

Primljen / Received: 15.10.2012.

Ispravljen / Corrected: 9.6.2013.

Prihvaćen / Accepted: 14.6.2013.

Dostupno online / Available online: 10.7.2013.

Identifikacija rizika pri monitoringu klizišta

Autori:



Mr.sc. **Zlatko Mihalinec**, dipl.ing.građ.
Institut IGH d.d., Zagreb
zlatko.mihalinec@igh.hr



Mario Bačić, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za geotehniku
mbacic@grad.hr



Prof.dr.sc. **Meho Saša Kovačević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za geotehniku
msk@grad.hr

Pregledni rad

Zlatko Mihalinec, Mario Bačić, Meho Saša Kovačević

Identifikacija rizika pri monitoringu klizišta

Monitoring klizišta ima značajnu ulogu u razumijevanju procesa klizanja, što je naročito važno u urbanim sredinama gdje aktiviranje klizišta može posredno ili neposredno ugroziti živote ljudi i nanijeti materijalne štete. U radu se identificiraju potencijalni izvori rizika pri monitoringu klizišta, te se objašnjavaju pojmovi svrhe mjerenja, mjernih veličina, mjerne opreme i rezultata mjerenja. Na primjeru dobro dokumentiranog klizišta Grmošćica u Zagrebu prikazat će se uloga monitoringa klizišta u urbanim sredinama.

Ključne riječi:

monitoring, klizište, rizici mjerenja, pogreška mjerenja, klizište Grmošćica

Subject review

Zlatko Mihalinec, Mario Bačić, Meho Saša Kovačević

Risk identification in landslide monitoring

Landslide monitoring has an important role in the understanding of the landslide process, which is especially important in urban areas where landslide activation may directly or indirectly endanger human lives and cause material damage. Potential risk sources in landslide monitoring are identified in the paper, and terms measurement purpose, measurement parameters, measuring equipment and measurement results, are explained. The role of landslide monitoring in urban areas is presented using an example of well documented landslide Grmošćica in Zagreb.

Key words:

monitoring, landslide, measurement risks, measurement error, Grmošćica landslide

Übersichtsarbeit

Zlatko Mihalinec, Mario Bačić, Meho Saša Kovačević

Identifikation von Risiken beim Monitoring von Erdbeben

Die Überwachung von Erdbeben spielt eine bedeutende Rolle für das Verständnis von Erdbebenprozessen, insbesondere in städtischen Gebieten, in denen durch die Bewegung von Erdmassen Menschenleben direkt oder indirekt gefährdet werden oder Sachschäden verursacht werden können. In dieser Arbeit werden potenzielle Risikoquellen beim Monitoring von Erdbeben identifiziert und Begriffe erläutert, die sich auf den Zweck der Messungen, Messwerte, Messtechniken und Messergebnisse beziehen. Am Beispiel des gut dokumentierten Erdbebens Grmošćica in Zagreb wird die Bedeutung der Überwachung von Erdbebengebieten im städtischen Umfeld dargestellt.

Schlüsselwörter:

Monitoring, Erdbeben, Messrisiken, Messabweichung, Erdbeben Grmošćica

1. Uvod

Pojava klizišta, kretanja mase tla po jednoj ili više kliznih ploha, nije rijetka pojava u urbanim sredinama. Kad se u urbanoj sredini pokrene klizište, ono može posredno ili neposredno ugroziti živote ljudi i nanijeti materijalne štete i zato ga treba imati pod kontrolom, a kad god je to moguće i sanirati. Razumijevanje procesa klizanja i sposobnost djelotvornog pojednostavljanja zahtijeva interpretaciju brojnih procesa i aktivnosti koji uključuju geomorfologiju, hidrologiju, geologiju, hidrogeologiju, geotehničke karakteristike lokacije, geotehnički model, analize procjeđivanja, analize stabilnosti i deformacija, procjenu i ublažavanje rizika [1]. Posljednjih godina postiže se stalan napredak u svim navedenim područjima. Nova sredstva primjenjuju se za definiranje karakteristika lokacije, a raspon geotehničkih modela koji se mogu uspješno primijeniti značajno se povećao. Mogućnosti analiza danas često nadmašuju mogućnosti karakterizacije. Procjena rizika i upravljanje kosinama razvija se brzo kao korisno sredstvo za suočavanje s klizištima lokalno i regionalno. Ipak neizvjesnosti i dalje opstaju u geotehničkoj praksi i zabilježeni su brojni primjeri nepredviđenih ponašanja geotehničkih objekata, često s neželjenim posljedicama [2]. Potrebno je uzeti u obzir činjenicu da je klizište "živi organizam" čijem se ponašanju treba prilagoditi. Uloga monitoringa je pri tome ključna. Monitoring predstavlja osnovu za uvođenje sustava kontrole aktivnosti klizišta i odlučivanje o potrebnim mjerama u ovisnosti o stanju na klizištu [3].

Za uspješnost monitoringa klizišta važnu ulogu ima identificiranje mogućih izvora rizika prilikom mjerenja. Pitanja koja je potrebno postaviti da bi se pravilno identificirali rizici jesu:

- a) Zašto mjeriti? → definira "svrhu mjerenja"
- b) Što mjeriti? → definira "mjerne veličine"
- c) Čime mjeriti? → definira "mjernu opremu"
- d) Što je izmjereno? → definira "rezultate mjerenja"

Izvori rizika pri monitoringu klizišta su u navedena četiri čimbenika koji će se u nastavku prikazati i analizirati.

2. Svrha mjerenja

Monitoring na klizištima se provodi u svrhu istraživanja ili u svrhu predviđanja i upozoravanja [4]. Geotehnički istražni radovi na klizištima provode se radi upoznavanja karakteristika klizišta i okolnosti u kojima se ono pokrenulo. To je potrebno kako bi se mogli izraditi geotehnički modeli za provođenje analiza i proračuna s ciljem definiranja potrebnih mjera sanacije. Za svako klizište je nakon upoznavanja osnovnih geotehničkih karakteristika lokacije potrebno definirati granice, smjer i dubinu klizanja, kao i iznos i brzinu pomaka, razinu podzemne vode i piezometarske tlakove na kliznoj plohi te parametre čvrstoće na kliznoj plohi. Sve navedeno, osim parametara čvrstoće koji se upoznaju laboratorijskim

ispitivanjima, može se odrediti tijekom monitoringa kao dijela geotehničkih istražnih radova. Monitoring za potrebe istraživanja ne završava prikupljanjem podataka o klizištu tijekom geotehničkih istražnih radova i izradom geotehničkog modela. Naime, radi praćenja stanja klizišta i građevina izvedenih za potrebe sanacije, te usporedbe projektom predviđenog i ostvarenog ponašanja klizišta i izvedenih konstrukcija, monitoring za potrebe istraživanja se provodi i tijekom radova sanacije klizišta, kao i nakon završetka sanacije. Rezultati monitoringa koji se provodi za vrijeme radova sanacije mogu se odmah upotrijebiti za interaktivno projektiranje [5, 6]. Usporedba projektom predviđenog ponašanja i monitoringom ustanovljenog daje mogućnost procjene ispravnosti numeričkih metoda i geotehničkih modela [7, 8]. Monitoring nakon izvedbe sanacije provodi se kao kontrola uspješnosti izvedenih radova.

Motivacija za razvoj monitoringa za potrebe predviđanja i upozoravanja jest želja da se pravodobnim intervencijama spriječe ili barem umanje moguće žrtve i štete uslijed aktiviranja klizišta. Faktor koji omogućuje praktičnu upotrebu i uspješnost monitoringa za potrebe predviđanja i upozoravanja jest razvoj tehnologije kojom se otkrivaju i prate pomaci na velikim i udaljenim površinama u realnom ili gotovo realnom vremenu. Ovakva vrsta monitoringa provodi se na evidentiranim klizištima i površinama kod kojih postoji rizik od pokretanja klizišta, gdje se uvodi kao sustav za brzo (rano) upozoravanje (*early warning*). Potreba za uvođenjem sustava za upozoravanje prisutna je i na starim privremeno umirenim klizištima čija je priroda takva da se ne može s potpunom sigurnošću isključiti mogućnost ponovnog aktiviranja, kao što je slučaj s velikim klizištem u Anconi u Italiji [9]. U slučaju monitoringa za potrebe predviđanja i upozoravanja, sustav monitoringa treba biti maksimalno automatiziran. Ipak, bez obzira na ubrzan razvoj tehnologija za monitoring klizišta, interpretacija rezultata monitoringa, posebno u smislu ranog upozorenja o mogućnosti pokretanja klizišta ostaje u domeni subjektivne interpretacije [10].

3. Mjerne veličine

Iako postoji tendencija da se aktivnosti klizišta u urbanim sredinama predvide primjenom monitoringa za potrebe predviđanja i upozoravanja, realnost je takva da se u većini slučajeva reagira tek nakon što je došlo do pokretanja kliznog tijela i kada je potrebno provesti monitoring u svrhu istraživanja. Kako je već navedeno, monitoring klizišta u svrhu istraživanja je nužno provoditi za vrijeme istražnih radova, za vrijeme radova sanacije kao i nakon radova sanacije. Glavni parametri koji se obuhvaćaju monitoringom klizišta u svrhu istraživanja jesu:

Vertikalni i horizontalni pomaci kliznog tijela, objekata i potpornih konstrukcija

Mjerenjem horizontalnih i vertikalnih pomaka kliznog tijela moguće je definirati smjer, dubinu i brzinu klizanja,

kao i veličinu pomaka. Od navedenih parametara brzina je najznačajnija za odlučivanje o daljnjim postupcima. Ako se brzina klizanja smanjuje, otvara se vrijeme za donošenje odluke o metodi sanacije, a ako se brzina povećava, potrebno je brzo rješenje. Praćenje pomaka potpornih konstrukcija za vrijeme radova sanacije i nakon radova omogućuje usporedbu mjerenih i proračunanih vrijednosti.

Porni tlakovi

Veličina pornih tlakova izravno utječe na brzinu pomaka klizišta. Povećanjem pornih tlakova (primjerice uslijed infiltracije oborinskih voda u klizno tijelo) dolazi do povećanja brzine klizanja, dok smanjenje pornih tlakova smanjuje brzinu klizanja.

Razina podzemne vode u tlu

Određivanje razine podzemne vode na klizištima značajno je za projektiranje mjera sanacije i analize stabilnosti.

Sile u sidrima potpornih konstrukcija

Mjerenjem sila u sidrima potpornih konstrukcija moguće je usporediti izmjerene veličine sila s proračunanim, te analizirati njihovo značenje za konstrukciju tijekom svih karakterističnih faza izvedbe sanacije klizišta (iskopi i prednapinjanja).

4. Mjerna oprema

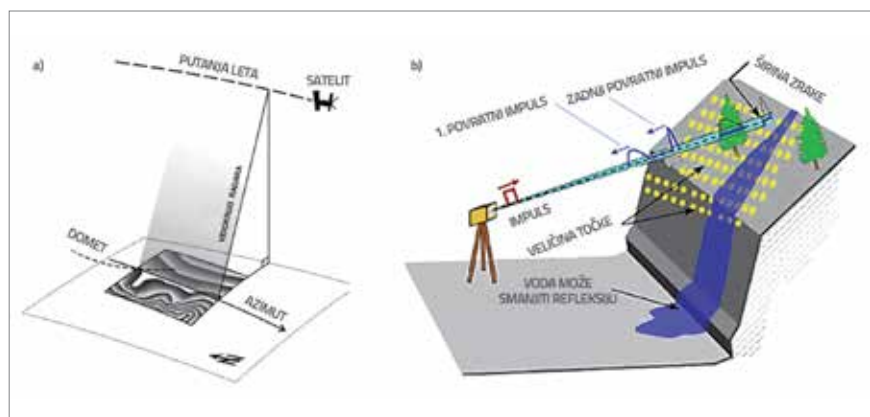
Pri odabiru opreme za monitoring klizišta preporučljivo je odabirati izravne metode i opremu čiji rezultati mjerenja izravno upućuju na ponašanje klizišta i konstrukcija izvedenih za potrebe sanacije. Metode i oprema kojima se rezultati dobivaju nakon interpretacija i provođenja analiza također su primjenjivi, ali zahtijevaju previše vremena za reakciju u slučaju nepovoljnih pojava. Mjerne veličine koje dominantno daju odgovore na pitanja o ponašanju i stanju kliznog tijela i potpornih konstrukcija, kao i o njihovoj interakciji, jesu pomaci. Prema Savvaïdisu [11], metode koje se primjenjuju radi određivanja pomaka jesu daljinska opažanja, fotogrametrijske metode, geodetske metode te geotehničke metode. Kod praćenja pomaka za vrijeme i nakon sanacije mora se osigurati veća točnost opreme nego kod monitoringa za vrijeme istražnih radova, jer se tada očekuju manji pomaci. Oprema kojom se definiraju porni tlakovi na lokaciji klizišta su piezometri. Za određivanje sila u sidrima potpornih konstrukcija služe mjerne ćelije. Neka istraživanja [12] uvode i geofizička mjerenja kao bitna za definiranje geološkog modela klizišta, a time i za određivanje potencijalnih položaja kliznih ploha,

a u fazi monitoringa se mogu koristiti za praćenje razine podzemne vode.

Daljinska opažanja pomaka

Prednost je daljinskih metoda u tome da omogućuju monitoring velikih površina bez fizičke prisutnosti ljudi i opreme na tim površinama. Daljinska opažanja se često primjenjuju za mapiranje različitih faktora povezanih s klizištima, kao što su površinska morfologija, strukturalne i litološke karakteristike, kao i promjene tih faktora tijekom vremena. Za razliku od optičkih senzora koji omogućuju mapiranje navedenih faktora, za monitoring pomaka su u novije vrijeme uvedena radarska mjerenja vezana na satelite [9, 13, 14] ili zemaljske stanice [15, 16]. Njihov razvoj je posljedica razvoja satelitske i radarske tehnologije te mogućnosti korištenja u svim atmosferskim (ne) prilikama. Ovim metodama se mjeri ukupna količina energije koja se vrati do radara nakon interakcije sa površinom Zemlje. Među navedenima su se vrlo učinkovitim pokazale tehnologija radarskog snimanja SAR (en *Synthetic Aperture Radar*), radarske interferometrije InSAR (en *Interferometric Synthetic Aperture Radar*) te naročito diferencijalne interferometrije DInSAR (en *Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*). SAR tehnologija koristi radar kojim se stvara slika visoke rezolucije, gdje se u fazi obrade signala analizira magnituda i faza primljenog signala iz niza generiranih impulsa. Princip rada InSAR tehnologije se pak temelji na upotrebi dviju antena postavljenih vertikalno i horizontalno na isti satelit. Jedna antena odašilje signal, dok obje antene primaju povratni signal, što rezultira formiranjem dviju slika [17]. Najprecizniji tip interferometrijskih snimanja je diferencijalna interferometrija DInSAR [18], kojom se mogu odrediti male (milimetarske) deformacije terena između dva uzastopna snimanja, čime se omogućuje mapiranje i monitoring pomaka kliznog tijela. Za razliku od klasičnih geodetskih metoda, DInSAR metodom se mogu odrediti pomaci cijelog kliznog tijela. Na slici 1a prikazan je radarski sustav pri prikupljanju podataka.

Posljednjih godina se, u monitoringu klizišta, sve češće primjenjuje LIDAR tehnologija (*Light Detection and Ranging*)



Slika 1. Daljinska opažanja: a) radarskim satelitskim mjerenjima [18]; b) LIDAR tehnologijom [19]

koja predstavlja optičko-mehanički postupak prikupljanja prostornih podataka [19]. Prednost tehnologije je u činjenici da je potpuno automatizirana te da je snimanje terena vrlo precizno [20]. Time se mogu, s vrlo visokom rezolucijom, odrediti morfološke strukture koje upućuju na klizišta, kao i kvalitativni i kvantitativni podaci o promjeni položaja površine terena. Metoda je vrlo korisna i djelotvorna na klizištima s vegetacijom, koja kod ostalih metoda opažanja može predstavljati problem [21]. Da bi se odredio trodimenzionalni položaj neke točke na klizištu, koristi se laserski skener koji se nalazi na avionu ili helikopteru, a može se nalaziti i na zemlji (slika 1b).



Slika 2. Usporedba pomaka dobivenih fotogrametrijskim metodama i GPS mjerenjima na primjeru klizišta u Austriji [22]

Fotogrametrijska opažanja pomaka

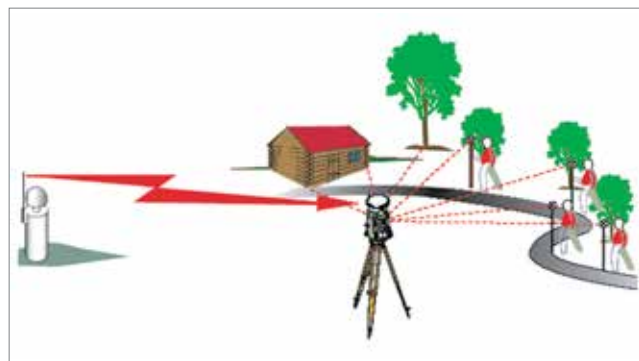
Vertikalni i horizontalni pomaci se mogu odrediti i daljinskim opažanjima pomaka primjenom fotogrametrijske tehnike. Usporedbom snimaka izrađenih na razne datume moguće je ustanoviti pomake odabranih točaka na terenu [9, 22, 23]. Snimci se mogu dobiti s različitim sensorima (kamere, fotoaparati) vezanim na satelite, avione, helikoptere, kao i sa zemlje (fiksirani senzori). Zračna i zemaljska fotogrametrija se intezivno koriste za određivanje pomaka klizišta, uz uštedu vremenskih resursa, te praktički neograničenog broja točaka koje se mogu opažati [24]. Prikupljeni podaci se analitičkim i digitalnim fotogrametrijskim metodama pohranjuju kao strukturirani digitalni zapis. Posljednjih godina se preciznost fotogrametrijskih metoda povećala, tako da je metoda vrlo atraktivna za precizna određivanja pomaka klizišta. Na slici 2. su prikazani uspoređeni pomaci klizišta u Austriji [22], dobiveni fotogrametrijskim metodama (u periodu od 1962. do 1996.) i GPS mjerenjima (u periodu od 1999.g do 2003.g).

Geodetska opažanja pomaka

Geodetska opažanja klizišta, slika 3., omogućuju određivanje vertikalnih i horizontalnih pomaka, a time i smjera i brzine klizanja. Veličine i smjerovi pomaka točaka, kod svih tipova geodetskih opažanja, mogu se izračunati iz razlike izmjerenih koordinata u dva uzastopna mjerenja. Da bi se geodetska opažanja uspješno provela, potrebno je na klizištu imati stabilizirane točke, geodetske repere. Vrste geodetskih instrumenata koji se mogu koristiti za određivanje relativnih ili apsolutnih koordinata pojedinih točaka na klizištu uključuju klasične geodetske instrumente te instrumente za određivanje koordinata preko satelita, GPS (*Global Positioning System*).

Za klasična geodetska opažanja pomaka u upotrebi su totalne mjerne stanice čije deklarirane točnosti danas dostižu do $\pm 0.6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ za očitavanja prizme ($\pm 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ za bilo koju površinu, vertikalne kutove do 0.5° i automatsko

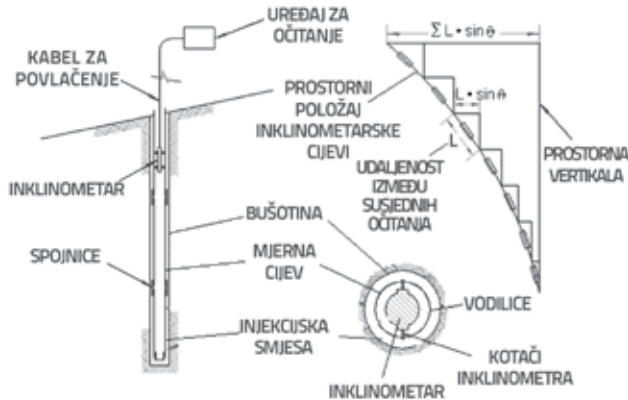
prepoznavanje ciljeva do 1°). Totalnim mjernim stanicama se nazivaju elektronički tahimetri kod kojih se kutovi i duljine mjere elektronički. Klasična geodetska opažanja zahtijevaju stabilnu bazu izvan zone klizišta, a minimalno treba imati dvije točke baze (preporučljivo tri). Za postizanje veće točnosti potrebno je koristiti sustav prisilnog centriranja instrumenata [25, 26], a najveća preciznost postiže se kad su instrumenti trajno postavljeni na točkama baze [27]. Mjerenja su relativno brza, primjerice određivanje trodimenzionalnih koordinata na površini na kojoj je postavljeno 200 prizmi može se provesti otprilike za 17 minuta [17]. Nedostaci tih mjerenja su u činjenici da je potrebno imati neometan (bez prepreka) vidokrug između instrumenta i prizme, te pojava kada pogreške vertikalne refrakcije smanjuju točnost informacija o mjerenim visinama. Primjenom GPS opažanja pomaka [22, 28] danas je moguće postići visoke točnosti, koje se povećavaju postprocesuiranjem, postupkom kojim se mjerene vrijednosti za repere na klizištu uspoređuju s mjerenjima koja su u istom vremenu rađena na dobro stabiliziranim točkama u blizini klizišta. Korištenjem stacioniranih uređaja i duljim periodima primanja signala moguće je ostvariti točnosti horizontalno $3 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$, vertikalno $6 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$, uz postprocesuiranje [27].



Slika 3. Geodetska opažanja pomaka

Geotehnička opažanja pomaka

Geotehnička opažanja pomaka obuhvaćaju upotrebu inklinometara, ekstenzometara, kliznih deformetara i mikrometara, *crack-metara*, lančanih deflektometara, optičkih vlakana i klinometara. Inklinometri se na klizištima koriste za mjerenje promjene nagiba vertikalnih zacjvljenih bušotina ili cijevi ugrađenih u potporne konstrukcije (piloti, dijafragme). Time se omogućuje utvrđivanje dubine klizanja i smjera pomaka te izračunavanje veličine i brzine pomaka između pojedinih mjerenja. Današnji inklinometri mogu se podijeliti u dvije vrste: probni (*probe*) i ugrađeni (*in-place*). Kod probnih inklinometara u bušotinu se ugrađuju cijevi s vodilicama. Mjerna sonda se s kotačićima koji se umeću u vodilice spušta i na određenim razmacima mjeri nagib između dviju mjernih točaka na kojima su se zaustavili kotačići. Sonda ima ugrađene senzore za mjerenje nagiba, u jednom ili u dva međusobno okomita smjera, koji se podudaraju sa smjerovima što ga određuju nasuprotne vodilice. Usporedbom izmjenog nagiba cijevi po dionicama s prethodnim mjerenjima određuje se promjena nagiba i izračunava pomak. Točnost probnih inklinometara u terenskim uvjetima doseže ± 0.1 mm/m. Shema rada probnog inklinometra je prikazana na slici 4.



Slika 4. Princip mjerenja inklinometrom [29]

Kod ugrađenih inklinometara sonde su opremljene sensorima i ugrađuju se na dubine na kojima se očekuje pojava klizanja. Očitavanja je moguće raditi povremeno ili se obavljaju kontinuirano i šalju u sustav za prihvaćanje i obradu podataka. Ugrađeni inklinometri primjenjiviji su u situacijama kad je dubina klizanja relativno dobro poznata ili sužena na neku određenu zonu, jer šira zona opažanja zahtijeva više senzora i poskupljuje primjenu.

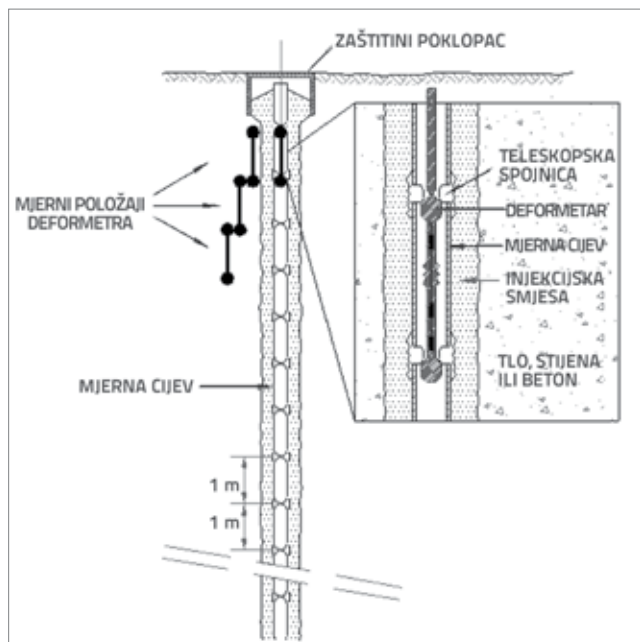
Naziv ekstenzometar (slika 5.) odnosi se na različita sredstva za mjerenje promjene duljine između dviju ili više točaka. Mogu se postavljati u bušotinama ili na površini terena gdje se postavljaju lokalno ili globalno. U prvom slučaju, ekstenzometri raznih duljina sidre se na raznim dubinama u bušotini, a mjerenjem promjene razmaka od površine terena do točaka na odabranim dubinama moguće

je ustanoviti dubinu klizanja i veličinu pomaka. Umjesto primjene više ekstenzometara raznih duljina moguće je koristiti ekstenzometre sa sensorima postavljenim na jednolikim razmacima koji daju podatke o promjeni pojedinog razmaka [30]. Kod lokalnog postavljanja na površini terena ekstenzometri se instaliraju preko pukotina na terenu ili na objektima. Uzastopnim očitavanjima prati se šire li se pukotine, odnosno je li klizište aktivno i ima li njegova aktivnost posljedica na objekte. Kod globalnog postavljanja na površini terena ekstenzometri su postavljeni po klizištu [31], obično u smjeru očekivanih pomaka i mjeri se promjena razmaka između fiksne točke izvan klizišta i jedne ili više točaka u klizištu. Prethodno opisani ekstenzometri su ugrađeni (*in-place*), a slično kao i inklinometri i ekstenzometri mogu biti probni (*probe*).



Slika 5. Princip mjerenja ekstenzometrom [29]

Klizni deformetar i klizni mikrometar, koji predstavljaju probne ekstenzometre, omogućuju kontinuirano mjerenje deformacija duž ugrađenih cijevi. Cijevi se mogu ugrađivati u bušotine ili u konstrukcije (pilote, dijafragme i sl.). Točnost kliznog deformetra u terenskim uvjetima iznosi ± 0.03 mm/m, dok točnost kliznog mikrometra iznosi ± 0.003 mm/m. Mjerenja deformacija kliznim deformetrom zasnivaju se na mjerenju relativnih deformacija ugrađenih cijevi spojenih teleskopskim spojnicama, slika 6. U mjernu cijev se uvlači deformetar koji se u kliznom položaju može neometano kretati između spojnica. Nailaskom na spojnice, deformetar se zaokreće za 45° , a njegovim povlačenjem se aktivira mjerni senzor kojim se mjeri razmak između spojnica. Ista procedura se ponavlja za svaki par spojnica. Ponovno mjerenje razmaka spojnica rezultira relativnim deformacijama mjerne cijevi (po m'), čijim se integriranjem izračunavaju pomaci tla.

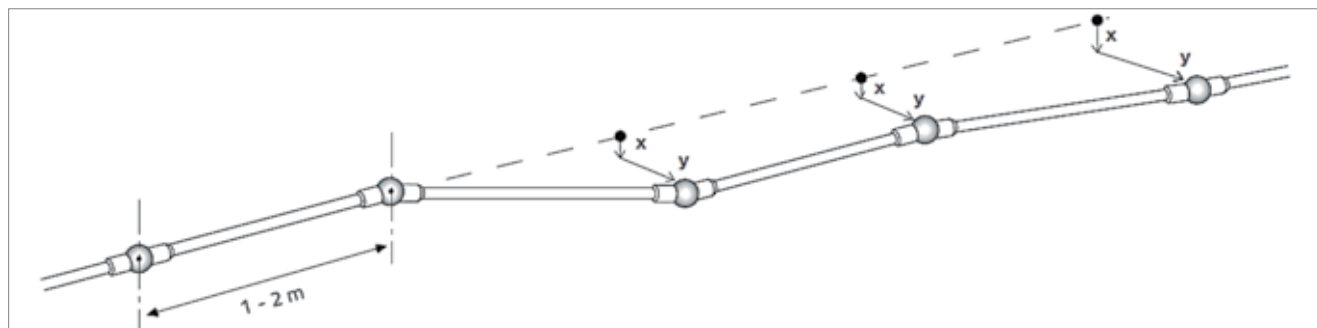


Slika 6. Princip mjerenja kliznim deformetrom [7]

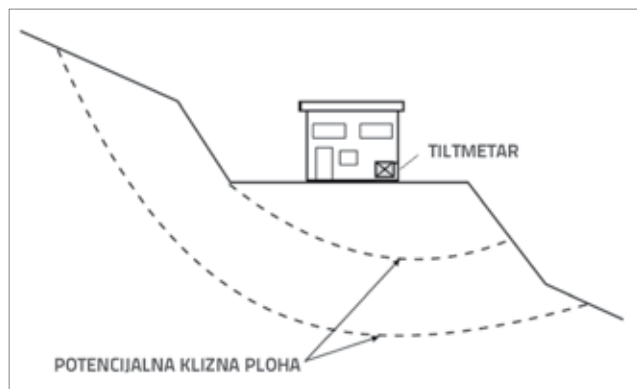
Crack-metri su jednostavni instrumenti koji mogu biti vrlo korisni za rano otkrivanje pomaka kliznog tijela. Zasnivaju se na mjerenju pomaka na površini između dvije točke koje su se počele odvajati [11]. Lančani deflektometar, slika 7., služi za monitoring deformacija ispod površine tla, a instalira se u fiksirane cijevi povezane s tlom injekcijskom smjesom. Deflektometar se sastoji od više povezanih štapova na čijim su krajevima elektroničke glave koje mjere defleksiju između dva štapa u smjeru x i y .

Optička vlakna se mogu učinkovito upotrijebiti za mjerenje deformacija u tlu [33, 34], gdje se vlakna mogu instalirati po cijeloj površini klizišta, čime se dobivaju kontinuirani podaci za svaku točku klizišta. Osim površinski, optička vlakna se mogu instalirati i po dubini.

Mjerenje klinometrima (tiltmetrima), slika 8., zasniva se na mjerenju kutova zaokreta u konstrukciju ugrađenih specijalnih nosača, koji se ugrađuju posebnim postupkom bušenja i injektiranja. Razlika očitano rezultata između dva mjerenja predstavlja zaokret nosača izražen u mm/m .



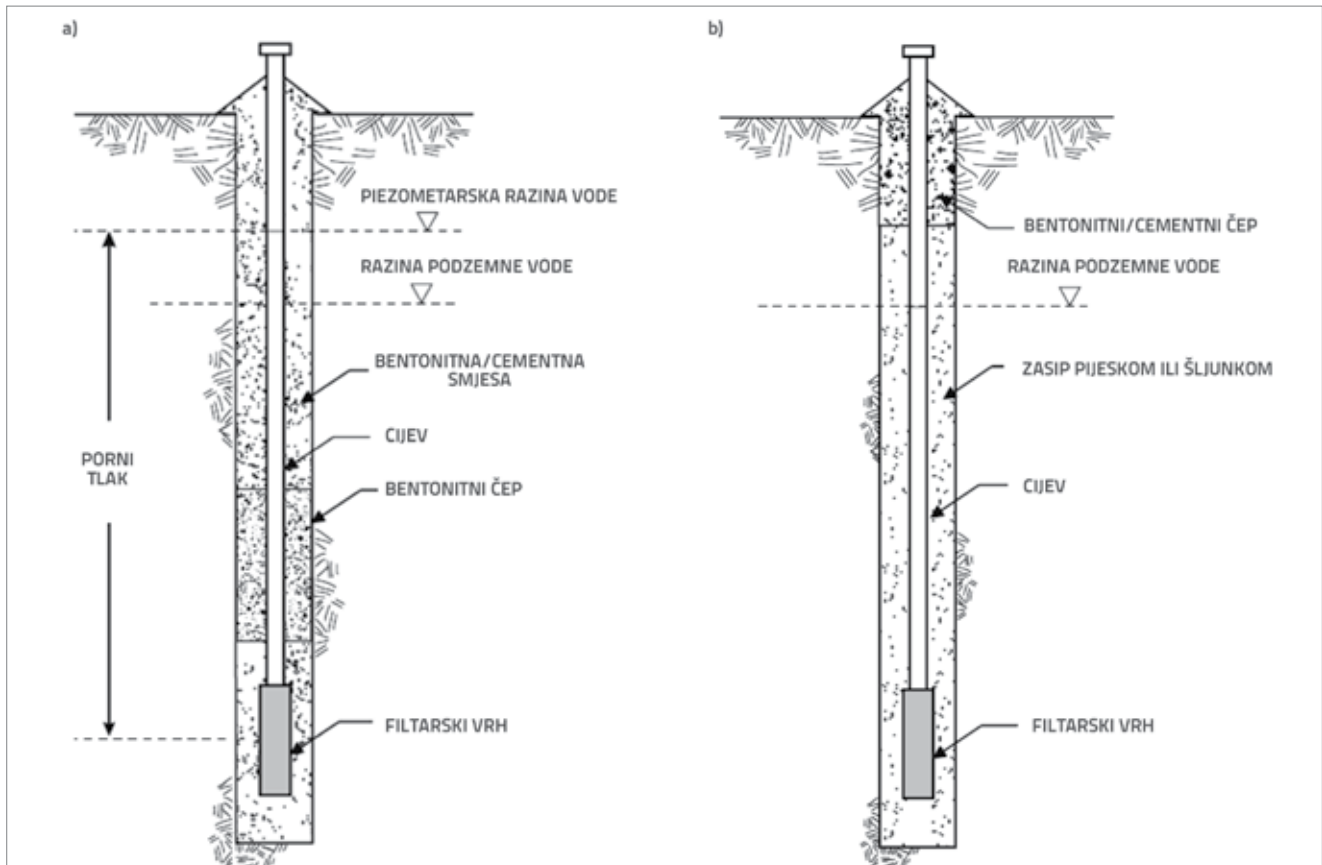
Slika 7. Princip mjerenja lančanim deflektometrom [32]



Slika 8. Ugradnja klinometra (tiltmetra) na građevini na klizištu [35]

Mjerenje pornih tlakova

Za mjerenje pornih tlakova ugrađuju se piezometri koji imaju zonu zahvata u točno određenim dubinama. Idealno je zonu zahvata koncentrirati na dubine na kojima se bitno mijenja propusnost i u zoni očekivanih dubina klizanja. Najjednostavniji i najpouzdaniji su cijevni Casagrande piezometri, slika 9a. Casagrande piezometar za mjerenje pornog tlaka se sastoji od filtarskog vrha spojenog na cijev. Filtar je izrađen od polietilena ili poroznog kamena, dok je cijev obično izrađena od PVC-a (osim u mekim tlima gdje se koriste čelične cijevi). Nakon što se cijevi s filtarskim vrhom instaliraju u bušotinu, prostor oko filtarskog vrha se zaspe pijeskom. Vrh filtarske zone se začepi bentonitom. Nivoi vode u piezometrima očitavaju se u unaprijed definiranim intervalima ili po potrebi (nakon perioda značajnih oborina, otapanja snijega i slično). U upotrebi su i dvocijevni hidraulički, pneumatski, s vibrirajućom žicom i električni piezometri. Ako treba mjeriti tlak na raznim dubinama, umjesto ugradnje pojedinačnih piezometara u više bušotina mogu se ugrađivati dvostruki ili trostruki Casagrande [36] i višestruki električni [27] piezometri u jednu bušotinu. Cijevni Casagrande piezometri mogu se iskoristiti i za približno određivanje dubine klizanja mjerenjem dubine prohodnosti šipkom. Naime, ako su piezometri dovoljno duboki, ugrađene cijevi zbog aktivnosti klizišta mogu postati neprohodne na dubini klizanja.



Slika 9. a) Mjerenje pornih tlakova Casagrande piezometrom; b) mjerenje razine podzemne vode [35]

Mjerenje razine podzemne vode u tlu

Mjerenja razine podzemne vode provode se u nezacijevljenim bušotinama ili se u bušotine ugrađuju perforirane cijevi tako da primaju vodu po cijeloj dubini bušotine. Bunar za opažanje, slika 9b., služi za monitoring razine podzemne vode. Bunar također koristi filter vrh, ali za razliku od Casagrande piezometra nema bentonitni čep, a zasipanje između cijevi i stijenke bušotine se obavlja pijeskom ili šljunkom. Kako filter vrh nije izoliran od vertikalnih dotjecanja vode, ovakva vrsta instalacije omogućava određivanje razine podzemne vode, ali ne i pornih tlakova u tlu. Geofizičkim metodama se također može odrediti razina podzemne vode u tlu, kao i zone povećane vlažnosti tla. U ovu svrhu uglavnom se primjenjuju geoelektrične metode.

Mjerenje sila u sidrima

Za određivanje sila u sidrima ugrađuju se na glavu sidara mjerne ćelije (*load cells*). Sastoje se od čeličnog cilindra koji je opremljen mjeracima deformacije. Deformacije čeličnog cilindra se pretvaraju u električne signale koji se zatim kalibriraju i kao izlazni podatak se dobije vrijednost sile u sidru.

5. Rezultati mjerenja

Korak koji slijedi nakon prikupljanja podataka odnosi se na interpretaciju rezultata mjerenja. Inklinometarska i deformetarska (mikrometarska) mjerenja daju rezultat u obliku dijagrama pomak - dubina u određenom vremenu. Rezultati mjerenja se najčešće prikazuju u obliku dijagrama mjereni parametar - vrijeme. Na primjer, ako se mjeri pomak jedne točke na klizištu, rezultat se prikazuje u obliku dijagrama pomak - vrijeme. Ta točka može biti geodetski reper, vrh inklinometra, deformetra (mikrometra)... Prilikom interpretacije rezultata mjerenja pomaka postavljaju se dva pitanja koja bitno utječu na sam "tok" interpretacije. Ta pitanja glase:

1. Je li moguće na terenu dva puta dobiti iste rezultate mjerenja (nema pomaka)?
2. Je li moguće prepoznati i ispraviti pogrešku mjerenja (ne proglasiti rezultat mjerenja izmjenjenim pomakom)?

Da bi se dobio odgovor na prvo pitanje, potrebno je objasniti pojmove točnosti (*accuracy*) i preciznosti (*precision*) mjerenja. Točnost mjerenja predstavlja stupanj podudarnosti individualnih ili prosječnih rezultata mjerenja sa stvarnom vrijednošću mjerenja veličine ili s prihvaćenom referentnom

vrijednošću. Preciznost mjerenja predstavlja stupanj uzajamnog slaganja između individualnih mjerenja učinjenih pod određenim uvjetima. Preciznost je sinonim za ponovljivost (*repeatability*). Shemu tumačenja točnosti i preciznosti je dao Dunicliff [29] i prikazana je na slici 10.

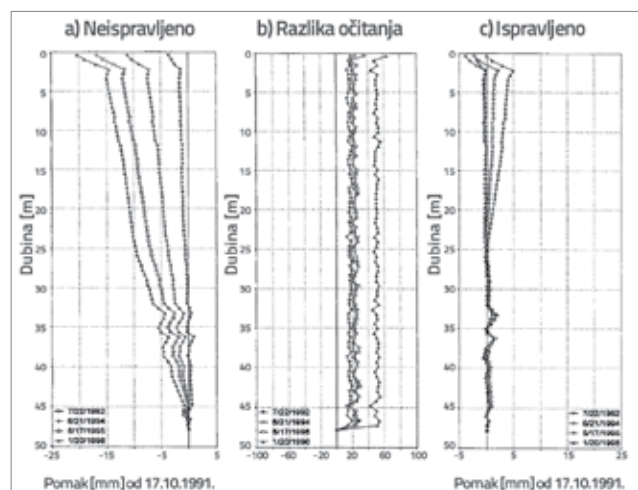


Slika 10. Shema tumačenja točnosti i preciznosti prema Dunicliffu [29]

Odgovor na prvo pitanje ovisi isključivo o preciznosti. Na primjer, ako je u dva uzastopna mjerenja izmjeren pomak od 5 mm, može se reći da je mjerenje precizno. Međutim, to ne pokazuje ništa o točnosti izmjerenog pomaka koji može, ali i ne mora, imati vrijednost 5 mm. Uzastopnim mjerenjem je moguće dobiti iste rezultate mjerenja, a isti uzastopni rezultati mjerenja upućuju na činjenicu da pomaka između mjerenja nije bilo. Da bi se odredila točnost mjerne veličine, potrebno je odgovoriti na drugo postavljeno pitanje koje utječe na tok interpretacije, što će se uraditi u nastavku.

Točnost provedenih mjerenja ovisi o nizu faktora mjernog sustava koji uključuju način ugradnje mjerne opreme, karakteristike mjerne opreme, iskustvo i osposobljenost osoblja koje izvodi mjerenja, proceduru i provođenje mjerenja te način obrade, prikaza i interpretacije rezultata. Matematički ekvivalent točnosti je pogreška. Ona predstavlja devijaciju između mjerenih i stvarnih vrijednosti. Mikkelsen [37] je pogreške mjerenja objasnio na primjeru inklinometarskih mjerenja, a primjer je dobar indikator za pogrešku mjerenja i ostalom opremom. Prema Mikkelsenu, ukupna pogreška mjerenja predstavlja zbroj slučajne pogreške i sistematske pogreške, gdje je utjecaj slučajne pogreške na ukupnu pogrešku puno manji nego što je to utjecaj sistematske pogreške. No dok se slučajne pogreške mogu samo minimalizirati, sistematske pogreške se mogu ispraviti primjenom matematičke procedure. Faktori koji u najvećoj mjeri utječu na sistematsku pogrešku prilikom mjerenja inklinometrom jesu pogreška otklona od vertikale (*bias-shift*), pogreška rotacije (*rotation error*) i pogreška pozicioniranja na dubinu (*depth positioning error*). Koliki može biti utjecaj pogreške mjerenja na konačan rezultat, prikazao je Mikkelsen na primjeru pogreške otklona od vertikale prilikom mjerenja inklinometrom na lokaciji morske litice [37]. Iako se očekivalo da će horizontalni pomaci litice biti u smjeru prema moru, rezultati mjerenja inklinometrom su pokazali suprotno. Dok su neispravljivi rezultati mjerenja upućivali na negativan pomak (prema kopnu) u vrijednosti od 20 mm (slika 11a.), ispravljivi rezultati "otkrili su" da je riječ

o pozitivnim pomacima (prema moru) s veličinom od 5 mm (slika 11c.).



Slika 11. Postupak korekcije inklinometarske pogreške otklona od vertikale [37]

Mikkelsen navodi da je čak i pogrešku pozicioniranja na dubinu, koju je najteže ispraviti, minimalno potrebno identificirati, a poželjno ispraviti, sve sa svrhom izbjegavanja netočnih rezultata mjerenja. Stoga se može zaključiti da je moguće prepoznati i ispraviti pogrešku mjerenja i ne proglasiti rezultat mjerenja izmjerenim pomakom. Pri tome znanje i iskustvo interpretatora ima ključnu ulogu.

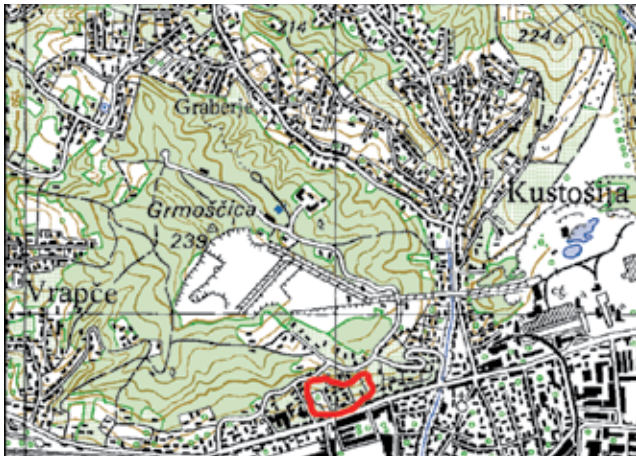
6. Monitoring klizišta Grmošćica u Zagrebu

Klizište Grmošćica u Zagrebu predstavlja dobro dokumentirani primjer monitoringa klizišta u urbanoj sredini. Staro klizište Grmošćica u Zagrebu, slika 12., reaktiviralo se 1993. godine u nepovoljnim hidrološkim uvjetima kao posljedica urbanizacije površine bez odgovarajućeg rješavanja odvodnje. S površinom klizišta oko 2 ha, i dubinom klizanja od 5 do 9 m, u pokretu je ukupno bilo oko 15×10^6 m³ tla.

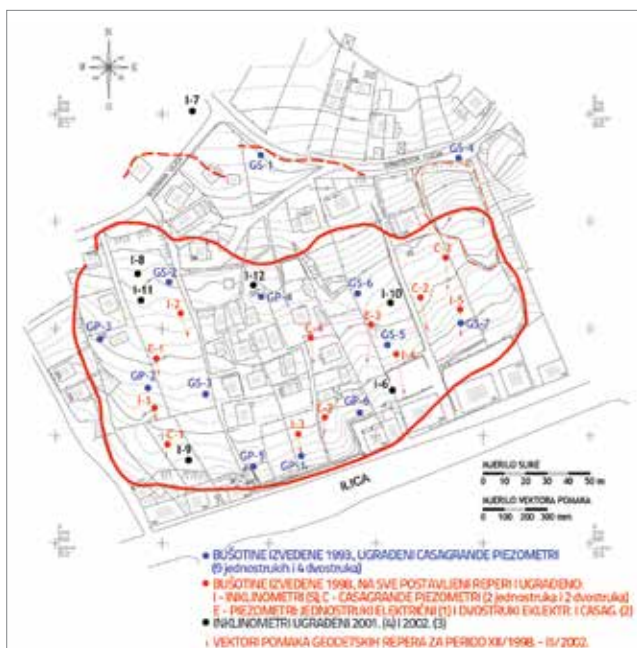
Klizište je nakon reaktiviranja bilo aktivno više od 10 godina prije nego se pristupilo sanaciji. U periodu nakon reaktiviranja izvedeni su geotehnički istražni radovi u dva dijela. Monitoring u sklopu prvog dijela geotehničkih istražnih radova proveden je tijekom 1993., a u sklopu drugog dijela od 1998. do 2000. U prvom dijelu su za potrebe monitoringa ugrađeni piezometri u istražne bušotine, dok je drugi dio uključio izvedbu inklinometara i geodetskih repera te dodatnih piezometara. Kako bi se pratilo stanje na klizištu, monitoring se provodio do 2003. godine.

Glavni projekt prve etape sanacije klizišta završen je 2002. godine [38], a izvedba radova prve etape sanacije je trajala od 2005. do 2007. Tijekom izvedbe radova ugrađeni su geodetski reperi, inklinometri i mjerne čelije na potpornim konstrukcijama radi kontrole ponašanja potpornih konstrukcija u skladu s projektnim predviđanjima. Također se paralelno provodio

monitoring kao kontrola stanja na klizištu. U periodu od listopada 2007. do studenog 2009. proveden je monitoring nakon sanacije koji je potvrdio da je sanacija, odnosno njena prva etapa bila uspješna [39]. Na slici 13. prikazan je raspored mjerne opreme za vrijeme istražnih radova.



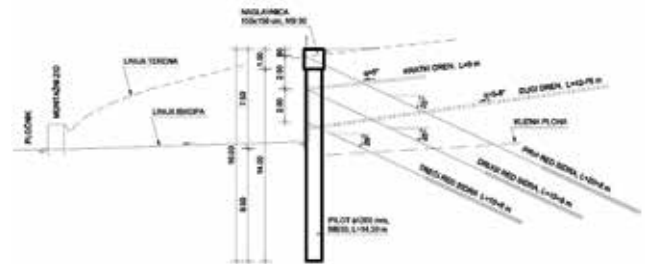
Slika 12. Kontura klizišta Grmošćica na karti izvornog mjerila 1:25 000



Slika 13. Klizište Grmošćica, mjerna oprema ugrađena za vrijeme istražnih radova

Klizište Grmošćica sanirano je izvedbom potpornih konstrukcija (sidrene pilotne stijene), a kao dodatna mjera izvedeni su i bušeni drenovi. Potporna konstrukcija je izvedena od jednog reda pilota promjera 120 cm, na osnovu razmaku 1,50 m s naglavnom gredom dimenzija 1,50x1,50 m. Ukupna visina potpornih konstrukcija je 16,00 m, a dno pilota je minimalno 8 m ispod klizne plohe. Sidra s nagibom 25° na osnovu su razmaku od 1,50 m. Na poziciji 1.1. izvedena su tri reda sidara, a na ostalim potpornim konstrukcijama dva reda.

Gornja sidra su ukupne duljine 28,0 m (20,0 m slobodna, 8,0 m sidrišna dionica). Drugi red sidara je ukupne duljine 23,0 m (15,0 + 8,0). Treći red sidara na poziciji 1.1. duljine je 18 m, (10,0 + 8,0). Sidra su prednapinjana silom od 100 kN. Bušeni drenovi izvedeni su kroz razmake između pilota. Izvedeni su dugi bušeni drenovi, duljine 42-75 m, i kratki bušeni drenovi duljine 9 m. Na slici 14. prikazan je karakteristični poprečni presjek usvojene konstrukcije.



Slika 14. Karakteristični poprečni presjek potporne konstrukcije [38]

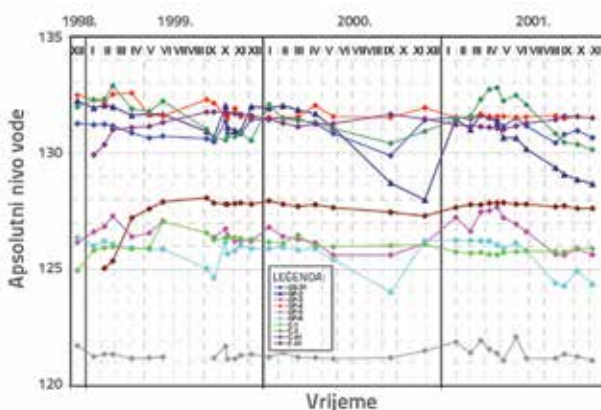


Slika 15. Klizište Grmošćica, mjerna oprema ugrađena za vrijeme i nakon sanacije

6.1. Piezometarska mjerenja

Piezometarska mjerenja na klizištu Grmošćica provedena su s ciljem određivanja pornih tlakova na razini klizne plohe. Mjerenja su provedena u prvom i drugom dijelu istražnih radova. U prvom dijelu istražnih radova u sve su istražne bušotine ugrađeni jednostruki i dvostruki Casagrande piezometri, ukupno 9 jednostrukih i 4 dvostruka (slika 13.). Drugi dio istražnih radova obuhvatio je izvedbu 7 piezometara,

od kojih 2 jednostruka i 2 dvostruka Casagrande, 1 električni i 2 dvostruka kao kombinacije električnog i Casagrande (slika 13.), a u monitoring su bili uključeni i piezometri ugrađeni u prvom dijelu istražnih radova. Prema prikupljenim podacima u prvom dijelu istražnih radova, Ortolan [40] je interpretirao izohipse maksimalnih očekivanih piezometarskih tlakova na razini klizne plohe, te su definirani piezometarski tlakovi na kliznoj plohi mjerodavni za analize stabilnosti. Prema rezultatima mjerenja u piezometrima u drugom dijelu istražnih radova, napravljene su korekcije piezometarskih tlakova. Rezultati piezometarskih mjerenja obavljenih tijekom drugog dijela istražnih radova, za piezometre sa zonom zahvata približno na nivou klizne plohe, prikazani su na slici 16. u obliku dijagrama apsolutna razina vode – vrijeme.



Slika 16. Rezultati piezometarskih mjerenja obavljenih tijekom drugog dijela istražnih radova za piezometre sa zonom zahvata približno na nivou klizne plohe [3]

Pri mjerenjima su kontrolirane prohodnosti piezometara spuštanjem šipke duljine 1 m. Iako je na klizištu za vrijeme prvog dijela istražnih radova bilo znakova pomaka, u smislu proširenja starih pukotina i nastanka novih, svi piezometri ostali su potpuno prohodni do kraja mjerenja. U drugom dijelu istražnih radova ustanovljena je neprohodnost pojedinih piezometara, čime su dobiveni vrijedni podaci o dubinama klizanja. Opažanja piezometara planiralo se nastaviti i za vrijeme i nakon sanacije, međutim do završetka radova sanacije ostao je sačuvan samo manji broj ugrađenih piezometara, a većina ih je postala neprohodna.

6.2. Geodetska opažanja

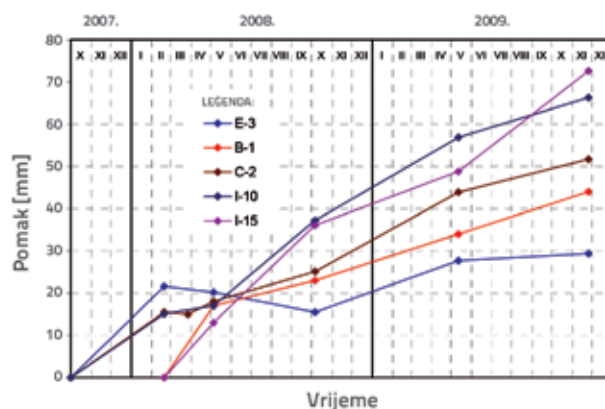
Geodetska opažanja na klizištu Grmoščica provedena su s ciljem određivanja horizontalnih i vertikalnih pomaka kliznog tijela i potpornih konstrukcija. S geodetskim opažanjima pomaka kliznog tijela započelo se u drugom dijelu istražnih radova kada su geodetski reperi ugrađeni u temelje piezometara i inklinometara (slika 13.). Opažanja klizišta su nastavljena i za vrijeme izvedbe potpornih

konstrukcija kao i nakon izvedbe radova sanacije. Za vrijeme izvedbe sanacije reperi su ugrađeni i na potporne konstrukcije (slika 15.).

U vremenu od 1998. do 2002. rađena su GPS mjerenja, a razlog za odabir GPS mjerenja bile su teškoće s postavljanjem stabilne baze s koje bi se obavljala mjerenja. GPS opažanja rađena su prijamnicima deklarirane točnosti: horizontalno ± 5 mm + 1 ppm, a vertikalno ± 10 mm + 1 ppm, za mjerenja vektora od 1 km u trajanju 20 minuta uz prijam signala s pet satelita. Godine 2002. prešlo se na terestrička mjerenja totalnom mjernom stanicom. Razlog prijelaza na terestrička mjerenja bili su problemi s GPS mjerenjima prouzročeni smetnjama nastalim zbog stanja raslinja i meteoroloških uvjeta pri pojedinim mjerenjima.

Prosječne brzine pomaka pojedinačnih repera u drugom dijelu istražnih radova iznosile su 20–60 mm/god. Iz rezultata geodetskih opažanja se zaključilo da se klizište ne ponaša kao jedinstveno klizno tijelo, već su veličine pomaka na pojedinim površinama različite. Najveći pomaci izmjereni su na istočnoj površini klizišta, a najmanji na zapadnoj.

Opažanja kliznog tijela za vrijeme radova pokazala su da izvedba sanacijskih mjera nije bitno utjecala na pomake kliznog tijela, jer su se pomaci za vrijeme sanacije događali približno istom brzinom kao i prije sanacije, dok je monitoringom kliznog tijela nakon sanacije utvrđeno da su se pomaci znatno usporili. Brzine pomaka nakon sanacije iznosile su na zapadnom dijelu klizišta 12–15 mm/god, a na istočnom dijelu koji nije u potpunosti saniran 13–40 mm/god. Za repere na klizištu postignuta točnost određivanja pomaka procijenjena je na ± 5 mm položajno i visinski. Na slici 17. prikazani su rezultati geodetskih opažanja u obliku dijagrama pomak-vrijeme, i to za pomake istočnog dijela klizišta nakon sanacije.



Slika 17. Rezultati geodetskih opažanja pomaka istočnog dijela klizišta nakon sanacije [3]

Geodetska opažanja potpornih konstrukcija provedena su za vrijeme i nakon izvedbe sanacije i to na 17 repera (slika 15). Postignuta točnost određivanja pomaka na osnovi geodetskih opažanja nakon sanacije procijenjena je za repere na potpornim konstrukcijama na ± 2 mm smjer sjever-jug i

visinski, a na ± 5 mm za smjer istok-zapad. Procjena točnosti određivanja pomaka dana je na osnovi analize rezultata uz odbacivanje "nemogućih" pomaka: uzduž potpornih konstrukcija, suprotno smjeru klizanja i izdizanja repera. Dane vrijednosti su maksimumi izračunanih "kontra" pomaka između dva uzastopna mjerenja.

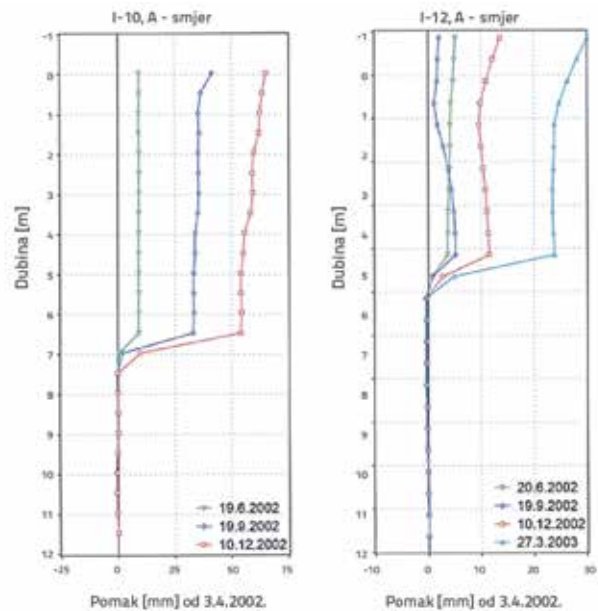
6.3. Inklinometarska mjerenja

Inklinometarska mjerenja su na klizištu Grmošćica provedena radi određivanja horizontalnih pomaka kliznog tijela i potpornih konstrukcija te radi određivanja dubine klizanja. Postignuta točnost određivanja horizontalnih pomaka iz uzastopnih mjerenja u inklinometrima procijenjena je na ± 2 mm za inklinometre na klizištu, a na ± 1 mm za inklinometre u potpornim konstrukcijama. Procjena točnosti određivanja horizontalnih pomaka prema mjerenjima u inklinometrima napravljena je na isti način kao i kod repera.

Prvi inklinometri su ugrađeni u drugom dijelu istražnih radova kada je u više navrata ugrađeno 12 inklinometara (slika 13). Naime, zbog pomaka klizišta pojedini inklinometri postajali su neprohodni za daljnja mjerenja pa su kao zamjena ugrađivani novi. Na slici 18. prikazana su mjerenja u inklinometrima I-10 i I-12. U oba inklinometra jasno se zapaža dubina klizanja.

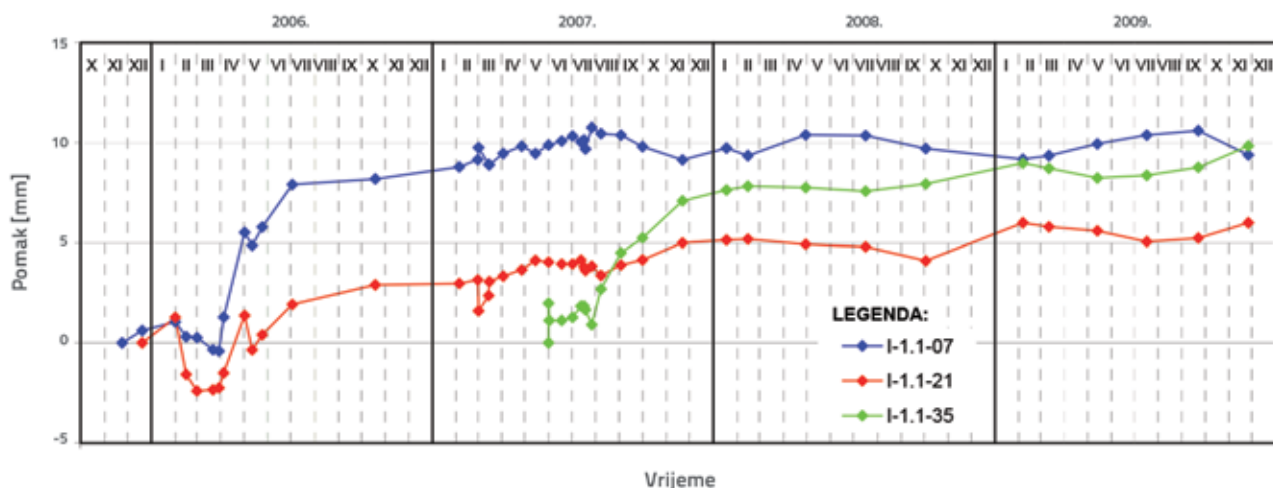
Iz rezultata mjerenja u inklinometrima zapaženo je da se klizište ne ponaša kao jedinstveno klizno tijelo, što je pokazano i geodetskim opažanjima. Najveći pomaci u inklinometrima, u drugoj fazi istražnih radova, izmjereni su na istočnoj površini klizišta kao i kod geodetskih opažanja. Izračunana prosječna brzina pomaka iznosila je 28-109 mm/god. Za vrijeme radova sanacije inklinometri su ugrađivani u pilote potpornih konstrukcija, a nakon završetka ugrađeni su i na površini klizišta (slika 15). Prema obavljenom monitoringu inklinometara, na klizištu je i nakon sanacije bilo pomaka. Najveći pomaci izmjereni su u inklinometru na istočnom dijelu klizišta na kojem nikakvi radovi sanacije nisu izvedeni i iznosili su 36 mm/god. Na zapadnom dijelu klizišta prosječna brzina

pomaka mjerenih u inklinometru iznosila je 9 mm/god, a u središnjem dijelu 4.6 mm/god, što je znatno manje nego prije sanacije.

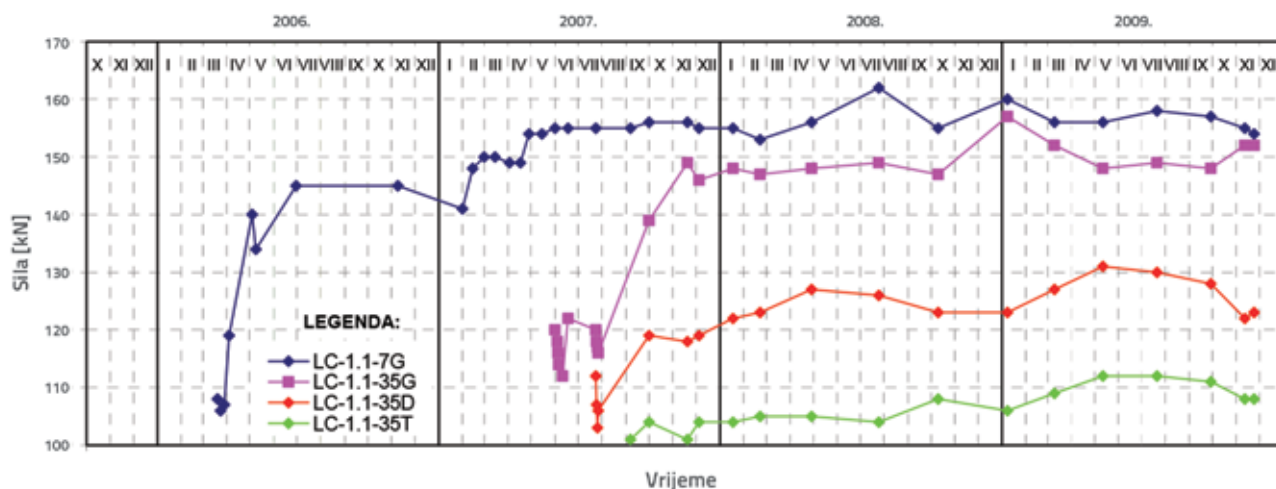


Slika 18. Mjerenja u inklinometrima I-10 i I-12 po dubini [3]

Na slici 19. prikazani su pomaci u vremenu izmjereni u inklinometrima ugrađenim u potpurnu konstrukciju 1.1 od početka gradnje i mjerenja, do kraja monitoringa (brojevi 7, 21 i 35 odgovaraju rednom broju pilota u koji su ugrađeni, slika 15.). Potporna konstrukcija 1.1, slika 15., najzanimljivija je za prikazivanje zato jer osigurava najvišu denivelaciju, sadrži tri reda sidara (ostale konstrukcije po dva reda) i izvedba je rađena po dijelovima. Na slici 19. se vidi da su pomaci mjereni u inklinometrima od listopada 2007. (kraj sanacije) do kraja mjerenja u granicama točnosti mjerenja (osim I-1.1-35 ugrađen u dijelu konstrukcije koji je zadnji završen – rujun 2007. i još neko vrijeme je pokazivao pomake, a od kraja 2008. do kraja 2009. i on je bez pomaka).



Slika 19. Pomaci u vremenu, izmjereni u inklinometrima ugrađenim u potpurnu konstrukciju 1.1 [3]



Slika 20. Sila u vremenu, izmjerene u mjernim ćelijama sidara potporne konstrukcije 1.1 [3]

6.4. Mjerenja sila u sidrima potpornih konstrukcija

Mjerenja sila u sidrima potpornih konstrukcija rađena su mjernim ćelijama ugrađenim na glave sidara. Točnost očitavanja sila u sidrima preko mjernih ćelija bila je ± 1 kN, što je najmanja vrijednost koja se prikazuje na digitalnom prikazu na mjernom uređaju.

Na slici 20. prikazane su promjene sila izmjerenih u mjernim ćelijama ugrađenim u potpornu konstrukciju 1.1, od ugradnje do kraja monitoringa (brojevi 7 i 35 odgovaraju rednom broju pilota u koji su ugrađeni, slika 15., a slova G, D i T označavaju gornji, drugi odnosno treći red sidara). Vidi se da su promjene veličina sila nakon gradnje znatno manje u odnosu na promjene koje su se događale pod utjecajem gradnje (iskopi, prednapinjanje susjednih sidara u istom ili drugom redu).

Usporedbom slika 19. i 20. primjećuje se da ni pomaci ni sile u sidrima nemaju tendenciju porasta nakon izvedene sanacije. Provedeni monitoring dao je odgovore na postavljene zadatke koji uključuju procjenu uspješnosti izvedenih radova prve etape sanacije, određivanje potrebe za izvedbom daljnjih sanacijskih mjera te određivanje mogućnosti gradnje na površini klizišta.

7. Zaključak

Da bi se identificirali, a potom uklonili ili umanjili, potencijalni rizici pri monitoringu klizišta u urbanim sredinama, potrebno je definirati svrhu mjerenja, mjerne veličine, mjernu opremu i rezultate mjerenja. Monitoring na klizištima se provodi u svrhu istraživanja, kada se klizište već aktiviralo, ili u svrhu predviđanja i upozoravanja, kada postoje naznake

da bi se klizište moglo aktivirati. Monitoring za potrebe istraživanja u širem smislu podrazumijeva monitoring za vrijeme istražnih radova, za vrijeme sanacije klizišta te nakon sanacije klizišta. Mjerne veličine koje se obuhvaćaju monitoringom su vertikalni i horizontalni pomaci kliznog tijela i potpornih konstrukcija kao sanacijskih mjera. Određivanje pomaka se postiže daljinskim opažanjima, geodetskim opažanjima te geotehničkim opažanjima (inklinometri, ekstenzometri, deformetri i mikrometri, *crackmetri*, lančani deflektometri, optička vlakna, klinometri). Ostale bitne veličine za razumijevanje ponašanja klizišta uključuju porne tlakove (piezometri), razine podzemne vode (bunari za opažanje i geofizičke metode) te sile u sidrima potpornih konstrukcija (mjerne ćelije). Odabir mjerne opreme potrebno je prilagoditi svrsi mjerenja, mjernim veličinama i očekivanim rezultatima. Na rezultate mjerenja utjecaj imaju preciznost i točnost, odnosno pogreška kao matematički ekvivalent točnosti. Ključnu ulogu u procesu interpretacije rezultata mjerenja ima znanje i iskustvo interpretatora koji potencijalnu pogrešku mora identificirati i ispraviti. Klizište Grmošćica u Zagrebu predstavlja primjer dobro dokumentiranog klizišta u urbanoj sredini. Ponašanje klizišta je promatrano kroz dva dijela monitoringa za vrijeme istražnih radova, te kroz monitoring za vrijeme i nakon sanacije klizišta. U sklopu istražnih radova monitoringom su dobivene informacije o karakteristikama klizišta koje su omogućile stvaranje pouzdane podloge za projekt sanacije. Monitoring za vrijeme radova sanacije je pokazao da nema utjecaja izvedbe potpornih konstrukcija na povećanje brzine pomaka, dok je monitoring klizišta nakon sanacije potvrdio uspješnost izvedenih mjera sanacije.

LITERATURA

- [1] Morgenstern, N.R., Martin, C.D.: Landslides: Seeing the Ground, Keynote lecture, *Proc. of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, Xi'an, pp. 3-23, 2008.
- [2] Morgenstern, N.R.: Performance in Geotechnical Practice: Inaugural Lumb Lecture, *Transactions Hong Kong Institute of Engineers*, 7 (2), pp. 1-15, 2000.
- [3] Mihalinec, Z.: *Monitoring klizišta u urbanim sredinama*, Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [4] Moore, D.P., Imrie, A.S., Baker, D.G.: Rockslide Risk Reduction Using Monitoring, *Proc. Can. Dam Safety Assn. Annual Meeting*, Whistler, 1991.
- [5] Kovačević, M.S.: The Observational Method and the Use of Geotechnical Measurements, *Proc. of the 13th ECSMGE*, Prag, pp. 575-582, 2003.
- [6] Kovačević, M.S., Szavits-Nossan, V.: Interactive Design - Croatian Experience, *13th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering*, Ljubljana, pp. 451-455, 2006.
- [7] Kovačević, M.S., Arapov, I., Lušo, P., Kuželički, R.: Povratne numeričke analize u tunelu Pečine, 4. *Savjetovanje HGD-a Ojačanje tla i stijena*, Opatija, pp. 143-152, 2006.
- [8] Mihalinec, Z., Škevin, J., Kovačević, M.S.: Calculated and Measured Horizontal Deformations of High Reinforced Embankment, *Proc. of the 11th International Conference of IACMAG*, Torino, pp. 349-355, 2005.
- [9] Cotecchia, V.: Experience Drawn from the Great Ancona Landslide of 1982., *The Second Hans Cloos Lecture, Bulletin of Eng. Geology and the Environment*, 65 (1), pp. 1-41, 2006.
- [10] Eberhardt, E., Watson, A.D., Loew, S.: Improving the Interpretation of Slope Monitoring and Early Warning Data Through Better Understanding of Complex Deep-seated Landslide Failure Mechanisms, *Proc. of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, Xi'an, pp. 39-51, 2008.
- [11] Savvaidis, P.D.: Existing Landslide Monitoring Systems and Technique, *From Stars to Earth and Culture*, pp. 242-258, 2003.
- [12] The ClimChAlp partnership: *Slope Monitoring Methods - A State of the Art Report*, Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the Alpine Space (ClimChAlp), Work Package 6, 179 p., Munich, 2008.
- [13] Calcaterra, D., Ramondini, M., Calò, F., Longobardi, V., Parise, M., Galzerano, C.M.: DInSAR Techniques for Monitoring Slow-moving Landslides, *Proc. of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, Xi'an, pp. 1095-1101, 2008.
- [14] Cascini, L., Peduto, D., Fornaro, G., Lanari, R., Zeni, G., Guzzetti, F.: Spaceborn Radar Interferometry for Landslide Monitoring, *The First Italian Workshop on Landslides, Rainfall - Induced Landslides*, Napoli, pp. 138-144, 2009.
- [15] Tarchi, D., Casagli, N., Fanti, R., Leva David, D., Luzi, G., Pasuto, A., Pieraccini, M., Silvano, S.: Landslide Monitoring by Using Ground-based SAR Interferometry: an Example of Application to the Tesina Landslide in Italy, *Engineering geology*, 68, pp. 15-30, 2003.
- [16] Canuti, P., Casagli, N., Catani, F., Falorni, G., Farina, P.: Integration of Remote Sensing Techniques in Different Stages of Landslide Report (Chapter 18), *Progress in Landslide Science*, eds. K. Sassa, H. Fukuoka, F. Wang & G. Wang, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 251-260, 2007.
- [17] Shao-tang, L., Zhi-wu, W.: Choice of surveying methods for landslide monitoring, *Proc. of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, Xi'an, pp. 1211-1216, 2008.
- [18] Yen, J., Chen, K., Chang, C., Boerner W.: Evaluation of earthquake potential and surface deformation by Differential Interferometry, *Remote Sensing of Environment*, 112, pp. 782-795, 2008.
- [19] Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellan, A., Derron, M., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A.: Use of LIDAR in landslide investigations: a review, *Nat Hazards*, 61, pp. 5-28, 2012.
- [20] Gajski, D., Fiedler, T., Krtalić, A.: Classification and Filtering of Airborne Topographic LIDAR Data. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 34, pp. 100-104, 2003.
- [21] Kraus, K., Pfeifer, N.: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanning data, *SSPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, pp. 193-203, 1998.
- [22] Brúckl, E., Brunner, F.K., Kraus, K.: Kinematics of Deep-seated Landslides Derived from Photogrammetric, GPS and Geophysical Data, *Engineering Geology*, 88 (3-4), pp. 149-159, 2006.
- [23] Ortolan, Ž., Mihalinec, Z., Stanić, B., Pleško, J.: Application of Repeated Photogrammetric Measurements at Shaping Geotechnical Models of Multi-layer Landslides, *Proc. of the 6th Int. Symposium on Landslides*, Christchurch, pp. 1685-1691, 1992.
- [24] US Army Corps of Engineers: *Structural Deformation Surveying* (EM 1110-2-1009), 292 p., Washington, 2002.
- [25] Stanić, B., Ortolan, Ž., Mikulić, J., Mihalinec, Z.: Stanje klizišta Zalesina, *Građevinar*, 5, pp. 203-206, 1990.
- [26] Nonveiller, E., Šuklje, L.: Landslide Zalesina, *Geotechnique*, 5, pp. 143-153, 1955.
- [27] Cardellini, S., Osimani, P.: Living With Landslide: The Ancona Case History and Early Warning System, *Open Workshop within the frame of EU FP7 'SafeLand' Project*, Vienna, pp. 61-66, 2010.
- [28] Gili, J.A., Corominas, J., Rius, J.: Using Global Positioning System Techniques in Landslide Monitoring, *Engineering Geology*, 55, pp. 167-192, 2000.
- [29] Dunnycliff, J.: *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, John Wiley & Sons, New York, 1988.
- [30] Steiner, P., Yetman, R.: New Instruments Improve Site Characterization with Time Based Instruments, *Proc. of the Regional Symposium of the ISRM, Eurock 2009, Cavtat*, pp. 577-582, 2009.
- [31] Angeli, M.G., Pasuto, A., Silvano, S.: A Critical Review of Landslide Monitoring Experience, *Engineering Geology*, 55, pp. 133-147, 2000.
- [32] Solexpert: *Chain Deflectometer*, Geotechnics Product List; <http://www.solexperts.com> (preuzeto 03.06.2013.)
- [33] Damiano, E., Olivares, L., Minardo, A., Greco, R., Zeni, L., Picarelli, L.: Advanced monitoring criteria for precocious alerting of rainfall-induced flowslides, *Proc. of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, Xi'an, pp. 1157-1163, 2008.
- [34] Shi, B., Sui, H., Zhang, D., Wang, B., Wei, G., Piao, C.: Distributive monitoring of the slope engineering, *Proc. of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, Xi'an, pp. 1283-1288, 2008.
- [35] Slope Indicator: *Applications Guide*, Second Edition, Slope Indicator Company, 1994.

- [36] Ortolan, Ž.: *Formiranje prostornog inženjerskogeološkog modela dubokog klizišta s više kliznih ploha*, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1996.
- [37] Mikkelsen, P.E.: *Advances in inclinometer Data Analysis, Proceedings of the 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, Oslo, pp. 555-567, 2003.
- [38] Mihalinec, Z.: *Sanacija klizišta 'Grmoščica' - Zagreb, Glavni projekt radova prve etape sanacije*, Zavod za geotehniku IGH, oznaka projekta 2230-1-220481/02-4R2, Zagreb, 2002.
- [39] Mihalinec, Z.: *Sanacija klizišta 'Grmoščica' - Zagreb, Monitoring klizišta nakon završetka I etape sanacije, Izvješće o provedenom monitoringu (listopad 2007.-studenj 2009.)*, Zavod za gospodarenje građevinama, Institut IGH, broj evidencije 2230-5/10, Zagreb, 2010.
- [40] Ortolan, Ž., Mihalinec, Z.: *Sanacija klizišta 'Grmoščica', Geotehnički elaborat s prijedlogom mjera sanacije, Knjiga 1: Inženjerskogeološki elaborat, Knjiga 3: Istražni radovi*, Zavod za geotehniku IGH, oznaka evidencije 2230-1-213491/93, Zagreb, 1995.