

Analiza gibanja klizišta Kostanjek na temelju GNSS podataka

Kvaternik, Gloria

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:340698>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-04**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Preddiplomski studij geološkog inženjerstva

ANALIZA GIBANJA KLIZIŠTA KOSTANJEK NA TEMELJU GNSS PODATAKA

Završni rad

Gloria Kvaternik

G2240

Zagreb, 2023



Sveučilište u Zagrebu
Dokumentski centar i služba za kvalitetu
101 10000 Zagreb, Pločnikova 8, P.P. 390

OBRAZAC SUSTAVA UPRAVLJANJA KVALITETOM

KLASA: 602-01/23-01/54
URBROJ: 251-70-15-23-2
U Zagrebu, 6. 9. 2023.

Gloria Kvaternik, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/54, URBROJ: 251-70-15-23-1 od 22. 5. 2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

ANALIZA GIBANJA KLIZIŠTA KOSTENJAK NA TEMELJU GNSS PODATAKA

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv. prof. dr. sc. Martin Krkač nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Martin Krkač

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc. dr. sc. Zoran Kovač

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

Oznaka: OB 8.5.-1 SRF-1-13/0

Stranica: 1/1

Čuvanje (godina) Trajno

ANALIZA GIBANJA KLIZIŠTA KOSTENJAK NA TEMELJU GNSS PODATAKA

Gloria Kvaternik

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Završni rada sastoji se od općenitih podataka o klizištu Kostanjek kao i povijesti i nastanku samog klizišta. Drugi dio završnog rada fokusiran je na prikaz podataka GNSS-a 08. Podaci su prikazani pomoću grafova koji prikazuju pomake S-J, I-Z, vertikalni i horizontalni pomak kao i brzini kretanja. Na temelju podataka zaključeno je kako se klizište kreće prema jugo-jugozapadu uz povremena odstupanja pri kutu od 188°. Tijekom gibanja bilo je 8 perioda s većim brzinama kretanja klizišta. Uz izračun pomaka izračunate su i pogreške prilikom mjerenja koje u horizontalnom smjeru iznose $\pm 3,11$ a u vertikalnom smjeru $\pm 6,71$. Na temelju podataka pretpostavljeno je kako do bržih kretanja klizišta dolazi u hladnijim i kišnijim razdobljima godine te bi tada trebalo očekivati mogućnost nastanka veće štete i bit spremni za sanaciju .

Ključne riječi: klizište, klizište Kostanjek, GNSS sustav

Završni rad sadrži: 17 stranice, 1 tablica, 12 slika, 0 priloga, i 35 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Martin Krkač, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Martin Krkač, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Snježana Mihalić Arbanas, redovna profesorica RGNF
Dr. sc. Sanja Bernat Gazibara, docentica na RGNF

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆENITO O KLIZIŠTIMA	2
3. KLIZIŠTE KOSTANJEK	4
4. ANALIZA GIBANJA KLIZIŠTA KOSTANJEK.....	9
4.1.1. Podaci dobiveni praćenjem instrumentima	9
4.1.2. Pogreške prilikom mjerenja	13
5. ZAKLJUČAK.....	16
6. LITERATURA	17

POPIS SLIKA

Slika 3-1 Položaj klizišta Kostanjek.....	4
Slika 3-2 Raspored senzora i senzorskih mreža integriranog „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek" (Krkač, 2015)	8
Slika 3-3 Jedna od 15 permanentnih GNSS stanica „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek" (Krkač, 2015).....	8
Slika 4-1 Graf izmjerenih i prosječnih pomaka za dH, dE i dN.....	10
Slika 4-2 Tlocrtni prikaz kretanja klizišta Kostanjek	11
Slika 4-3 Graf prikazuje 3D pomak.....	12
Slika 4-4 Graf brzina	13
Slika 4-5 Grafički prikaz pogreške za pomak sjever-jug (dN).....	14
Slika 4-6 Grafički prikaz pogreške za vertikalni pomak (dH).....	15
Slika 4-7 Grafički prikaz pogreške za pomak istok-zapad (dE).....	15

POPIS TABLICA

Tablica 1 Prikazuje razdoblja većih brzina kretanja i najveće brzine kretanja	13
---	----

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
dN	mm	pomak sjever-jug; - jugu, + sjeveru.
dE	mm	pomak istog zapad; + istok, - zapad
dH	mm	vertikalni pomak; - prema dolje (usjedanje), + prema gore (izdizanje)

1. UVOD

Klizišta mogu nastati u različitim vrstama materijala, mogu imati različite mehanizme i brzine gibanja te različita stanja aktivnosti (Cruden i Varnes, 1996; Hungr i dr., 2014), odnosno kinematiku klizanja. Poznavanje kinematike klizanja omogućava razumijevanje sila koje uzrokuju gibanje, promjene u stanju naprezanja, mehanička svojstva materijala te predviđanje gibanja klizišta u budućnosti (Schulz i dr., 2017). Razumijevanje kinematike nužno je i kod sporih klizišta, budući da ona ponekad mogu značajno ubrzati, rezultirajući velikom materijalnom štetom i ljudskim žrtvama (Lacroix i dr., 2020), što je vrlo važno pri upravljanju u kriznim situacijama. Kako bi se što bolje razumjela kinematika klizišta bitno je praćenje, odnosno monitoring klizišta (Angeli i dr., 2000). Jedno od klizišta na kojemu se vrši monitoring zbog nemogućnosti sanacije je klizište Kostanjek, najveće klizište u Republici Hrvatskoj. Površina ovog klizišta iznosi oko 1 km², što je otprilike 1000 puta veća površina od prosječne površine (730 m²) klizišta u Gradu Zagrebu (Bernat Gazibara i dr., 2019). Klizište je prvi puta aktivirano 1963. godine kao posljedica iskapanja materijala u otvorenom kopu lapora koji je pripadao tvornici cementa 'Sloboda' (Stanić i Noveiller, 1996). Klizište Kostanjek je od svoje aktivacije do danas uzrokovalo brojne štete na okolnim građevinama i infrastrukturi te je zbog toga u razdoblju 2011-2013. godine u okviru znanstveno-istraživačkog bilateralnog hrvatsko-japanskog SATREPS FY2008 projekta (Mihalić i Arbanas, 2012) 'Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje posljedica klizanja i poplava u Hrvatskoj' postavljan je Opservatorij za praćenje klizišta Kostanjek Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta.

Cilj ovog završnog rada je prikazati rezultate praćenja gibanja klizišta Kostanjek pomoću jednog uređaja GNNS 08 od aktivacije klizišta do danas te na temelju podataka pretpostaviti razdoblja veće opasnosti.

2. OPĆENITO O KLIZIŠTIMA

Klizanje je proces kretanja stijene ili tla (ili oboje) niz padinu (Cruden, 1991; Highland i Bobrowky, 2008) dok je klizište pojava koja nastaje procesom klizanja. Gubitak stabilnosti na padini rezultira klizanjem tla na padini odnosno pojavom klizišta. Klizanje se često koristi kao širi pojam opisivanja pokretanja tla na padini pa se tako tip klizišta određuje na temelju brzine kretanja, volumena pokrenute mase, duljini transporta pokrenute mase te opasnosti od samoga klizišta i mogućnost njegove sanacije. Razlikuje se pet osnovnih tipova kretanja (mehanizama pokreta) a to su odronjavanje, prevrtanje, klizanje, bočno razmicanje ili tečenje.

Poznavanje obrazaca gibanja omogućava bolje razumijevanje procesa klizanja (Terzaghi, 1950). Jedna od klasifikacija klizanja zasniva se na brzini klizanja. Prema klasifikaciji Cruden i Varnes (1996) klizanje može biti ekstremno sporo (brzine manje od 16 mm/god) do ekstremno brzo (brzine veće od 5 m/s). Brza klizišta poput debritnih tokova, zemljanih tokova, odrona stijena i klizanja umjetnog materijala ili jalovine predstavljaju najopasnija i najrazornija klizišta (Hungar, 1995). Ekstremno spora, vrlo spora i spora klizišta također mogu nepovoljno utjecati na funkcionalnost građevina, a u određenim slučajevima mogu se ubrzati i time izazvati značajnu štetu (Schuster i Highland, 2007) i ljudske žrtve (Massey i dr., 2010). Osim podjele s obzirom na brzinu klizanja, Cruden i Varnes (1996) klasificirali su klizišta i na temelju stanja aktivnosti klizišta. Stanja aktivnosti klizišta također su definirana na osnovi brzine gibanja klizišta. Kod neaktivnih klizišta, svrha praćenja gibanja je određivanje vremena ponovnog aktiviranja ili potvrda da se radi o trajno umirenom ili stabiliziranom klizištu koje je uspješno sanirano (Baroň i dr., 2012).

Najčešći uzroci klizanja tla su promjena razine podzemnih voda, promjena površinskih tokova vode, tektonski poremećaji i potresi te neprikladni zahvati u tlu. Povećana količina oborina utjecati će na saturaciju površinskoga sloja te će daljnje procjeđivanje uz eroziju uzrokovati i porast djelovanja sila na padinu kao i porast razine podzemne vode. Erozijski vodenim tokovima ili djelovanjem valova dodatno može potkopati padinu i znato pridonijeti narušavanju stabilnosti padine. Nastanak klizišta nešto rjeđe mogu uzrokovati potresi. Potresi magnitude veće od 4 mogu uzrokovati nastanak klizišta kao posljedica potresanja i likvefakcije (proces u kojem se materijal ponaša kao tekućina). Iako su klizišta prirodni procesi u današnje vrijeme brojne pojave klizišta mogu se javiti i kao posljedica ljudskog djelovanja na okoliš. Ljudska aktivnost je uz oborine, potrese i eroziju najčešći inicijator aktivacije klizišta. Tako recimo uklanjanje vegetacije ili nedostatak vegetacije zbog požara

pospješuje procjeđivanje vode u podzemlje kao i samu eroziju površine padine. Ljudi zbog potrebe gradnje mijenjaju okoliš znatno brže i intenzivnije nego što to rade prirodni procesi. Opterećuju padine nasipavanjem nestabilnih materijala pri vrhu dok stabilnost padine narušavaju iskopima pri dnu padine. Često građevinske radove prati i potreba za promjenom razine i režima podzemne vode kao, promjena razine vode u akumulacijama te promjena režima riječnih i morskih struja izgradnjom brana, preljeva i lukobrana. Također aktivaciju klizišta ili čak stvaranje klizišta mogu uzrokovati brojne umjetne vibracije koje se šire od gradilišta poput vibracija miniranja ili vibracija uzrokovanih bušecim strojevima. Potrebno je na vrijeme uočiti klizišta kako bi ih bilo što lakše pravilno sanirati ili spriječiti njihov nastanak. Kako bi sanacija klizišta bila što bolja također je potrebno poznavati preduvjete nastanka klizišta kao i inicijatore klizišta. Zbog svoje kompleksnosti i potrebe za što efektivnijom sanacijom na klizištima se provode brojna inženjerskogeološka istraživanja čiji je cilj jasno definirati i opisati mehanizme klizanja, dimenzije klizišta, aktivnost klizišta, brzinu gibanja, dijelove klizišta, te vrstu pokrenutog materijal i njegovu vlažnost.

U slučajevima kada sanacija klizišta nije moguća vrši se monitoring kretanja klizišta. Kontinuirana praćenja (monitoring) daju rezultate čija analiza gibanja klizišta te odnos između uzroka i gibanja klizišta čine osnovu za razvoj sustava ranog upozoravanja (Mihalić i dr., 2010; Mihalić Arbanas i dr., 2013b; Krkač i dr., 2014c), a u slučaju klizišta Kostanjek mogu poslužiti i za novelaciju projekta sanacije klizišta (Krkač i dr., 2013b), budući da postojeći projekt sanacije nije racionalan prvenstveno zbog previsoke cijene i predviđenog dugotrajnog izvođenja radova Monitoring klizišta definiran je kao opažanje određene građevine ili pojave koja se sustavno ponavlja (Krkač, 2015). Parametre praćenja klizišta čine pojave, odnosno veličine, vezane za klizanje mase tla ili stijena niz padinu koje se mogu mjeriti u vremenu. Parametri se kroz vrijeme mogu pratiti na nekoliko načina primjerice pomoću inklinometarskih mjerenja jednom godišnje ili automatizirano u intervalima od jedne sekunde (Olalla, 2004). Integrirani sustavi praćenja prema Schäferu (2008) obuhvaćaju različite vrste senzora kao što su geodetski, geotehnički i meteorološki senzori. Odabir optimalne tehnologije za praćenje klizišta ovisi o ciljevima praćenja klizišta, koje Stumpf i dr. (2011) grupiraju na sljedeći način: (1) otkrivanje klizišta; (2) brzo određivanje značajki klizišta i kartiranje klizišta; te (3) dugoročno praćenje klizišta i uzorka klizanja. Integrirani sustavi praćenja, koji se odnose na dugoročno praćenje klizišta i uzroka klizanja, uspostavljaju se na klizištima od posebne važnosti za određenu zajednicu.

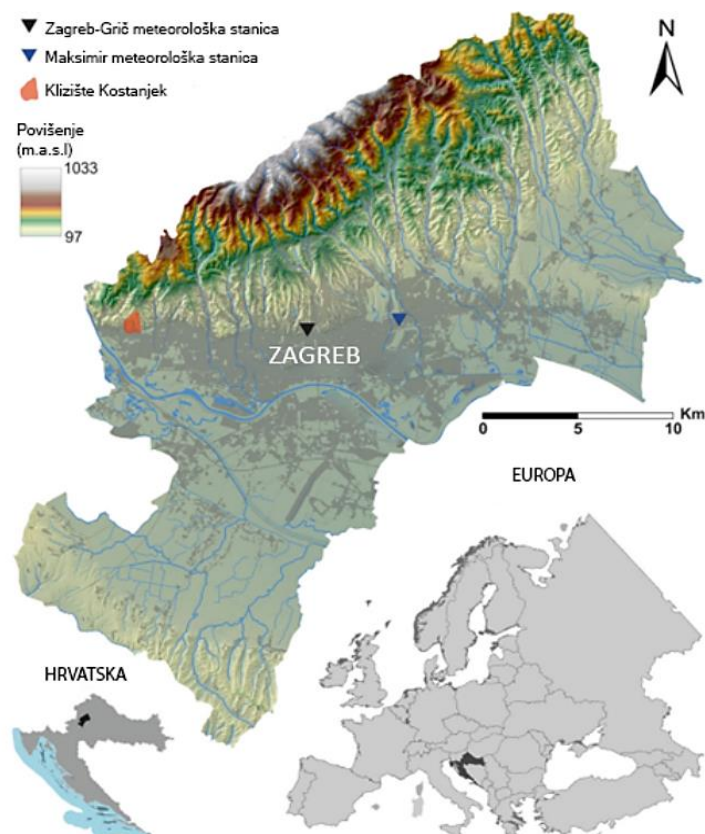
Ubrzanje klizanja je indikator koji ukazuje na mogućnost pojave sloma te ga je važno sustavno opažati. Na temelju podataka prikupljenih praćenjem, rezultata analiza povijesnih

podataka o klizanju, kao i analiza morfologije klizišta moguće je procijeniti granične vrijednosti pomaka i brzina klizanja za određene lokacije i predvidjeti fazu sloma u svrhu ublažavanja posljedica od klizanja.

3. KLIZIŠTE KOSTANJEK

Klizište Kostanjev nalazi se na području Podsljemenske zone Zagreba (slika 3-1) i zauzima površinu oko 1 km². Zahvaćeni volumen područja iznosi 32 x 10⁶ m³ i zahvaća područje do 90 m dubine, prema modelu iz 1966. godine koji su interpretirali Ortolan i Pleško, te na temelju toga spada u kategoriju velikih i dubokih klizišta.

Materijali u klizanju obuhvaćaju naslage sarmata te donjeg i gornjeg panona, koje se uglavnom sastoje od lapora niske do vrlo niske čvrstoće. Radi se o translacijskom klizištu čija je klizna ploha formirana u laminiranom sarmatskom laporu za koji je karakteristična izmjena vrlo tankih svijetlih i tamnih lamina poznatih kao varve (prema Weinheimer i Biondi 2003). Pokrenuta masa iznad sarmatski sedimenata sastoje se od donjopanonske gline i lapora s tankim vapnenačkim slojevima i gornjopanonski masivnim glinovitim laporim. Klizište se od svoje aktivacije 1963. godine kreće ekstremno sporo do vrlo sporo prema klasifikaciji Cruden i Varnes (1996). Nastanak duboko smještenog klizišta uzrokovala je aktivnosti cementare „Sloboda“ nedaleko od klizišta. Cementara je za potrebe proizvodnje



Slika 3-1 Položaj klizišta Kostanjev

vršila iskapanja u kamenolomu lapora koji se nalazio u nožnom dijelu padine što je uzrokovalo destabilizaciju i aktiviranje klizišta. Destabilizaciji padine također je pridonijela i tehnika miniranja koja je bila korištena za dobivanje materijala iz kamenoloma lapora i kamenoloma vapnenca koji se nalazio otprilike 1 km sjeverno od gornjeg dijela klizišta. Ubrzo nakon početka miniranja pojavila su se prva oštećenja na tvorničkim zgradama i drugim objektima, uključujući brojna slijeganja i pukotine (Ortolan i Pleško, 1992; Stanić i Nonveiller, 1996). Nakon nastanka oštećenja provedena su geotehnička istraživanja kojima je donesen zaključak da je zbog iskopa lapora došlo do bubrenja što je prihvaćeno kao najvjerojatniji uzrok oštećenja na objektima. Nekoliko godina kasnije Nonveiller (1976) je zaključio da je došlo do klizanja zbog eksploatacije lapor kao i metode eksploatacije (miniranje). Novo doneseni zaključak rezultirao je prestankom eksploatacije i zatvaranjem cementare. Klizište je kroz 59 godina aktivnosti (od 1963. do danas) prouzročilo brojna oštećenja na obiteljskim kućama, šumama, prometnicama, tvornicama i poslovnim zgradama nedaleko od klizišta. Ukupni pomak klizišta Kostanjek je nepoznat zbog loše vremenske rezolucije opažanja kretanja klizišta i nekonzistentnih mjerenja na stabilnim geodetskim točkama. Analizom povijesnih stereo-parova snimki iz zraka za razdoblje 1963-1988 godine dobiveno je da su horizontalni pomaci površine tla bili u rasponu 3-6 m (Ortolan i Pleško 1992). Ortolan (1996) je procijenio da se najveći horizontalni pomak od 44 cm/god dogodio u razdoblju 1973–1976. godine. Za interpretaciju gibanja klizišta Kostanjek najkorisnijim su se pokazale fotogrametrijske analize pomaka objavljene u Ortolan i Pleško (1992) zbog toga što je njima dobiven iznos pomaka na površini cijelog klizišta. Nedostatak mjerenja pomaka provedenih u razdoblju od 49 godina je taj što je provedeno svega nekoliko mjerenja različitih skupova geodetskih točaka unutar vrlo kratkih razdoblja (primjerice razdoblje od 1988. do 1994. godine, Ortolan, 1996; te od 2010. do 2012. godine, Županović i dr., 2012), iz čega nije moguće dobiti podatke o ukupnim pomacima klizišta od njegova aktiviranja do danas, kao niti o maksimalnim brzinama klizanja u pojedinim povijesnim razdobljima gibanja klizišta.

Istraživanja nakon aktivacije klizišta su provedena kao dio projekta „Identifikacije rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje posljedica klizanja i poplava u Hrvatskoj“. Cilj tog projekta bila je procjena i ublažavanje geohazarda klizišta kroz razvoj sustava ranog upozoravanja kao i razvoj smjernica za primjenu rezultata projekta u sustavu prostornog uređenja i civilne zaštite. Kako bi se omogućila kontinuirana promatranja u razdoblju 2011-2014 postavljeno je nekoliko senzorskih mreža za praćenje (1) pomaka / deformacije / aktivnosti (GNSS postaje, ekstenzometri, bušotinski ekstenzometri), (2) hidrološka svojstva

(mjerači pornog tlaka i senzori razine vode u bušotinama i bunarima, senzori razine vode na preljevima) i (3) vanjski okidači (kišomjer i akcelerometri). Oprema za monitoring je većim dijelom postavljena na središnjem dijelu klizišta gdje se nalazi centralna mjerna stanica. Model je izrađen na temelju kombinacije podataka dobivenih praćenjem i opažanjem kretanja klizišta pomoću GNSS postaje (GNSS 08) i iz podataka o razini vode prikupljenih senzorom (WLS 01) uključujući podatke o oborinama iz Zagreb Meteorološka postaja Grič smještene 9 km istočno od klizišta Kostanjek (Krkač i dr., 2014a). Izgled jedne permanentne GNSS stanice moguće je vidjeti na slici 3-2.

Sustav praćenja klizišta Kostanjek koncipiran je tako da omogućava automatizirano praćenje gibanja klizišta i promjena uvjeta koji utječu na potencijal za reaktiviranje klizišta (oborine, potresi) uz bežični prijenos podataka do centra podataka smještenog na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Senzorske mreže instalirane na klizištu obuhvaćaju više od 40 pojedinačnih senzora (Krkač, 2015). Senzori su instalirani na površini terena i u bušotinama na 24 različite lokacije koje je moguće vidjeti na slici 3-3. Senzori za mjerenje pomaka, deformacija i aktivnosti na klizištu Kostanjek daju pouzdane podatke u realnom vremenu. Pomaci u podzemlju mjere se pomoću jednog inklinometra i četiri vertikalna žičana ekstenzometra smještena u središnjem dijelu klizišta. Dok se pomaci na površini mjere pomoću mreže permanentnih GNSS stanica i mreže žičanih ekstenzometara raspoređenih na različitim dijelovima klizišta. Aktivnost klizišta mjerila se je i mrežom akcelerometara instaliranih u bušotinama u različitim dijelovima klizišta (Krkač i dr., 2014d).

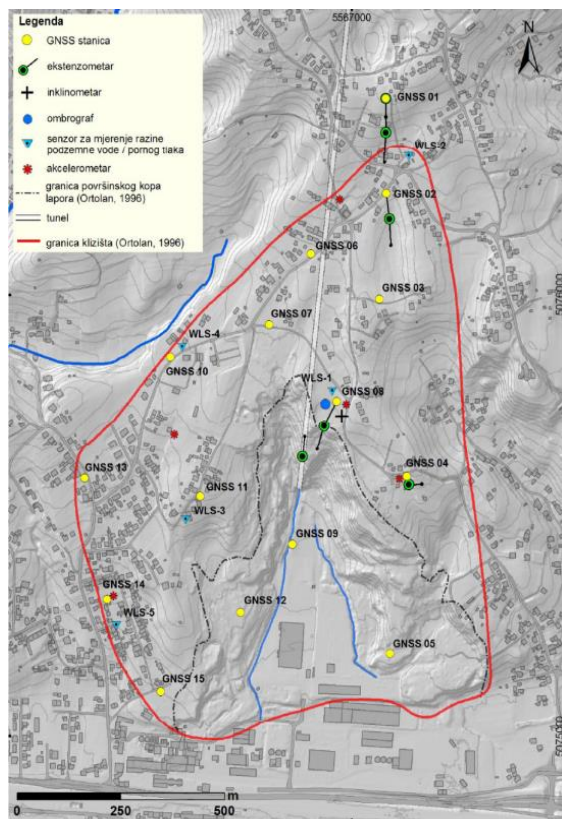
GNSS predstavlja sustav satelita i zemaljskih stanica koji služi za precizno pozicioniranje na površini Zemlje (Krkač, 2015). Sateliti kontinuirano odašilju signale i tako prenose informaciju o vremenu odašiljanja signala i poziciji određenog satelita u trenutku odašiljanja i tako omogućavaju precizno pozicioniranje na površini Zemlje. Zemaljske stanice primaju satelitske signale pomoću antena i prijemnika te pomoću razlike u vremenu odašiljanja i primanja signala određuju udaljenosti satelita. Prijemnici precizno računaju poziciju na Zemlji uzimanjem u račun udaljenost između antene i minimalno četiri satelita kao njihov položaj. GNSS prijemnici koriste signale GPS i GLONASS satelita (Krkač, 2015). GNSS sustav nesmetano funkcionira 24 sata dnevno bez obzira na vremenske uvjete i nije mu potrebna optička vidljivost između mjerenih senzora (Ghiloian i Wolf, 2012).

Mreža permanentnih GNSS stanica tvrtke Trimble sastoji se od 15 dvofrekventnih prijemnika tipa NetR9 TI-2 GNSS sa Zephyr Geodetic 2 GNSS antenama. Mjerne stanice sa GNSS prijemnicima i ruterima koji prenose podatke napajaju se električnom energijom iz javne mreže. GNSS antene nalaze se na stupovima visokim četiri metra koji su pričvršćeni

armirano-betonskim temeljima ukopanim jedan metar u tlo. Prijemnici prikupljaju neobrađene podatke o položaju GNSS antena te ih u realnom vremenu pomoću bežične mreže šalju na Rudarsko-geološko-naftni fakultet, to jest u centar podataka. Prikupljeni podaci su podaci o apsolutnim položajima GNSS antena, a njihova preciznost iznosi $3\text{mm} + 0,1\text{ RMS}$ u horizontalnoj ravnini i $4\text{mm} + 0,4\text{ppm RMS}$ u vertikali (prema specifikacijama proizvođača Trimble, 2010.) Server za pohranu podataka koji sadrži aplikaciju za obradu podataka Trimble 4D Control (T4DC) nalazi se na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Program sadrži tri komponente : (1) T4D Control Server čija je svrha prikupljanje, obrada i pohrana podataka opažanja; (2) T4D Control Desktop pomoću kojeg se definira projekt i konfiguriraju senzori; i (3) T4D Control Web pomoću kojeg se podaci prikazuju i analiziraju pomoću web sučelja (Karahayit, 2013.). Najvažniji dio t4DC softvera je T4D Control Server u kojem se definiraju granične vrijednosti pomaka koje igraju znatnu ulogu u sustavu ranog upozoravanja. Moguće je i definirati jednu ili više referentnih stanica kao i različite vrste izmjerenih podataka (podaci dobiveni u realnom vremenu i postprocesorni podaci različitih vremenskih intervala). Postavljanje GNSS stanica određeno je u odnosu na dijelove klizišta. Stanica GNSS 01 postavljena je iznad čela klizišta (sjeverno). Stanica je postavljena pod pretpostavkom da se nalazi izvan granica klizišta. Sljedeće četiri stanice, GNSS 04, 07, 08 i 11 postavljene su iznad otkopnih fronti nekadašnjeg otvorenog kopa lapora. Tri GNSS stanice (GNSS 05,09 i 12) postavljene su na područje nekadašnjeg otvorenog kopa lapora. Pet GNSS stanica (GNSS 06,10, 13, 14 i 15) postavljeno je uz zapadnu i sjeverozapadnu granicu klizišta, dok su dvije stanice (GNSS 02 i 03) postavljene u sjeveroistočnom dijelu klizišta. Također je postavljena i jedna nepomična referentna točka van granica klizišta koja omogućava precizno određivanje položaja ostalih GNSS stanica mreže. Pomoću T4D Control Servera definirane su tri opcije postavljanja referentne točke: (1) referentna stanica je permanentna stanica GNSS 01 na sjeveru izvan granica klizišta; (2) referentna stanica je GNSS stanica u Gornjem Stupniku udaljena 7,2 km u smjeru juga od klizišta Kostanjek i ta stanica za T4D Control Server predstavlja 16-tu GNSS; (3) referentne stanice su obje prethodno navedene stanice (GNSS 01 i 16). Mjerenjem podataka na klizištu Kostanjek dobiju se određene vrste podataka. Vrste podataka koje se dobiju su: (1) neobrađeni podaci za svaku sekundu; (2) srednja vrijednost neobrađenih podataka za razdoblje od posljednjih 30 minuta; (3) srednja vrijednost neobrađenih podataka za razdoblje od posljednjih 2 sata; (4) postprocesirani podaci za razdoblje od jednog sata; i (5) postprocesorni podaci za razdoblje od 24 sata.



Slika 3-3 Jedna od 15 permanentnih GNSS stanica „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek“ (Krkač, 2015)



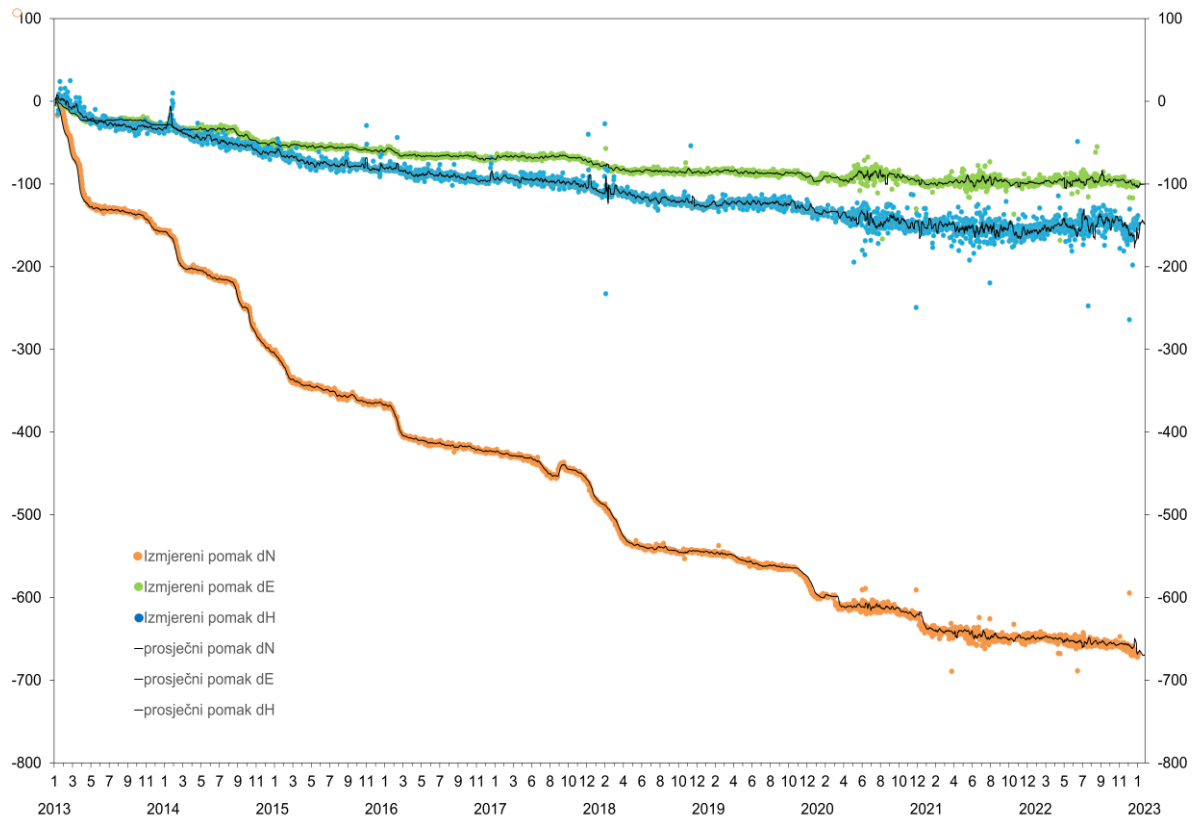
Slika 3-2 Raspored senzora i senzorskih mreža integriranog „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek“ (Krkač, 2015)

4. ANALIZA GIBANJA KLIZIŠTA KOSTANJEK

U ovom radu korišteni su podaci GNSS 08 koji se odnose na postprocesirane podatke za razdoblje od 24 sata. Na temelju podataka određeni su ukupni pomaci sjever-jug (dN), istok-zapad (dE), vertikalni pomak (dH) kao i 2D i 3D pomak. Određen je smjer gibanja u središnjem djelu klizišta te razdoblja bržih i sporijih gibanja, također su određene i pogreške prilikom mjerenja.

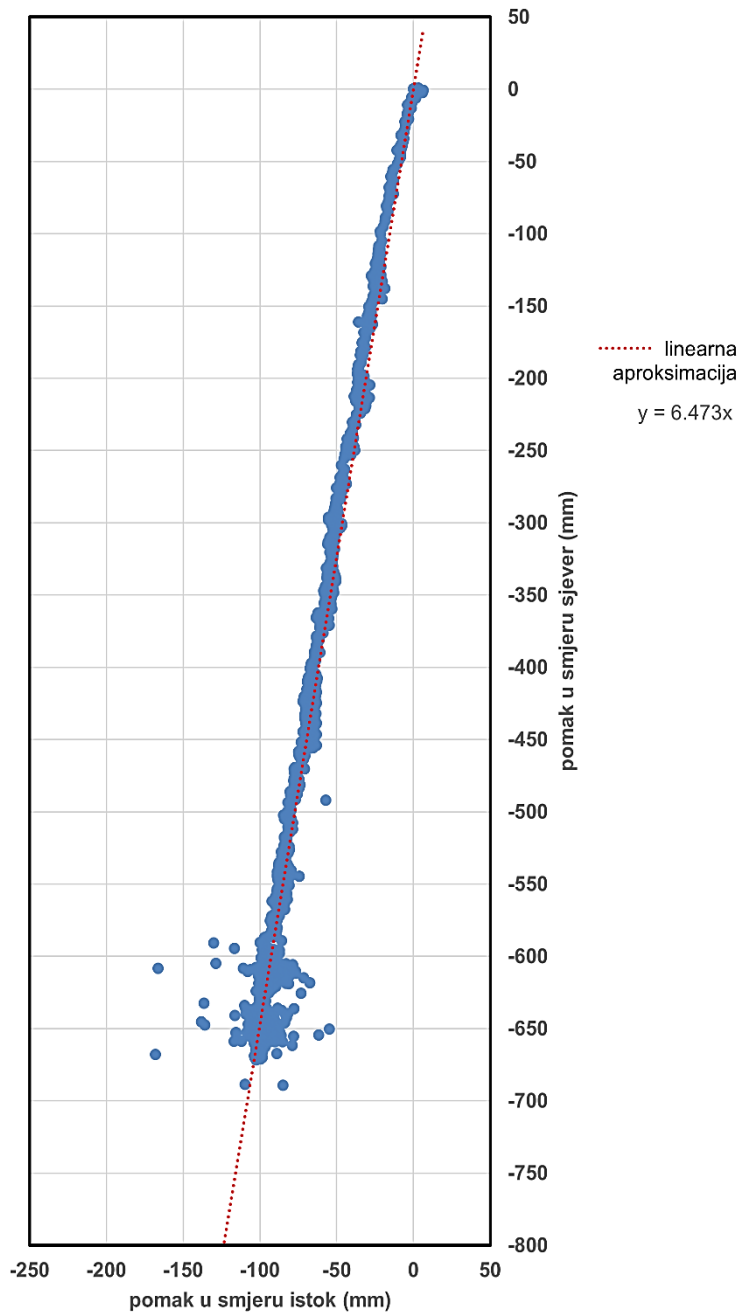
4.1.1. Podaci dobiveni praćenjem instrumentima

Na slici 4-1 prikazani su kumulativni dnevni pomaci izmjereni GNSS-om 08 te njihove sedmodnevne prosječne vrijednosti za razdoblje od 11.1.2013. do 10.1.2023. Prosječni iznosi pomaka računati su kao prosjek sedam dana (tri dana prije, taj dan i tri dana nakon). Ovakav prikaz korišten je za generalni prikaz podataka kroz vrijeme, odnosno kako bi se prikazao ukupni pomak. Kao konačni pomak uzeta je zadnja vrijednost kod računanja 7-dnevnog prosjeka kako bi se umanjio utjecaj pogreške. Pa tako ukupni pomak za sjever-jug iznosi -669,3 mm u smjeru juga. Znamo da se radi o pomaku prema jugu zbog negativne vrijednosti što označava pomak prema jugu. Da se radilo o pomaku prema sjeveru tada bi vrijednost bila pozitivna. Ukupan pomak istok-zapad iznosi -100,4 mm prema zapadu. Kada se radi o pomaku istok-zapad tada negativna vrijednost ukazuje na pomak prema zapadu dok pozitivna ukazuje na pomak prema istoku. Ukupan vertikalni pomak iznosi -146,9 mm. Kod vertikalnog pomaka negativna vrijednost, odnosno predznak minus, ukazuje na usjedanje.



Slika 4-1 Graf izmjerenih i prosječnih pomaka za dH, dE i dN

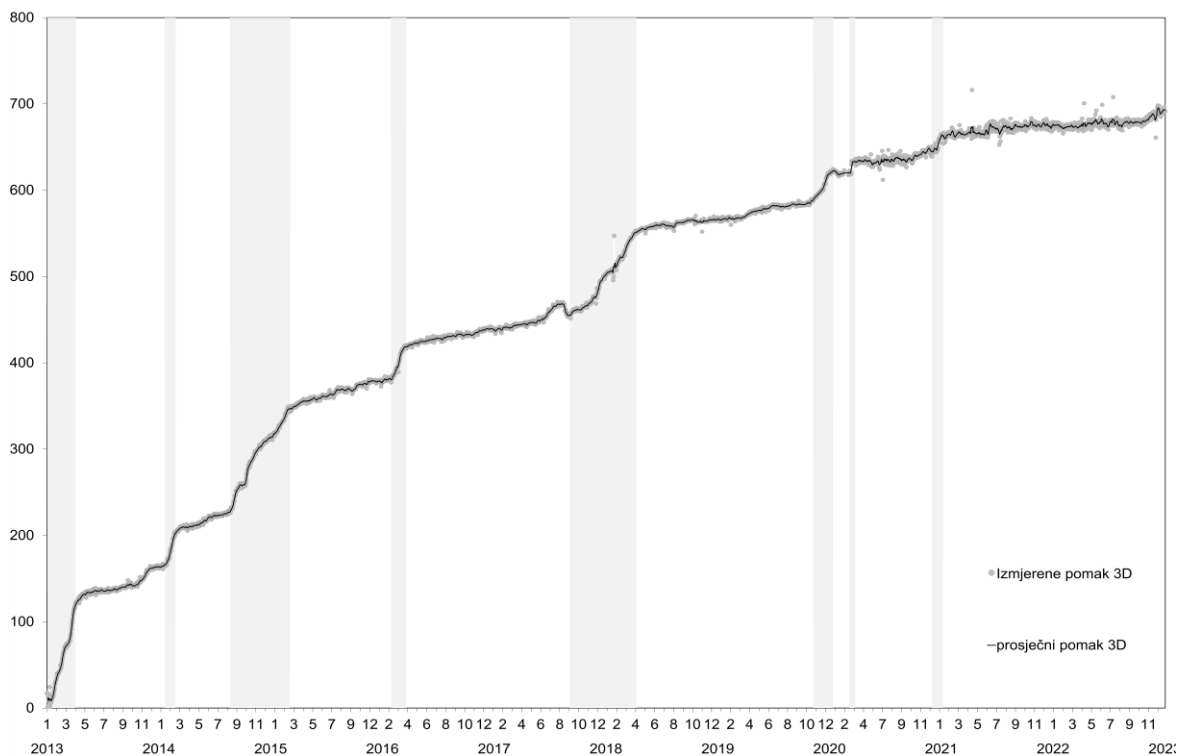
Slika 4-2 prikazuje tlocrtni prikaz gibanja klizišta Kostanjek. Iz dijagrama se može zaključiti kako se klizište kreće u smjeru jug-jugozapad čiji smjer kretanja u stupnjevima iznosi 188,8°. Uz tlocrtni prikaz kretanja dana je i linearna aproksimacija kretanja klizišta pomoću koje se mogu približno predvidjeti daljnja kretanja klizišta.



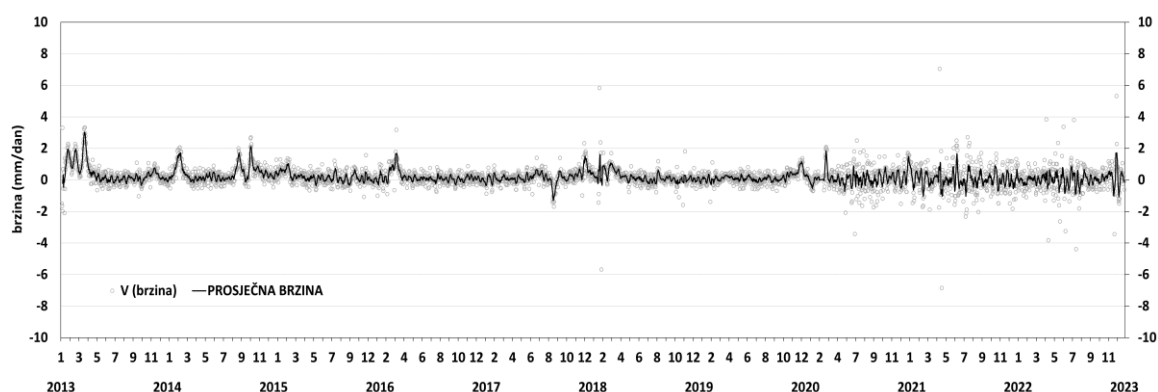
Slika 4-2 Tlocrtni prikaz kretanja klizišta Kostanjek

Podaci o 3D pomaku u grafu sa slike 4-3 izračunati su preko formule $\sqrt{dH^2 * 2D^2}$ pri čemu su vrijednosti 2D dobivene preko formule $\sqrt{dN^2 * dE^2}$. Dobiveni 3D podaci jasno ukazuju na razdoblja bržih (vidljivo kao veći skok brzina u krećem vremenskom razdoblju) i sporijih gibanja. Popratno uz 3D graf (prikazan na slici 4-3) prikazan je i graf brzina (slika 4-4) koji dodatno ukazuje na brzine za razdoblje bržih i sporijih gibanja. Na temelju grafova možemo vidjeti kako se dogodilo osam razdoblja bržih gibanja i osam razdoblja sporijih gibanja. Razdoblje najdužeg trajanja dogodilo se od 7.12.2017 do 22.4.2018. dok se razdoblje sa najvećim pomakom dogodilo u periodu od 24.1.2013 do 27.4.2013 pri maksimalnoj brzini 3,02 mm/dan. Najveće brzine kretanja dogodile su se na početku odnosno prilikom aktivacije samoga klizišta koje su tada iznosile 3,02 mm/dan, no drugo razdoblje s drugim većim brzinama kretanja klizišta bilo je od 31.8.2014. do 6.12.2014. kada je maksimalna brzina iznosila 2,10 mm/dan. Razdoblja bržeg gibanja i maksimalne brzine gibanja (maksimalne vrijednosti iz 7-dnevnog prosječnog pomaka) prikazane su u tablici 1 za lakši pregled. Ukupno trajanje razdoblja bržih gibanja iznosilo je 18 mjeseci, odnosno 21,43% vremena praćenja. Ukupni pomak za vrijeme bržeg gibanja iznosilo je 463,9 mm dok je za vrijeme sporijeg iznosilo 217,04 mm.

Na temelju razdoblja u kojima je došlo do većih pomaka moguće je pretpostaviti da se veći pomaci kao i vjerojatnost za pojavom kriznih situacija mogu očekivati u periodima većih oborina i u periodima zime.



Slika 4-3 Graf prikazuje 3D pomak



Slika 4-4 Graf brzina

Tablica 1 Prikazuje razdoblja većih brzina kretanja i najveće brzine kretanja

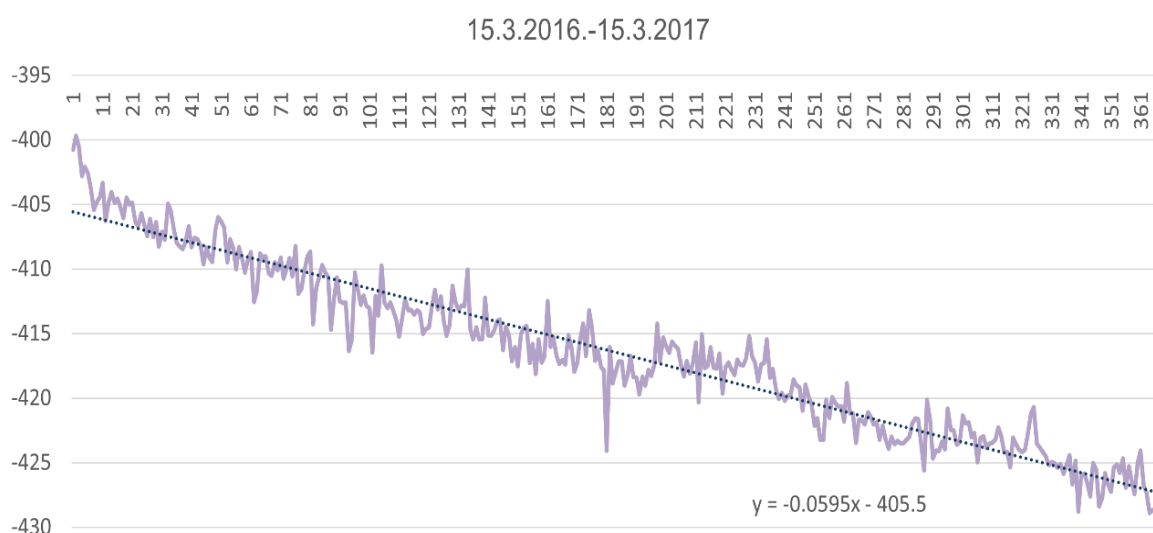
Razdoblje	Maksimalna prosječna brzina (mm/dan)
24.1.2013-27.4.2013	3.02
30.1.2014-29.3.2014	1.72
31.8.2014-6.12.2014	2.10
9.2.2016-10.4.2016	1.68
21.8.2017-27.9.2017	0.56
7.12.2017-22.4.2018	1.61
14.12.2019-22.2.2020	1.14
29.3.2020-12.4.2020	0.29

4.1.2. Pogreške prilikom mjerenja

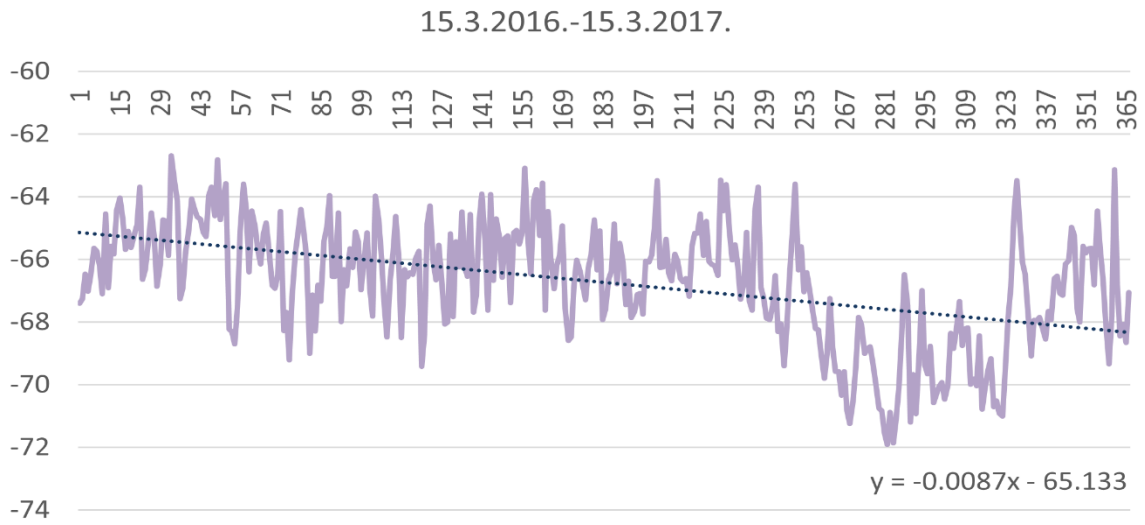
Pri opisivanju rezultata praćenja GNSS stanicama potrebno je uzeti u obzir i pogrešku mjerenja. Prema Ghiliani i Wolf (2012) pogreške u GNSS mjerenjima su posljedica jednog ili više sljedećih faktora: (1) razlike u točnom vremenu između prijemnika i satelita; (2) refrakcije signala zbog utjecaja ionosfere i toposfere; (3) pogreške u efemeridima putanja satelita; (4) višestruke putanje satelitskih signala; (5) načina na koji je instalirana antena; i (6) položaja satelita. Navedene pogreške utječu na ukupnu pogrešku GNSS-a. Za GNSS 08 odabrano je razdoblje od približno 300 do 360 dana s podacima o dnevnim kumulativnim pomacima, tijekom kojeg nije bilo većih pomaka. Za odabrano razdoblje određen je linearni trend metodom najmanjih kvadrata te je izračunata razlika između izmjerenih vrijednosti i vrijednosti linearnog trenda (reziduali). Zatim su određene standardne devijacije reziduala

za pomake u smjeru S-J (dN) na slici 4-5, I-Z (dE) na slici 4-6 i vertikalno (dH) na slici 4-7 pri čemu je pretpostavljeno da su razlike između izmjerenih vrijednosti i linearnog trenda normalno distribuirane. Upotreba standardne devijacije podrazumijeva da je dnevna razlika između izmjerenih vrijednosti i vrijednosti linearnog trenda neovisna varijabla, što ju čini prikladnom za primjenu na vremenski niz GNSS mjerenja (Massey, 2010). Pogreška mjerenja određena je na temelju intervala pouzdanosti od 95% što odgovara iznosu dvije standardne devijacije. Podaci određivanja pogreške poslužili su za procjenu pogreške mjerenja, odnosno za zaključke o statističkoj značajnosti pomaka. Kada su mjerenja nekog niza veća od utvrđene pogreške mjerenja, može se zaključiti da se dogodio statistički značajan pomak, a ukoliko je većina mjerenja unutar vrijednosti pogreške, ne može se sa sigurnošću zaključiti da je došlo do pomaka (Krkač, 2015).

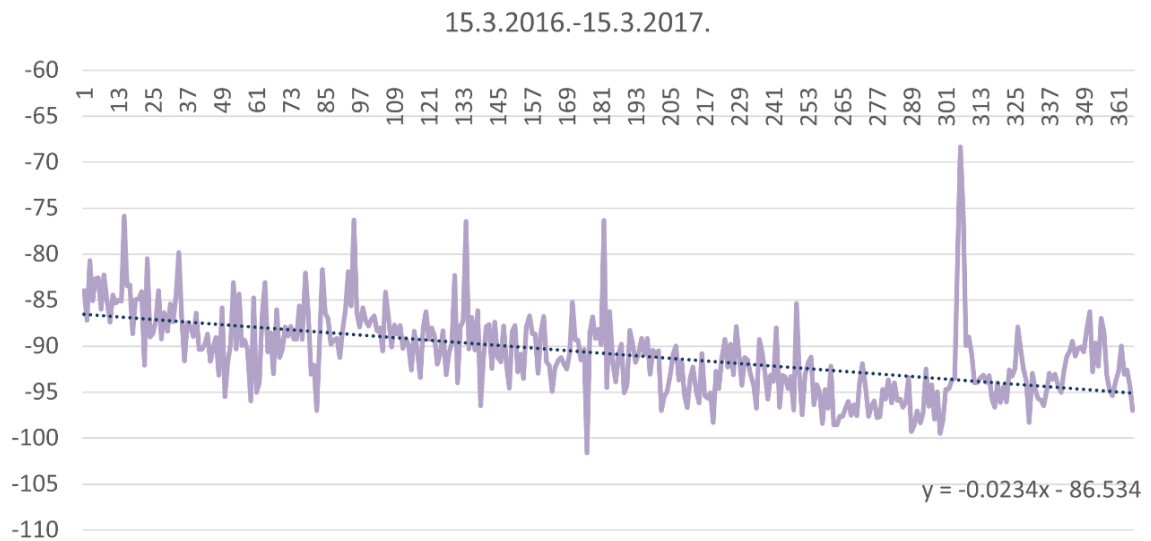
Izračunate pogreške uz 95%-tnu pouzdanost u smjeru S-J iznose od $\pm 3,22$ mm, dok pogreške u smjeru I-Z iznose $\pm 3,11$ mm. Pogreške u horizontalnoj ravnini u smjeru gibanja iznose $\pm 3,11$ mm, dok su pogreške u vertikalnom smjeru nešto veće nego u horizontalnom smjeru i iznose $\pm 6,71$ mm. Izračunate preciznosti slične su specifikacijama proizvođača GNSS uređaja (Trimble, 2010) koje s obzirom na udaljenost od referentne GNSS stanice u Gornjem Stupniku (7,2 km) iznose $\pm 3,72$ mm u horizontalnoj ravnini i $\pm 6,88$ mm u vertikalnom smjeru.



Slika 4-5 Grafički prikaz pogreške za pomak sjever-jug (dN)



Slika 4-7 Grafički prikaz pogreške za pomak istok-zapad (dE)



Slika 4-6 Grafički prikaz pogreške za vertikalni pomak (dH)

5. ZAKLJUČAK

Iako je gibanje klizišta Kostanjek ekstremno sporo do sporo, njegova važnost proizlazi iz činjenice da se nalazi u urbaniziranom području grada Zagreba s približno 250 stambenih i gospodarskih zgrada i gustom mrežom infrastrukturnih građevina te da od iniciranja 1963. godine, ovo klizište kontinuirano utječe na stabilnost i funkcionalnost mnogobrojnih građevina. Osim toga, na klizištu Kostanjek postoji i opasnost za ljude u slučaju rušenja građevina uslijed daljnjih pomaka klizišta (Krkač, 2015). Zbog veličine klizišta kao i velikog iznosa potrebnog za sanaciju klizišta trenutačno se kao jedini način prevencije od nastanka većih šteta u sklopu pravovremenog upozoravanja provodi kontinuirani monitorin g klizišta. Pa je tako u svrhu monitoringa u razdoblju 2011-2013. godine postavljan je „Opservatorij za praćenje klizišta Kostanjek“ Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta koji je dio znanstveno-istraživačkog bilateralnog hrvatsko-japanskog SATREPS FY2008 projekta 'Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje posljedica klizanja i poplava u Hrvatskoj' (Mihalić Arbanas i dr., 2013a; Krkač i dr., 2014b)

U ovom radu korišteni su podaci GNSS 08 koji se odnose na postprocesirane podatke za razdoblje od 24 sata. Na temelju podataka određeni su pomaci sjever-jug (dN), istok-zapad (dE) i sedmodnevni prosječni pomaci. Određen je smjer gibanja u središnjem djelu klizišta te razdoblja bržih i sporijih gibanja. Na temelju podataka možemo zaključiti kako se klizište kreće u smjeru jug-jugozapadu uz kut gibanja $188,8^\circ$. Tijekom gibanja bilo je nekoliko perioda bržih gibanja klizišta. Ukupno razdoblje bržih gibanja iznosi oko 18 mjeseci i obuhvaća 8 razdoblja bržih gibanja što čini 21% od ukupnog vremena pri čemu je najveća brzina kretanja iznosila 3,02 mm/dan, a najmanja 0,29 mm/dan. Pogreške mjerenja određene su na temelju intervala pouzdanosti od 95% što odgovara iznosu dvije standardne devijacije. Podaci određivanja pogreške poslužili su za procjenu pogreške mjerenja, odnosno za zaključke o statističkoj značajnosti pomaka. Pogreške u horizontalnoj ravnini u smjeru gibanja iznose $\pm 3,11$ mm, dok pogreške u vertikalnom smjeru iznose $\pm 6,71$ mm.

Možemo pretpostaviti kako se razdoblja većih brzina kretanja gotovo periodički javljaju u hladnijim dijelovima godine i u vrijeme većih padalina. Na temelju te pretpostavke mogu se dobiti podaci korelirati sa podacima o padalinama kako bi se pretpostavka potvrdila. Doneseni zaključak na temelju koreliranja podataka može pridonijeti planiranju potrebe za većim mjerama opreza i planiranju sanacije štete za vrijeme kriznih razdoblja kako sanacija samoga klizišta nije moguća.

6. LITERATURA

ARBANAS, Ž., SASSA, K., MARUI, H., MIHALIĆ, S. (2012): Comprehensive monitoring system on the Grohovo Landslide, Croatia. Proceedings of the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides: Landslides and Engineered Slopes, Protecting Society through Improved Understanding. / Eberhardt, E., Froese, C., Turner, K., Leroueil, S. (eds). CRC Press, Vancouver. 1441-1447

ANGELI M.-G., PASUTO A., SILVANO S. (2000): A critical review of landslide monitoring experiences. *Engineering Geology*, 55, 3, 133-147. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00122-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00122-2).

BAROŃ, I., SUPPER, R., OTTOWITZ, D. (eds.) (2012): The Safeland Project, Deliverable 4.6, Report on evaluation of mass movement indicators. 328 p.

BERNAT GAZIBARA S., KRKAČ M., MIHALIĆ ARBANAS S. (2019): Verification of historical landslide inventory maps for the Podsljeme area in the City of Zagreb using LiDAR-based landslide inventory. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, 34, 1, 45-58. DOI: 10.17794/rgn.2019.1.5

CROZIER M.J. (2010): Landslide geomorphology: An argument for recognition, with examples from New Zealand. *Geomorphology*, 120, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.010>

CRUDEN D.M. (1991): A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29. doi:10.1007/BF02590167

CRUDEN D.M., VARNES D.J. (1996): Landslide types and processes. In: Turner, A.K.,

GHILIANI C.D., WOLF P.R. (2012): *Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics (Thirteenth Edition)*. Pearson Education, Inc., New Jersey. 984 p.

HUNGR, O. (1995): A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32. 610-623.

HUNGR O., LEROUEIL S., PICARELLI L. (2014): The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 2, 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>

KARAHAYIT, O. (2013): Modern geodetic solutions for automated observation. Zbornik radova 3. CROPOS konferencije / Bašić, T., Marjanović, M. (ur.). Državna geodetska uprava, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska komora ovlaštenih inženjera geodezije. 29-35.

KRKAČ, M. (2015). 'Fenomenološki model gibanja klizišta Kostanjek na osnovi praćenja parametara klizanja : doktorski rad', Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, citirano: 24.08.2023., <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:969446>

KRKAČ, M., MIHALIĆ, S., FERIĆ, P., PODOLSZKI, L., TOŠEVSKI, A., ARBANAS, Ž. (2013a): Japanese-Croatian Project: preliminary investigations of the Kostanjek landslide. Proc. of the 2nd World Landslide Forum 'Landslide Science and Practice' / Margtini, C., Canuti, P., Sassa, K. (eds). Springer, Germany. 385-390.

KRKAČ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., ARBANAS, Ž., SMOLČAK, N., ŠPEHAR, K., BERNAT, S. (2013b): Primjena rezultata praćenja permanentne GNSS mreže u modeliranju klizišta na primjeru klizišta Kostanjek u Zagrebu. Zbornik radova 3. CROPOS konferencije / Bašić, T., Marjanović, M. (ur.). Državna geodetska uprava, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska komora ovlaštenih inženjera geodezije, Zagreb. 103-110.

KRKAČ, M., RUBINIĆ, J., KALAJŽIĆ, J. (2014a): Analysis of water fluctuation dynamics in the wider area of the Kostanjek landslide. Proceedings of the 1st Regional Symposium on Landslides in the AdriaticBalkan Region: Landslide and Flood Hazard Assessment / Mihalić Arbanas, S., Arbanas, Ž. (eds). Croatian Landslide Group, Zagreb. 23-26.

KRKAČ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., NAGAI, O., ARBANAS, Ž., ŠPEHAR, K. (2014b): The Kostanjek Landslide - Monitoring System Development and Sensor Network. Proceedings of the 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-

Balkan Region: Landslide and Flood Hazard Assessment / Mihalić Arbanas, S., Arbanas, Ž. (eds). Croatian Landslide Group, Zagreb. 27-32.

KRKAČ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., ARBANAS, Ž., BERNAT, S., ŠPEHAR, K. (2014c): The Kostanjek Landslide in the City of Zagreb: Forecasting and Protective Monitoring. Proceedings of the XII IAEG Congress 'Engineering Geology for Society and Territory', Vol. 5 'Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation' / Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P., Luino, F. (eds). Springer, Heidelberg. 715-719.

KRKAČ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., ARBANAS, Ž., BERNAT, S., ŠPEHAR, K., WATANABE, N., NAGAI, O., SASSA, K., MARUI, H., FURUYA, G., WANG, C., RUBINIĆ, J., MATSUNAMI, K. (2014d): Review of Monitoring Parameters of the Kostanjek Landslide (Zagreb, Croatia). Proceedings of the 3rd World Landslide Forum 'Landslide Science for a Safer Geoenvironment', Volume 2 'Methods of Landslide Studies' / Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y. (eds). Springer, Netherland. 637-645.

LACROIX P., HANDWERGER A.L., GRÉGORY G. (2020): Life and death of slow-moving landslides. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 404–419. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0072-8>

MANSOUR, M. F., MORGENSTERN, N. R., MARTIN, D. (2010): Expected damage from displacement of slow-moving slides. *Landslides*, 8. 117-131

MASSEY, C.I. (2010): The dynamics of reactivated landslides: Utiku and Taihape, North Island, New Zealand. PhD Thesis, Durham University, Durham, United Kingdom.

MIHALIĆ, S., ARBANAS, Ž. (2013): The Croatian–Japanese joint research project on landslides: activities and public benefits. *Landslides: global risk preparedness* / Sassa, K., Rouhban, B., Briceño, S., McSaveney, M., He, B. (eds). Springer, Heidelberg. 333-349.

MIHALIĆ ARBANAS, S., ARBANAS, Ž., KRKAČ, M. (2013a): Comprehensive Landslide Monitoring System: The Kostanjek Landslide Case Study, Croatia. ICL

Landslide Teaching Tools / Sassa, K., He, B., McSaveney, M., Osamu, N. (eds). International Consortium on Landslides, Kyoto. 158-168.

MIHALIĆ ARBANAS, S., ARBANAS, Ž., BERNAT, S., KRKAČ, M., KALINIĆ, P., MARTINOVIĆ, K., FABRIS, N., SAJKO, J., ANTOLOVIĆ, A. (2013b). Upravljanje kriznim situacijama uslijed pokretanja klizišta. Zbornik radova V. konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa / Perinić, J. (ur.). Državna uprava za zaštitu i spašavanje, Zagreb. 151-164

MIHALIĆ ARBANAS, S., KRKAČ, M., BERNAT, S. (2016). Application of innovative technologies in landslide research in the area of the City of Zagreb (Croatia, Europe). *Geologia Croatica*, 69(2), 231-243.

NONVEILLER, E. (1976): Analiza uzroka pomaka terena u području tvornice cementa "Sloboda" u Podsusedu. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.

OLALLA, C. (2004): Recent developments in landslide monitoring. Proc. of the Ninth international symposium on landslides 'Landslides: evaluation and stabilization' / Lacerda, W., Ehrlich, M., Fontoura, S.A.B., Sayao, A.S. (eds). A.A. Balkema, Leiden. 549-555

ORTOLAN Ž., PLEŠKO J. (1992): Opetovana fotogrametrijska mjerenja pri oblikovanju geotehničkih modela višeslojnih ležišta. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 4. 51-58.

SCHÄFER, T. (ed.) (2008): Slope Monitoring Methods A State of the Art Report. The ClimChAlp partnership, Munich. 165 p

SCHULZ W.H., COE J.A., RICCI P.P., SMOCZYK G.M., SHURTLEFF B.L., PANOSKY J. (2017): Landslide kinematics and their potential controls from hourly to decadal timescales: Insights from integrating ground-based InSAR measurements with structural maps and long-term monitoring data. *Geomorphology*, 285, 121-136. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.011>.

SCHUSTER, R. L., HIGHLAND. L. M. (2007): The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies. *Bulletin of the Engineering Geology and the Environment*, 66. 1-27.

STANIĆ B., NONVEILLER E. (1996): The Kostanjek landslide in Zagreb. *Engineering Geology*, 42, 269-283.

STUMPF, A., KERLE, N., MALET, J.-P. (eds.) (2011): The Safeland Project, Deliverable 4.4, Guidelines for the selection of appropriate remote sensing technologies for monitoring different types of landslides. 91 p.

TERZAGHI, K. (1950): Mechanism of landslides. Application of geology to engineering practice / Paige, S. (ed.). Geological Society of America, New York. 83-123

TRIMBLE (2010): Trimble NetR9 GNSS Reference receiver. User guide

WEINHEIMER, A., BIONDI, F. (2003): Varves. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, Vol.4 / Holton, J.R., Pyle, J.A., Curry, J.A. (eds). Academic Press, Oxford. 1680-1685