

## PROJEKTIRANJE GLOBOKIH VKOPOV V SPREMENLJIVIH GEOLOŠKO – GEOMEHANSKIH POGOJIH

**POVZETEK:** Pri projektiranju visokih vkopov moramo najprej pravilno določiti vhodne podatke za hribinske stabilnostne analize in analize napetostno deformacijskega stanja po metodi končnih elementov. V začetni fazi raziskav je potrebno obravnavano področje podrobno inženirsko geološko kartirati z natančnimi meritvami razpok, hkrati pa popisati vrtime in odvzeti vzorce za laboratorijske raziskave. Uporabiti je potrebno hribinsko klasifikacijo po Bieniawskem z določitvijo vrednosti RMR ter ugotoviti območje geološke trdnostnega indeksa GSI. Uporabljamo ga za izračun materialnih konstant preperete do kompaktne kamenine. Na podlagi posplošenega Hoekovega in Brownovega porušitvenega kriterija določimo trdnostno deformacijske parametre različne kvalitete kamenine. Ti služijo za izdelavo prostorskih hribinskih stabilnostnih analiz in na podlagi njihovih rezultatov, določiti potrebnih opornih ukrepov za varovanje brežine po izkopu. V fazi raziskav med izvedbo izkopa brežine dodatno inženirsko geološko kartiramo. Opraviti je potrebno natančne meritve razpok in obenem ponovno določiti geološki trdnostni indeks GSI. Na izkopnih brežinah odvezamo vzorce za dodatne laboratorijske preiskave. Na podlagi ugotovljenega skupnega presečnega razpoklinskega sistema izdelamo globalno prostorsko hribinsko stabilnostno analizo z upoštevanjem projektnega seizmičnega pospeška. Izdelati je potrebno tudi natančno analizo napetostno deformacijskega stanja vseh izkopnih faz in vgrajenih opornih ukrepov. Celoten izkop stabilnostno preverimo s hibridno analizo po MKE, s katero ugotovimo kritično in globalno drsino. Tak pristop projektiranja omogoči optimizacijo opornih ukrepov, kar zniža stroške investicije.

## PROJECTING OF HIGH CUTTING SLOPES IN VARIABLE GEOLOGICAL – GEOMECHANICAL CONDITIONS

**SUMMARY:** The research work on projecting of supporting measures for high cutting slopes consists of on the proper selection of the input data for stability and stress – strain analysis of slopes by the finite elements method. In the preliminary phase of investigations the area must be engineering geologically charted in detail, and discontinuities precisely measured, boreholes must be listed and samples for laboratory investigation must be taken. Bienawski slope classification with the assessment of value RMR is to be applied. On this basis the determination of material constants of rocks to soft rocks and hard soils is used. The strength parameters of different quality of rocks are investigated on the ground of the generalised Hoek-Brown failure criterion. The 3 - D wedge stability analysis are performed and its results are used in selection of obligatory retaining measures for cutting slopes after the excavations had been done. In the second phase of investigation the additional engineering geological charting must be elaborated during the excavation of slope. Discontinuities must be precisely measured and geological strength index GSI must be afresh assessed. The global 3 – D wedge stability analysis is made on the ground of the discovered common intersection system and in conjunction with the consideration of the project seismically acceleration. The stress strain analysis state in all of the phases of the excavation are very precisely analysed in the conjunction with the analysis of the inbuilt retaining measures. In order to discover the critical and global slip, the stability of the whole excavation was checked by the FEM hybrid analysis. This way of projecting enabled the optimization of the retaining measures and reducement of the investment's costs.

## **SPLOŠNO**

Namen osnovnih geološko – geomehanskih raziskav in analiz lastnosti kamenin, mehkih kamenin in zemljin, za izdelavo projekta gradnje visokih vkopov, je določitev načina in pogojev za izvedbo izkopa ter varovanja brežin z ustreznimi proti erozijskimi in opornimi ukrepi. S projektom je potrebno predvideti kasnejše potrebne spremembe in dopolnitve med samo izvedbo, s prilagajanjem geološko geomehanskim razmeram med izvedbo izkopa. Tedaj je potrebno zagotoviti projektantski geološko geomehanski nadzor, ki z natančnimi inženirsko geološkimi meritvami (RMR, GSI) zagotovi ustrezne podatke o prostorski legi, strukturi in površinskem stanju plasti in razpok ter registrira vse spremembe v litološki zgradbi, stopnji tektonske poškodovanosti, ali poškodb zaradi erozijskih procesov.

Pri večjih odstopanjih od s projektom predvidenih sprememb je potrebno opraviti dopolnilne geološko geomehanske raziskave in analize. Odvzeti je potrebno vzorce za laboratorijske preiskave in napraviti dodatne stabilnostne in geostatične analize (prostorske hribinske stabilnostne analize in analize napetostno deformacijskega stanja z upoštevanjem izkopnih faz in opornih ukrepov). Včasih rezultati analiz omogočijo optimizacijo opornih ukrepov, kar zniža stroške investicije. Lahko pa pri izvedbi izkopa ugotovimo spremembe, ki zahtevajo ojačanje opornih ukrepov, kar stroške investicije poveča. Zato je pri projektiranju potrebno računati tudi z najslabšimi možnimi geomehanskimi pogoji v dani geološki zgradbi. Tudi ta je lahko drugačna od predvidene, predvsem če so osnovne geološko geomehanske raziskave narejene v preskromnem obsegu.

Uporaba delnih varnostnih faktorjev v skladu z geotehničnimi standardi Eurocode 7 za spremenljive geološko geomehanske pogoje nam omogoča prilagajanje naravnim razmeram. Stalna geološko geomehanska spremljava izkopa in vzpostavitev tehničnega opazovanja pomaga, da še pred koncem izvedbe izkopa in opornih ukrepov, rezultate geostatičnih analiz preverjamo z merjenimi vrednostmi. Te vključujejo meritve sidrskih sil, opazovanja geodetskih točk vgrajenih ob robove brežin, meritve pomikov z globino in nivoje vode v vgrajenih inklinometrih – piezometrih. Po potrebi merimo tudi premike kritičnih razpok in prostorsko napetostno stanje s posebnimi vgrajenimi celicami (CSIRO). Tehnično opazovanje je potrebno nadaljevati tudi v fazi obratovanja objektov in spremembam skrbno slediti ter po potrebi oporne ukrepe tudi dodati.

## **GEOLOŠKO GEOMEHANSKE RAZISKAVE IN ANALIZE**

### **Raziskave za izdelavo projekta**

Raziskovalno delo za izdelavo projekta visokega vkopa temelji na različnih metodah ugotavljanja fizikalnih lastnosti kamenin, mehkih kamenin do zemljin ter na pravilni izbiri vhodnih podatkov za hribinske stabilnostne analize in analize napetostno deformacijskega stanja po metodi končnih elementov.

#### *Inženirsko geološko kartiranje in geofizikalne meritve*

V začetni fazi raziskav je obravnavano področje potrebno podrobno inženirsko geološko skartirati in poiskati vse golice za natančne meritve razpok. Zavedati se je treba, da so raziskovalne vrtnice le točkovni podatek, zato se je še posebej potrebno potruditi pri podrobnem kartiranju razpoložljivih golic. Pomagamo si tudi s sondažnimi razkopi, v katerih je prav tako potrebno opraviti meritve plastovitosti, razpok ter podrobno popisati površinsko stanje kamenine. V kolikor je na obravnavanem območju debelejši preperinski pokrov si pomagamo tudi z geofizikalnimi preiskavami (geoelektrične in seizmične meritve).

#### *Raziskovalno vrtanje z »in situ« meritvami*

Pri vrtanju se je potrebno poslužiti tehnologije vrtanja z dvojno, ali več stenskim jedrnikom, ob uporabi diamantnih kron in hlajenjem z vodo, pri mehkih kameninah pa z uporabo težke polimerne izplake. Med vrtanjem je potrebno v trdih in mehkih kameninah opraviti meritve s presiometrom, v zemljinah pa meritve z dilatometrom ter odvzeti vzorce za laboratorijske preiskave. Skrbno je potrebno registrirati globino pojava podzemne vode, še posebej takrat ko je vezana na razpoklinske sisteme. Zelo dobro je da opravimo tudi nalivalne preizkuse in meritve z vodo pod pritiskom (VDP). Če imamo vrtnice na primerni razdalji je priporočljivo opraviti tudi »crosshole« meritve (geofoni razvrščeni v dveh vrtninah, pri

čemer dobimo s proženjem seizmičnih valov zelo kvalitetno preslikavo), ali vsaj »down hole« meritve (geofoni razvrščeni v eni vrtini) kombinirati s seizmičnim profiliranjem (geofoni razvrščeni na površinskem profilu) in napraviti seizmično tomografijo.

Pri popisu vrtin je potrebno enako, kot pri površinskem kartiranju, uporabiti hribinsko klasifikacijo po Bieniawskem z določitvijo vrednosti RMR (Bieniawski, 1989) in ugotoviti območje vrednosti geološkega trdnostnega indeksa GSI (Marinos in Hoek, 2000).

#### *Laboratorijske preiskave*

V trdih kompaktnih kameninah je potrebno izvesti vsaj preiskave enosne tlačne trdnosti, če je mogoče tudi z določitvijo deformacijskih parametrov (modul elastičnosti in Poissonov količnik), v preperelih kameninah pa preiskave točkovnega trdnostnega indeksa vzporedno in pravokotno na plasti. V mehkih kameninah je potrebno opraviti direktne strižne, rotacijske strižne, ali če je le mogoče triosne strižne preiskave. V tektonsko pregnetenih ali drugače oslavljenih conah mehkih kamenin je potrebno opraviti tudi edometriške preiskave z določitvijo modula stisljivosti in po potrebi koeficienta prepustnosti.

#### *Mineraloško petrografske preiskave*

Zelo pomembno je določiti tudi mineraloško zgradbo, strukturo in teksturo kamenine. V ta namen izvedemo hkrati z geomehanskimi laboratorijskimi preiskavami mineraloško petrografske preiskave (lahko tudi na istih vzorcih). Dobro je izvesti tudi mikroskopske in rentgenske analize. Rezultati nam služijo za izračun materialnih konstant od preperela do kompaktne kamenine.

### **Analize za določitev načina možne porušitve in materialnih parametrov**

#### *Diagram prostorske porazdelitve razpok*

Vse meritve prostorske lege razpok po posameznih golicah in sondažnih jaških, ter kasneje izvedene tudi v fazi izkopa, (PZI) uporabimo za izdelavo zbirnega, konturnega diagrama polov razpok. Pri tem je v nasprotju z ročno obdelavo zelo uporaben programski paket Rocscience – program DIPS. Z njim si pomagamo pri določitvi kontur zgostitev prostorske porazdelitve razpok na projekciji enakih površin, ali enakih kotov. Na tem diagramu tvorijo meridiani maksimumov zgostitev presečne razpoklinske sisteme z meridiani projektiranih brežin, ki jih oklepa kritično področje kroga strižnega kota. Za strižni kot izberemo najnižjo vrednost določeno za hribinsko maso po klasifikaciji Bieniawskega.

Z Marklandovim testom ugotovimo ali je izpolnjen pogoj za zdrs klina ali bloka, ali pa možnost strukturne porušitve celo izključimo. V kolikor tvorijo meridiani maksimumov zgostitev presečišča razpoklinskih sistemov znotraj kritičnega področja, je potrebno računati z možnostjo strukturnih porušitev. Te je potrebno preveriti s prostorskimi hribinskimi stabilnostnimi analizami.

#### *Določitev strižnih karakteristik razpok*

Za izračun prostorskih hribinskih stabilnostnih analiz moramo ugotoviti strižne karakteristike razpok. V kolikor je na obravnavanem področju že bila kakšna porušitev se je najprikladneje poslužiti povratne hribinske stabilnostne analize. Če so razpoke zapolnjene z mehkejšimi glinastimi polnitvami lahko opravimo tudi laboratorijske preiskave. Te so primerne predvsem v mehkih kameninah, kjer jih je potrebno opraviti na intaknih vzorcih. Številne praktične izkušnje kažejo, da so rezultati povratnih analiz najbolj primerljivi s triosnimi strižnimi preiskavami.

V trdih kameninah strižne karakteristike razpok najlažje določimo s pomočjo izračuna po metodi Bartona in Bandisa (1990). Pri tem se lahko poslužujemo vizualne klasifikacije tipičnih hrapavih površin razpok (Barton, Choubey; 1988), ali pa določimo hrapavost s pomočjo meritev in kvantitativne analize. Najprej določimo koeficient hrapavosti v merilu laboratorijskega vzorca. Za vhodne podatke nam služijo podrobne meritve razpok na golicah, jaških in v vrtinah (vrtanje z diamantno krono ob uporabi dvostenskega jedrnika z vodnim hlajenjem) ter določitve enosne tlačne trdnosti vzorcev. Osnovni kot notranjega trenja  $\Phi_b$  določimo z laboratorijskimi strižnimi preiskavami, lahko pa tudi na podlagi posplošenega Hoekovega in Brownovega kriterija za brežine. Najprej opravimo korekcijo koeficienta hrapavosti in koeficienta trdnosti sten razpok (enačbi 2 in 3) med velikostjo vzorcev in

velikostjo hribinskih blokov, nato pa za izbrano območje napetosti določimo povprečno strižno trdnost razpok po naslednji enačbi [2]:

$$\tau = \sigma_n \tan \left( \phi_b + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (1)$$

$$JRC_n = JRC_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,02 JRC_0} \quad (2)$$

$$JCS_n = JCS_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,03 JCS_0} \quad (3)$$

- JRC: koeficient hrapavosti razpok, z indeksi pripadajočimi vzorcu, ali bloku,
- JCS: tlačna trdnost sten razpok, z indeksi pripadajočimi vzorcu, ali bloku,
- $L_0$ : dolžina vzorca (100 mm),
- $L_n$ : dolžina »in situ« hribinskega bloka.

#### *Geološki trdnostni indeks GSI ter posplošen Hoekov in Brownov porušitveni kriterij*

Na podlagi posplošenega Hoekovega in Brownovega porušitvenega kriterija (Hoek, Carranza, Torres in Corkum, 2002) z aplikacijo na brežine določimo trdnostno deformacijske parametre različne kvalitete hribine. Ti nam kasneje služijo za izdelavo geostatičnih analiz napetostno deformacijskega stanja izkopa in varovanja z opornimi ukrepi, ter posredno pri prostorskih hribinskih stabilnostnih analizah, z določitvijo potrebnih opornih ukrepov za varovanje brežine po izkopu.

Vhodne podatke za izračun porušitvenega kriterija pridobimo s pomočjo podrobnega inženirsko geološkega kartiranja z meritvami razpok in določitvijo geološkega trdnostnega indeksa – GSI ter z določitvijo enoosne tlačne trdnosti, ali s pomočjo parov efektivnih napetosti triosnih preiskav.

Geološki trdnostni indeks so vpeljali Hoek, Kaiser in Bawden (1995). Sistem omogoča postopek za določitev redukcije trdnosti hribinske mase v različnih geoloških pogojih. Zadnje spremembe v smislu razširitve na hribine mešane sestave so opravili Hoek, Marinis in Benissi leta 1998, ter Marinis in Hoek, 2000 in 2001.

Geološki trdnostni indeks temelji na litološki zgradbi, strukturi in površinskih pogojih diskontinuitet v hribinski masi. S kombinacijo dveh osnovnih parametrov geoloških procesov, blokavnosti mase in lastnosti razpok, odraža glavne pogoje geološke formacije. Pri kartiranju izkopa ga določimo s primerjavo strukture, prikazane na slikah, v posebnih preglednicah. Posebej je potrebno poudariti, da brez podrobnih meritev diskontinuitet (prostorska lega, število razpoklinskih sistemov, velikost blokov, površinsko stanje razpok z upoštevanjem hrapavosti, polnitev in stopnje preperelosti ter tektonske poškodovanosti), primerjava s preglednicami ni možna. Pri določitvi je bolje opredeliti območje vrednosti, kot podati točno vrednost.

Ocenjevanje geološkega trdnostnega indeksa otežujejo poškodbe, ki jih povzroči miniranje. Pri ocenjevanju je po možnosti potrebno uporabiti nepoškodovane površine. V novejši klasifikaciji (Marinos in Hoek, 2001), ki je uporabljena tudi v posebnem programskem paketu RocLab (Rocscience 2002) za izračun posplošenega porušitvenega kriterija, je posebej prikazana preglednica za določitev faktorja porušivosti hribine D. Za kvalitetnejše hribinske mase ( $GSI > 25$ ) je možno vrednost GSI določiti z zadnjo verzijo klasifikacije Bieniawskega (RMR, 1989) po naslednji zvezi:

$$GSI = RMR_{89}' - 5 \quad (4)$$

Pri tem je potrebno pri vrednotenju RMR razmerje točk za podzemno vodo postaviti na 15 (popolnoma suho) in pogoj prostorske lege razpok (zelo ugodna lega) na 0.

Pri določevanju lastnosti hribinske mase po sistemu Hoeka in Browna je najpomembnejša redukcija materialnih konstant  $\sigma_{ci}$  in  $m_i$  z njihovih »intaktnih – i « laboratorijskih vrednosti na pridobljene vrednosti razpokane hribinske mase, kar dosežemo z geološkim trdnostnim indeksom (GSI). Vrednosti konstant  $m_i$ , ki so bile glede na prvotno klasifikacijo korigirane na podlagi številnih laboratorijskih preiskav in izkušenj inženirskih geologov, so prikazane v posebni preglednici (Hoek in Marinos, 2000). Pri določitvi nam zelo pomaga določitev strukture in teksture ter kristalne zgradbe kamnin na podlagi mineraloško petrografskih preiskav.

Po določitvi območja indeksa GSI lahko izračunamo parametre za vrednotenje trdnostnih karakteristik hribinske mase:

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad (5)$$

- $m_b$  je vrednost Hoekove in Brownove konstante  $m$  za hribinsko maso,
- $m_i$  je konstanta odvisna od povezanosti kristalne zgradbe (določitev iz preglednice),
- $D$  je faktor poškodovanosti hribinske mase.

Zadnja objavljena sprememba (Hoek, Carranza – Torres, Corkum, 2002), ki jo vključuje tudi program RocLab, temelji na dopoljenih enačbah za določitev konstant  $s$  in  $a$ , ki vključujeta faktor porušenosti hribinske mase  $D$ :

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (7)$$

Prav tako, kot je po klasifikaciji Bieniawskega podana ocenitev elastičnega modula na podlagi RMR vrednosti (Serafim in Pereira, 1983, na podlagi povratnih analiz deformacij pri temeljenju visokih pregrad za bolj kvalitetne hribine), je na podlagi praktičnih opazovanj in povratnih analiz obnašanja hribinskih mas slabe kvalitete, enačba za take hribine modificirana. Tudi ta enačba [5] vključuje faktor porušenosti hribinske mase, nastale zaradi poškodb pri izkopu (mehanski izkop ali miniranje) in umiritev napetosti:

$$E_m = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (GPa) \quad (8)$$

V tej enačbi GSI zamenjuje RMR tako, da je modul  $E_m$  reduciran progresivno, ko je vrednost  $\sigma_{ci} < 100$ . Ta redukcija temelji na dejstvu, da so deformacije v hribinskih masah boljše kvalitete odvisne od razpok, v hribinskih masah slabše kvalitete pa pripadajo skupnemu deformacijskemu procesu intaktnih kosov hribine.

Za razpokane hribinske mase je bila nazadnje razvita enačba posplošenega porušitvenega kriterija [5]:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (9)$$

kjer sta  $\sigma'_1$  in  $\sigma'_3$  maksimalna in minimalna efektivna napetost pri poružitvi;

- $s$  in  $a$  sta konstanti, odvisni od karakteristik hribinske mase (določitev na podlagi geološkega trdnostnega indeksa GSI (pri  $s = 1$  gre za analizo intaktnih neporušenih vzorcev hribine);
- $\sigma_{ci}$  je enoosna tlačna trdnost intaktnih kosov hribine;
- $m_b$  je vrednost Hoekove in Brownove konstante  $m$  za hribinsko maso.

Za vsak tip hribinske mase in napetostno območje je potrebno določiti pripadajoči strižni kot in kohezijo v odnosu z Mohr – Coulombovim poružitvenim kriterijem. To naredimo s prilaganjem povprečnega linearnega razmerja  $k$  sovisnici nelinearnega Hoekovega in Brownovega odnosa (enačba 9) v območju vrednosti najmanjših glavnih napetosti  $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{3max}$ . Pripadajoči strižni kot in kohezijo izračunamo po metodi najmanjših kvadratov (Hoek, E., Carranza – Torres, C., Corkum, B., 2002).

Vrednosti  $\phi'$  in  $c'_i$ , pridobljeni iz analize parov podatkov triosnih strižnih preiskav, sta zelo občutljivi na obseg vrednosti minimalne efektivne glavne napetosti  $\sigma'_3$ , ki jo uporabimo pri generiranju simuliranih rezultatov triosne preiskave v velikem merilu. Zato sta za njuno določitev na podlagi številnih meritev in povratnih analiz podani dve specifični aplikaciji: za predore in brežine.

- Enačba za plitve in globoke predore:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left( \frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94}, \quad (10)$$

kjer je  $\gamma$  prostorninska teža hribinske mase in  $H$  globina predora pod površjem;

- Enačba za brežine:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left( \frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}, \quad (11)$$

kjer je  $\gamma$  prostorninska teža hribinske mase in  $H$  višina brežine.

### Prostorske hribinske stabilnostne analize

Stabilnost strukturnih porušitev, pri katerih porušna ploskev ne vpada vzporedno z ravnino brežine, je potrebno analizirati tridimenzionalno. To je danes omogočeno z visoko razvito računalniško grafiko in z ustreznimi računalniškimi programi. Vse analize brežin so nekoč izvajali dvodimenzionalno. Rešitve teh analiz dajejo nižje varnostne faktorje, kot prostorske. Danes je to preveč konzervativno in neekonomično, saj so tudi oporni ukrepi bolj razviti, bolj učinkoviti in trajnejši (npr.: trajna prednapeta sidra, zaščiteni proti rjavenju). Tridimenzionalne analize obravnavajo zdrs poljubnega tetraedrskega klina in razporeditve trenja, glede na način poružitve: zdrs po presečišču, zdrs po eni od ploskev. Hkrati upoštevajo hidrostatične pritiske (z možnostjo poljubne razporeditve in modela), v kolikor so prisotni, ter zunanje sile in obremenitve (npr.: aktivna ali pasivna sidra, obloge brežin, potres, projektne obremenitve) v katerikoli smeri in prostorski razporeditvi. Tudi ravnine izkopnih brežin imajo lahko poljubno, celo previsno lego. Na presečnih ploskvah razpok so lahko različno upoštevani trdnostni parametri, možno pa je spreminjati tudi velikost klina (s spreminjanjem razdalje natezne

razpoke ter dolžine presečišč ploskev klina s spodnjo in zgornjo brežino), in s tem ugotavljati kritično velikost, pri kateri pride do zdrsa (določitev ključnega bloka, kritične višine in širine brežine, v odvisnosti od vhodnih podatkov). Poleg tega je možno analizirati tudi verjetnost porušitve z upoštevanjem in izbiro statistične porazdelitve prostorskih podatkov in tudi fizikalnih karakteristik razpok.

V prostorski stabilnostni analizi z upoštevanjem natezne razpoke ter kohezijskega odpora in vodnih pritiskov, so enačbe dokaj zapletene. Porazdelitev pritiskov je narejena na predpostavkah, da je klin za vodo neprepusten, voda pa prodira z vrha klina vzdolž presečišč ploskev razpok z zgornjo brežino in curlja vzdolž presečišč skozi spodnjo brežino. Maksimalni pritisk se pojavi vzdolž presečne linije klina, vzdolž presečišč z zgornjo in spodnjo brežino pa je enak nič. Faktor varnosti brežine je izpeljan z upoštevanjem celotne strižne trdnosti razpok (kohezije  $c$  in strižnega kota  $\phi$ ), ki je lahko na ploskvah razpok različna:

$$F = \frac{3}{\gamma H} (c_A X + c_B Y) + \left( A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} X \right) \tan \Phi_A + \left( B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} Y \right) \tan \Phi_B, \quad (12)$$

V enačbi (12) sta  $c_A$  in  $c_B$  kohezijski trdnosti na ploskvah razpok ravnin klina A in B,  $\phi_A$  in  $\phi_B$  sta njuna strižna kota,  $\gamma$  je prostorninska teža hribine,  $\gamma_w$  pa prostorninska teža vode in H celotna višina klina. X, Y, A in B so brezdimenzijski faktorji, odvisni od geometrije klina, ki jih izračunamo na podlagi Schmidtovega diagrama razpok s pomočjo razdalj med presečišči meridianov.

### **Analize napetostno deformacijskega stanja po metodi končnih elementov**

Za matematično modeliranje je potrebno ugotoviti napredovanje porušitve hribinske mase z določitvijo karakteristik po preseženi vrhunski trdnosti ali po porušitvi. Hoekov in Brownov porušitveni kriterij se pri nekaterih modelih obravnava kot kriterij plastičnega tečenja, pri čemer se analize izdelajo z uporabo teorije plastičnosti (Pan in Hudson, 1988). Posebna pravila za to niso definirana, temveč imamo le osnovna vodila, pridobljena z izkušnjami pri numeričnih analizah različnih praktičnih problemov, s katerimi so predlagane osnovne karakteristike po porušitvi.

Za hribinsko maso zelo dobre kvalitete, kot sta masiven granit ali kvarcit, se v analizah pri visokem napetostnem stanju okrog odprtih izkopov predpostavi (Hoek, Kaiser in Bawden, 1995) elastično krhko obnašanje. Ko je trdnost hribinske mase presežena, pride do njenega nenadnega upada in znatnega množenja števila zdrobljenih kosov hribine. Deformacijske karakteristike hribinske mase se pri tem praktično zmanjšajo za štirikrat, kot razmikanja ( $\psi$ ) pa znaša četrtno vrednosti strižnega kota. Za hribinsko maso povprečne kvalitete priporočajo avtorji določitev karakteristik po porušitvi z redukcijo indeksa GSI iz določene začetne vrednosti na nižjo, ki opredeljuje zdrobljeno hribinsko maso, kar odgovarja lastnostim mehčanja materiala z naraščajočimi deformacijami in kotom razmikanja z osmino vrednosti strižnega kota. Analize napredovanja porušitev hribinskih mas zelo slabe kvalitete pa kažejo, da se te obnašajo kot idealno elastoplastični material. To pomeni, da se po doseženi vrhunski trdnosti deformacije nadaljujejo pri konstantnih napetostih brez prostorninskih sprememb (distorzijske deformacije). Kot razmikanja je enak nič, končne deformacijske karakteristike pa enake začetnim.

V računalniške programe je danes vgrajena cela vrsta konstitutivnih modelov različnih avtorjev, za katere je potrebno vstaviti ustrezne vhodne parametre. Pri projektiranju visokih vkopov se najpogosteje uporablja Mohr – Coulombov konstitutivni model, kateremu je mogoče vhodne parametre določiti na podlagi standardnih terenskih in laboratorijskih raziskav zemljin in hribin. Rezultati analiz so zadovoljivi in za projektiranje v spremenljivih geološko geomehanskih pogojih primerni. To dokazuje tehnično opazovanje z meritvami in primerjavo napovedanih in merjenih deformacij.

V stabilnostnih analizah po MKE, ki smo jih uporabljali pri projektiranju visokih vkopov (programski paket GEOSLOPE: SLOPE/W) je možno napetosti izračunane s pomočjo programa SIGMA/W, uporabiti za izračun varnostnih faktorjev. Napetosti so izračunane na dnu vsake rezine drsine, za določitev aktivirane strižne in normalne napetosti. Normalna napetost je uporabljena za izračun razpoložljive strižne trdnosti. Aktivirana in razpoložljiva strižna trdnost se za oceno uporabljene razpoložljive trdnosti v dnu vsake drsine primerjata, kar se nanaša na lokalni varnostni faktor. Za

izračun globalnega faktorja se aktivirana strižna trdnost in strižna trdnost integrirata vzdolž celotne površine drsine. Pri reševanju geotehničnih problemov nam uporaba takšne hibridne analize omogoča popolnoma nov pristop k izračunu lokalnih in globalnih faktorjev varnosti. Na brežinah tako ne ugotovimo samo mejne varnosti, ampak napovemo tudi deformacije, ki nastanejo med izvedbo in po njej.

Na izračun spremembe napetostno deformacijskega stanja najbolj vplivata Poissonov količnik  $\nu$  in modul elastičnosti  $E$ , ki imata v izračunu stabilnosti zelo majhno vlogo. Pri izračunu varnostnega faktorja ima v dreniranih in nedreniranih pogojih glavno vlogo strižna trdnost. V nedreniranih pogojih moramo v stabilnostnih analizah po MKE in analizah napetostno deformacijskega stanja upoštevati tudi spremembo pornih tlakov, ki ponavadi odigrata glavno vlogo.

## PRIMERI PROJEKTIRANJA VISOKIH VKOPOV

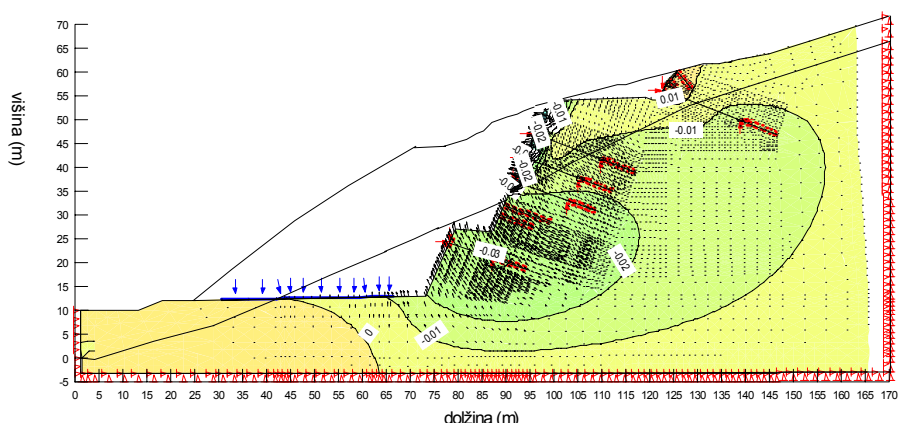
### Trajno varovanje brežin v prostoru gradnje skladišča naftnih derivatov Ortnek

V fazi raziskav med izvedbo je bila brežina že med izkopom prve kampade dodatno inženirsko geološko skartirana. Opravljene so bile natančne meritve razpok in obenem določen geološki trdnostni indeks GSI. Na izkopni brežini so bili odvzeti vzorci za triosne strižne preiskave in edometriško preiskavo, ki je služila predvsem za določitev koeficienta prepustnosti hribine. Za določitev modula elastičnosti hribine so bile v sidrni vrtini opravljene tudi meritve s presiometrom.

Rezultati triosnih strižnih preiskav so bili skupaj s karakteristikami določenimi na podlagi RMR in GSI vneseni v izračun posplošenega Hoekovega in Brownovega porušitvenega kriterija. Prostorske hribinske stabilnostne analize so bile narejene po odsekih brežine najprej za vsak prostorsko različno usmerjen presečni razpoklinski sistem posebej, kasneje pa so bile vse meritve nizov razpok zbrane in analizirane glede na njihovo skupno prostorsko porazdelitev. Na podlagi ugotovljenega skupnega presečnega razpoklinskega sistema je bila izdelana globalna prostorska hribinska stabilnostna analiza z upoštevanjem projektnega seizmičnega pospeška. Narejena je bila tudi natančna analiza napetostno deformacijskega stanja vseh šestih faz izkopa in vgrajenih opornih ukrepov ter analiza zadnje faze temeljenja rezervoarja. Celoten izkop je bil stabilnostno preverjen s hibridno analizo po MKE, s katero sta bili ugotovljeni kritična in globalna drsina.

Blagovne rezerve RS - Ortnek - rezervoar R 13  
varovanje brežine  
dat.: p2r13c-izkop.sig  
datum: 3.2.2003  
ura: 22:03:16  
vrsta analize: Load/Deformation  
merilo - M = 1 : 750: 2-D

12. korak: 6. faza izkopa in 6 faz opornih ukrepov  
konture horizontalnih pomikov / 1 cm  
vektorji deformacij: 23 x povečava



Slika 2: Elastoplastična analiza s konturami horizontalnih pomikov na 0,01 m in vektorji deformacij (23 kratna povečava). Maksimalna velikost vektorja je nad zgornjo vrsto sider pri vrhu brežine: 10,8 cm.

Na podlagi dopolnilnih raziskav in natančnih analiz, katerih cena je v primerjavi s stroški opornih ukrepov zanemarljiva, se je občutno zmanjšala investicijska vrednost objekta.



## Sanacija brežin v prostoru gradnje rezervoarja R-20 Sermin

Pri izvedbi izkopa brežine v naklonu  $n = 1 : 1,5$ , zgrajene iz preperelega fliša, je v noči med 04., 03. in 05., 03., 2003 nad požarno cesto ob projektiranem rezervoarju R-20 prišlo do zdrsa. Dne 06.03.2003 smo izvedli podrobno inženirsko geološko kartiranje z natančnimi meritvami razpok ob nastali strukturni porušitvi. Po pregledu je bil izveden natančen geodetski posnetek območja odrona ter prečni profili in meritve pomikov, vgrajenih geodetskih točk. Do pričetka izvedbe sanacije so bila takoj ustavljena vsa izkopna dela.

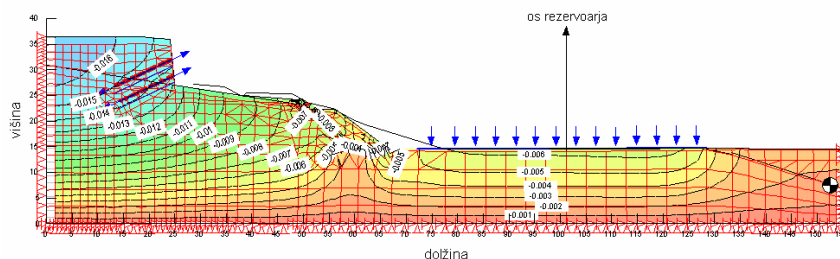
Natančen geodetski posnetek hribinskega zdrsa in zbrane meritve razpok so nam služile za izdelavo povratne prostorske hribinske stabilnostne analize. Na podlagi nastalega stanja je bila sprejeta odločitev o preprojektiranju rezervoarja (zmanjšanje na  $40.000 \text{ m}^3$ ) in predstavitvi požarne ceste, tako da je del prvotne, nepoškodovane požarne ceste ostal kot berma, na brežini. V območju zdrsa je bil splazel material zasut izza nizke zložbe nad cesto. Med izvedbo sanacije sta nastala še dva manjša zdrsa preperelega dobro prepustnega fliša po oslabljeni plasti mehkega slabo prepustnega laporja.

Povratna prostorska hribinska stabilnostna analiza stanja ob zdrsu za vkopno brežino, višine  $H = 19,2 \text{ m}$ , je izkazala kot kritično drsno ploskev plastovitost. Ta se na tem območju povije niz pobočja v smeri  $6^\circ/16^\circ$ . Zdrs je hkrati nastal tudi po presečišču med plastovitostjo in razpoko, ki smo jo registrirali prečno na zaledno natezno razpoko. Ta je sestavni del niza razpok, ki se pojavljajo na razdalji od 0,2 do 0,4 m in so zapolnjene s kalcitom. Na drsni ploskvi plastovitosti smo ugotovili izločeno židko do lahkognetno lapornato glino, ki je nastala kot produkt preperevanja laporja. Ta ima značilno vzdolžno prostorsko razporeditev mineralov glin illita in montmorillonita (nabreklijivi minerali).

Ker je obstajala nevarnost, da se bo zdrs razširil na že očiščenem delu brežine v zaledje prostora gradnje, smo s pomočjo geostatičnih analiz sprojektirali izvedbo varovanja zaledne brežine z mrežo, brizganim betonom in pasivnimi sidri. Sanacija zaledne brežine je bila izvedena do 19., 09., 2003. S tem je bila preprečena nevarnost širjenja plazu v zaledje, in hkrati je bilo zavarovano gradbišče. Gradnja masivne kamnite zložbe pod požarno cesto in manjše zložbe nad njo, je tako lahko varno potekala. Dodatno smo sanacijo s kamnito zložbo preverili tudi s prostorsko hribinsko stabilnostno analizo, glede na ugotovljene razpoklinske sisteme, s pomočjo statistične analize, narejene na konturnem diagramu zgostitev vseh izmerjenih razpok na 1 % površine projekcijske ravnine. Stabilnost brežine, varovane z dvanajstimi pasivnimi injektirnimi sidri, je bila zaradi ponavljanja zdrsov ob mokrih površinah zalednih razpok in same drsine ob sušnem vremenu, preverjena s 100% vsebnostjo vode po razpokah. S to sanacijo je zagotovljena varnost nadaljnje gradnje.

Instalacija Sermin - R 20  
Profil - plaz  
P-plaz-izkop 1.siz  
datum: 13.9.2003  
ura: 23:32:52  
analiza: Load/Deformation  
M = 1 : 600; 2-D

5 računska faza: temeljenje rezervoarja  
- po izvedbi kamnite zložbe pod in nad požarno cesto  
- po izvedbi zaščite zgornje brežine: mreža Q - 196 + brizgan beton - d = 10 cm + pasivna sidra  
- pasivna sidra R - d = 32/15 - raster: 3 m  
- deformirana mrežaj - povečava 100x - maksimalna velikost: 1,8776 cm  
- konture navpičnih pomikov / 1 mm



Slika 3: Končna izvedba sanacije brežin in izvedbe temeljenja rezervoarja. Konture navpičnih pomikov / 1 mm. Maksimalna velikost pomikov znaša 1,8776 cm. Usedki pod rezervoarjem znašajo do 8 mm.

Globalna stabilnost sanacije s kritično drsino prek celotne brežine vkopa, na zaledni brežini varovanega s pasivnimi sidri, in kamnitima zložbama nad požarno cesto in pod njo znaša:  $F = 1,308$ .

### **Projektiranje in izvedba varovanja brežin v prostoru gradnje MMP Gruškovje**

Za potrebe gradnje mednarodnega mejnega prehoda Gruškovje smo v fazi izdelave projekta za izvedbo varovanja brežin izdelali geostatične analize. Za to smo izvedli dodatne geološko geotehnične preiskave in meritve.

#### *Geološko geomehanske raziskave za potrebe projektiranja*

Trdnostne in deformacijske parametre preperete in kompaktne hribine smo pridobili na podlagi analize posplošenega Hoekovega in Brownovega porušitvenega kriterija za brežine (računalniški program RocLAB – Rocscience 2002). Pri tem smo kot vhodne podatke uporabili niz laboratorijskih preiskav enoosne tlačne trdnosti in točkovnega indeksa hribine iz vrtine V – 1 (edina vrtina izvedena na brežini z uporabo diamantne krone in dvostenskega jedrnika). Geološki trdnostni indeks GSI smo določili na podlagi vrednotenja rezultatov podrobnega inženirsko geološkega kartiranja obstoječih vkopnih brežin in meritev, v dodatno izvedenih sondažnih jaških ter posredno s pomočjo določitve RMR v vrtini.

Prostorske hribinske stabilnostne analize smo izdelali na treh karakterističnih prerezih, kjer dosežejo vkopne brežine najvišjo višino: P – 15 ob magistralni cesti Ptuj – Macelj, višine  $H = 30$  m, P – 12 nad predvidenimi objekti carine in fitosanitarne zdravstvene inšpekcije, višine  $H = 63,5$  m ter P – 18 ob lokalni cesti LC 457, višine  $H = 40$  m. Kritični prerez P – 12 smo obdelali tudi z analizo napetostno deformacijskega stanja izkopnih faz in opornih ukrepov ter s hibridno stabilnostno analizo po metodi končnih elementov.

Podatki meritev razpok so bili obdelani na skupnem konturnem diagramu razpok (program DIPS - Rocscience) posebej za brežino ob magistralni cesti in posebej za brežino ob lokalni cesti. Ločena obdelava je smiselna, saj poteka prek doline potoka Maceljčica in prek obeh pobočij prelom v smeri severozahod – jugovzhod, ki vpliva na različno prostorsko usmeritev razpoklinskih sistemov. Strižne karakteristike razpok smo določili na podlagi vrednotenja koeficienta hrapavosti JRC, trdnosti sten razpok JCS, enoosne tlačne trdnosti in bazičnega strižnega kota hribinske mase. Za vhodne podatke so nam služile podrobne meritve razpok iz vrtine V – 1 in določitve enoosne tlačne trdnosti vzorcev. Osnovni kot notranjega trenja smo določili na podlagi posplošenega Hoekovega in Brownovega kriterija za brežine. Najprej smo opravili korekcijo koeficienta hrapavosti in koeficienta trdnosti sten razpok med velikostjo vzorcev in velikostjo hribinskih blokov, nato pa smo za izbrano območje napetosti določili povprečno strižno trdnost razpok.

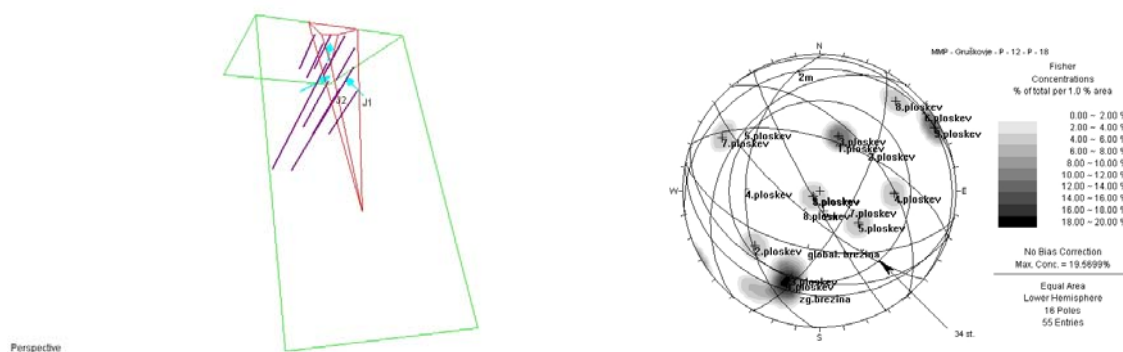
#### *Geološko geomehanske raziskave v fazi izvedbe*

V okviru inženirsko geološke spremljave izkopa brežin smo podrobno določili litološke meje in prostorsko lego plasti in razpok. Meritve površinskega stanja sveže odkopane hribinske mase in površinskega stanja razpok so bile opravljene takoj po izvedenem strojnem izkopu in kasneje takoj po izvedenem gladkem miniranju. Na podlagi rezultatov meritev je bila hribina klasificirana po geomehanski klasifikaciji Bienawskega (RMR, 1989) ter izvrednoten geološki trdnostni indeks (GSI, Hoek, Carranza-Tores in Corkum, 2002). Podrobno smo pregledali izkopne brežine ter popisali jedra vrtin za izvedbo nadvoza. Določili smo litološko zgradbo, RQD, stanje razpok ter izvedli meritve prostorske lege diskontinuitet (plastovitost, foliacija, skrtilavost in razpoke). Ker je hribinska masa v povprečju kvalitetnejša ( $GSI > 25$ ), smo na podlagi vrednosti RMR' hribini določili geološki trdnostni indeks GSI.

#### *Prostorska hribinska stabilnostna analiza*

Prostorske stabilnostne analize kritičnih klinov smo obdelali z računalniškim programom Rocscience – SWEDGE 4.077 po metodi Hoeka & Braya. Pogoji za zdrs klina različnih kombinacij presečnih razpoklinskih sistemov razpok, ugotovljenih z dodatnimi meritvami ob izkopu brežin, je bil določen z Marklandovim testom na Schmidtovem diagramu razpok. Prostorske podatke lege presečnih ravnin razpok (strižnih in nateznih) in plastovitosti smo določili na podlagi maksimumov zgostitev polov razpok s pomočjo konturnega diagrama (slika 4).

Med izvedbo izkopa in varovanja brežin je po zimski odjugi in obilnem pomladanskem deževju v območju razpoklinske cone preperete in tektonsko poškodovane hribine prišlo nad lokalno cesto med profili P – 17 in P -18 do večjih deformacij in poškodb na delu že varovane brežine s pasivnimi sidri in na vmesni bermi. Voda v vgrajenih inklinometrih – piezometrih se je dvignila do ustja vrtin. Zaradi velikih hidrostatičnih pritiskov so se razpoke razširile, kar je povzročilo padec kohezijske trdnosti, ki jo v normalnih pogojih povzroča hrapavost razpok. Deformacije so dosegle velikostni red do 3,8 cm. Brežino smo takoj sanirali z dodatnimi injektirnimi sidri, in zaradi vertikalne lege novo odprtih sekundarnih razpok na kritičnem odseku, dodali še vodoravno 3 x sidrano AB gredo. Takoj smo opravili podrobne meritve novo nastalih razpok in izdelali povratno prostorsko stabilnostno analizo.



Slika 4: Prostorska hribinska stabilnostna analiza z določitvijo sanacijskih ukrepov med gradnjo in konturni diagram razpok kritične brežine med profili P – 12 in P – 18, kjer poteka prelomna cona močno razpokane mešane kamenine trdnostno deformacijsko različnih kamenin: razpoklinsko porozen grobo zrnat peščenjak in drobno zrnat peščenjak, ki preide v slabo prepusten tektonsko pregneten skrilav meljevec. Zunanja razpoklinska cona ob prelomu in notranja prelomna cona s tektonsko pregneteno mehko kamenino ter hitrimi litološkimi spremembami, poteka prečno prek pobočja in tako zajame široko območje izkopnih etaž spodaj od profila P – 9 m vse do P – 19 v osrednjem delu pobočja.

Za trajno stabilnost brežine smo v skladu s predstandardi EUROCODE 7 (projektiranje v spremenljivih geotehničnih pogojih) izbrali varnostni faktor  $F = 1,25$ . Pri tem je za zagotovitev stabilnosti potrebno brežino varovati z mrežo in brizganim betonom, učvrščeno s pasivnimi sidri ( $Q = 200$  kN), v območju prelomne cone pregnetenega skrilavega meljevca v spodnjem delu ob cesti dodatno tudi z 2 x sidranimi AB slopi. Na kritičnem odseku smo na vmesno etažo dodali tri geotehnična sidra zaklinjena na silo  $P_0 = 450$  kN do 500 kN (večja sila zaklinjenja je v območju peščenjaka, manjša pa v območju skrilavega meljevca). V analizi smo upoštevali dejansko število pasivnih in trajnih geotehničnih sider, ki delujejo na ugotovljen kritični klin s podano prostorsko lego in velikostjo.

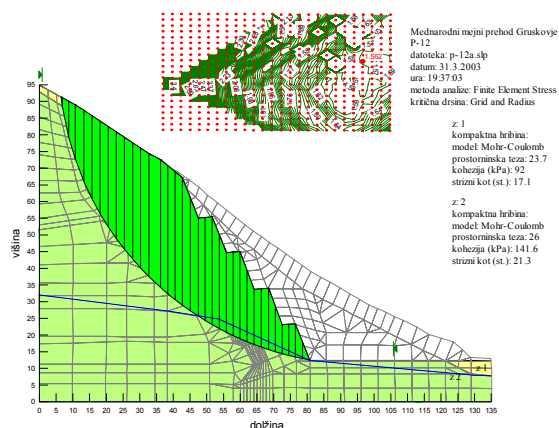
#### *Analiza izkopa in opornih ukrepov*

Geostatične analize po metodi končnih elementov smo izdelali s programskim paketom Geoslope (programa SIGMA/W in SLOPE/W), verzija 5.15.

Analize so obsegale analizo začetnega napetostnega stanja pred izvedbo izkopa, podrobno analizo postopnega odkopavanja ter izvedbe opornih ukrepov in stabilnostno analizo z upoštevanjem spremembe napetostno deformacijskega stanja po izvedbi izkopa in varovanja s sidranimi slopi.

Za analizo napetostno deformacijskega stanja kritičnega profila smo na podlagi rezultatov prvotnih in dodatnih terenskih in laboratorijskih raziskav uporabili konstitutivni elastoplastični model.

Stabilnostno analizo smo izdelali s pomočjo programa Geoslope (Slope/W), pri čemer smo uporabili napetosti izračunane do zadnje faze izkopa s programom Sigma /W. Upoštevali smo tudi razmeroma visok vodostaj v primeru daljšega deževnega obdobja, ki obsega dobro prepustno območje deluvijalnega preperinskega sloja (CL/GC) in preperete hribine (preperel peščenjak s polami meljevca). Na sliki 5 prikazujemo izračun stabilnosti s kritično drsino. Globalna stabilnost pobočja po izkopu in izvedenih opornih ukrepih: - kritična drsina s faktorjem varnosti proti zdrsu  $F = 1,562$ .



Slika 5: Stabilnostna analiza po metodi končnih elementov kritičnega prereza P – 12 za fazo PGD – PZI ob upoštevanju izkopnih faz in varovanja z 2 x sidranimi slopi na zgornji in spodnji brežini ob cesti.

## ZAKLJUČEK

Pri projektiranju globokih vkopov se je pokazalo, da je poleg ustreznih izvedenih geološko geotehničnih preiskav in geostatičnih analiz v fazi načrtovanja, pomemben tudi skrben projektantski geološko geotehnični nadzor izvedbe. Z njim dosežemo, da bo projektna rešitev varovanja visokih vkopnih brežin v dano geološko-geotehnično sredino umeščena optimalno. Tako skupaj z načrtovanim tehničnim opazovanjem – monitoringom zagotovimo zahtevano varnost med izvedbo in po njej ter hkrati racionalen način projektiranja.

Pri sami izvedbi je potrebno za vsako spremembo, bodisi v sestavi temeljnih tal, ali v geološki zgradbi zalednih brežin, sproti podati ustrežno rešitev. Pri tem si v različnih hribinskih masah poleg uveljavljene klasifikacije kamenin po Bieniawskem (1989, v skladu z EC 7) posredno (v povezavi s klasifikacijo Bieniawskega - RMR), ali neposredno (določitev geološkega trdnostnega indeksa – GSI) pomagamo z novejšo klasifikacijo za razpokane in mešane tako trde, kot mehke kamenine, ali celo tektonsko poškodovane in pregnetene hribinske mase (Marinos in Hoek, 2001).

Pridobljeni parametri nam skupaj z rezultati laboratorijskih preiskav izvedenih v fazi načrtovanja, ali celo z dodatnimi med samo izvedbo, služijo za potrebno ponovitev geostatičnih analiz.

Po vsaki zaključeni gradbeni fazi je potrebno vzpostaviti ustrezno tehnično opazovanje – monitoring. Z njim zagotovimo možnost primerjave napovedanih računskih pomikov z dejansko izmerjenimi ter možnost izvedbe dodatnih opornih ukrepov, v kolikor bi bili potrebni.

## LITERATURA

- (1) BARTON, N. R. and CHOUBEY, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics* 10 (1 – 2), str.1 – 54.
- (2) BARTON, N. R. and BANDIS, S. C. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in Engineering practise. In *Rock Joints, proc. Int. Symp. On rock joints*, Leon, Norway. Editors: N. Barton and O. Stephansson, Rotterdam: Balkema.
- (3) BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley, 1989.
- (4) EINSTEIN H. H., STEPHANSSON O. Fracture Systems, Fracture Propagation and Coalescence, *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Geoeng 2000*. Technomic Publishing Company, Inc. U. S. A., 2000, str. 1348 – 1388.
- (5) HOEK, E., CARRANZA – TORRES, C. T., and CORKUM, B. Hoek – Brown failure criterion – 2002 edition. *Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July 2002*.