vrijednost ovisna o razini na kojoj se određuje moment savijanja (elastična ili plastična preraspodjela reznih sila).

Na kraju sidra su naglavne ploče dimenzija 15 x 15 cm. Na mjestu naglavnih (sidrenih) ploča treba provesti dokaz proboja pločice kroz stijenku zida.

Za dokaz proboja treba uzeti silu $E_{ah}' = 0,85E_{ah}$.

Ovako se određena sila ravnomjerno podijeli na broj sidara $Z_i = \frac{E_{ah}'}{n}$ i njome se provodi dokaz proboja čelične pločice dimenzija 15 x 15 cm kroz betonsku oblogu.

Ovaj je prijedlog provjere uslijedio na temelju pokusa provedenih na modelu 1:1 (TU Karlsruhe i poduzeće specijalizirano za poslove niskogradnje Bauer- Njemač-



Slika 7. Sile na temelju kojih se određuju potrebni otpor na savijanje i proboj obloge od mlaznog betona

ka). U praksi se provjera proboja dimenzionirana prema sili E_i pokazala konzervativnom, a dokaz neproblematičnim.

4.3.2 Vrijednosti posmičnih napreznja na plaštu bušotine

Za dokaz posmičnih napreznja na plaštu bušotine treba uzeti veću od dviju vrijednosti sila E_i'/n , odnosno Z_i , pri čemu je sila Z_i određena izravnim mjerenjem duljine sidra izložene zatezanju (dio iza zamišljene klizne plohe do kraja sidra).

Ovisno o vrsti tla u kojem se obavlja iskop građevne jame, na temelju sljedećih parametara moguće je odrediti veličinu posmičnih napreznja na plaštu bušotine odnosno silu po m' štapnog sidra (tablica 2.).

Kako su stvarne vrijednosti promjera bušotine ovisne o primijenjenom stroju i načinu bušenja, ovdje je dan raster od 50 do 100 mm. Međuvrijednosti se mogu interpolirati.

Tablica 2. Vrijednosti adhezivnih sila po m' sidra u ovisnosti vrsti tla [9]

Karakteristična vrijednost sile po m' sidra	$\tau_{R,d} / \tau_{ser}$	τ_k	Promjer bušotine (mm)		
			50	75	100
Vrsta tla	kN/m ²	kN/m ²	$V_{Rd} / V_{ser} / V_k$ (kN/m')	$V_{Rd} / V_{ser} / V_k$ (kN/m')	$V_{Rd} / V_{ser} / V_k$ (kN/m')
Koherentno, sitnozrnasto tlo male propusnosti	150/100	200	23.6 15.7 31.0	35.3 23.55 47.1	47.2 31.4 62.0
Pjeskovito tlo	225/150	300	35.4 23.5 47.1	53.0 35.3 71.5	70.8 47.0 94.2
Šljunkovito tlo	300/200	400	47.2 31.4 62.8	70.1 47.0 94.0	94.4 62.8 125.6
Potrošnja morta za injektiranje			min 2 do 12 l/m' maks 4 do 24 l/m' 15*)	min 5 do 30 l/m' maks 10 do 60 l/m' 20*)	min 8 do 48 l/m' maks 16 do 96 l/m' 30*)

*) Za potrebe procjene utroška morta pri izradi troškovnika $V_i = \tau_i \cdot o$; $o = d \cdot \pi$

Primjer određivanja tabličnih brojnih vrijednosti:

$$V_{ser} = 0,05(m) \cdot 3,14 \cdot 100 \frac{kN}{m^2} = 15,7 kN / m'$$

$$V_{Rd} = 1,5 \cdot V_{ser} = \frac{V_k}{1,35}; \text{ ili } 1,35 V_{Rd} \approx 2,0 \cdot V_{ser} = V_k$$

4.3.3 Provjera ispravnosti proračunskih pretpostavki

U nedostatku rezultata prethodnih geotehničkih istraživanja projektanti su prisiljeni usvojiti određene pretpostavke. U gornjem su tekstu vrijednosti napreznja prijanjanja po ploštini bušotine u ovisnosti o vrsti tla. Ove vrijednosti, u nedostatku točnijih podataka, treba uzeti kao dobre orijentacijske vrijednosti, ali ih pri izvođenju zahtjevnijih građevnih jama valja provjeriti.

Provjere se rade na probnim sidrima koja se poslije ugradbe (bušenje, postavljanje, injektiranje) na gradilištu izvlače sve do sloma. Pri tome se vlačna sila sukcesivno povećava u nekoliko vremenskih intervala i crta dijagram zavisnosti sile i pomaka puzanja.

Na temelju dobivenih rezultata treba ocijeniti ispravnost proračunskih pretpostavki i u slučaju bitnih odstupanja proračun s revidiranim vrijednostima napreznja trenja prema plaštu bušotine po potrebi ponoviti.

Način provođenja probnog opterećenja, nanošenja sile, trajanje vremenskih intervala i veličine dopuštenih proklizavanja sidra redovito su definirani nacionalnim geotehničkim normama.

4.3.4 Provjera vlačnih napreznja u poprečnom presjeku armaturne šipke

Ovdje se radi o jednostavnoj provjeri iskorištenosti poprečnog presjeka armaturne šipke.

Nosivost sidara ovisi o kvaliteti materijala i o promjeru šipke. U tablici 3. navedene su vrijednosti sila na uporab-

noj razini, sila na razini velikih izduljenja (σ_{o2} – granica) i na karakterističnoj granici sloma za čelik Swiss-Gewi B 500/550.

Tablica 3. Nosivosti jezgre štapnih sidara

Promjer šipke	20 mm	25 mm	28 mm	32 mm	40 mm
B 500/550 (Swiss Gewi)	kN	kN	kN	kN	kN
Sila na granici velikih izduljenja F_y	160	245	310	405	630
Karakteristična sila sloma F_{tk}	175	270	340	440	690
Sila na uporabnoj razini F_{ser}	97	147	186	243	378

5 Proračunski primjer

5.1 Dokaz unutarnje stabilnosti

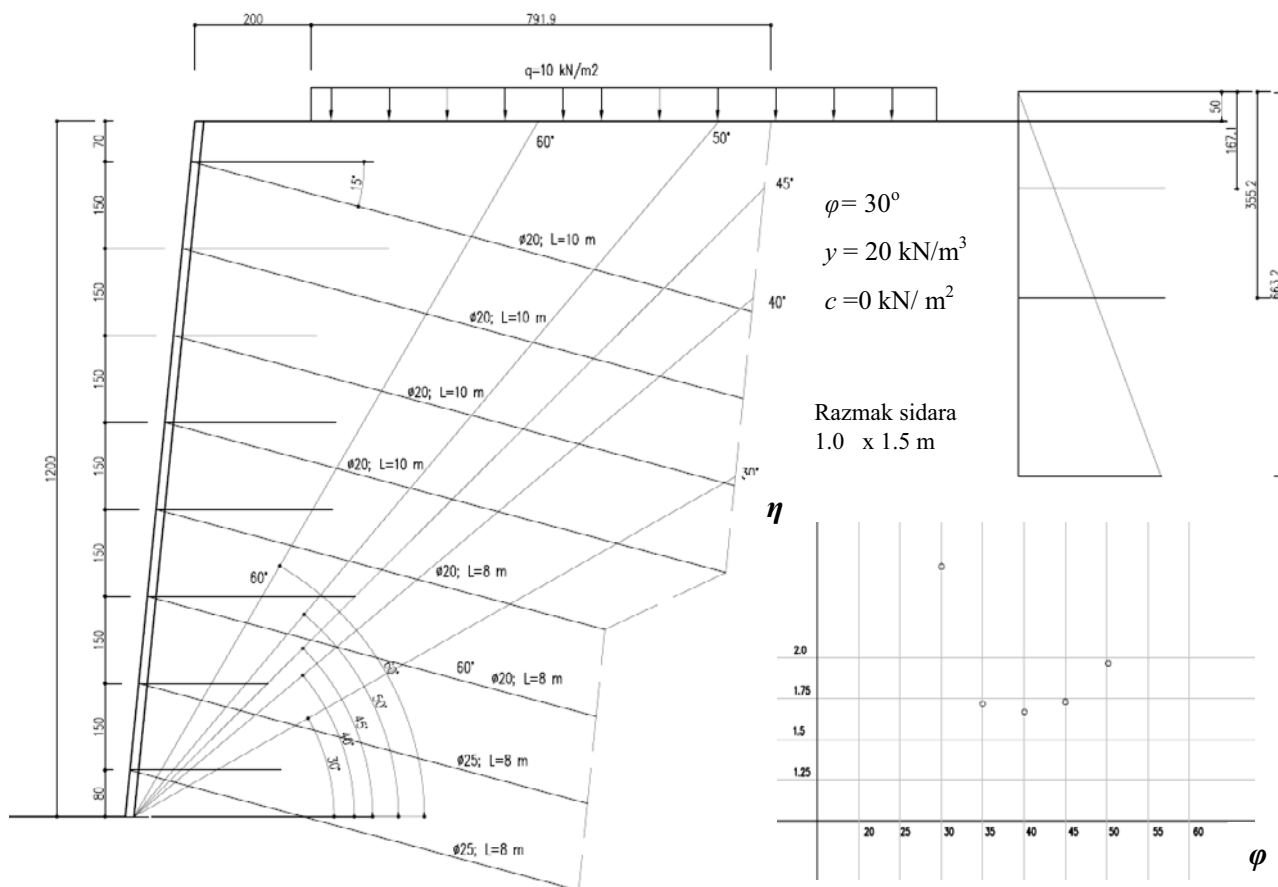
5.1.1 Općenito

Na slici 8. prikazan je proračunski model zida visine 12 m. Na kruni zida, udaljenoj 2 m od ruba jame djeluje opte-

rećenje od 10 kN/m^2 (opterećenje deponiranim materijalom i vozilima). Zid je projektiran u nagibu $\varepsilon = 1:10$ čime se pojednostavnjuje izvedba, a štapna sidra su dužine $l = 8 \text{ m}$ u donjem i $l = 10 \text{ m}$ u gornjem dijelu zida, čime se uzima u obzir bolja iskoristivost sidara u dubljim dijelovima građevne jame. Na desnoj strani slike u ovisnosti o nagibu pretpostavljenih kliznih ploha proračunan je pripadajući aktivni tlak koji djeluje na zamišljenu „vanjsku“ ploštinu zemljanog monolita. Bušotine štapnih sidara imaju nagib od 15° .

5.1.2 Posmična naprezanja na plaštu bušotine

Za određivanje posmičnih naprezanja na plaštu bušotine potrebno je provesti ispitivanje na gradilištu primjenom probnih sidara njihovim izvlačenjem do sloma. Ovi podaci u vrijeme izrade izvedbenog projekta u pravilu nisu poznati, pa je na temelju prethodnih istraživanja i geotekničkih podataka koji projektantu stoje na raspolaganju potrebno usvojiti stanovite pretpostavke. U ovdje proračunanom primjeru vrijednost adhezivnih naprezanja po plaštu bušotine određena je za prvu skupinu tala iz tablice 2 i promjer bušotine $d = 62,5 \text{ mm}$. Dobivena je vrijednost adhezivne sile po m' bušotine od



Slika 8. Proračunski model zida s prikazom koeficijenta sigurnosti od približno $\gamma = 1,7$ (usporedi s rezultatima tablice 4.)

$$Z_{ser} = o \cdot \tau_{ser} = 0,0625(m) \cdot \pi \cdot 100(kN/m^2) \approx 20kN/m'$$

Ova vrijednost sile po m' štapnog sidra je uobičajena kod približnih proračuna i nalazi se na strani sigurnosti.

5.1.3 Iznalaženje koeficijenta sigurnosti za kritičnu kliznu plohu unutar monolita i pripadajućih vlačnih sila u štapnim sidrima

Na slici 8. prikazani su mogući mehanizmi sloma unutar zemljanog monolita sa slobodno odabranim kliznim plohamama između 30° i 60°. Na stranici 12 u tabličnom su obliku prikazane pripadajuće gravitacijske sile i sile aktivnoga zemljanog tlaka. Na istoj stranici prikazan je i pripadajući poligon sila za svaku pretpostavljenu kliznu plohu. Iz pretpostavke da je cijeli poligon statički uravnotežen, grafički se odredi vlačnu silu (potr. Z) u štapnim sidrima, potrebnu za uravnoteženje poligona sila. Kako je iz slike 8. za pretpostavljenu kliznu plohu moguće odrediti stvarnu ili efektivnu vlačnu silu ($effZ$) u štapnim sidrima (izmjere se preuzimaju s crteža)

$$(effZ = \sum_{i=1}^n l_i \cdot \tau_M \cdot o = \sum_{i=1}^n l_i \cdot 20kN/m'),$$

jednostavno je odrediti ukupni koeficijent sigurnosti kao odnos ef. Z /potr. $Z = \eta$

5.1.4 Dokaz na savijanje i proboj obloge od mlaznog betona

5.1.4.1 Dokaz na savijanje

Za visinu zida od $H = 12$ m i parametre $\delta = \varphi = 30^\circ$ i $c = 0$ kN/m²; $k_a = 0,257$ ukupni aktivni tlak E_a određuje se kao:

$$E_a = \frac{e_a \cdot h}{2} = \frac{(\gamma \cdot h \cdot k_a) \cdot h}{2} = \frac{20 \cdot 12^2 \cdot 0,257}{2} = 370kN/m';$$

$$E_a' = 0,85E_a = 0,85 \cdot 370 = 315kN/m'$$

$$e_a' = \frac{E_a'}{h} = \frac{315}{12} = 26,25kN/m^2$$

$$m_{ser,max} = \frac{e_a' \cdot l^2}{f} \cdot k \approx \frac{26,25 \cdot 1,5^2}{11,67} \cdot 2 = 10,12kNm/m$$

$$potAs \geq \frac{m_d \cdot \gamma_d \cdot \gamma_s}{0,9 \cdot h \cdot f_{sk}} = \frac{10,12 \cdot 1,35 \cdot 1,15}{0,9 \cdot 0,12 \cdot 50} = 2,91cm^2/m'$$

Odabrana armaturna mreža Q-335

$$(\phi 8/150 = 3,35cm^2/m')$$

5.1.4.2 Dokaz na proboj

$$Z_i = \frac{E_a'}{n} \cdot b = \frac{315}{8} \cdot 1,0 = 39,5kN;$$

$$Z_d = 1,35 \cdot 39,5 \approx 53kN$$

Otpornost ploče na proboj $V_{Rd} \approx 180kN$

$$Z_i \leq V_{Rd};$$

$53 \leq 180 \Rightarrow$ za debljinu ploče $d = 15$ cm (beton C30/37) i odabranu armaturu sigurnost na proboj je dokazana.

5.1.5 Provjera nosivosti sidara

Vlačna su sidra s najvećom vlačnom silom sidra 4, 6 i 8.

Maksimalna zategnuta duljina sidara za mjerodavnu kliznu ravnim pomnožena silom prijanjanja po jedinici duljine daje:

$$Z_{z4}^{45^\circ} = 4,87m \cdot 20kN/m' = 97,4kN \approx F_{ser}^{\phi 20} = 97kN$$

$$Z_{z6}^{45^\circ} = 5,08m \cdot 20kN/m' = 101,6kN \approx F_{ser}^{\phi 20} = 97kN$$

$$Z_{z8}^{45^\circ} = 7,29m \cdot 20kN/m' = 145,8kN \approx F_{ser}^{\phi 25} = 147kN$$

Po navedenim rezultatima odabir promjera štapnih sidara ($\phi = 20/25mm$) može se smatrati dobrim.

Zadebljanja naglavnicama prednapetih geotehničkih sidara, ukupne debljine 35 cm, izvedena su također mlaznim betonom.

5.2 Dokaz vanjske stabilnosti

5.2.1 Općenito

Dokaz vanjske stabilnosti koji podrazumijeva uobičajene dokaze potpornih konstrukcija na prevrtanje, klizanje, nosivost tla itd. ovdje nećemo potanje razmatrati.

No radi usporedbe koeficijenata sigurnosti unutarnje i vanjske stabilnosti bit će provedena analiza naprezanja i deformacija na dva neovisna proračunska modela.

Prvi model odgovara klasičnoj linearno elastičnoj teoriji proračuna programom Larix-5 tvrtke Cubus iz Züricha. Radi provjere globalne stabilnosti zasjeka uporabljena je metoda Kray [10].

Drugi je model u tehničkom smislu nešto napredniji, a temelji se na nelinearnom proračunu metodom konačnih elemenata s „boljim materijalima“ kao što je Mohr-Coulombov elastični – idealno plastični model materijala.

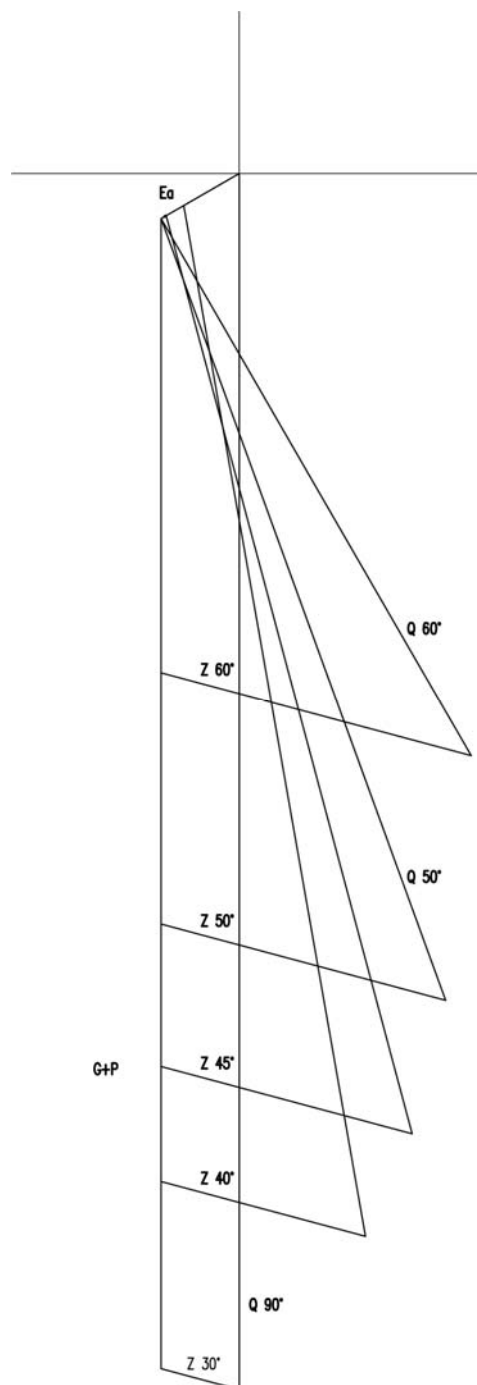
5.2.2 Rezultati proračuna metodom Kray

Zadani su parametri $\varphi = 30^\circ$, $\gamma = 20$ kN/m³, $c = 0$, a rezultat s karakterističnim linijama sloma vidi se na slici 9.

Proračun Larixom izvršen je na dvije razine - tzv. uporabnoj i proračunskoj razini s karakterističnim vrijednostima trenja po plaštu štapnog sidra od 40 kN/m² i unutarnjeg otpora štapnih sidara promjera 20 mm ($K_{max} = 175$ kN) odnosno 25 mm ($K_{max} = 270$ kN).

Tablica 4. Grafoanalitički rezultati proračuna potrebne vlačne sile u štapnim sidrima s pripadajućim poligonom sila (usporedi s modelom na slici 8.)

θ [°]	Q [°]	G, P, G+P [kN]	e [kN/m ²] Ea [kN/m]	potrebno Z [kN/m]	ΣN [m]	eff. Z [kN/m]	Sigurnost
30	90	G= 88,56 * 20 = 1771 P= 7,92 * 10 = 79,2 G+P= 1850,2	e = 6,63 * 20 * 0,33 = 43,77 Ea = 43,77 * 6,63 * 0,5 = 145,10	130	6,95 + 5,20 + 3,45 + 1,69 + 1,93 = 19,22	19,22 * 20 = 384,4	2,96
40	80	G= 73,51 * 20 = 1470 P= 7,92 * 10 = 79,2 G+P= 1549,2	e = 3,552 * 20 * 0,33 = 23,67 Ea = 23,67 * 3,552 * 0,5 = 42,05	340	7,2 + 5,91 + 4,62 + 3,34 + 4,05 + 2,77 + 1,48 + 0,20 = 29,37	30,66 * 20 = 613,2	1,73
45	75	G= 64,28 * 20 = 1285 P= 7,92 * 10 = 79,2 G+P= 1364,2	e = 1,67 * 20 * 0,33 = 11,13 Ea = 11,13 * 1,67 * 0,5 = 9,30	418	7,29 + 6,18 + 5,08 + 3,98 + 4,88 + 3,77 + 2,67 + 1,56 = 35,41	35,41 * 20 = 708,2	1,69
50	70	G= 53,25 * 20 = 1065 P= 7,026 * 10 = 70,26 P+G= 1135,26	- -	473	7,37 + 6,43 + 5,5 + 4,56 + 5,62 + 4,69 + 3,75 + 2,81 = 40,73	40,73 * 20 = 814,6	1,72
60	60	G= 34,57 * 20 = 691,40 P= 3,91 * 10 = 39,10 G+P= 730,50	- -	516	7,52 + 6,88 + 6,23 + 5,59 + 6,94 + 6,29 + 5,65 + 5,0 = 50,1	50,1 * 20 = 1002	1,94

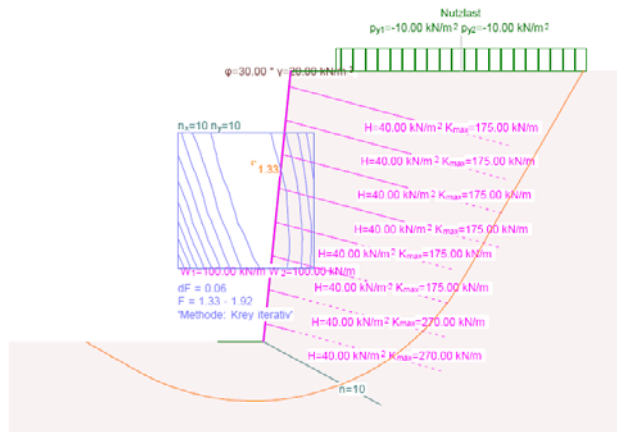


Za proračun na uporabnoj razini zahtijevani propisani globalni koeficijent sigurnosti je 1,35, dok je za proračun s karakterističnim vrijednostima na proračunskoj razini zahtijevani koeficijent sigurnosti ≥ 1 . Koeficijenti sigurnosti na proračunskoj razini uzimaju se u obzir tako da se parametri kojima se opisuje posmična otpornost ma-

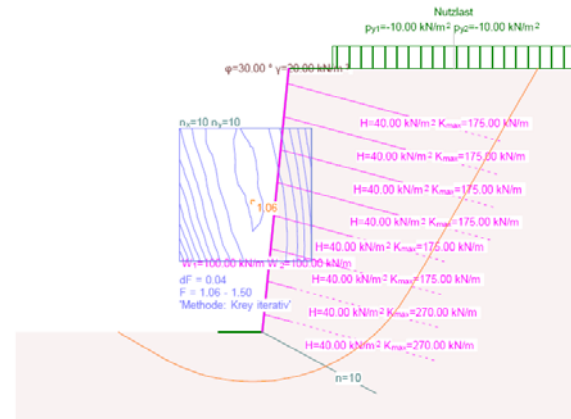
terijala (tla) podijele s pripadajućim koeficijentima sigurnosti, primjerice
$$tg\varphi' = \frac{tg\varphi}{\gamma_\varphi} = \frac{tg30^\circ}{1,2}$$

Koeficijent globalne sigurnosti je 1,33 ~ 1,35, a na proračunskoj razini 1,06 > 1,0

IGlobale Sicherheit, EWK 1
Massgebende Gleitlinie



IGrenzzustand TS 3, EWK 1
Massgebende Gleitlinie



Slika 9. Linija sloma zasjeka dobivena metodom Kraya na uporabnoj i proračunskoj razini

5.2.3 Rezultati proračuna metodom ϕ' - c' redukcije primjenom Mohr-Columbova modela tla

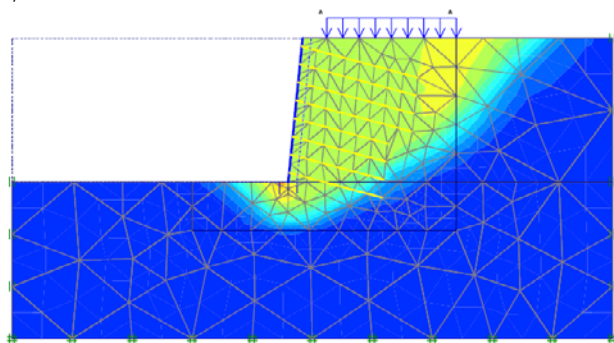
Radi usporedbe rezultata ručnog proračuna analiziran je i drugi model građevne jame s tim da je u metodi točnijeg proračuna primijenjena nelinearna metoda konačnih elemenata i napredniji Mohr-Coulombov elastoplastični model materijala. Kao rezultat proračuna dobiju se deformacije tla, preraspodjela naprezanja u tlu, sile u štapnim sidrima, ali i sve rezne sile na ploštini zasjeka definiranoj u ovu svrhu kao „dodirni (interface) element“ [7], i to za sve faze iskopa. Proračunom su naime obuhvaćena i sva privremena stanja (faze) kroz koja građevina prolazi tijekom izvedbe sve do konačnog završetka radova.

Stabilnost zasjeka određuje se tako da se sukcesivno provodi redukcija parametara ϕ' i c' , kojima se opisuje posmična otpornost tla sve do sloma. Ploha sloma prikazana je na slici 10.

U proračunu programskim paketom Plaxis primijenjeni su sljedeći parametri.

$$\phi = 30^\circ$$

$$\psi = 0^\circ$$



Slika 10. Ploha sloma proračunana programskim paketom Plaxis primjenom MC-modela tla

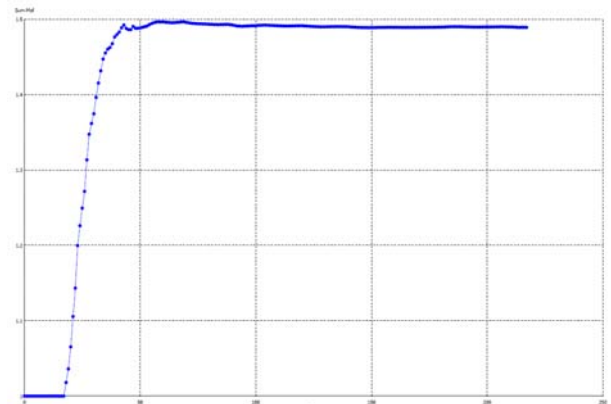
$$E_{ref} = 30000 \text{ kN/m}^2$$

$$E_{edom} = 48148 \text{ kN/m}^2$$

$$v = 0,35$$

$$\psi = \phi - 30^\circ$$

Na slici 11. grafički je prikazan rezultat ϕ' - c' redukcije, a na slici 11. dijagram u kome je svaka točkica na dijagramu jedan korak proračunske iteracije.



Slika 11. Računalni crtež dijagrama sigurnosti. Ukupni je koeficijent sigurnosti na razini oko 1,5

5.3 Usporedba koeficijenta sigurnosti dobivenih provjerom unutarnje i vanjske stabilnosti

Globalna proračunska sigurnost građevne jame glede stabilnosti zasjeka provedena po metodi Kray jest 1,33 dok je proračunom postupkom ϕ' - c' redukcije, koji se istodobno može smatrati i najtočnijim, dobivena vrijednost koeficijenta sigurnosti 1,5.

Jednostavni ručni proračun unutarnje stabilnosti rezultirao je ukupnim koeficijentom sigurnosti od približno 1,7.

6 Zaključak

Prikazan je ručni proračun unutarnje stabilnosti građevne jame zaštićene zidom od mlaznog betona i štapnim sidrima. Proračun se provodi razmjerno brzo i jednostavno, a u svakodnevnoj inženjerskoj praksi služi kao nadomjestak skupim i kadšto kompliciranim računalnim prog-

ramima. Dobiveni se rezultati lako prate i imaju jasna fizikalna značenja.

Iskustvo je pokazalo da za slučajeve kada je koeficijent sigurnosti, dobiven provjerom unutarnje stabilnosti na prikazani način, između 1,7 i 2,0, unutarnja stabilnost nije mjerodavna za ukupnu stabilnost potporne građevine.

LITERATURA

- [1] Peter Andreas von Wolffelsdorff, TU Freiberg- Institut für Geotechnik- Vorlesungen
- [2] Nonveiller, E.: *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Školska knjiga, Zagreb, 1981.
- [3] Vorgespannte Boden- und Felsanker, schlaffe Boden- und Felsnägel/Boden- und Felsdübel, Bodenbewehrung mit Geokunststoffen (Geotextilien), Technische Akademie Esslingen, Oktober 1991
- [4] SIA 267 Geotechnik, Schweizer Architekten- und Ingenieurverein, Zürich 2003
- [5] Kurs Finite Elemente in der Geotechnik – Theorie und Praxis –, März 2006, TA Esslingen
- [6] Advanced geotechnical analysis using the finite element method, 2002, ETH Zuerich
- [7] Handbuch Plaxis V8, 2005
- [8] KSB Anker, Küchler Ankertechnik AG, Selbstbohranker Broschüre
- [9] EAB Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ 4 Auflage 200,
- [10] Lang- Huder, Bodenmechanik und Grundbau- 5 Auflage 1994, Springer Verlag,