

Pomen inženirske geologije pri načrtovanju in gradnji zahtevnih objektov v urbanih okoljih

The main goal of engineering geology for designing and construction complex structures in urban areas

Drago OCEPEK & Jasna JERMAN

GeoEng & Co., Dimičeva ul. 14, 1000 Ljubljana, Slovenija
e-mail: d.ocepek@geoeng.si, j.jerman@geoeng.si

Key words: geological strength index – GSI, disturbance factor of rock mass – D, joint roughness coefficient – JRC, joint compressive strength – JCS, numerical modeling, retaining measures, monitoring, back analyses, strain softening, rock mass relaxation

Ključne besede: Geološki trdnostni indeks – GSI, faktor poškodovanosti hribinske mase – D, koeficient hrapavosti razpok – JRC, koeficient trdnosti sten razpok – JCS, numerično modeliranje, podporni ukrepi, monitoring, povratne analize, deformacijsko popuščanje, relaksacija hribinske mase

Izvleček

Pri načrtovanju zahtevnih objektov v urbanih okoljih se v prvi vrsti srečujemo s pomankanjem prostora. Zato morajo biti izkopi in brežine pri temeljenju ponavadi varovane s primernimi opornimi ukrepi. V tem prispevku prikazujeva načrtovanje in izvedbo izkopov, varovanih z različnimi opornimi ukrepi v dveh različnih slovenskih okoljih, ki sta zgrajeni iz heterogenih mešanih hribinskih mas trdih razpokanih do mehkih kamenin (triasnega dolomita in apnenca z vložki rožencev in laporjev ter eocenskega fliša).

Ze med izkopom in izvedbo opornih ukrepov, preverjamo njihovo uspešnost s pomočjo tehničnega opazovanja – monitoringa. Tak pristop projektiranja omogoči optimizacijo podpornih ukrepov, kar zniža stroške investicije.

Abstract

Work for designing complex structures in urban areas consists of geological-geotechnical investigations and analysis of the quality of rocks, soft rocks and hard soils in the construction area. Urban areas limited the space for designing cutting slopes in stable inclination without reinforcement. In this paper will be presented designing and excavation works with different reinforcement of two different areas in Slovenia built of heterogeneous mixed hard to soft rock masses (Triassic dolomite, limestone and Eocene flysch sediments).

Before the start of excavations work and after establishing the retaining measures, the analysis results are checked by monitoring. This monitoring will continue in the phase of exploitation of the objects. Since the cost of these additional investigations and precise analysis with monitoring (SIST - EN 7 - 2004) and measurements is negligible – in comparison with the costs of the permanent reinforcement – if variable conditions are not too intensive, we were able to reduce effectively the investment value of the object.

Uvod

Pomen inženirske geologije se pri projektiranju geotehničnih ukrepov najprej pokaže v pravilni določitvi lastnosti in značilnosti materialnih parametrov zemljin in hribinske mase za analize napetostno deformacijskega stanja izkopskih faz z dodajanjem ustreznih podpornih ukrepov. Preiskave in analize je potrebno nadaljevati tudi med samo gradnjo in na podlagi rezultatov oporne ukrepe prilagajati spremenljivim geološko geomehanskim pogojem.

Novjše metode poleg običajnih meritev vključujejo tudi določitev karakteristik hribinske mase po preseženi vrhunski trdnosti in relaksaciji. Novejši merilni sistem omogoča direktno odčitavanje pomikov hribinske mase, tako v stanju elastičnosti, kot v stanju po preseženi vrhunski trdnosti. S povratnimi analizami kasneje ugotavljamo deformacijsko popuščanje – relaksacijo hribinske mase in potrebo po morebitnih dodatnih podpornih ukrepih.

Pri načrtovanju zahtevnih objektov v urbanih okoljih smo predvsem omejeni s prostorom. Zaradi vedno večjega pomanjkanja prostora je pomembno sodelovanje med arhitektom in inženirskim geologom že v začetni fazi načrtovanja. Inženirski geolog mora v obravnavanem prostoru gradnje opredeliti vse pomembne pojave, ki odločujoče vplivajo na možnost izkoriščanja prostora v globino (podzemne garaže in kleti) ter načina temeljenja in varovanja gradbene jame s primernimi geotehničnimi ukrepi.

Predlagane spremembe v slovenski zakonodaji s področja graditve objektov, ki so bile vsklajene med matičnima sekcijama gradbenih inženirjev (MSG) in rudarjev ter geotehnologov (MSRG) pri Inženirski zbornici Slovenije (IZS), omogočajo tudi inženirskim geologom sodelovanje pri načrtovanju. Po novih predlogih in dopolnitvah zakona o graditvi objektov (ZGO 1) lahko nastopa pooblaščen inženir (inženirski geolog, rudarski inženir, geotehnolog) kot odgovorni projektant geotehniških načrtov izkopov in podgradnje za podzemne in druge geotehnične objekte.

Projektna dokumentacija mora na nivoju projekta za gradbeno dovoljenje in izvedbo (PGD in PZI) ter projekta izvedenih del (PID) vsebovati tudi geotehniški načrt (načrti geotehničnih konstrukcij ter izkopov in osnovne podgradnje podzemnih objektov). Znanja inženirjev Matične sekcije

Geotehnologov in rudarjev pri Inženirski zbornici Slovenije (IZS), z opravljenimi ustreznimi strokovnimi izpiti, dovoljujejo in omogočajo izdelavo geotehniških načrtov, kakor tudi revidiranje, vodenje in nadziranje del pri izgradnji podzemnih objektov, galerij, brežin, vkopov, etažnih cest, odvodnjevalnih kanalov, gradbenih jam, globokih vrtin, miniranja, deponij, odlagališč, sanacij plazov in podorov.

V nadaljevanju prispevka prikazujeva potek preiskav in analiz potrebnih za izdelavo geotehniških načrtov.

Inženirsko geološke raziskave pri izdelavi geotehniških načrtov

Raziskovalno delo pri izdelavi geotehniških načrtov varovanja brežin, podzemnih objektov, ali sanacij plazov ter podorov temelji na različnih metodah ugotavljanja fizikalnih lastnosti kamenin, mehkih kamenin in zemljin. Rezultati preiskav služijo pravilni izbiri vhodnih podatkov za stabilnostne in numerične analize napetostno deformacijskega stanja gradnje po fazah in potrebnih podpornih ali opornih ukrepih.

Osnovne geološke preiskave potekajo že v fazi idejne študije in idejnega projekta. Gre predvsem za reambulacijo Osnovne geološke karte v danem prostoru gradnje v merilu 1 : 5000. Vendar je širše obravnavano območje prav tako potrebno inženirsko geološko kartirati ter pri tem opredeliti primerna, manj primerna in neprimerna področja za nadaljnje načrtovanje gradenj. Pri tem je pomembno izločiti labilna in nestabilna področja, območja delovanja intenzivne erozije, ali celo potresna področja, kjer so pri gradnji potrebni bolj ali manj zahtevni geotehnični ukrepi.

V višjih fazah projektiranja potekajo za ugotavljanje lastnosti zemljin in hribinske mase najprej raziskave in analize v fazi projekta za pridobitev gradbenega dovoljenja (PGD). Na podlagi rezultatov raziskav in analiz se lahko ustrezno opredelimo pri izbiri podpornih in opornih ukrepov. Ti so v najmočnejši izvedbi po potrebi celo geotehnične konstrukcije. Sledi nadaljevanje raziskav ugotavljanja lastnosti in značilnosti zemljin ter hribinske mase zaradi prilagajanja geološko – geomehanskim spremembam med samo izvedbo (PZI) ter preverjanje rezultatov numeričnih analiz s tako pridobljenimi vhodnimi podatki.

V začetni fazi raziskav (faza PGD) je obravnavano področje potrebno podrobno inženirsko geološko skartirati in določiti potek litoloških mej ter poiskati vse golice za natančne meritve razpok v hribinski masi podlage zemljin. 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). Za podzemne objekte je najbolje izvesti raziskovalni rov s podrobnim kartiranjem »in situ« meritvami ter z odvzemom vzorcev za laboratorijske preiskave. Možna je tudi kombinacija navpičnih in vodoravnih raziskovalnih vrtnic.

Geotehnične, geomehanske in hidrogeološke preiskave ter meritve »in situ«

Podrobna določitev litoloških mej in določitev prostorske lege hribinske podlage s pomočjo inženirske geološke kartiranja nam v naslednji fazi preiskav (faza PZI) služi tudi za optimalno določitev razporeditve raziskovalnih vrtnic. Z njimi je potrebno pokriti ključna mesta, ki jih zahtevajo oblika, velikost in način temeljenja načrtovanih objektov.

V zgornjih delih pokrova zemljin (kvarternih nanosov) in tudi umetnih nasipov ter preperinskega sloja v območju preperele hribinske mase poteka vrtnanje rotacijsko na suho. Pri tem se preperele kamenine še bolj poškodujejo. Naloga inženirskega geologa je podrobna določitev in medsebojna razmejitve litoloških členov (velikost in oblika zrn, gostotno in konsistenčno stanje zemljin, mokre in vlažne cone, dotoki vode in morebitni drugi posebni pojavi) stopnje in globine preperevanja ter vpliva erozijskih procesov, ali celo plazjenja. Pri tem nam v koherentnih zemljinah pomagajo meritve enoosne tlačne trdnosti (z žepnim penetrometrom) v nekoherentnih zemljinah pa standardni penetracijski preizkusi (SPT – določitev gostote in stopnje preperelosti) ter preiskave penetrabilnosti hribin.

V primeru debelejših slojev koherentnih zemljin (aluvijalni nanosi, barjanski, jezer-

ski ali morski sedimenti) izvajamo v višjih fazah projektiranja poleg vrtnic tudi statične penetracijske sonde (CPT) z meritvami odpora pod konico in trenja po plašču ter pornih tlakov in njihove disipacije. Za manjše globine na takšnih tleh, predvsem pri načrtovanju zgornjega ustroja cest, železnic, energetskih in drugih vodov (plinovodi, naftovodi, tlačni vodi, vodovodi...) uporabljamo v zadnjem času tudi ultra lahko sondo (»Panda«), s katero na podlagi meritev odpora pod konico in trenja po plašču, izračunamo s pomočjo empiričnih obrazcev nedrenirano strižno trdnost ter določimo koeficient nosilnosti temeljnih tal nasipov (CBR).

Če na področju načrtovane gradnje nastopajo debelejši sloji nekoherentnih zemljin pa sondažne vrtnice kombiniramo s preiskavami z dinamično penetracijsko sondo (DP). S pomočjo empiričnih obrazcev izračunavamo gostotno stanje nekoherentnih zemljin (do manjših globlin lahko preiskujemo tudi koherentne zemljine – problem večjega odpora po plašču sonde) ter posredno kot notranjega trenja in module elastičnosti.

V kompaktnih trdih kameninah pa se je potrebno pri vrtnanju poslužiti tehnologije vrtnanja z dvojno, ali večstenskimi jedrnikom, ob uporabi diamantnih kron in hlajenjem z vodo, pri mehkih kameninah in mešanih hribinskih masah pa z uporabo težke polimerne izplake.

Med vrtnanjem je za izdelavo geotehniških načrtov potrebno v trdih in mehkih kameninah opraviti meritve s presiometrom, v koherentnih zemljinah pa meritve z dilatometrom ter odvzeti vzorce za laboratorijske preiskave. V nekoherentnih zemljinah in močno preperelih hribinskih masah izvajamo presiometerske meritve s posebno sondo za zemljine.

Skrbno je potrebno registrirati globino pojave podzemne vode, še posebej takrat ko je vezana na razpoklinske sisteme. Zelo priporočljivo je opraviti 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 vrtnini) kombinirati s seizmičnim profiliranjem (geofoni razvrščeni na površinskem profilu) in napraviti seizmično tomografijo.

Po zaključku vrtnanja je potrebno v izbrane vrtnice vgraditi inklinometrične cevi za kasnej-

še spremljave globokih pomikov med gradnjo (projektiranje po opazovalni metodi).

Naloga inženirskega geologa pri popisu jedra vrtin v hribini je podrobno ugotoviti litološko zgradbo in ustrezno kategorizirati hribinsko maso. Pri tem je potrebno najprej določiti območje vrednosti geološkega trdnostnega indeksa GSI (Marinos in Hoek, 2000, 2005) ter odvzeti vzorce za laboratorijske preiskave. Zelo pomembno je tudi določiti morebitne fosilne in aktivne drsine ter strukturno tektonske elemente (prostorska lega in debeline plasti, določitev morebitnih oslavljenih con, gub...).

V trdih kompaktnih kameninah je od laboratorijskih preiskav 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, koeficienta prepustnosti ter količnika por.

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.

Potek in vrednotenje večine opisanih preiskav je standardiziran (SIST – EN 7) in končno tudi sprejet v Republiki Sloveniji leta 2004.

Analize za določitev materialnih parametrov in porušitvenih mehanizmov

Osnova vsake analize za določitev medsebojnega vpliva načrtovane gradnje in naravnega okolja, bodisi z izkopom, nasipavanjem, rudarskimi metodami, ali njihovimi kombinacijami, je izdelava ustreznega števila geološko-geotehničnih prerezov (prečnih in vzdolžnih) na podlagi inženirsko geološke karte ter vseh pridobljenih terenskih podatkov in meritev. Prezezi morajo pokriti celotno območje načrtovane gradnje, v pri-

meru vpliva na druga območja, ali celo objekte, je tudi te potrebno vključiti vanje.

Geološko geotehnični prerezi s podrobno podano litološko zgradbo, prostorsko lego osnovne hribine in z vsemi pridobljenimi pomembnimi podatki (nivoji vode, vlažne cone, fosilne in aktivne drsine, erozijske, tektonske in preperela cone) služijo za načrtovanje primernih naklonov izkopov, nasipov, ali potrebne oblike in velikosti podzemnih posegov, kot tudi določitev potrebne globine in načina temeljenja objektov.

Za izdelavo geotehnološkega projekta je potrebno ustrezno analizirati vse kritične prereze (maksimalne višine izkopov in nasipov, območja najglobljih drsin in tektonsko pretrtih con...) ustrezno analizirati. Pri geotehničnih konstrukcijah je potrebno upoštevati interakcijo med objektom in naravno geološko zgradbo (tudi v morebitnih kritičnih vmesnih izkopnih fazah, ali fazah nasipavanja).

Za potrebe takšnih analiz obstaja danes (z obravnavanjem faznosti gradnje) vrsta zelo kvalitetnih računalniških programov (2 D in 3D), s katerimi je možno tako zemljine, kot hribinske mase in potrebne podporne in oporne ukrepe ustrezno modelirati. Vendar je pri izbiri ustreznih materialnih modelov potrebno posvetiti posebno pozornost tudi vsem fizikalnim spremembam v zemljinah, hribinski masi in podpornih ali opornih ukrepih (časovne spremembe pornih tlakov, napetostno deformacijska relaksacija hribinske mase zaradi gradbenih posegov, pomiki zemljin in hribin ter opornih in podpornih ukrepov in samih objektov, vključno s seizmičnim pospeškom).

Zahtevne gradnje s pomočjo geotehničnih podpornih ali opornih ukrepov, kot tudi podzemne gradnje opazujemo s pomočjo skrbno načrtovanega tehničnega opazovanja – monitoringa. Tako lahko rezultate analiz preverjamo in po potrebi potrebne geotehnične ukrepe dodamo med samo gradnjo, ali po potrebi tudi po njej.

Tako lahko verificiramo uporabljene materialne modele in vhodne parametre za numerične analize.

Za izbiro ustrezne analize in določitev potrebnih vhodnih parametrov nam najprej služi podrobno izdelan geološko geotehnični prerez. Na njem je potrebno vnaprej predvideti porušitveni mehanizem, ki bi nastal ob načrtovanih gradbenih posegih. V kolikor pa načrtujemo sanacijo plazov ugotovimo globine drsin pri popisu vrtin (kasneje jih

lahko potrdimo z meritvami inklinacij vgrajenih v vrtnice in nivojev nihanja vode). Pri hribinskih podorih pa lahko merimo drsne ploskve neposredno.

V nadaljevanju prispevka se bova omejila na določitev porušitvenih mehanizmov in materialnih parametrov v trdih in mešanih hribinskih masah. V obeh primerih je potrebno opraviti podrobne meritve prostorske lege in fizikalnih lastnosti strukturnih elementov hribinske mase.

V začetni fazi raziskav je področje predvidenih gradbenih posegov potrebno podrobno inženirsko geološko kartirati z natančnimi meritvami razpoklinskih sistemov, hkrati pa popisati vrtnice in v njih izvesti ustrezne »in situ« preiskave ter odvzeti vzorce za laboratorijske raziskave. Za karakterizacijo hribinske mase uporabljamo hribinsko klasifikacijo za razpokane in mešane hribinske mase z določitvijo območja vrednosti geološkega trdnostnega indeksa – GSI (Marinos & Hoek, 2000, 2001). Najprej jo uporabljamo v fazi raziskav za izdelavo projekta in kasneje za določitev med samo izvedbo, ob upoštevanju faktorja poškodovanosti hribinske mase D , zaradi načina in kvalitete izkopa ter relaksacije hribinske mase (Hoek & Diederichs, 2006). Če obstajajo v hribinski masi dominantne razpoke, ki lahko povzročijo translacijske, ali rotacijske porušitvene mehanizme, velja omejitev za uporabo obravnavane metode. Posledice so zdrs po eni razpoki (diskontinuiteti/plastovitosti), ali klinast zdrs, ki ga omejujejo presečne ravnine dveh do treh razpoklinskih sistemov (Ocepek, 2005). Če v hribinski masi ugotovimo možnost strukturnih porušitev zaradi pomembne vloge razpoklinskih sistemov, je potrebno napraviti kinematične analize (Schubert et al., 2004). V drugačnih okoliščinah lahko obravnavamo hribinsko maso kot enotno in izotropno. Na podlagi posplošenega Hoekovega in Brownovega porušitvenega kriterija z aplikacijo na plitve, ali globoke predore ter brežine, določimo trdnostno deformacijske parametre hribinske mase različne kvalitete (Hoek et al., 2002).

Prostorska porazdelitev strukturnih elementov hribinske mase

Vse meritve prostorske lege razpok v hribinski masi po posameznih golicah in sondažnih jaških, ter kasneje izvedene tudi v fazi izkopa (PZI), uporabimo za izdelavo

zbirnega, konturnega diagrama polov razpok.

Ročno izvedene meritve v zadnjem času zamenjujejo tudi različne fotogrametrične tehnike. Te so uporabne predvsem za meritve površin brežin ali sten in stropa predorov (Pötttsch, 2006). Fotogrametrične podatke obdelamo s posebnim računalniškim programom (Joint Matrix 3 D, Gaisch et al., 2006) in prostorske lege razpoklinskih sistemov v obliki preglednic izvozimo v drug računalniški program. Tako pridobljene prostorske podatke strukturnih elementov hribin (lahko tudi s pomočjo klasičnih meritev) obdelamo statistično.

V nasprotju s klasično ročno obdelavo je 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 na podlagi izračuna posplošenega porušitvenega kriterija po Hoeku in Brownu (Hoek et al., 2002, 2006), ali po starejši geomehanski klasifikaciji za hribinske mase (Bieniawski, 1989).

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 intaktnih vzorcih. Številne praktične izkušnje kažejo, da so rezultati povratnih analiz najbolj primerljivi s triosnimi strižnimi preiskavami.

Strižne karakteristike razpok v trdnih kameninah najlaže 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 (vedno bolj se uporabljajo tudi elektronski merilni pripomočki in posebne tehnike za določitev geometrije intaktnih hribinskih blokov, Milne et al., 1991, 1992) ter kvantitativne analize.

Najprej določimo koeficient hrapavosti v merilu laboratorijskega vzorca. Za vhodne podatke uporabimo podrobne meritve razpok na golicah, jaških in v vrtnah (vrtnanje z diamantno krono ob uporabi dvostenskega jedrnika z vodnim hlajenjem) ter določitev enoosne tlačne trdnosti vzorcev. Osnovni kot notranjega trenja Φ_b določimo z laboratorijskimi strižnimi preiskavami, lahko pa tudi na podlagi posplošenega Hoekovega in Brownovega kriterija. 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 (Barton & Bandis, 1990):

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

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

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

- 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 et al., 2002) z aplikacijo za brežine, ali predore določimo trdnostno deformacijske parametre različne kvalitete hribine. Ti nam kasneje pomagajo pri izdelavi 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, ali podzemne kaverne 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 enoosne tlačne trdnosti, ali s pomočjo parov učinkovitih 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, Marinos in Benissi leta 1998, Marinos in Hoek, 2000 ter 2005.

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 najprimerneje uporabiti nepoškodovane površine. V novejši klasifikaciji (Marinos & Hoek, 2000), ki je uporabljena tudi v posebnem programskem paketu RocLab (Rocscience 2006) za izračun posplošenega porušitvenega kriterija, je posebej prikazana preglednica za določitev faktorja porušeniosti hribine D. Za kvalitetnejše hribinske mase (GSI > 25) je možno vrednost GSI določiti posredno s pomočjo klasifikacije Bieniawskega (RMR, 1976, 1989) po naslednjih zvezah:

$$GSI = RMR_{76}' \quad (4)$$

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

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. Vendar je v današnjih razmerah bolj priporočljivo direktno določati geološki trdnostni indeks, za vrednotenje starejših podatkov pa uporabiti zgoraj podani relaciji. Pri določevanju lastnosti hribinske mase po sistemu Hoeka in Browna je najpomembnejša redukcija materialnih konstant σ_{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 & Marinos, 2000). Pri določitvi nam zelo pomaga določitev strukture in teksture ter kristalne zgradbe kamnin na podlagi mineraloške petrografskih preiskav. Po določitvi območja indeksa GSI lahko izračunamo parametre za vrednotenje trdnostnih karakteristik hribinske mase:

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad (6)$$

- 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.

Na Univerzi v Torontu je bil izdelan računalniški program »RocLab«, ki je dostopen na svetovnem spletu (www.rocscience.com). Program je bil od prve objave že večkrat (Hoek et al., 2002) nadgrajen. Program RocLab, temelji na dopoljenih enačbah za določitev konstant s in a , ki vključujeta faktor poškodovanosti hribinske mase D :

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad (7)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (8)$$

Prvotno je bila po klasifikaciji Bieniawskega podana ocenitev elastičnega modula na podlagi RMR vrednosti (Serafim & Pereira, 1983), na podlagi povratnih analiz deformacij pri temeljenju visokih pregrad za bolj kvalitetne hribine. Enačba je na podlagi praktičnih opazovanj in povratnih

analiz obnašanja hribinskih mas slabe kvalitete, za take hribine modificirana. Tudi ta enačba (Hoek et al., 2002) vključuje faktor poškodovanosti hribinske mase, nastale zaradi poškodb pri izkopu (mehanski izkop ali miniranje) in umiritev napetosti:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (GPa) \quad (9)$$

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:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (10)$$

kjer sta σ'_1 in σ'_3 maksimalna in minimalna efektivna napetost pri porušitvi;

- 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);
- σ_{ci} je enosna 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 možno določiti pripadajoči strižni kot in kohezijo v odnosu z Mohr–Coulombovim porušitvenim kriterijem. To naredimo s prileganjem povprečnega linearnega razmerja k sovisnosti nelinearnega Hoekovega in Brownovega odnosa (enačba 10) v območju vrednosti najmanjših glavnih napetosti $\sigma'_1 < \sigma'_3 < \sigma_{3max}$. Pripadajoči strižni kot in kohezijo izračunamo po metodi najmanjših kvadratov (Hoek et al., 2002). Vrednosti ϕ'_i in c'_i , pridobljeni iz analize parov podatkov triosnih strižnih preiskav, sta zelo občutljivi na obseg vrednosti minimalne efektivne glavne napetosti σ'_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:

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad (11)$$

kjer je γ prostorninska teža hribinske mase in H globina predora pod površjem;

– Enačba za brežine:

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91} \quad (12)$$

kjer je γ prostorninska teža hribinske mase in H višina brežine.

Na podlagi rezultatov kvalitetnih numeričnih povratnih analiz in primerjave računskih deformacij z merjenimi so v zadnjih desetih letih nastale nove baze podatkov o obnašanju različnih hribinskih mas okrog številnih starejših in novo zgrajenih predorov ter visokih brežin. Tako so s pomočjo najboljšega prileganja krivulj k obravnavanim podatkom (S oblike krivulj) dopolnili enačbe za deformacije hribinske mase v odvisnosti od geološkega trdnostnega indeksa GSI in faktorja poškodovanosti hribinske mase D zaradi načina izkopa ter porazdelitve napetostnega polja. Zadnja nadgradnja programa RocLab vsebuje tako kar tri enačbe za določitev deformacijskega modula hribinske mase (Hoek & Diederichs, 2006).

Prva je osnovna enačba [9], druga je poenostavljena, pridobljena na podlagi zgornjih vrednosti meritev in zgodovinskih meritev pri visokih pregradah, ki jo uporabljamo za izotropne hribinske mase pri omejenih pogojih, v kolikor poznamo le GSI (RMR ali Q):

$$E_m (\text{MPa}) = 100.000 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75 + 25D - GSI)/11)}} \right) \quad (13)$$

Tretjo enačbo pa lahko uporabljamo tudi za močno razpokane (tudi z mikro razpokami nastalimi ob relaksaciji po izkopu) in tektonsko poškodovane, ali celo razpadle hribinske mase ($GSI = 0$) v kombinaciji z različnimi vrednostmi faktorja poškodovanosti D :

$$E_m = E_i \left(0,02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60 + 15D - GSI)/11)}} \right) \quad (14)$$

Poškodbe hribinske mase se spreminjajo v odvisnosti od razdalje proste površine, poškodovane zaradi miniranja, in porazdelitve napetostnega polja ter v nekaterih primerih zaradi novo nastalih razpok, ki jih povzroči sprememba oblike in jakosti napetostnega polja. Vrednost D se spreminja v odvisnosti od deformacijsko povzročene poškodovane cone okrog predora, kaverne ali izkopne brežine. Tako lahko okrog izkopa pri načrtovanju vključimo koncentrične kroge okrog izkopne odprtine, ali niz približno

Faktor poškodovanosti hribinske mase – D	Opis nastanka poškodb
$D = 0$	Sveža nepoškodovana površina hribinske mase – npr.: graniti, gnajsi (izkopi predorov izvedeni s TBM, ali izvedba podzemnih kavern s kvalitetnim gladkim miniranjem)
$D = 0,3$	Sveža hribinska masa nagubanih in naravno razpokanih sedimentnih kamenin (izkopi predorov izvedeni s TBM, ali izvedba zelo natančnih strojnih izkopov brežin)
$D = 0,5$	Poškodovano območje naravno razpokane hribinske mase širine 1,5 do 2,0 m okrog podzemnih kavern izvedenih s tehniko gladkega miniranja (novo nastale mikro razpoke povzročene s spremembo napetostnega polja)
$D = 0,7$	Poškodovano območje z novo nastalimi razpokami kot posledica miniranja ali slabo nadzorovanega strojnega izkopa s pnevmatskimi kladi (kamnolomi, slabše kontrolirano miniranje vkopov cest, železnic, globokih gradbenih jam...)
$D = 1$	Z miniranjem ali s strojnim izkopom zelo poškodovane mešane skrila-ve ali tektonsko poškodovane, zelo razpokane in oslABLJENE hribinske mase (napetostno deformacijska relaksacija)

Preglednica 1. Opisne vrednosti faktorja poškodovanosti hribinske mase

vzporednih krivulj (brežine, globoki hribinski plazovi) okrog porušitvenega mehanizma ugotovljenega pri povratnih numeričnih analizah, z upadajočimi vrednostmi faktorja D. V naslednji preglednici podajamo tipične opisne vrednosti faktorja poškodovanosti hribinske mase.

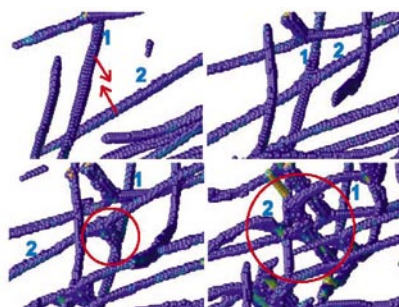
Mehanizem poškodb in sprememb mehke mešane hribinske mase

Materiali imajo pri deformiranju le ozko območje, pri katerem so deformacije povratne, zato definicija porušitvenih mehanizmov v različnih merilih ni povsem jasno definirana.

Če obravnavamo neko srednje plastično glino, ki se v merilu laboratorijskega vzorca do neke napetosti deformira elastično, tako da so deformacije povratne, ne moremo z gotovostjo trditi, da se bo to dogajalo tudi pri ponovljenih obremenitvah, ali pri zelo počasni obremenitvi, pri kateri presežemo vrhunsko trdnost. Vzrok tiči v tem, da se srednje plastična homogena glina pri cikličnih obremenitvah nekaj časa utrjuje toda, po analogiji (Ocepek, 2005) z ugotovitvami raziskav v atomističnem merilu (Buehler, 2004), se pri nastanku dislokacij le te medsebojno prepletajo in rezultat utrjevanja je po določenem času porušitev vzorca. V merilu vzorca je takšna porušitev ponavadi zelo zbrisana, saj se zaradi plastifikacije nastala razpoka dobesedno zlije sama vase. Bolj kot je glina plastična, bolj je razpoka zlita in teže zaznavna. Če primerjamo porušni mehanizem pri hladnem utrjevanju v kristalni kocki duktilnega materiala, vidimo, da se začetna poškodba z vrha zareze (predhodna zareza) širi v kristal. Hitro nastane veliko dislokacij, ki se med seboj prepletajo in se vedno bolj ukleščijo. S tem se sposobnost gibanja dislokacij močno zmanjša. Zato se material ne more več izogniti napetosti z deformacijo

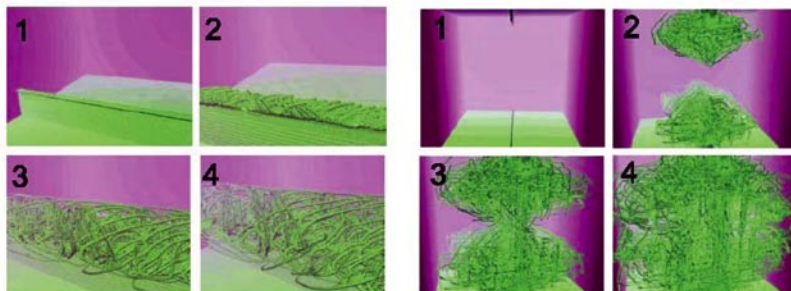
in postane trši ter obenem bolj krhek. Tako duktilna deformacija odpove v korist krhke. Pri tem je mehanizem hladnega utrjevanja odvisen od kolektivnega dinamičnega obnašanja velikega števila poškodb – dislokacij. Pri mehkih kameninah lahko v merilu vzorca nastali porušni mehanizem primerjamo vsoti velikega števila obravnavanih porušitvenih mehanizmov v virtualnem duktilnem kristalu. Slika 1. prikazuje takšen mehanizem poškodb atomistične simulacije (Abraham et al., 2002).

Mešano mehko hribinsko maso (v njej so npr.: skrilavi meljevci s tanjšimi polami drobno zrnatega peščenjaka, ki nezvezno prehajajo v glinaste skrilavce), ki je tudi tektonsko poškodovana, ali drugače oslajljena, smo preiskali v laboratoriju z zadostnim številom triosnih preiskav, kot tudi z »in situ« preiskavami in celo računalniškimi simulacijami porušitvenih mehanizmov na mikroskopskem nivoju, da lahko rezultate medsebojno ustrezno primerjamo. Takšno mešano hribinsko maso lahko v ultrakrat-

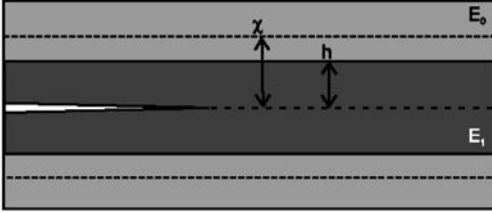


Slika 2. Prerez reakcij prvih dislokacij. Slika kaže, kako se dve dislokaciji (označeni z 1 in 2) z nasprotnih razpok presekatata in ustvarita produkt reakcije. Ko druga reakcija zavzame prostor pri dislokaciji »2« z vključitvijo tretje dislokacije, postane gibanje dislokacij resno ovirano, kar se vidi z upogibom izven dislokacij. Veliko takšnih reakcij se je pojavilo med simulacijo in povzročilo kompleksno mrežo poškodb (Buehler, 2004).

Slika 1. Simulacija utrjevanja milijarde atomov, kot je podano v študiji. Slika (objavljena z dovoljenjem avtorja, Buehler, 2004) kaže zaporedje slik pri nastajanju dislokacijskih struktur med simulacijo.

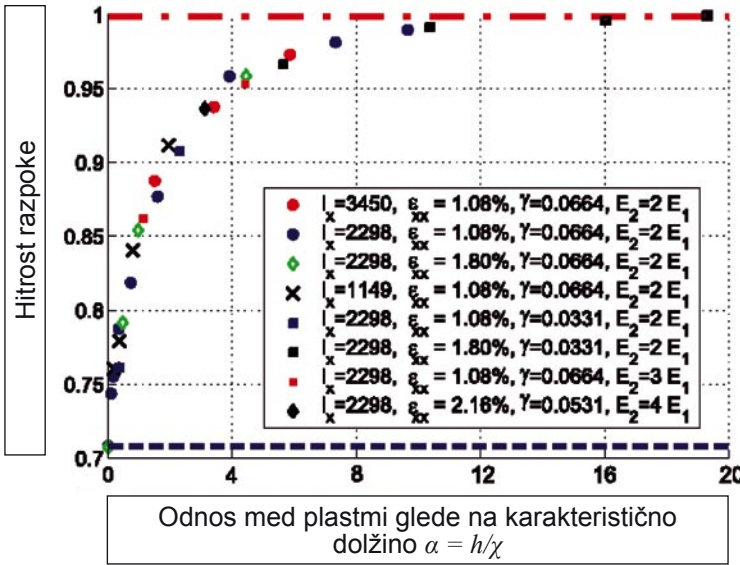


kem merilu primerjamo z atomističnimi simulacijami »Brobergovega problema«. Na naslednji sliki je prikazana geometrija za model materialov z različnimi elastičnimi lastnostmi ter vmesno mejno površino (Broberg, 1995).

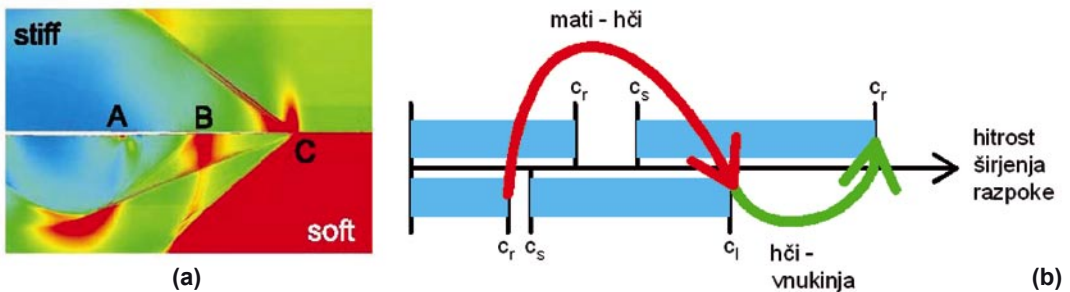


Slika 3. Geometrija Brobergovega problema razširjanja razpoke v tanki togi plasti obdani z mehkim materialom (Buehler, 2004).

Gre za problem razširjanja razpoke v tanki togi plasti, obdani z mehkim materialom podobno, kot se dogaja v peščenjaku, obdanem s skrilavim meljčevcem s prehodi v glinast skrilavec. Torej je porušitveni mehanizem zelo kompleksen, saj je pogojen na eni strani s togim materialom z geometrijsko zaporo (obdajajoča mehka mešana hribinska masa skrilavega meljevca s prehodi v glinast skrilavec, ki hitro rastoče razpoke duši), na drugi pa z razpokama na stiku obeh različnih materialov v vmesnih površinah. Napredovanje porušitev hitro rastočih razpok v tenki togi plasti povzročijo razpadanje vmesnih pol peščenjaka in kasneje lahko vmesna razpoka zaradi »hčerinskih« mehanizmov prekorači zvočne hitrosti. Tako iz dela osnovne mikro razpoke nastane niz novih razpok, ki



Slika 4. Rezultati izračuna Brobergovega problema. Slika kaže rezultate različnih računov za pripadajoče napetosti, elastične lastnosti in površinske energije razpoke, ki se spreminjajo neodvisno. Po konceptu karakteristične dolžinske skale padejo vse točke na isto krivuljo in je hitrost odvisna samo od razmerja h/χ (Buehler, 2004).



Slika 5. Razpoka pod strižno obremenitvijo z gibanjem z nadzvočno hitrostjo. Slika (a) prikazuje energijsko polje razpoke pri strigu po ploskvi med dvema materialoma z elastičnim zakonom $\nu = 3$, z gibanjem razpoke z nadzvočno hitrostjo. (A) razpoka »mati«, (B) razpoka »hči«, (C) razpoka »vnukinja«. Risba (b): Dovoljene omejene hitrosti in opazovani preskoki v hitrosti razpoke (Buehler, 2004).

se širijo v mehkem materialu. Iz sekundarnih »hčerinskih« razpok, tako nastanejo še hitreje razširjajoče se razpoke, ki potujejo s hitrostjo longitudinalnih valov elastično togega vmesnega materiala. Pri tem potujejo razpoke v obdajajočem mehkem materialu skozenj z nadzvočno hitrostjo.

Slika 5 prikazuje modelni kristal, kjer lahko opazujemo, kako se najprej razpoka A širi z Rayleighovo hitrostjo (hitrost površinskih valov omejena s hitrostjo zvoka) elastično mehkega materiala od leve proti desni (Liu et al., 1993). Strižna razpoka lahko zaradi »hčerinskih« mehanizmov prepovedana območja prekorači. To se dejansko zgodi in iz dela mikro razpoke A nastane nova razpoka B, ki se s hitrostjo longitudinalnih valov širi v mehkem materialu proti desni. Popolnoma nepričakovano nastane še sekundarna »hčerinska« razpoka, ki se oblikuje iz razpoke B in tako nastane še razpoka C. Ta potuje s hitrostjo longitudinalnih valov elastično togega zgornjega materiala, torej še pred A in B na desno. Pri tem je razpoka C hitrejša od A in ta hitrejša od B. V spodnjem mehkem materialu opazimo dva Machova stožca, kjer potuje razpoka skozi material s hitrostjo 1,41 Macha.

Posledica vsote porušitvenih mehanizmov v realnem materialu je razpad tenkih togih vmesnih plasti in nastanek niza mikrorazpok v mehkih obdajajočih plasteh. V duhu mehanike kontinuuma lahko rečemo, da je prišlo do razmikanja materiala – dilatacije in nato do povečanega efekta rudninskega sesanja – sukcije, v kolikor je material zadosti blizu površja pod vplivom atmosferskih padavin, ali pa globlje, pod vplivom precejanja podzemne gladine vode. Ker lahko na splošno trdimo, da je naša obravnavana mešana mehka hribinska masa v kompaktnem delu neprepustna, sem na tem mestu zaradi razpadanja pri spremembah napetostnega stanja – destrukturizacije (npr.: ob razbremenitvi) ob nastajanju hitro rastočih razpok ter posledični dilataciji, s hkratnim rudninskim sesanjem, vpeljal izraz: **dilatacijska sukcija** (Ocepek, 2005). Ta nastane zaradi spremembe prepustnosti mešane mehke hribinske mase, kot posledica spremembe mehanskih in fizikalnih lastnosti. Posledica destrukturizacije, dilatacijske sukcije in morebitnih nadaljnjih napetostnih sprememb (npr.: razbremenjevanja – izkop, ali obremenjevanja – nasipavanje, temeljenje objektov itd....) je popoln razpad kompaktne mešane hribinske mase na gmoete in še kasneje na zrna peščenjaka (ostanki

vmesnih togih plasti med mehko hribinsko maso skrilavega meljevca s prehodi v glinast skrilavec) v meljno glinasti osnovi. Takšna spremenjena – **alterirana mešana hribinska masa** ima praktično že vse lastnosti heterogene sestavljene zemljine (zaglinjenega do zameljenega gruščca). Mehansko fizikalne lastnosti so odvisne od stopnje časovno izvršenih sprememb. Takšna alterirana mešana hribinska masa na meji heterogene zemljine je na vsakršne zunanje mehanske, fizikalne, morda celo kemične spremembe (obremenitve, razbremenitve, precejanje vode, sušenje, temperaturne spremembe, ...), izredno občutljiva.

Mehanizme poškodb tako spremenjene mešane hribinske mase lahko na atomističnem nivoju primerjamo s preučevanjem mehanskih lastnosti tenkih slojev na substratih, ki sem jih prav zaradi tega podrobno opisal v prejšnjem poglavju. Njihovih mehanskih lastnosti še nismo popolnoma spoznali. Tako imajo filmi, ki so tanjši od 400 nm trdnost, ki je neodvisna od debeline filma (Balk & Arzt, 2001).

Če povzamemo lastnosti popolnoma novega modela poškodb, ki ga je predlagal Huajian Gao (Gao et al., 1999), ki pravi, da v zelo tenkih filmih difuzija v kristalnih mejah relaksira napetosti v mejah zrn, kar povzroči defekt podoben razpoki. Porušitveni mehanizem lahko po analogiji na atomističnem nivoju primerjamo z našo razpadlo-alterirano mešano hribinsko maso, s izrazito dilatacijsko sukcijo. Ta povzroči nastanek tenkega filma – suspenzije vode na meji zrn in gmot razpadle heterogene hribinske mase. Kot kažejo atomistične simulacije poškodba imenovana difuzijski klin kasneje generira dislokacije v drsnih ravninah vzporedno s površino razpoke. Tak deformacijski mehanizem so raziskovalci imenovali difuzijski klin v mejah zrn. Novejše študije tudi kažejo, da je pripadajoče difuzijsko lezenje vzrok mehanizmu, ki mejna zrna počasi transformira v razpoke, glede na pripadajoče napetosti (Buehler, 2004). Pogoj nastanka difuzije je predpostavljen lokalni kriterij, neodvisen od debeline filma. Spremembo ravnotežja sil kritične konfiguracije na robu dislokacije proč od proste površine, povzroči kritična vodoravna napetost za začetek difuzije mejnih zrn. Pri tem je potrebno interpretirati modul elastičnosti E kot lokalni modul mejnih zrn blizu površine, ki je lahko mnogo manjši, kot modul mase ostalega materiala.

Po analogiji z atomističnimi simulacijami sem na podlagi simulacij porušitev v mikroskopskem merilu (Ocepek, 2005) ugotovil, da je tudi pri triosni strižni preiskavi krhka deformacija plastično prehitela, pri čemer je nastala družina sestrskih razpok. Njihovo širjenje se je zadržilo ob plastičnih deformacijah, ali celo ob viskoznem lezenju v sosednjem mehkejšem materialu.

Zaradi izrazite tektonske poškodovanosti obravnavane mešane mehke hribinske mase so časovne spremembe zaradi opisanih mehanizmov še bolj izrazite, saj obravnavane plasti in pole ter skrilavi deli hribinske mase še zdaleč niso ravni. V tektonsko zelo poškodovanih delih so strukture povite, nagubane, pomešane, ali že v geološki preteklosti popolnoma spremenjene v tektonsko glino.

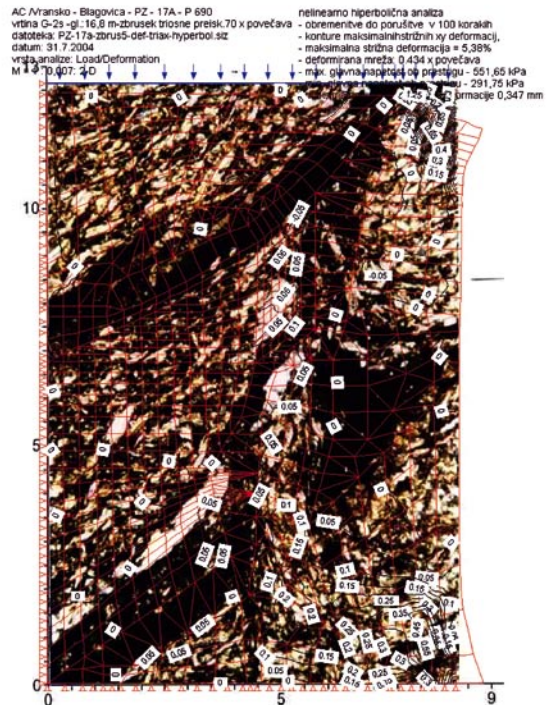
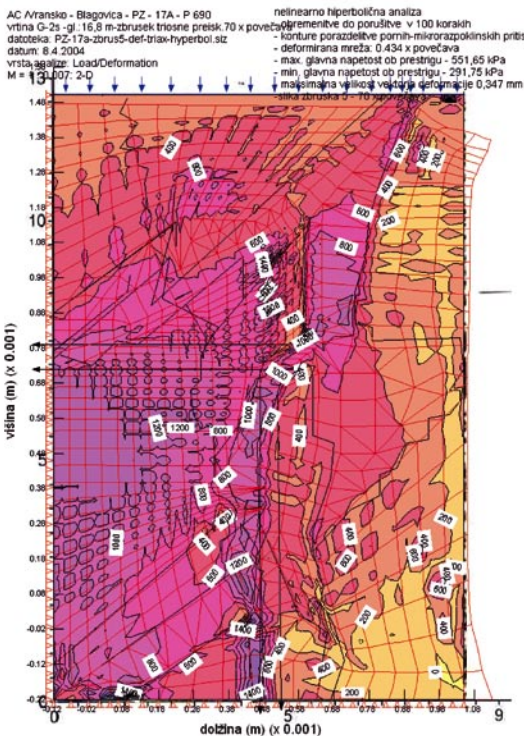
Mehanizem porušitve je pokazal dilatacijsko popuščanje na račun primarnih razpok, kar kaže tudi relativno visok prekonsolidacijski koeficient. Naslednje slike prikazujejo rezultate numerične simulacije nedrenirane triosne strižne preiskave (CU – test) intakt-

nega vzorca skrilavega meljevca s prehodi v glinast skrilavec in polami drobnozrnatega peščenjaka v mikroskopskem merilu (Ocepek, 2005).

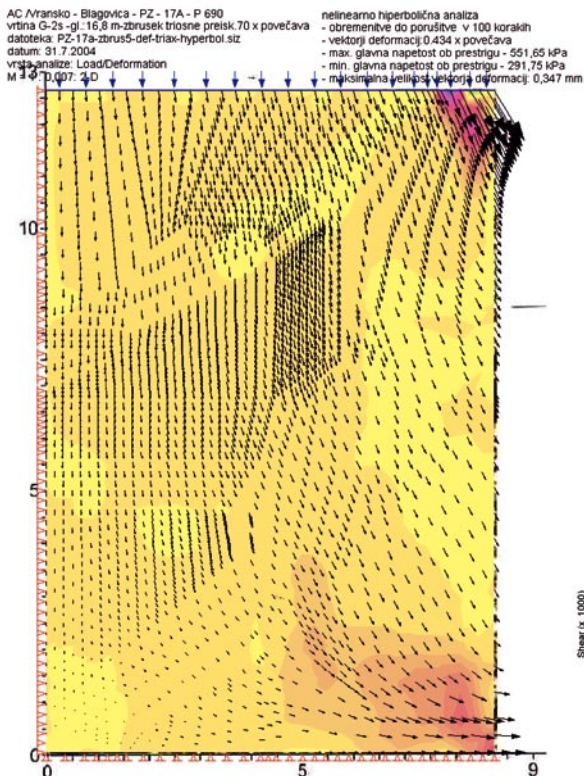
Zbruski odvzeti iz vzorcev po izvedeni nedrenirani triosni strižni preiskavi (Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani) so bili narejeni in interpretirani na Geološkem zavodu Slovenije (Trajanova, 2001).

Numerične analize so bile narejene na podlagi digitaliziranih fotografij zbruskov ob upoštevanju napetosti in merjenih pornih tlakov pri preiskavi (Izračun Skemptonovih parametrov pornih tlakov A in B) ter rezultatov presiometerske preiskave v globini odvzema intaktnega vzorca pridobljenega s pomočjo tehnike vrtanja z dvostenskim jedrnikom ob uporabi polimerne izplake (vrtina za pilotno steno PZ-17 a, globina 16,8 m na AC – Trojane–Blagovica).

Tako sem po analogiji s porušitvenimi mehanizmi na atomističnem nivoju ugotov-

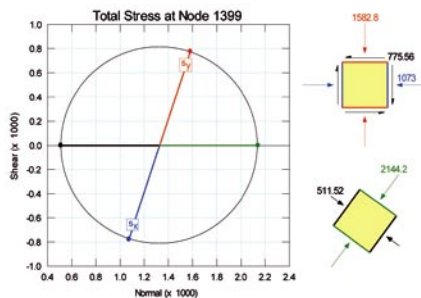


Slika 6. a) Prikaz porazdelitve koncentracije pornih tlakov (v kPa), ki dosežejo maksimalne vrednosti v mikrorazpokah v tršem materialu in porah v manj prepustnejših delih mehkejšega materiala.
b) Prikaz deformirane mreže končnih elementov in kontur skupnih xy (v m) deformacij nad digitalno sliko zbruska. Deformacije in tudi porni tlaki so največji v hiperelastičnem območju sestrskih mikrorazpok.



Slika 7.

- a) Vektorji deformacij. Maksimalna velikost vektorja deformacij je 0,347 mm, kar se zelo dobro ujema z merjeno deformacijo pri povečevanju digitalne slike zbruska.
- b) Mohrov napetostni krog celotnih napetosti (v kPa) v območju striga po kremenovi žili, kjer so nastale maksimalne deformacije.



vil, da je mehka mešana hribinska masa po svojih mehanskih in fizikalnih lastnostih časovno odvisna. Obravnavanje porušnih mehanizmov je zato izredno zapleteno. Pri vsaki simulaciji moramo uporabiti določene predpostavke. Na podlagi opravljenih preiskav lahko preprosto ugotovimo, da večje kot je merilo obdelave, več je tudi uporabljenih predpostavk.

Najprej se tu odpira vprašanje kako v model čim bolj realno zajeti mešano hribinsko zgradbo. Temu takoj sledi realno obravnavanje strukture, stopnje tektonske poškodovanosti in spremembe zaradi vsrkavanja vode, precejanja ter razpadanja in posledičnega alteriranja tako strukture kot same zgradbe.

Na vsak način morajo biti posplošitve realne in se jih moramo pri nadaljnji obdelavi zavedati ter jih primerno vključiti v interpretacijo rezultatov.

V nadaljevanju prispevka prikazujeva na dveh realnih primerih potek potrebnih preiskav in analiz za izdelavo geotehniških načrtov v katere sva vključila pridobljeno teoretično znanje na podlagi povratnih numeričnih analiz zbruskov pridobljenih

iz intaktnih vzorcev po preseženi vrhunski trdnosti v triosnem strižnem aparatu in tudi neporušenih, ki so bili obremenjeni z naravnimi procesi (prekonsolidacijski tlak in tektonski procesi). Rezultati takšnih analiz so zelo primerni za določitev medsebojne prostorske lege glavne navpične in bočne napetosti, ki nista nujno medsebojno pravokotni (Ocepek, 2005), kar je zelo pomembno pri projektiranju podzemnih gradenj.

V proces preiskav, analiz in izdelave obeh projektov sva vključila tudi pridobljene praktične izkušnje pri izdelavi podobnih projektov v preteklosti (Ocepek & Pipenbäher, 1998; Ocepek & Vogrinčič, 1998, 2000; Ocepek & Štern, 2004).

Geotehniški načrt sanacije podora v Baški grapi

V Baški grapi je marca leta 2006 po daljšem sneženju in nato otoplitvi in topljenju snega prišlo do večjega skalnega podora na regionalno cesto R403/1072 Bača-Koritnica. Na naslednji sliki prikazujeva previsno brežino po nastanku podora:



Slika 8. Previsna brežina po podoru na cesto v Baški grapi

Cesta poteka po pobočju, ki ga v celoti gradijo zgornje triasne plasti - »baški dolomit«.

V tej seriji dobimo plastovite dolomite sive do temno sive barve z vložki ploščatih apnencev in s temno sivimi do črnimi roženci, ki se pojavljajo kot gomolji ali do 30 cm debele plasti. Nadalje dobimo še masivne, delno debelo plastovite dolomite z vložki temno sivih bituminoznih dolomitov in z vložki breč.

Preko terena gre v dinarski smeri Ravnikarski prelom, približno vzporedno z njim pa je še več manjših lokalnih prelomov.

Dolomiti obeh enot so na danem območju močno razpokani, ob prelomih pa tudi milonitizirani. Razpoke so v različnih smereh, večinoma odprte, delno zapolnjene z gruščem, po površini so hrapave, valovite do gladke.

V hidrogeološkem smislu ima kompaktna hribina razpoklinsko poroznost in je slabo prepustna, preperela hribina pa je srednje prepustna, saj je močnejše razpokana, ponekod tudi razpadla (medzrnska do razpoklinska poroznost).

Spodnji del pobočja proti strugi Koritnice prekriva pobočni grušč. V manjših količinah ga dobimo na nivoju ceste le ob večjih prelomnih conah, kjer so nakazane erozijske grape. Pobočni grušč sestavlja pretežno peščen grušč dolomita z različno velikimi kosi in večjimi bloki le tega. Je dobro prepusten in v gostem gostotnem stanju.

Cesta leži na umetnem nasipu, ki je zaradi prometa zbit in je v zelo gostem gostotnem stanju.

Za določitev načina možne porušitve in materialnih parametrov pri izdelavi projekta za izvedbo (PZI) sanacije podora smo opravili naslednje preiskave in analize:

- podrobne meritve razpok previsne brežine, ki so jih opravili tudi alpinisti,
- statistično analizo prostorske porazdelitve razpok s konturnim diagramom,
- terenske in laboratorijske preiskave za določitev strižnih karakteristik drsin in razpok,
- geološki trdnostni indeks GSI ter posplošen Hoekov in Brownov porušitveni kriterij hribinske mase v prostoru projektiranja sanacije podora,
- prostorske hribinske stabilnostne analize,
- numerične analize dveh variant sanacije podora.

Obravnavano območje je bilo najprej posneto geodetsko. Geodetske podlage so nam služile pri podrobnem inženirsko geološkem kartiranju z meritvami razpok.

Pri kartiranju smo sledili vsem nastopajočim inženirsko geološkim enotam pod cesto, tudi ločevanju meje preperine s hribino, opazovanju strukturno tektonskih elementov v hribini: merjenju vpada plasti in razpok. Pri meritvah razpok so bili podrobno popisani kvalitativni in kvantitativni elementi, kot so polnitve in širina razpok, pogostnost

pojavnjanja, opis hrapavosti ploskev, kavernoznost in precejanje vode. Meritve razpok so se izvajale po celotni brežini nad cesto in tudi v više ležečih delih brežine (geologi alpinisti). Ob ploskvah razpok podora smo odvzeli devet vzorcev za laboratorijske preiskave. Podatke inženirsko geološkega kartiranja smo prikazali na inženirsko geološki karti in jih upoštevali pri izdelavi geološko-geotehničnih prereзов.

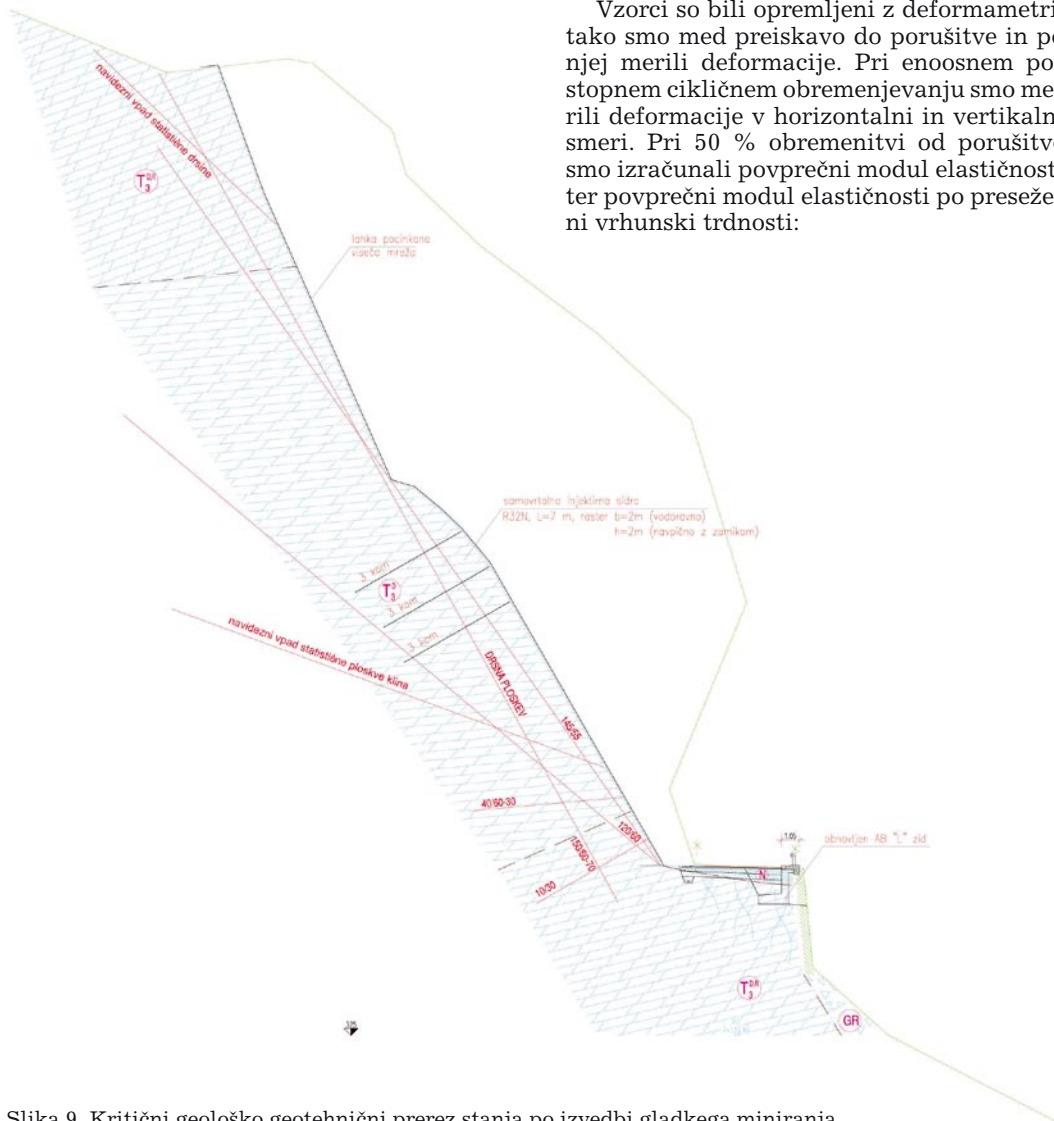
Pridobljeni podatki so nam potem pomagali pri določanju geomehanskih parametrov, katere smo skupaj z laboratorijskimi preiskavami in meritvami »in situ« upora-

bili pri stabilnostnih in geostatičnih analizah. Na naslednji sliki prikazujeva kritični geološko geotehnični prevez, ki smo ga v nadaljevanju obdelali s stabilnostnimi in geostatičnimi analizami.

Preiskave enoosne tlačne trdnosti baškega dolomita z meritvami deformacij

Preizkus enoosne tlačne trdnosti smo izvedli na štirih vzorcih baškega dolomita z roženci, izrezanimi z diamantno žago v obliki štiristranskega kvadra. Preiskali smo tri vzorce kompaktnega dolomita in enega z inherentno oksidirano razpoko.

Vzorci so bili opremljeni z deformimetri, tako smo med preiskavo do porušitve in po njej merili deformacije. Pri enoosnem postopnem cikličnem obremenjevanju smo merili deformacije v horizontalni in vertikalni smeri. Pri 50 % obremenitvi od porušitve smo izračunali povprečni modul elastičnosti ter povprečni modul elastičnosti po preseženi vrhunski trdnosti:



Slika 9. Kritični geološko geotehnični prevez stanja po izvedbi gladkega miniranja

Preglednica 2. Enoosna tlačna trdnost in modul elastičnosti intaktnih vzorcev

Vrsta kamenine	povprečna enoosna tlačna trdnost pri porušitvi σ_{\max} (MPa)	povprečni modul elastičnosti pri 50 % obremenitvi: E_{50} (MPa)	povprečni modul elastičnosti po porušitvi: E_{ap} (MPa)
Kompakten dolomit z roženci	28,85	4.667	2.544
Dolomit z rožencem in oksidirano razpoko	13,69	2.500	1.375

Stabilnostne analize podora

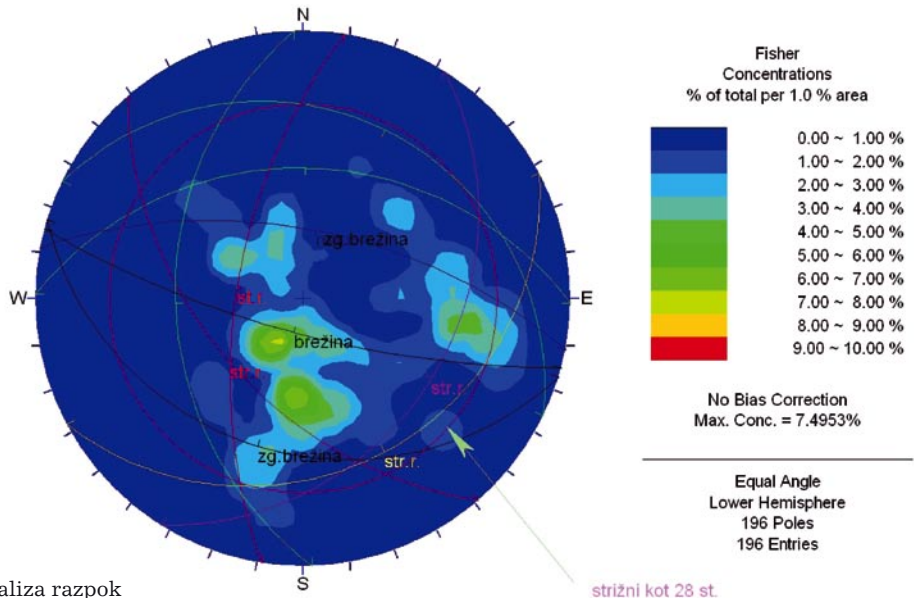
Na podlagi podrobnega inženirsko geološkega kartiranja in natančnih meritev razpok (geologi alpinisti) ter laboratorijskih preiskav odvzetih vzorcev hribin (določitev trdnostno deformacijskih karakteristik razpok in hribinske mase), smo izdelali stabilnostne analize. Podlaga prostorskim hribinskim stabilnostnim analizam so statistično določene ploskve presečišč razpoklinskih sistemov, ki tvorijo presečišča z ravninami obstoječih naklonov brežin.

Statistična analiza razpok z določitvijo kritičnega področja

Podrobne meritve prostorskih elementov hribine (vpadov plasti in razpok – 196 meritev) smo statistično obdelali in jih prikazali kot zgostitve polov na 1 % površine ekva-

torialne ploskve. Pri tem smo uporabili računalniški program Rocscience – DIPS (verzija 5.105). Izbrali smo varianto analize s Fischerjevimi zgostitvami, ki je najprimernejša za prostorsko porazdeljene podatke in obravnava enake kote. Maksimume zgostitev smo prikazali (slika 2) z meridiani, skupaj z meridiani obstoječe zgornje in spodnje brežine. Upoštevali smo tudi izračunan strižni kot po razpokah: 28° (analiza drsine). Ta kot krožnica na ekvatorialni ravnini oklepa s presečišči zgornje in spodnje brežine kritično področje, v katerega lahko padejo presečišča meridianov razpoklinskih sistemov in plastovitosti.

S statistično analizo in z Marklandovim testom (lega možnih presečišč v kritičnem področju) smo ugotovili, da ležijo v kritičnem področju tri možna presečišča meridianov maksimumov ploskev strižnih in nateznih razpok z maksimalno zgostitvijo 7,5 %. Analizo prikazujeva na naslednji sliki:



Slika 10.
Statistična analiza razpok

Ključne kritične bloke tvori kombinacija presečišč naslednjih razpoklinskih sistemov, prikazane v naslednji preglednici:

Preglednica 3. Kvantiteta in kvaliteta kritičnih statističnih razpoklinskih sistemov

Vrsta razpok	Statistična prostorska lega	Odprtost – širina	Valovitost, hrapavost, kavernožnost	Pogostost pojavljanja	Precejanje vode
1. strižne razpoke	229°/50°	delno odprte, š. ≤ 5 mm	Rahlo valovite, rahlo hrapave	0,7 m – 1,0 m	izcejanje vode, kapljanje
2. strižne razpoke	122°/31°	delno odprte, š. ≤ 5 mm	Rahlo valovite, rahlo hrapave do hrapave	0,5 m – 0,7 m	vlažne
3. natezne razpoke (»strehe« previsnih delov brežine)	26°/20°	odprte, š. = 5 mm – 1 cm	Rahlo valovite, rahlo hrapave do hrapave s pogostimi večjimi kavernami	1,2 m – 1,4 m	močni dotoki vode, precejanje

Za globalno stabilnost brežine so posebej nevarne odprte strižne in natezne razpoke, ki so dobro prevodne za vodo, hkrati pa izredno občutljive na ponavljajoče se potrese. Ob potresih (tudi dinamični prometni obtežbi težkih tovornih vozil na ozki cesti) se razpoke širijo, pri čemer se znižuje kohezijska trdnost njihovih bolj ali manj sprjetih sten.

Prostorske hribinske stabilnostne analize

Prostorske hribinske stabilnostne analize smo obdelali z računalniškim programom

Rocscience – SWEDGE 4.080 po metodi Hoeka & Braya. Pogoji za zdrs klina različnih kombinacij presečnih razpoklinskih sistemov razpok, ugotovljenih z meritvami na obstoječem 55 m visokem vkopu brežine, je bil določen z Marklandovim testom na Schmidtovem diagramu razpok za obstoječo zgornjo in spodnjo brežino na kritičnem prečnem profilu P-7.

Fizikalne karakteristike razpokane hribinske mase smo izračunali na podlagi določitve s povratno analizo pri nastalem podoru v primerjavi z analizo strižne trdnosti

Preglednica 4.

Profil	Višina spodnje brežine (m)	Hidrostatični pritisk v razpokah (%)	Globalna varnost (F) nezavarovane brežine
P-2 do P-9 Obstoječa brežina	55	100	1,023
Projektirana Brežina po miniranju	55	100	1,311

Preglednica 5. Rezultati izračuna Hoekovega & Brownovega porušitvenega kriterija

Hribinska masa	GSI	m_i	$\sigma_{ci-povp}$ (MPa)	strižni kot: ϕ	kohezija c (kPa)	modul elastičnosti E (MPa) (¹ Hoek et al., 2002, ² Hoek & Diederich, 2005)
Razpokan Baški dolomit	55 do 60	9	28,85	31,7°	1.565	8.036,61 ¹ 6.783,57 ²
Razpoklinska cona v baškem dolomitu	43 do 47	9	$\sigma_{JCS} = 13,7$	28,2°	608	2.775.62 ²

razpoke po Bartonu in Bandisu. Vhodni podatki za analizo so bili laboratorijska določitev trdnosti razpoke in analiza po posplošenem Hoekovem in Brownovem porušitvenem kriteriju za brežine (GHB). Za deformacijsko popuščanje drsine je bil posebej določen tudi geološki trdnostni indeks (GSI = 45). Na vzorcih je bil ob razpokah v laboratoriju določen tudi koeficient hrapavosti JRC = 14. Tako koeficient hrapavosti kot tudi trdnost sten razpok JCS, sta bila korigirana za povprečno velikost bloka (velikost določajo presečni razpoklinski sistemi), ki znaša 1,34 m. Na naslednji sliki je prikazana laboratorijska preiskava enoosno tlačne trdnosti s cikličnim obremenjevanjem in razbremenjevanjem ter hkratnimi meritvami deformacij intaktnega vzorca:



Slika 11.
Nastanek razpok po preseženi vrhunski trdnosti ob cikličnem obremenjevanju intaktnega vzorca s hkratnimi meritvami deformacij

Ugotovljene **trdnostne karakteristike drsine** (glej preglednico 6) so pri srednji globini v pobočju naslednje: kohezija – $c = 61 \text{ kPa}$ in strižni kot – $\varphi = 31,6^\circ$.

Povprečna prostorninska teža hribine je: $\gamma = 26,9 \text{ kN/m}^3$. V analizi obstoječe brežine smo upoštevali 100 % možnost napoljenosti razpok z vodo, saj se odprte razpoke s kavernami pojavljajo na vrhu brežine nad previsno steno, pod previsom pa kaplja voda iz razpok.

Stabilnost obstoječe brežine pred izvedbo miniranja je $SF = 1,023$. Analiza kaže, da je brežina na meji stabilnosti, večja varnost je le ob nižji vsebnosti vode po razpokah.

Rezultati povratne prostorske hribinske stabilnostne analize podora

Rezultati analiz možnosti strukturnih porušitev v spremenljivih geološko geomehanskih pogojih kažejo, da je obstoječe stanje previsne brežine na meji stabilnosti in ne izpolnjuje pogojev varnosti brežine v skladu z veljavnimi standardi SIST – ENV 1997–2004.

Posplošen Hoekov in Brownov porušitveni kriterij

Posplošen Hoekov in Brownov porušitveni kriterij smo uporabili za določitev trdnostno deformacijskih parametrov kompak-

te razpokane hribine za analizo napetostno deformacijskega stanja variant sanacije po metodi končnih elementov. Pri tem smo uporabili računalniški program Rocklab 1.021. Rezultate določitve prikazujeva v preglednici na str. 363.

Pri določitvi smo upoštevali izračun za brežine z upoštevanjem faktorja poškodovanosti izkopa ($D = 0,7$) in izračun za brežino povprečne višine nad previsom $h = 40 \text{ m}$. Na podlagi tabele za določitev vrste in teksture hribine smo hribini določili konstanto $m_1 = 9$, za dolomit.

Za enoosno tlačno trdnost hribinske mase smo upoštevali povprečno laboratorijsko do-



Slika 12.
Razpoklinska cona pod previsom pred izvedbo sanacije: oksidirane in kalcitizirane delno odprte in kavernozone razpoke: območje GSI = 43 do 47.

ločeno enoosno tlačno trdnost vzorcev odvzetih ob stenah razpok.

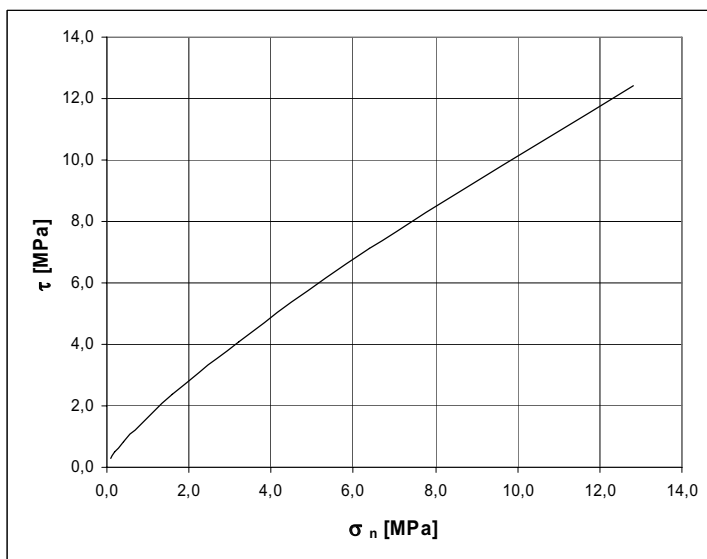
Na sliki 12. prikazujeva razpoklinsko cono previsne stene baškega dolomita.

Določitev strižnih karakteristik razpok in drsin

Koeficient hrapavosti smo iz vrednotili po metodi Barton. Za vhodne podatke so nam

Preglednica 6. Izračun strižne trdnosti razpok

Vrsta razpok	Normalna napetost σ_n (Mpa)	strižni kot: φ	kohezija c (kPa)
Statistično določeni razpoklinski sistemi	1,6	49,3°	512,3
Oksidirane kavernozone razpoke obstoječega podora	0,8	31,6°	61



Slika 13.
Sovisnica strižne trdnosti in normalne napetosti v ploskvah drsnih razpok

služile podrobne meritve hrapavosti razpok na devetih vzorcih povprečne dolžine 18,3 cm in določitve enoosne tlačne trdnosti vzorcev. Osnovni kot notranjega trenja smo določili na podlagi posplošenega Hoekovega in Brownovega kriterija za brežine. Najprej smo napravili korekcijo koeficienta hrapavosti in koeficienta trdnosti sten razpok med velikostjo vzorcev in velikostjo hribinskih blokov določenih na podlagi podrobnega inženirsko geološkega kartiranja brežin. Za izbrano območje napetosti smo določili povprečno strižno trdnost razpok.

Posebej smo izdelali izračun za statistične ploskve razpok in posebej za drsine obstoječega podora.

Za statistično določene razpoklinske sisteme smo kot osnovni kot notranjega trenja upoštevali strižni kot razpok ob statističnih ploskvah razpok določen po GHB kriteriju in izračunali trdnostne karakteristike razpok po metodi Bartona & Bandisa.

Na sliki 13. prikazujeva sovisnico strižne trdnosti in normalne napetosti na podlagi izračuna po metodi Bartona in Bandisa (1993).

Analiza napetostno deformacijskega stanja sanacije podora

Analizi napetostno deformacijskega stanja smo izvedli na območju previsne brežine v prečnem prerezu P-7, kjer je obstoječa brežina najvišja za dve varianti sanacije. Analizi smo izvedli po metodi končnih elementov s programom Plaxis (verzija 8.2) za sanacijo previsne brežine z galerijo in sanacijo brežine z miniranjem.

Potrebne podatke oblike in dimenzije objekta ter debeline primarne obloge za varianto sanacije z galerijo nam je posredoval projektant Geoportal d.o.o.

Za razpokan baški dolomit smo uporabili materialni model »Jointed rock«. Pri tem

smo upoštevali tri ključne statistično določene razpoklinske sisteme na podlagi statistične analize razpok (slika 3), ki z obstoječo previsno brežino tvorijo ključni kritični blok. Trdnostno deformacijske karakteristike statistično določenih ploskev razpok smo določili po metodi Bartona in Bandisa (Preglednica 6). Trdnostno deformacijske karakteristike hribinske mase med razpoklinskimi sistemi smo določili po posplošenem Hoekovem in Brownovem porušitvenem kriteriju za brežine (GHB, preglednica 3).

Za grušč in cestni nasip v zelo gostem gostotnem stanju smo izbrali materialni model s kinematičnim utrjevanjem (HS), pri čemer smo najprej izvedli parametrično povratno analizo z uskladitvijo računskih pomikov obstoječega pobočja. S korigiranimi parametri smo nato izdelali analizo sanacije.

Faznost gradnje

Posamezne faze v analizi so naslednje:

- začetno stanje,
- postopen izkop cestnega nasipa za izvedbo temeljenja galerije,
- izvedba AB temeljev galerije in navpičnih pasivnih injektirnih sider dolžine $l = 5$ in 6 m, raster $b = 2$ m,
- izdelava primarne obloge galerije (mreže, brizgan beton, loki), zasutje z drenažnim betonom do višine zgornjega sidera, izvedba pasivnih injektirnih sider dolžine $l = 7$ m ob bokih galerije in ob levem robu, raster $b = 1$ m,
- postopno zasutje z drenažnim betonom MB 25 do roba previsa nad stropom galerije,
- izračun končne varnosti.

Karakteristike zemljin in hribin

Voda je upoštevana v nasipu-tamponu, grušču in kompaktni hribini (po razpokah).

Preglednica 7. Karakteristike zemljin in hribin, karakteristični prerez P 7

Sloj	$\gamma_{\text{nad v.}}$ (kN/m ³)	$\gamma_{\text{pod v.}}$ (kN/m ³)	φ (°)	C_{ref} (kPa)	E_{50}^{ref} (kPa)	GSI / σ_{cm} (MPa)
Umetni nasip	20	20,5	36	1	35.000	-
Grušč	20,5	21,5	43	5	47.000	-
Dolomit	26,9	27,2	31,9	1.585	8.036.610	45-57 / 2.033-5.606
AB temelj	25	25	45	70	20.000.000	-

Rezultati analize napetostno deformacijskega stanja sanacije:

Preglednica 8. Notranje statične veličine in pomiki podpornega zidu, P-2

Profil P-7	Vrednosti na m		$\times F = 1,35$		
	Q_{\max}	M_{\max}	$Q_{d,\max}$	$M_{d,\max}$	u_{\max}
	kN/m	kNm/m	kN/m	kNm/m	mm
AB Obloga galerije	- 64,3 - + 20,1	- 19,1 - + 9,58	- 86,8	- 25,8	0,005-3,3
AB Temelj galerije	+ 112,4 - + 3,7	+ 0,26 - - 48,9	151,7	- 66	0,9

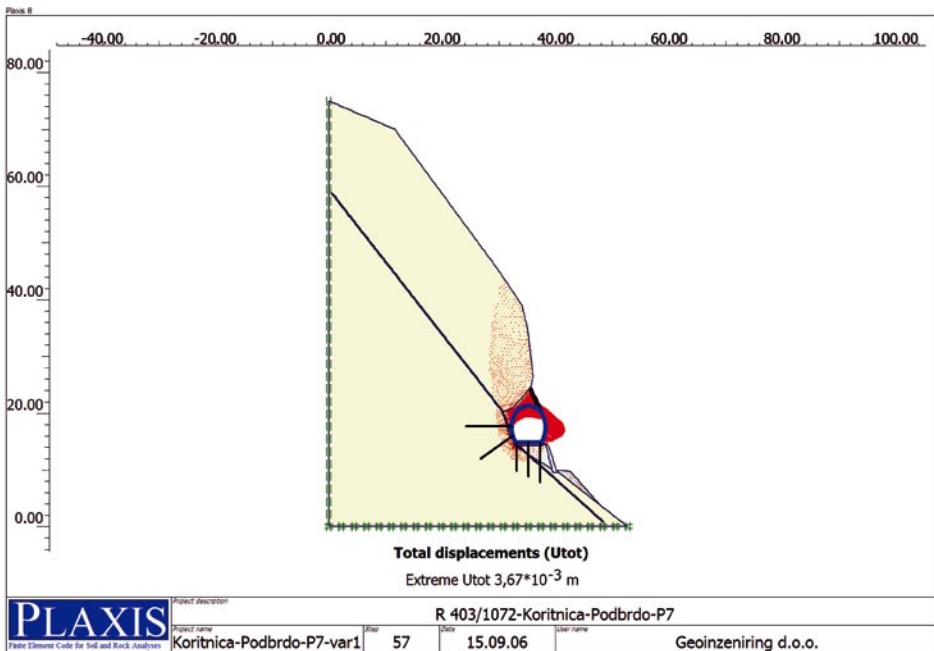
Končna varnost vkopa varovanega z galerijo učvrščeno s pasivnimi injektirnimi sidri, vključno z AB temeljem učvrščenim s pasivnimi injektirnimi sidri in zasutjem z drenažnim betonom znaša: $F = 1,42$.

Končni maksimalni pomiki obstoječe previsne brežine nad galerijo znašajo $u_{\max} = 2,5$ mm.

Želja krajanov in odločitev Ministrstva za promet in zveze je bila, da se preveri tudi varianto z izvedbo miniranja in razširitvijo obstoječe ozke trase ceste. Tako smo v končni varianti skupaj s podjetjem Minervo d.o.o. izdelali projekt sanacije z miniranjem v dveh fazah.

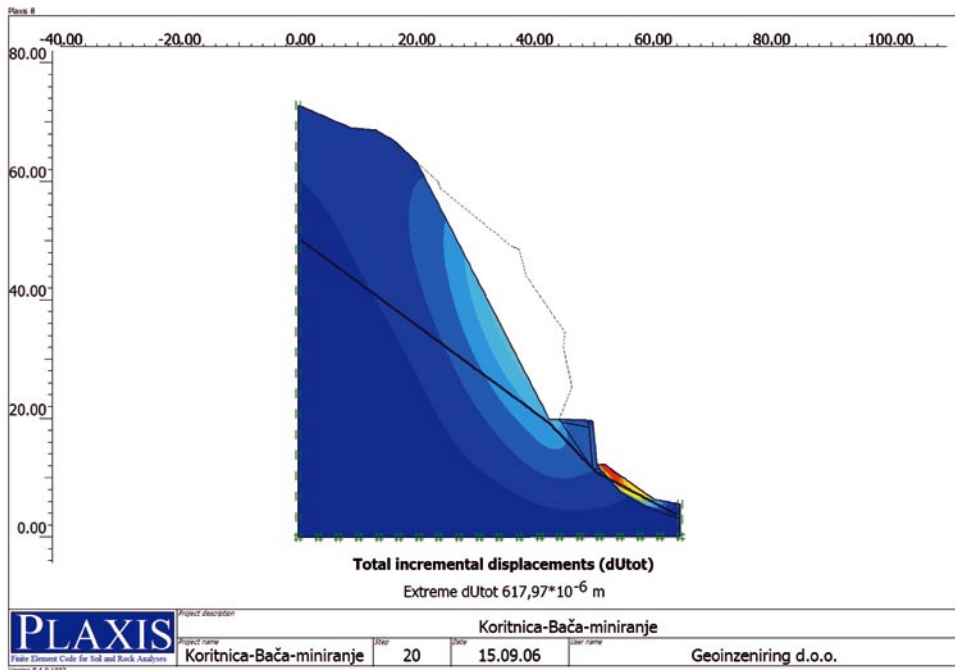
Posebej smo preverili faznost miniranja s stabilnostno analizo po metodi končnih ele-

mentov. Pri tem smo uporabili za baški dolomit materialni model za razpokane hribinske mase in vanj vnesli tudi vse tri kritične statistično ugotovljene drsne ploskve klina s karakteristikami razpok (preglednica 6). Varnost končno izvedene brežine po miniranju je: $F = 1,38$. Za fazo PZI miniranja smo izdelali tudi simulacijo padanja kamenja s pomočjo računalniškega programa Rockfall (verzija 4.0). Simulacija je bila narejena za tri različne velikosti blokov. Hitrosti, ki jih dosežejo pri odstrele se gibljejo v območju od 25 do 30 m/s, kinetične energije se gibljejo v povprečju od 300 do 700 kJ za bloke velikosti okrog 0,8 m, napovedano vplivno območje padanja kosov smo prikazali na inženirsko geološki karti.



Slika 14. Geostatična analiza variante sanacije z galerijo (materialni model za razpokane hribinske mase).

Analizo stabilnosti po metodi končnih elementov prikazujemo na naslednji sliki:



Slika 15. Stabilnostna analiza miniranja po metodi končnih elementov (materialni model za razpokane hribovinske mase) s prikazom porušitvenega mehanizma v zaključni fazi. Napovedani pomiki zgornjega roba brežine dosežejo $u = 4,5$ mm.

Med izvedbo miniranja smo opravljali tudi geološko geotehnični nadzor pri katerem smo sproti določali kritične dele na brežini, ki jih je bilo potrebno tudi ročno odstranjevati s pomočjo alpinistov. Brežina je v končni fazi zaščitena s sidrano mrežo.

Projektiranje in izvedba globokega vkopa stanovanjskih blokov "Semedelski razgledi" nad Koprmo po opazovalni metodi EN 7

Inženirsko geološko kartiranje in sondažne vrtnice, ki so bile opremljene kot inklinometri-piezometri, so pokazale, da so flišne plasti v globini različno intenzivno preperle, razpokane, mestoma nekoliko nagubane in tektonsko pregnetene. Vpad plasti je pod blagimi nakloni (5–15°) proti jugu v pobočje, v katerega so predvideni objekti vkopani z zaledno brežino in v globino dveh kletnih etaž. Sistemi razpok se širijo v različne smeri, najpogosteje pravokotno na plastovitost in pod strmimi nakloni (ca 70–85°). Gladke do hrapave razpoke so prevlečene z limonitnimi in temnimi prevleka-

mi (manganovi oksidi). Zelo pomembna je tudi krojitev fliša pod kotom od 40–50°. Po podatkih sondažnih raziskav je hribina preperela do 7,0 m globoko.

Geološki trdnostni indeks GSI in meritve s presimetrom

Na podlagi podrobnega popisa jedra sondažnih vrtnic so bila hribini po tabeli za mešane hribine (Marinos & Hoek, 2002) določena naslednja območja vrednosti geološkega trdnostnega indeksa s vzporednimi rezultati meritev s presimetrom.

Laboratorijske preiskave

Laboratorijske raziskave so potekale v laboratoriju za mehaniko tal na Geoinženiringu d.o.o. Ljubljana. V direktnem strižnem aparatu sta bila preiskana dva intaktna vzorca mehke kamenine. Dva kosa jedra hribine sta bila posebej obdelana z diamantno žago za preiskave enosne tlačne trdnosti



Slika 16.
Brežina po miniranju
in strojno odstranjevanje
odminiranega materiala

Preglednica 9. Površinska kvaliteta, GSI, presiometrski modul elastičnosti

Površinska kvaliteta / stopnja preperelosti	GSI	Presiometrski modul E_{p1} (MPa)
Močno prepereli flišni sedimenti	23–27	–
Zmerno prepereli flišni sedimenti	25–30	180–350
Rahlo prepereli flišni sedimenti	40–43	450–750

z meritvam deformacij, devetintridesetim kosom hribine nepravilnih oblik pa smo določili točkovni trdnostni indeks. Preiskali smo vzorce preperlega peščenega laporja. Bili so opremljeni z deformometri. Tako smo med preiskavo pri enoosnem postopnem cikličnem obremenjevanju merili deformacije v horizontalni in vertikalni smeri.

Rezultate preiskav podajamo v preglednici 10.

Posplošen Hoekov in Brownov porušitveni kriterij

Posplošen Hoekov in Brownov porušitveni kriterij (Hoek et al., 2002; Hoek & Die-

derichs, 2006) smo uporabili za določitev trdnostno deformacijskih parametrov mešane mehke hribinske mase za numerične in stabilnostne analize izvedbe izkopa in varovanja brežin. Pri tem smo uporabili računalniški program Rocklab 1.21, ki upošteva tudi faktor poškodovanosti hribine, bodisi zaradi miniranja, bodisi zaradi strojnega izkopa. Pri določitvi smo upoštevali izračun za brežine z upoštevanjem faktorja poškodovanosti strojnega izkopa ($D = 0,7$) in izračun za brežine (za preperelo in kompaktno kamenino na podlagi podatkov laboratorijsko določene enoosne tlačne trdnosti vzorcev laporja odvzetih iz vrtin). Na podlagi tabele za določitev vrste in teksture hribine, je bila

Preglednica 10.

Močno preperel fliš	$\varphi_{\text{dir.strig.}}$ (°)	C (kPa)	σ_{max} (MPa)	E_{150} (MPa)	E_{ap} (MPa)
Lapor	20,8	9,4	0,8	100	10
Peščenjak	19,6	35,1	13,6	–	–

*ap – modul elastičnosti po preseženi vrhunski trdnosti

določena konstanta $m_i = 8-10$. Za enoosno tlačno trdnost hribine so bile upoštewane laboratorijsko določene reducirane enoosne tlačne trdnosti (ob upoštevanju redukcijskega faktorja RF med preiskavami izvedenimi pravokotno in vzporedno s plastovitostjo). Na podlagi prileganja Mohr-Coulombove premice k nelinearni krivulji s sekanto, smo ugotovili naslednje trdnostno deformacijske parametre:

Preglednica 11.

Tip hribinske mase	φ_{rm} (°)	C (kPa)	E_i (MPa)
Zmerno preperel fliš	25,77	35	458,72
Rahlo preperel fliš	30,75	68	873,45

Geostatične analize

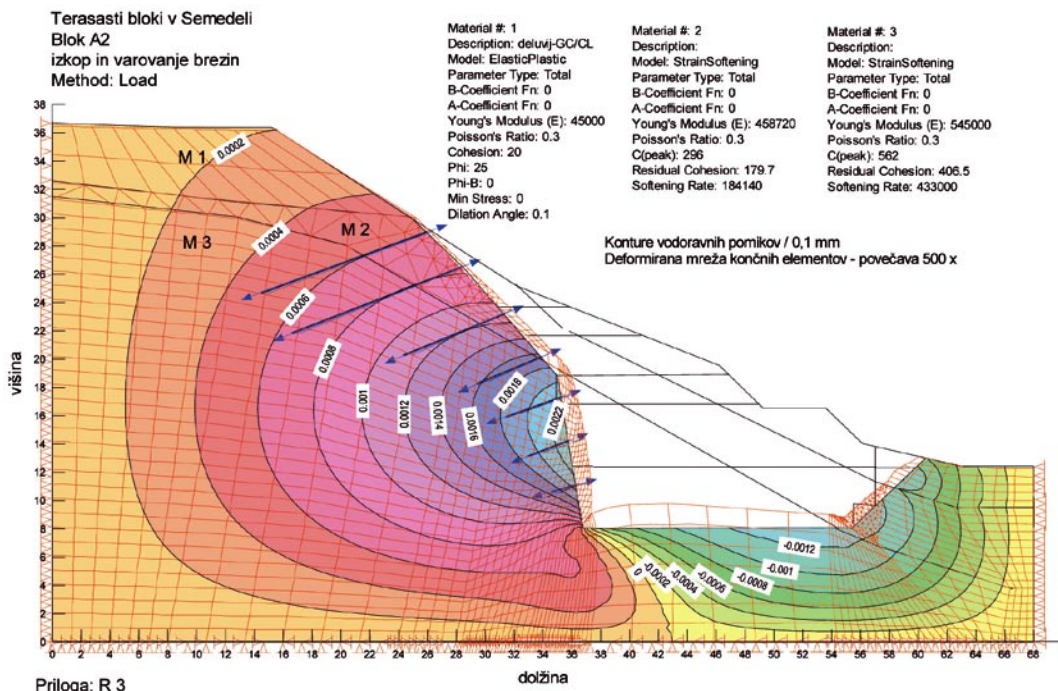
Geostatične in stabilnostne analize smo v prvi fazi izdelali s programskim paketom Geostudio (verzija 6.20). Povezava v programskem paketu omogoča hibridno analizo: stabilnostno analizo (program SLOPE/W) po metodi končnih elementov ob upoštevanju spremembe napetostno deformacijskega

stanja zaradi izkopa in dodanih obremenitev – opornih ukrepov (program SIGMA/W) ter upoštevanje pornih tlakov stacionarnih in prehodnih stanj (program SEEP/W). Analize so obsegale geostatično analizo izvedbe izkopa in varovanja trajne brežine izza projektiranih objektov ter izvedbe izkopa in varovanja brežine gradbene jame (2 etaži). Hkrati smo izračunali stabilnostno analizo vmesnega in končnega stanja izkopa. Uporabili smo materialni model z deformacijskim pouščanjem. Najprej smo izvedli analizo začetnega napetostnega stanja obstoječega pobočja. Ob upoštevanju le tega smo nato izvedli analizo napetostno deformacijskega stanja izkopa in varovanja brežin po fazah. V analizi smo upoštevali postopno izvedbo izkopa brežine po kampadah od zgoraj navzdol. Takoj po izkopu vsake kampade smo predvideli izvedbo sidranja, čemur sledi polaganje mrež in protierozijske zaščite ter učvrstitev sider prek podložnih plošč. Za varovanje brežine smo predvideli sidranje s samovrtalnimi injektirnimi sidri, za varovanje brežine gradbene jame pa primarno oblogo (mreže + brizgan beton) do nivoja temeljev bloka učvrščenega z dvema vrstama sider. Na naslednji sliki prikazujemo geostatično analizo po metodi končnih elementov z dimenzioniranjem opornih ukrepov v fazi PZI:

Na sliki prikazujeva mešano hribinsko maso zmerno preperle mešane hribinske mase eocenskega fliša po izkopu.



Slika 17.
Inženirsko geološki
popis hribinske mase
zmerno preperlega fliša
(december 2006).



Slika 18. Geostatična analiza po fazah izkopa in varovanja brežine (program Geostudio, verzija 6.20). Materialni model za flišne sedimente je Strain-Softening-deformacijsko popuščanje.

Izvedba izkopa in varovanja brežín ob opazovalni metodi EN 7

Za gradnjo predvidenih terasastih blokov so se izvajali do 12 m visoki vkopi v teren in do 10 m globoki izkopi za gradnjo podzemnih garaž. Gradnja poteka ob opazovalni metodi s pomočjo monitoringa, ki vključuje spremljavo izkopa (sprotno določevanje geološkega trdnostnega indeksa GSI), meritve inklinacij, nivojev vode in geodetskih točk. Prav tako se spremlja stanje sosednjih objektov (terasasto razporejene vrstne hiše do dna izteka pobočja).

Po vsaki fazi izkopa so bile vgrajene točke za geodetska opazovanja pomikov brežín med gradnjo in v fazi garancije. V vrtinah so meritve inklinacij, vključno z meritvami nivojev vode. Izvajajo se v fazi gradnje dvakrat mesečno in v fazi garancije 4 do 6 krat letno. Na naslednji sliki prikazujeva že izvedene brežine objekta »A« z vgrajenimi samovrtalnimi injektirnimi sidri. Protierozijska zaščita brežine še ni končano izvedena (mreže učvrščene s podložnimi ploščami in seneni nastilj z ustrezno setvijo, gnojili in lepili):

Izvedba poteka ob stalnem projektantskem geotehničnem nadzoru, ki oporne

ukrepe sprti prilagaja dejanskim geološko geomehanskim razmeram. Tako smo v levem delu izkopa gradbene jame naleteli na okrog 6 m široko tektonsko cono, izraženo s subverikalnimi razpokami v peščenjaku in lapornato glino (cona sukcije) med plastmi peščenjaka. Prostorska lega tektonske cone, ob kateri se tudi plasti nagubajo in usmerjajo do 20° niz brežine gradbene jame in hkrati iz razpok v peščenjaku tudi iztekajo manjše količine vode. Tako je pri nekoliko prehitrem izkopu pod še ne injektiranimi sidri prišlo do manjšega klinastega hribinskega odrona (okrog 40–50 m³). Takoj je bilo potrebno izvesti sanacijo brežine s primarno oblogo (težke mreže in brizgan beton d = 0,1 m) učvrščeno s samovrtalnimi injektirnimi sidri dolžine L = 6 m – 12 m.

Na osrednjem še ne odkopanem delu brežine in gradbene jame, izza katere se na razdalji b = 10 m – 12 m nahajajo trije podzemni rezervoarji za vodooskrbo mesta Koper, zgrajeni v sedemdesetih in devetdesetih letih prejšnjega stoletja, bo potrebno pri izkopu predvideti najstrožje oporne ukrepe: varovanje zgornje trajne brežine višine H = 12 m v naklonu 55° s samovrtalnimi injektirnimi sidri Ø 38 mm dolžine L = 8 m



Slika 19.
Pogled na dokončno izkopano brežino objektov A1 in A2, varovano s pasivnimi samovrtalnimi injektirnimi sidri do dna druge kletne etaže – podzemne garaže, kjer poteka izvedba temeljenja in opaženja prvih spodnjih sten (december 2006).

– 14 m, v horizontalnem rastru $b = 2$ m in izkope izvajati v maksimalni višini etaže $h = 2,5$ m (4 etaže). Zaledno brežino gradbene jame višine $H = 10$ m, v naklonu 80° pa s primarno oblogo (težka mreža in brizgan beton $d = 0,1$ m) učvrščeno s sidri dolžine $L = 6$ m do 12 m, v horizontalnem rastru $b = 1,5$ m (4 etaže).

Oporne ukrepe smo preverili z geostatično analizo s programom Plaxis 3 D (verzi-

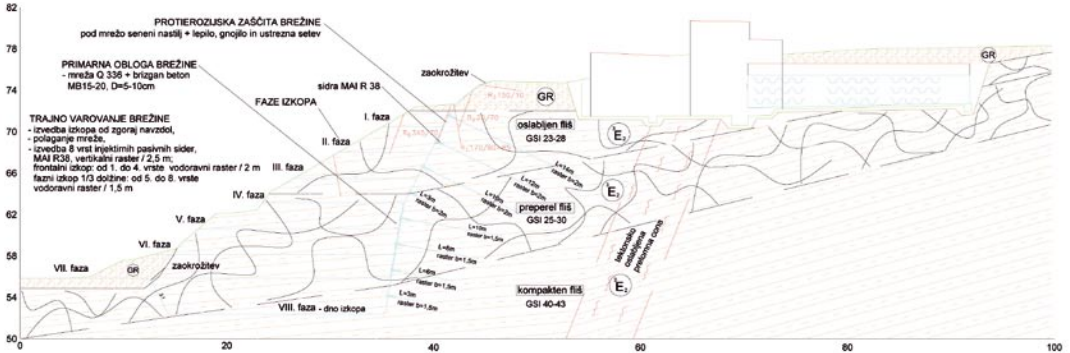
ja 2). Hribinsko maso smo na tem območju razdelili na tri kategorije: zmerno preperel, preperel in tektonsko oslabljen fliš (oslabljen tudi zaradi miniranja pri izvedbi starih rezervoarjev). Oslabljeno cono tektonsko poškodovane hribine zaradi miniranja smo upoštevali v analizi hribinske mase z relaksacijo s pomočjo faktorja porušenosti $D = 1$ v izračunu Hoekovega in Brownovega kriterija za brežine (Hoek & Diderisch, 2006).

Na sliki prikazujeva pogled na saniran odron v območju objekta »B« in že izveden in varovan izkop do kote ceste v območju objekta »AB«:



Slika 20.
Na levi strani gradnja bloka »B« in saniran hribinski podor ob prelomni in oslabljeni coni, na desni strani izkop pod rezervoarji Rižanskega vodovoda v območju objekta »AB«.

Na naslednji sliki prikazujeva kritični geološko geotehnični prerez območja objekta »AB«, ki je služil za izdelavo 3 D analize napetostno deformacijskega stanja izkopa in varovanja brežin z določitvijo kritične dolžine izkopne nevarovane etaže.

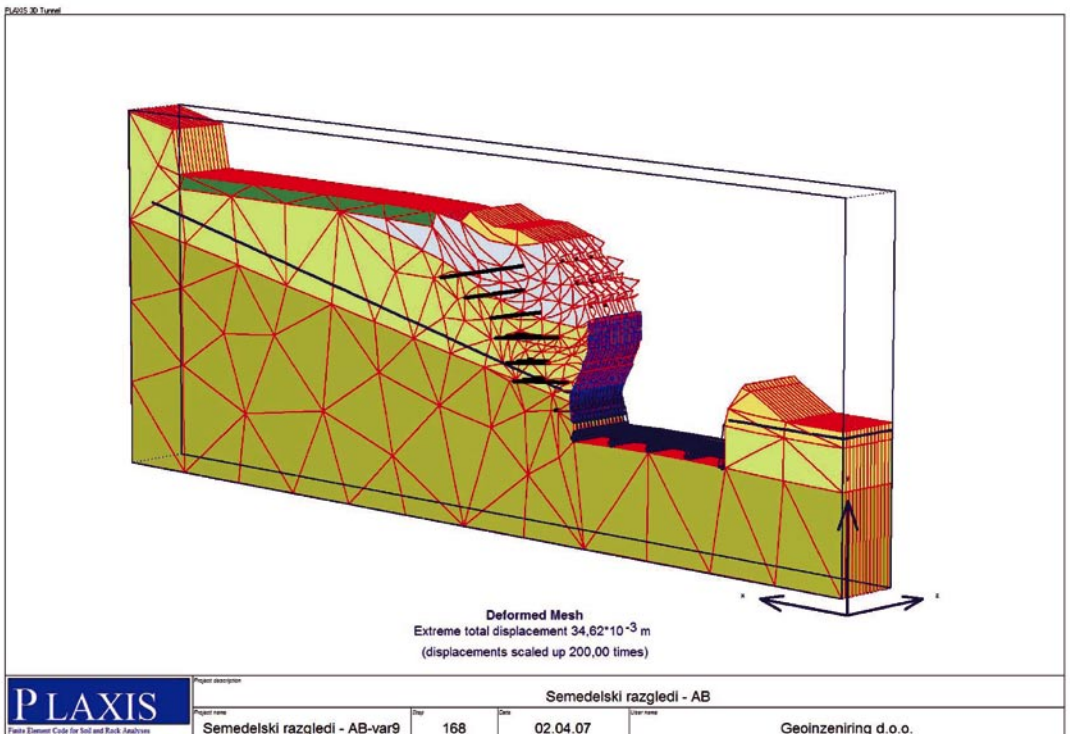


Slika 21. Kritični geološko geotehnični prerez P-6 s podzemnimi rezervoarji Rižanskega vodovoda in projektiranimi opornimi ukrepi določenimi s pomočjo 3 D analize

Varnostni faktor trajne brežine izza projektiranih objektov znaša $F = 1,332$ (v skladu s SIST – slovenski tehnični standard-EN7-2004), varnostni faktor ob izkopu do

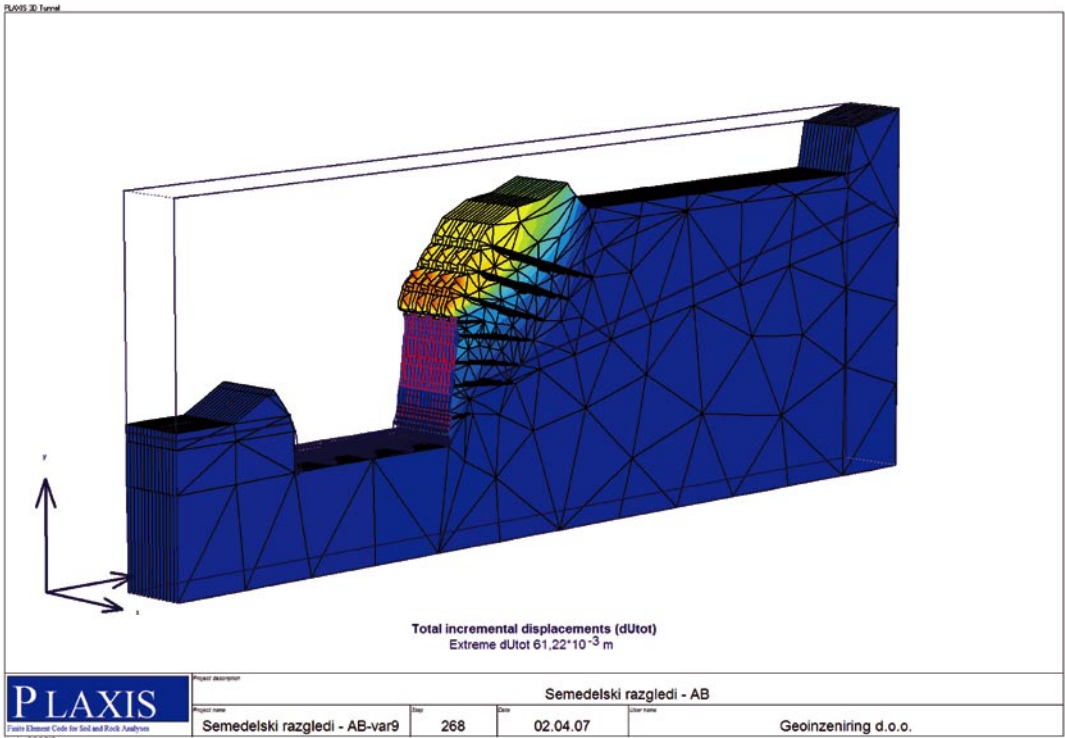
dna gradbene jame (začasna brežina) pa $F = 1,105$ (Delni varnostni faktorji za projektiranje v spremenljivih geotehničnih pogojih SIST-EN7-2004).

Na naslednji sliki prikazujemo 3 D model izkopa in varovanja brežine do dna gradbene jame, pri čemer znašajo skupne deformacije $u_{tot} = 3,462$ cm.



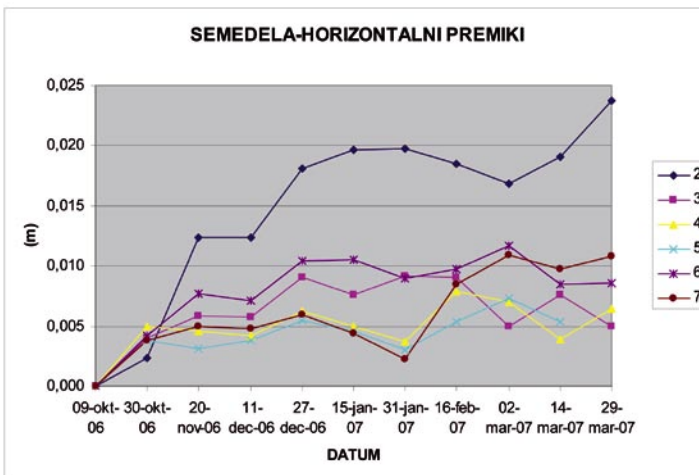
Slika 22. Skupne deformacije po izvedbi izkopa in varovanja brežin objekta »AB«.

Naslednja slika prikazuje izračun varnosti s porušitvenim mehanizmom po zadnji fazi izkopa in varovanja brežine:



Slika 23. Izračun varnosti s 3 D prikazom porušitvenega mehanizma

Na naslednji sliki prikazujeva geodetsko merjene pomike točk na kritičnem delu izkopa. Meritve se zelo dobro ujemajo z napovedjo pomikov tridimenzionalnega modela za katerega smo za vse tri tipe hribine upoabirali materialni model s kinematičnim utrjevanjem (Hardening soil – HS). Ta se je pokazal pri projektiranju opornih ukrepov in primerjavi računskih in napovedanih deformacij v mešanih mehkih hribinskih mash kot najsprejemljivejši.



Slika 24.
Vodoravni pomiki točk na robovih brežin v območju objektov »B« in »AB«

Zaključek

Pri projektiranju zahtevnih objektov v urbanih okoljih se je pokazalo, da je poleg ustrezno izvedenih geološko geotehničnih preiskav in geostatičnih analiz v fazi načrtovanja, pomemben tudi skrben projektantski geološko geotehnični nadzor izvedbe. Tako dosežemo, da bo projektna rešitev v dano naravno geološko okolje umeščena optimalno in skupaj z načrtovanim tehničnim opazovanjem – monitoringom zagotovimo zahtevano varnost med izvedbo in po njej ter hkrati racionalen način projektiranja ter samo gradnjo.

Namen osnovnih geološko-geomehanskih raziskav in analiz lastnosti kamenin, mehkih kamenin in zemljin, za izdelavo geotehnološkega projekta, je določitev načina in pogojev izvedbe izkopa ter varovanja brežin z ustreznimi protierozijskimi in opornimi ukrepi. S projektom je potrebno predvideti kasnejše morebitne spremembe in dopolnitve med samo izvedbo. Izvedba izkopa se mora sproti prilagajati geološko-geomehanskim razmeram. Zato je potrebno zagotoviti projektantski geološko-geomehanski nadzor, ki z natančnimi inženirsko geološkimi meritvami (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.

V numerične analize, ki jih uporabljamo pri projektiranju, je potrebno za obravnavane materiale zelo skrbno izbrati ustrezne materialne modele. Po spremembi napetostnega stanja je nastale mikroskopske deformacije in genezo porušnih mehanizmov možno modelirati z veliko natančnostjo z uporabo nelinearnega hiperboličnega modela. Stanja razbremenitve po izkopu in kasnejšo relaksacijo hribinske mase, ki se odraža z utrjevanjem ali popuščanjem, je zelo natančno možno modelirati z uporabo modela s kinematičnim utrjevanjem (Plaxis »HS« – Hardening Soil model). Časovne vplive večjih deformacij, ki lahko v pogojih kritičnega stanja na pobočjih sprožijo plazenje spremenjene hribinske mase v mehko razmočeno zemljino, ustrezno modeliramo z uporabo modela za lezenje mehke zemljine (Plaxis »Soft Soil Creep« model). Razpokane relativno trde hribinske mase je možno zelo uspešno modelirati s posebnim materialnim modelom za razpokane hribine, ki lahko po-

leg hribinske mase upošteva do tri kritične razpoklinske sisteme (Plaxis, »Jointed Rock«). Te je potrebno podrobno izmeriti statistično analizirati (ročno ali z Joint Matrix System, Rocscience-Dips).

Pri večjih odstopanjih merjenih deformacij od predvidenih sprememb s projektom na podlagi numeričnih analiz, 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 inženirskogeološka spremljava izkopa (določitev labilnih in kakorkoli oslabljenih con) ter vzpostavitev tehničnega opazovanja pomaga, da še pred koncem izvedbe izkopa in opornih ukrepov, rezultate geostatičnih analiz preverjamo z merjenimi vrednostmi. Te vključujejo meritve sidrnih 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 (npr.: CSIRO). Tehnično opazovanje je potrebno nadaljevati tudi v fazi obratovanja objektov in spremembam skrbno slediti ter po potrebi oporne ukrepe tudi dodati.

Zahvale

Posebno zahvalo dolgujeva dr. M. Buehlerju, direktorju Centra za več merilno modeliranje in integracijo materialov v programsko opremo ter Procesno simulacijskega centra Beckmanovega inštituta za

tehnologijo v Kaliforniji, in hkrati sodelavca Instituta M. Plancka, ki je dovolil objavo nekaterih fotografij iz svoje disertacije. Zahvaljujeva se DARS-u za dovoljenje uporabe in objave preiskav in analiz. Za nasvete, spodbudo in pomoč se zahvaljujeva prof. Stanislavu Škrablu iz Fakultete za gradbeništvo Univerze v Mariboru, izr. prof. Mihaelu Ribičiču iz Naravoslovno tehniške fakultete Univerze v Ljubljani, nadalje doc. dr. Janku Logarju iz Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, prof. Jakobu Likarju pa še za recenzijo članka. Posebej se zahvaljujeva ge. Silvi Ocepek, upok. profesorici slovenskega jezika za lektoriranje, kot tudi vsem bivšim sodelavcem in sodelavkam iz Geoinženiringa, d.o.o, ki so kakorkoli pripomogli pri izvedbi preiskav in izdelavi zahtevnih projektov.

Literatura

- Abraham, F. F., Walkup, R., Gao, H., Guchaineau, M., La Rubia, T. D. & Seager, M. 2002: Simulating materials failure by using up to one billion atoms on the world's fastest computer: Work-hardening. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 99(9), 5783–5787.
- Bajželj, U., Likar, J. & Žigman, F. 1995: Some procedures for installation of anchoring systems and the evaluation of capacity. *Anchors in Theory and Practice*, Widmann E., A. A. Balkema, 189–196, Rotterdam, Brookfield.
- Balk, T.J. & Arzt, E. 2001: Observations of dislocation motion and stress in homogeneities in thin copper films. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 673: 2.7.1–2.7.6.
- Bandis, C. S. 1993: Engineering Properties and Characterisation of Rock Discontinuities. *Comprehensive Rock Engineering*. Edited by Hudson: Oxford Pergamon Press, 1, 155–183.
- Barton, N. R. & Choubey, V. 1977: The shear strength of rock joints in theory and practice. – *Rock Mechanics* 10 (1–2), 1–54.
- Barton, N. R. & 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.
- Bieniawski, Z. T. 1976: Rock mass classification in rock engineering. In *Exploration for rock engineering*, proc. Of the Symp., edited by Z. T. Bieniawski, 97–106 Cape Town: Balkema.
- Bieniawski, Z. T. 1989: *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- Brinkgreve, R.B.J. & Vermeer, P.A. 2002: PLAXIS, Finite Element Code for Soil and Rock, Analyses, ISBN 90 5809 508 8, A. A. Balkema.
- Brinkgreve, R.B.J. & Broere, W. 2004: PLAXIS – 3 D, TUNNEL, Version 2, 2600, ISBN 90-808079-4-X, An Delft.
- Broberg, K.B. 1995: Dynamic crack propagation in a layer, *Int. J. Solids Struct.* 32/6–7: 883–896.
- Buehler, M. J., Abraham, F.F. & Gao, H. 2003: Hyperelasticity governs dynamic fracture at critical length scale. – *Nature*, 426, 141–146.
- Buehler, M. J. 2004: *Atomistic and Continuum Studies of Deformation and Failure in Brittle Solids and Thin Film Systems: Dissertation an der Universität Stuttgart*, 355 strani.
- Buehler, M. J. & Gao, H. 2004: Duktile Verformungen und spröde Brüche von Kristallen, Biegen und Brechen im Supercomputer. – *Phys. Unserer Zeit*, 35/1, 30–33.
- Buehler, M. J. 2004, 2005: Osebna komunikacija, poštni arhiv.
- Corkum, B. 2002: Osebna komunikacija, poštni arhiv.
- Crowder, J. J. & Bawden, W. F. 2004: Review of Post-Peak Parameters and Behaviour of Rock Masses: Current Trends and Research. *Rock News*, Lasselonde Institute, University of Toronto, Toronto.
- Cundall, P., Carranza-Torres, C. & Hart, R. 2003: A new constitutive model base on the Hoek-Brown criterion. *Flac and Numerical Modelling in Geomechanics*, Brummer et al. Swets & Zeitlinger, Lisse.
- Gaish, A., Pötsch, M., Fasching, A. & Schubert, W. 2004: Measurement of rock mass parameters based on 3 D imaging, In *Caratterizzazione degli ammassi rocciosi nella progettazione geotecnica. X Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria delle Rocce*, Turin, eds. G. Barla and M. Barla, 21–45: Patron editore, Bologna.
- Gaish, A., Pötsch, M. & Schubert, W. 2006: Acquisition and assesment of geometric rock mass features by true 3 D images. In *Proceedings of the 41th U.S. Rock Mechanics symposium – Golden Rocks 2006*, eds. N. N., paper under preparation (Workshop: Modern rock face characterisation techniques and their use for rock mechanical projects, TU Graz), Graz.
- Gao, H. 1996: A theory of local limiting speed in dynamic fracture. – *J. Mech. Phys. Solids*, 44/9, 1453–1474.
- Gao, H. 1997: Elastic waves in a hyperelastic solid near its plane-strain equibiaxial cohesive limit. – *Philosophical Magazine Letters*, 76/5, 307–314.
- Gao, H., Huang, Y. & Abraham, F. F. 2001: Continuum and atomistic studies of inter-sonic crack propagation. – *J. Mech. Phys. Solids*, 49, 2113–2132.
- Gao, H., Huang, Y., Nix, W.D. & Hutchinson, J.W. 1999: Mechanism-based strain gradient plasticity – I. Theory. – *J. Mech. Phys. Solids*, 47, 1239–1263.
- Gao, H., & Klein, P. 2001: Numerical simulation of crack growth in an isotropic solid with randomized internal cohesive bonds. – *J. Mech. Phys. Solids*, 46/2, 187–218.
- Gao, H., Zhang, I., Nix, W. D., Thompson, C.V. & Arzt, E. 1999: Crack like grain boundary diffusion wedges in thin metal films. – *Acta Mater.*, 47, 2865–2878.
- Eurocode 7: Geotechnical design, Adopted European Prestandard, European Committee for Standardization, ENV 1997–1: 1994.
- Hartmaier, A., Buehler, M.J & Gao, H. 2003: A discrete dislocation model of diffusional creep. *Diffusion and Defect Forum*, str. 224–225: 107–128.

- Hoek, E., Kaiser, P. K. & Bawden, W. F. 1995: Support of Underground Excavations in Hard Rock, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. T. & Corkum, B. 2002: Hoek – Brown failure criterion – 2002 edition. Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in July 2002, Toronto.
- Hoek, E. & Marinos, P. G. 2000, Predicting tunnel squeezing. Tunnels and tunnelling international, Part 1; November 2000, 45–51; Part 2; December 2000, 34–6.
- Hoek, E., Marinos, P. G & Marinos, V. P. 2005: Characterisation and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses. – International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 42, 277–285.
- Hoek, E. & Diederichs, M. S. 2006: Empirical estimation of rock mass modulus. – International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43 (Available on line 2005), 203–215.
- Kavvas, M. J. 1998: Modelling the soil behaviour-Selection of soil parameters, Proceedings of the Second International Symposium on Hard Soils – Soft Rocks 1998. Edited by A. Evangelista, L. Picarelli, 3, 1441–1461 Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- Likar, J. 2004: Back Analyses of time-dependent displacement at the Trojane tunnel construction. – Acta Geotechnica Slovenica, 1, 21–36.
- Liu, C., Lambros, J. & Rosakis, A. J. 1993: Highly transient elastodynamic crack growth in a bimaterial interface: higher order asymptotic analysis and experiments. – J. Mech. Phys. Solids, 41, 1887–1954.
- Logar, J. 1996: Vpliv interakcije med zemljinno, podporno konstrukcijo in sidrom na obremenitve konstrukcijskih elementov podporne konstrukcije, Razprave 2. posvetovanja slovenskih geoteknikov, 1. knjiga. Slovensko geotehnično društvo, 53–62.
- Logar, J. 1998: Uporabnost različnih konstitutivnih modelov v analizi konsolidacije tal: doktorska disertacija, 263 str, Ljubljana.
- Marinos, P. & Hoek, E. 2000: GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Geoeng 2000, Technomic Publishing Company, Inc. U. S. A., 1422 – 1440 Melbourne.
- Marinos, V., Marinos, P. & Hoek, E. 2005: The geological strength index: applications and limitations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 2005.
- Milne, D., Germain, P. & Potvin, Y. 1992: Measurement of Rock Mass Properties for Mine Design, Eurock' 92. Thomas Telford, London.
- Ocepek, D. & Vogrinčič, G. 1998: Project of supporting measures by using Hoek-Brown failure criterion. Proceedings of the Second International Symposium on Hard Soils – Soft Rocks. Edited by A. Evangelista, L. Picarelli, 2, 1141–1151, Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- Ocepek, D. & Pipenbaher, M. 1998: Izvedba izkopa in vzpostavitve tehničnega opazovanja v prostoru gradnje pokritega vkopa – galerije Strmec. Gradbeni vestnik, ISSN 0017-2774, 11–12, 249–255.
- Ocepek, D. & Vogrinčič, G. 2000: Critical State Approach to Stability of Clay Shale Design Structures of the Motorway Trojane Blagovica. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Geoeng 2000, Melbourne, Technomic Publishing Company, Inc. U. S. A., Melbourne.
- Ocepek, D. 2003: Trajno varovanje brezín pri gradnji skladišča naftnih derivatov Ortnek na podlagi hribinskih stabilnostnih analiz in elastoplastične analize napetostno deformacijskega stanja po metodi končnih elementov: Magistrsko delo, 107 str, Ljubljana.
- Ocepek, D. 2004: Projektiranje globokih vkopov v spremenljivih geološko-geomehanskih pogojih. Razprave četrtega posvetovanja slovenskih geoteknikov. Slovensko geotehniško društvo, Ur: A. Gaberc, str. 135–146, Rogaska Slatina.
- Ocepek, D. & Štern, K. 2004: Raziskave, projektiranje in nadzor izvedbe brezín v prostoru gradnje MMP Gruškovje. Zbornik referatov 7. kongresa o cestah in prometu. Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije, 344 – 353, Portorož, Ljubljana.
- Ocepek, D. 2005: New Trends in Rock Mass Characterisation for Designing Geotechnical Structures, Acta Geotechnica Slovenica, L. Trauner, University of Maribor, ISSN: 1854–0171.
- Ocepek, D. 2005: Odnos med plastično deformacijo in krhkim lomom po preseženi vrhunski trdnosti v karbonsko permskih mehkih kamninah. Doktorska disertacija, Naravoslovno tehniška fakulteta, 221 strani, Ljubljana.
- Picarelli, L. & Olivares, L. 2005: Properties and behaviour of tectonized clay shales in Italy, Proceedings of the Second International Symposium on Hard Soils – Soft Rocks 1998. Edited by A. Evangelista, L. Picarelli, 3, 1998, str. 1211–1241 Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- Picarelli, L. & Olivares, L. 1998: Ingredients for modelling the mechanical behaviour of intensely fissured clay shales, Proceedings of the Second International Symposium on Hard Soils – Soft Rocks. Edited by A. Evangelista, L. Picarelli, 2, 771–780 Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- Pötsch, M., Schubert, W. & Gaich, A. 2006: Kinematical analysis of rock blocks supported by 3 D imaging. In Proceedings of the 41st U.S. Rock Mechanics Symposium – Golden Rocks 2006, Paper No. 06-1079, under preparation.
- Placer, L. 1998, 1999: Strukturni pomen Posavskih gub. – Geologija, 41, 191–221.
- Potts, D. M. 2002: Appropriate constitutive models for geomaterials, Zbornik 3. Šukljjetovih dnevov, Ur. S. Škrabl in B. Dolinar, Slovensko geotehniško društvo, ISBN 86-435-0519-6, str. 2–21.
- Pulko, B. & Majes, B. 1999: Poročilo o laboratorijskih preiskavah vzorcev zemljin z območja podpornega zidu PZ-17a na AC Trojane-Blagovica, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani.
- Rosakis, A. J. 2002: Intersonic shear cracks and fault ruptures. – Advances in Physics, 51/4, 1189–1257.
- Tatsuoka, F., Santucci de Magistris, F. Hayano, K., Koseki, J. & Momoya, Y. 2000: Some new aspects of time effects on stress-strain behaviour of stiff geomaterials, Proceedings of the Second International Symposium on Hard

Soils – Soft Rocks. Edited by A. Evangelista, L. Picarelli, 3, 1285–1371: Balkema/Rotterdam/Brookfield.

Trajanova, M. 2001: O stabilnosti karbon-skega glinastega skrilavca ob avtocesti Ljubljana–Celje s petrografskega stališča. – *Geologija*, 44/1, 81–88.

Wittke, M. 2003: Limitation of swelling pressures due to self-sealing effects around tunnels in anhydritic rock. Extended Summary: Dissertation an der Universität Aachen.

Zienkiewicz, O.C., Pastor, M. & Huang, M. 1995: Softening, localisation and adaptive remeshing. Capture of discontinuous solutions. – *Computational Mechanics* 17, 98–106.

Zimmerman, J. A., Gao, H. & Abraham, F. F. 2000: Generalised stacking fault energies for embedded atom fcc metals. – *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 8, 103–115.