

Fenomenološki model gibanja klizišta Kostanjek na osnovi praćenja parametara klizanja

Krkač, Martin

Doctoral thesis / Disertacija

2015

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:169:969446>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-05**



Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

MARTIN KRKAČ

**FENOMENOLOŠKI MODEL GIBANJA
KLIZIŠTA KOSTANJEK NA OSNOVI
PRAĆENJA PARAMETARA KLIZANJA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2015.



University of Zagreb

FACULTY OF MINING, GEOLOGY AND PETROLEUM
ENGINEERING

MARTIN KRKAČ

**A PHENOMENOLOGICAL MODEL OF THE
KOSTANJEK LANDSLIDE MOVEMENT
BASED ON THE LANDSLIDE MONITORING
PARAMETERS**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2015.



Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

MARTIN KRKAČ

**FENOMENOLOŠKI MODEL GIBANJA
KLIZIŠTA KOSTANJEK NA OSNOVI
PRAĆENJA PARAMETARA KLIZANJA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Izv.prof.dr.sc. Snježana Mihalić Arbanas

Zagreb, 2015.

ZAHVALA

... suradnicima, kolegama, prijateljima i obitelji koji su utjecali na moj rad i time pridonijeli realizaciji ove disertacije.

Zahvaljujem mentorici izv.prof.dr.sc. Snježani Mihalić Arbanas na stručnom vodstvu tijekom izrade doktorata, ali i na prijateljstvu i podršci koju mi je pružila tijekom svih ovih godina. Također, bez njenog velikog zalaganja i truda ne bi došlo do uspostavljanja „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek“, kojim su dobiveni mnogobrojni vrijedni podaci korišteni u ovom radu, ali i budućim istraživanjima.

Zahvaljujem članovima povjerenstva prof.dr.sc. Željku Arbanasu, izv.prof.dr.sc. Kristijanu Posavcu, doc.dr.sc. Marku Komcu i prof.dr.sc. Ranku Žugaju na nesebičnom trudu prilikom recenzije te korisnim sugestijama koje su doprinijele kvaliteti rada. Veliko hvala i kolegi dr.sc. Dragi Špoljariću na pomoći pri izradi doktorata, od ideje do njegove realizacije, te kolegi dr.sc. Josipu Rubiniću koji se spremno odazvao na poziv u pomoć...

Posebno hvala prijateljici i kolegici Sanji Bernat na brojnim diskusijama i sugestijama koje su znatno doprinijele ovom radu te koja je, kao i kolega Marin Sećanj, preuzela velik dio mojih obaveza na radnom mjestu kako bi mi olakšali rad na doktoratu.

Hvala prijatelju Kristijanu Špeharu te Nenadu Smolčaku iz tvrtke Geomatika Smolčak d.o.o., koji su mi nesebično pomagali pri uspostavi, ali i održavanju „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek“.

Hvala obitelji, sinovima Franu i Jakovu te supruzi Kristini na strpljivošću i potpori koju su mi pružili za vrijeme izrade doktorskog rada te roditeljima koji su mi omogućili školovanje i kojima posvećujem ovaj rad.

Veliko hvala Japanskoj agenciji za međunarodnu suradnju (Japan International Cooperation Agency, JICA) i Japanskoj agenciji za znanost i tehnologiju (Japan Science and Technology Agency, JST) čije su donacije omogućile uspostavu „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek“ i pribavljanje vrijednih podataka vezanih za klizanje klizišta Kostanjek. Hvala gradskim uredima Grada Zagreba, Uredu za upravljanje u hitnim situacijama na donacijama u opremi i na administrativnoj podršci te Gradskom uredu za prostorno uređenje, izgradnju Grada, graditeljstvo, komunalne poslove i promet koji je osigurao napajanje uređaja „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek“ iz sustava javne električne mreže. Hvala Robnim terminalima Zagreb (PJ Jankomir) koji su dozvolili postavljanje mjernih uređaja na području njihove tvrtke te zajedno sa Strojopromet-Zagreb d.o.o. omogućili napajanje dijela mjernih uređaja električnom energijom. Hvala Državnom hidrometeorološkom zavodu (DHMZ) na vrijednim podacima o meteorološkim prilikama izmjeranim na meteorološkim postajama područja Grada Zagreba.

I na kraju, hvala svim stanovnicima područja klizišta Kostanjek koji su dozvolili instalaciju opreme na njihovim privatnim parcelama i bez čije suradnje uspostava „Opservatorija za praćenja na klizištu Kostanjek“ ne bi bila moguća.

SAŽETAK

U ovoj disertaciji prikazano je određivanje obrazaca gibanja klizišta i odnosa između gibanja i inicijatora klizišta Kostanjek, najvećeg klizišta u Republici Hrvatskoj, aktiviranog 1963. godine. Određivanje obrazaca gibanja i odnosa između gibanja i inicijatora klizanja omogućeno je na temelju kontinuiranog mjerenja parametara klizanja integriranim sustavom praćenja koji se naziva „Opservatorij za praćenje klizišta Kostanjek“, uspostavljenom u razdoblju od 2011. do 2013. godine. Opservatorij se sastoji od 40-tak uređaja koji mjere gibanje klizišta, hidrološke uvjete te inicijatore klizanja. Odnosi između gibanja i inicijatora klizanja određeni su empirijski na temelju kontinuiranih nizova podataka te kao takvi predstavljaju fenomenološki model klizišta. Vremenski nizovi analiziranih podataka obuhvaća razdoblje praćenja od dvije godine, od siječnja 2013. do siječnja 2015. godine. Analizom gibanja određeno je da se na klizištu Kostanjek, koje je duboko translacijsko klizište koje se giba po potpuno razvijenoj kliznoj plohi, razlikuju obrazac bržeg i sporijeg gibanja, odnosno mirovanja. Početak i kraj svakog razdoblja bržeg i sporijeg gibanja određen je statističkom metodom analize točke promjene. Ukupno je izdvojeno pet razdoblja bržeg gibanja tijekom kojih se dogodilo preko 90% izmjerenih pomaka. Maksimalna izmjerena brzina u središnjem dijelu klizišta iznosi 4,8 mm/dan, dok su na rubovima klizišta brzine klizanja dva do tri puta manje. Ukupni kumulativni horizontalni pomak središnjeg dijela klizišta, izmjeren tijekom razdoblja praćenja, iznosi 426,09 mm. Statističkom analizom također je određeno da su razdoblja bržeg gibanja posljedica devet razdoblja podizanja razine podzemne vode, pri čemu su promjene razine podzemne vode iznosile od 0,19 m do 5,06 m. Razdoblja podizanja razine podzemne vode u piezometru na središnjem dijelu klizišta trajala su od šest do devet dana, a brzine promjene razine podzemne vode iznosile su do maksimalno 0,87 m/dan. Analizom je utvrđeno da brzina gibanja ovisi o razini podzemne vode, pri čemu njihov odnos nije linearan, već je opisan histerezom. Promjene razine podzemne vode, a time i razdoblja bržeg gibanja, posljedica su izrazito vlažnih razdoblja tijekom praćenja klizišta Kostanjek, što je određeno analizom povijesnih podataka o oborinama s meteorološke postaje Zagreb-Grič. Korelacijom između količine oborina za različita prethodna razdoblja i promjene razine podzemne vode utvrđeno je da oborine utječu na podizanje razine podzemne vode u razdoblju od prosječno sedam dana. Odnos između oborina i razine podzemne vode te razine podzemne vode i gibanja klizišta statistički su modelirani metodama višestruke linearne regresije i slučajnih šuma. Svrha uspostavljanja navedenih modela je predviđanje razine podzemne vode na temelju oborina te predviđanje gibanja klizišta na temelju razine podzemne vode. Pri izradi modela za predviđanje razine podzemne vode kao nezavisne varijable korištene su različite prethodne oborine, kumulativne oborine, efektivne oborine, modificirane oborine te utjecaji godišnjih doba. Modelima višestruke linearne regresije i slučajnih šuma određivan je izravan utjecaj oborina na dubinu do podzemne vode, ali i utjecaj na brzinu promjene razine podzemne vode. Nezavisne varijable koje imaju najveći utjecaj na razinu podzemne vode u spomenutim modelima su dugotrajne prethodne i efektivne oborine te vremenska razdoblja protekla od posljednje oborine u iznosu od 50 mm. Pri izradi modela za predviđanje brzine gibanja klizišta kao zavisne varijable korištene su razine podzemne vode, brzine promjene razine podzemne vode za različita razdoblja, ubrzanje promjene razine podzemne vode te utjecaji godišnjih doba. Nezavisne varijable koje imaju najveći utjecaj na brzinu gibanja klizišta, u modelima višestruke linearne regresije i slučajnih šuma, su razina podzemne vode i 7-dnevna brzina promjene razine

podzemne vode. Usporedbom modela, na temelju statističkih pokazatelja kao što su srednja kvadratna pogreška modela i koeficijent korelacije između modeliranih i izmjerenih vrijednosti te k -strukom unakrsnom validacijom i validacijom, pokazano je da modeli slučajnih šuma imaju manju pogrešku nego modeli višestruke linearne regresije, kako za predviđanje razine podzemne vode tako i za predviđanje brzine gibanja klizišta. Verifikacija fenomenološkog modela provedena je za razdoblje od 10 do 90 posljednjih dana praćenja tako što su prvo predviđene razine podzemne vode na temelju izmjerenih oborina, a zatim su iz predviđenih razina podzemne vode predviđene brzine gibanja klizišta, iz kojih su izračunati kumulativni pomaci klizišta. Na temelju srednje kvadratne pogreške između predviđenih i izmjerenih kumulativnih pomaka određeno je da je pogreška predviđanja prihvatljiva za razdoblje od 10 do 30 dana. Relativna pogreška predviđenog kumulativnog pomaka ovisi o duljini razdoblja predviđanja, ali i o kumulativnom pomaku tijekom razdoblja predviđanja. Daljnji razvoj fenomenološkog modela koji je dobiven metodom slučajnih šuma potrebno je provesti uključivanjem dužih vremenskih nizova podataka praćenja klizišta Kostanjek, čime bi se povećala točnost predviđanja gibanja klizišta. S obzirom na to da postojeći podaci o klizištu Kostanjek nisu dostatni za uspostavu pouzdanog modela koji se temelji na fizičkim značajkama, fenomenološki (empirijski) model gibanja klizišta Kostanjek trenutno predstavlja odgovarajući model za predviđanje u svrhu uspostave sustava ranog upozoravanja.

Ključne riječi: klizište, sustav praćenja klizišta, parametri gibanja klizišta, pokretači klizanja, metoda slučajnih šuma, fenomenološki model, predviđanje klizišta

ABSTRACT

The thesis deals with the determination of the movement patterns and the relation between landslide movement and landslide triggers for Kostanjek landslide. The Kostanjek landslide is the biggest landslide in the Republic of Croatia, activated in 1963. The determination of the landslide movement patterns and the relation between landslide movement and triggers was performed on data continuously measured by the Kostanjek landslide monitoring system. The integrated monitoring system consists of about 40 sensors that measure the landslide movement, the hydrological conditions and the landslide triggers. The relation between landslide movement and landslide triggers, determined empirically on the basis of continuous data series, represents a phenomenological landslide model. The Kostanjek landslide phenomenological model is defined on the basis of data collected over a monitoring period of two years, from January 2013 to January 2015. The Kostanjek landslide movement, interpreted as translational sliding along a fully developed sliding surface, consists of periods of faster displacement and periods of slower displacement or periods of rest. The beginning and the end of every period of faster or slower displacement is determined by statistical method of change point analysis. In total, five periods of faster displacement were determined in which more than 90% of cumulative landslide displacement occurred. The maximum measured velocity in the central part of landslide was 4.8 mm/day, while in the area near the landslide border velocities were two to three times lower. The total cumulative horizontal displacement, measured in the central part of landslide during the monitoring period, was 426.09 mm. Periods of faster displacement are the result of nine groundwater level rising periods, during which water levels rose from 0.19 m to 5.06 m. Statistical analysis also showed that the periods of groundwater level rising, detected in the piezometer in the central part of landslide, lasted from six to nine days, while the daily groundwater level changes were up to 0.87 m. Analyses revealed that the sliding velocity depends on groundwater level and that this relationship can be described with hysteresis. The groundwater level changes as well as the periods of faster displacement are result of extremely wet conditions during the monitoring period, which was determined according to historical data analysis from the meteorological station Zagreb-Grič. The result of correlation analysis between precipitation of different antecedent periods and groundwater level changes showed that precipitations usually influence groundwater level over a seven days period. The relations between precipitation and groundwater level and groundwater level and landslide movement were statistically analyzed by multiple linear regression and random forest statistical methods. The purpose of development of these models is the prediction of groundwater level on the basis of precipitation data and the prediction of landslide movement based on the groundwater level data. In the process of the development of groundwater level prediction model, different types of precipitation parameters were used: different precipitation events, different antecedent precipitations, cumulative precipitations, effective precipitations, modified precipitations and influence of the season of the year. Modeling included influence of rainfall to groundwater level and influence of rainfall to groundwater level change rate. Independent variables, such as long lasting antecedent and effective precipitations and the time period from the last 50 mm precipitation have the greatest effect in all groundwater level prediction models. Groundwater level, groundwater level change rate for different periods, groundwater level change acceleration and the impact of the season of the year were used as independent variables for development of the landslide velocity prediction model. According to the

analysis, independent variables such as groundwater level and seven-day groundwater level change rate have the greatest influence on the landslide movement prediction model. Model comparison, carried out on the basis of statistical indicators such as mean squared error of the model, correlation coefficient between measured and modeled values and the methods of *k*-fold cross validation and validation, demonstrated that the random forest model has a better prediction capability in both cases, i.e. for the groundwater level prediction and for the landslide velocity prediction. Verification of phenomenological model was performed for the period which encompasses the last 10 to 90 days of monitored period. Firstly, the groundwater levels were predicted from the precipitation data and secondly, the landslide velocities were predicted from the predicted groundwater levels, followed by calculation of cumulative landslide movements. Mean squared error and the difference between predicted and measured values of cumulative displacement showed that the error for the prediction period of 10 to 30 days is acceptable. Relative error of cumulative displacement prediction depends upon duration of the prediction period and on the cumulative displacement during the prediction period. It is possible to increase the prediction capability of landslide movement by further development of the phenomenological landslide model derived by random forest method, on the basis of longer time data series of the Kostanjek landslide monitoring. On the basis of the fact that there are no sufficient data for the development of a reliable physically based model of the Kostanjek landslide, the developed phenomenological model of the Kostanjek landslide movement is the most appropriate model for predictions for the purpose of establishing an early warning system.

Key words: landslide, landslide monitoring system, landslide movement parameters, landslide triggering factors, random forest method, phenomenological model, landslide prediction

SADRŽAJ

ZAHVALA	i
SAŽETAK	iii
ABSTRACT	v
SADRŽAJ	vii
Popis slika	xi
Popis tablica	xvii
1. UVOD	1
1.1. Svrha i ciljevi istraživanja	3
1.2. Struktura disertacije.....	4
2. PREGLED LITERATURE	6
2.1. Gibanje klizišta.....	7
2.2. Uzroci klizanja	15
2.2.1. Oborine	17
2.2.2. Razina podzemne vode i porni tlak	19
2.2.3. Modeliranje oborina, razine podzemne vode i pornih tlakova	20
2.3. Gibanje klizišta u odnosu na oborine i promjene razine podzemne vode	22
3. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA	25
3.1. Prirodne značajke na širem području klizišta Kostanjek	25
3.1.1. Geomorfološki uvjeti.....	26
3.1.2. Geološka građa	28
3.1.3. Hidrološki i hidrogeološki uvjeti	31
3.1.4. Klimatski uvjeti.....	33
3.2. Povijesni podaci o istraživanjima klizišta Kostanjek.....	35
3.2.1. Geodetska snimanja	35
3.2.2. Inženjerskogeološko kartiranje.....	38
3.2.3. Istraživačko bušenje	40
3.2.4. Geofizička istraživanja.....	42
3.2.5. Ostala istraživanja.....	43
3.3. Povijesni podaci o interpretaciji klizišta Kostanjek	45
3.3.1. Geometrija klizišta.....	45
3.3.2. Materijali u klizanju i podzemna voda u klizištu.....	49
3.3.2.1. Interpretacija litološkog profila i fizičko-mehanička svojstva materijala	49
3.3.2.2. Interpretacija varijacija razine podzemne vode	51
3.3.3. Kinematika i uzroci klizanja	53
3.3.4. Analize prirodnih i antropogenih uzroka klizanja	57
3.3.5. Analize pomaka, analize stabilnosti i projekti sanacije na području tvornice cementa „Sloboda“ u razdoblju od 1965. do 2008. godine	59

4. METODE ISTRAŽIVANJA	60
4.1. Sustav praćenja klizišta Kostanjek	60
4.1.1. Gibanje klizišta	60
4.1.1.1. GNSS	61
4.1.1.2. Inklinometarska mjerenja	64
4.1.2. Uzroci klizanja	64
4.2. Metode analiza podataka praćenja klizišta Kostanjek	66
4.2.1. Analiza točke promjene	66
4.2.2. Višestruka linearna regresija	68
4.2.3. Metoda slučajnih šuma	73
4.2.4. Procjena statističkih modela	75
5. REZULTATI PRAĆENJA KLIZIŠTA KOSTANJEK	76
5.1. Gibanje klizišta	76
5.1.1. Površinski pomaci	77
5.1.1.1. Pomaci i brzine gibanja	80
5.1.1.2. Obrasci gibanja	90
5.1.1.2.1. Obrazac sporijeg gibanja	97
5.1.1.2.2. Obrazac bržeg gibanja	99
5.1.2. Podzemni pomaci	104
5.2. Uzroci klizanja	106
5.2.1. Oborine	106
5.2.2. Razina podzemne vode	110
6. FENOMENOLOŠKI MODEL KLIZIŠTA KOSTANJEK	115
6.1. Oborine i promjene razine podzemne vode	116
6.1.1. Korelacija količine oborina i promjena razina podzemne vode	122
6.1.2. Statističke analize odnosa oborina i promjena razina podzemne vode	131
6.1.2.1. Višestruka linearna regresija	131
6.1.2.2. Metoda slučajnih šuma	137
6.1.2.3. Usporedba rezultata višestruke linearne regresije i slučajnih šuma	140
6.2. Promjene razina podzemne vode i gibanje klizišta	149
6.2.1. Višestruka linearna regresija	153
6.2.2. Metoda slučajnih šuma	156
6.3. Oborine i gibanje klizišta	162
6.4. Verifikacija fenomenološkog modela klizišta Kostanjek	165
7. DISKUSIJA	170
7.1. Sustav praćenja na klizištu Kostanjek	171
7.2. Rezultati praćenja klizišta	174
7.3. Odnos između uzroka i gibanja klizišta	175
7.4. Statističke analize uzroka i gibanja klizišta Kostanjek	177
7.5. Primjena fenomenološkog modela gibanja klizišta Kostanjek	179

8. ZAKLJUČAK	181
LITERATURA.....	186
TEHNIČKA DOKUMENTACIJA.....	201
ŽIVOTOPIS AUTORA	204
POPIS OBJAVLJENIH RADOVA	205

Popis slika

Slika 2.1. Definicija praćenja kao sustavnog ponavljanja opažanja (Stumpf i dr., 2011).....	6
Slika 2.2. Stanja aktivnosti klizišta prema klasifikaciji Cruden i Varnes (1996).	7
Slika 2.3. Različiti mehanizmi gibanja unutar kliznog tijela (Baroš i dr., 2012).....	8
Slika 2.4. Promjena inverzne brzine klizanja u odnosu na vrijeme sloma (Fukuzono, 1985).	9
Slika 2.5. Faze gibanja klizišta (Leroueil i dr., 1996)	10
Slika 2.6. Smanjenje parametara čvrstoće nakon sloma s vršnih na rezidualne (Craig, 1997).....	11
Slika 2.7. Obrasci gibanja klizišta Wealden Beds (Allison i Brunsden,1990).....	12
Slika 2.8. Prikaz horizontalnih pomaka na poprečnom profilu klizišta Wealden Beds s obzirom na različite obrasce gibanja (Allison i Brunsden, 1990): a) višestruki pomaci; b) postupni pomaci; c) nagli pomaci.	13
Slika 2.9. Različiti obrasci gibanja na klizištu Tessina (Petley i dr., 2005).....	14
Slika 2.10. Linearni i asimptotski obrazac inverznih brzina klizanja (modificirano prema Petly i dr., 2002).....	15
Slika 2.11. Promjena faktora sigurnosti u vremenu (Popescu, 1994).....	16
Slika 2.12. Udjeli utjecaja pojedinih pokretača klizanja u aktiviranju klizišta (Mansour i dr., 2010).....	17
Slika 2.13. Odnos kumulativnih godišnjih oborina i učestalosti klizišta različitih dubina (Sangrey i dr., 1984)...18	
Slika 2.14. Shematski prikaz analiza razine podzemne vode (modificirano prema Casini i dr., 2010 i Grimaldi, 2008).....	21
Slika 2.15. Primjeri različitih odnosa između razine podzemne vode/pornog tlaka i brzine klizanja tijekom podizanja, odnosno tijekom snižavanja razine podzemne vode/pornog tlaka (preuzeto iz Massey, 2010).	23
Slika 2.16. Shematizirani prikaz pristupa modeliranju gibanja klizišta s obzirom na oborine (modificirano prema Cascini i dr., 2010 i Leroueil, 2001).....	24
Slika 3.1. Karta šireg područja klizišta Kostanjek. Granica klizišta prema Ortolan (1996) označena je crvenom linijom.	25
Slika 3.2. Nagib padina na širem području klizišta Kostanjek.	26
Slika 3.3. Pukotine na klizištu Kostanjek: a) smicanje uz zapadnu granicu klizišta; b) usijedanje uz pukotinu u istočnom dijelu klizišta.....	27
Slika 3.4. Uvećani isječak Geološke karte Medvednice originalnog mjerila 1:100.000 (modificirano prema Šikić i dr., 1978 i Basch, 1995) s prikazom položaja klizišta Kostanjek.	29
Slika 3.5. Geološki profil područja otvorenog kopa lapora, klizišta Kostanjek te kamenoloma Bizek (modificirano prema Ortolan, 1996).	29
Slika 3.6. Litološki stup: a) šireg područja istraživanja (Vrsaljko i dr. 2012) i b) zasjeka otvorenog kopa lapora (Vrsaljko, 1999).	31
Slika 3.7. Hidrogeološki profil šireg područja istraživanja (Ortolan, 1996).	32
Slika 3.8. Prikaz godišnjih oborina izmjerenih na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič za razdoblje od 1862. do 2014. godine.	34
Slika 3.9. Prikaz srednjih mjesečnih oborina za postaju Zagreb-Grič za razdoblje od 1862. do 2012. godine.....	34
Slika 3.10. Prikaz godišnjih snježnih oborina za meteorološku postaju Zagreb-Grič za razdoblje od 1961. do 2012. godine.	34
Slika 3.11. Položaji i pomaci mjernih točaka na tvorničkim objektima za razdoblje od 1966. do 1976. godine (Ortolan, 1996).....	36

Slika 3.12. Prostorni pomaci na području klizišta Kostanjek i u neposrednoj okolici određeni na temelju položaja 110 točaka iz dvije generacije stereoparova avionskih snimaka (1963. i 1985. godina) preuzeti iz Ortolan i dr. (1987). Vektori pomaka prikazani su na ortofoto karti iz 2012. godine.....	37
Slika 3.13. Položaji geodetskih točaka na širem području klizišta Kostanjek za razdoblje od 1988. do 1999. godine te horizontalni pomaci dviju preostalih geodetskih točaka za razdoblje od 1988. do 2012. godine. Podaci su prikazani na ortofoto karti iz 2007 godine.....	38
Slika 3.14. Prikaz lokacija istraživačkog bušenja na području klizišta Kostanjek, provedenih u četiri etape tijekom 20 stoljeća te geofizičkih istražnih radova iz 1988. godine.....	41
Slika 3.15. Granice tri klizna tijela na području klizišta Kostanjek s prikazom horizontalnih pomaka dobivenih na temelju analize stereoparova avionskih snimaka za razdoblja od 1963 do 1988. godine (Pleško, 1988; Ortolan i Pleško, 1992).....	46
Slika 3.16. Inženjerskogeološki model tri klizišta prema Ortolanu (1996) s prikazom dubina do klizne plohe i apsolutnih visina: (a,b) najplića klizna ploha; (c,d) srednja klizna ploha; (e,f) najdublja klizna ploha.....	48
Slika 3.17. Apsolutne piezometarske visine i porni tlakovi na razini najdublje klizne plohe za razdoblje ožujak-travanj 1988. godine, prema interpretaciji iz Ortolan (1996).....	52
Slika 3.18. Analiza veličine horizontalnih pomaka po najdubljoj kliznoj plohi za razdoblje od 1963. do 1988. godine i korelacija brzine klizanja s volumenom iskopa u površinskom kopu tvornice cementa „Sloboda“ (prema podacima iz arhiva tvornice cementa, bez jalovine) i količinama oborina s kišomjernih postaja Grič i Podsused (Ortolan, 1996). Za svaku godinu su prikazane maksimalne mjesečne i maksimalne tromjesečne oborine. Na slici su također označena razdoblja masovnih miniranja i iskopa tunela za transport sirovine, odnosno početak rada novog pogona tvornice.....	55
Slika 3.19. Kumulativni prostorni pomaci klizišta Kostanjek po najdubljoj kliznoj plohi KP1 od početka klizanja 1963. do travnja 2001. godine s kumulativnom neto količinom iskapanog lapora od početka klizanja do prestanka eksploatacije (precrtano iz Ortolan, 2008).	56
Slika 4.1. Raspored senzora i senzorskih mreža integriranog „Opservatorija za praćenja klizišta Kostanjek“	62
Slika 4.2. Jedna od 15 permanentnih GNSS stanica „Opservatorija za praćenja klizišta Kostanjek“. GNSS antena je smještena na pocinčanom stupu visokom četiri metra, temeljenog s arminrano-betonskim temeljem dubine jedan metar. GNSS prijemnik, uređaji za bežični prijenos podataka i uređaji za napajanje električno energijom smješteni su u ormarićima.	63
Slika 4.3. Model višestruke linearne regresije s dva prediktora (James i dr., 2014).....	69
Slika 4.4. Primjer izgradnje regresijskog stabla: a) regresijsko stablo za predviđanje brzine gibanja klizišta Kostanjek (RPV - dubina do razine podzemne vode; RPV_v – brzina promjene razine podzemne vode); b) podjela regija s obzirom na regresijsko stablo.....	73
Slika 5.1. Dijagrami rasipanja dnevnih kumulativnih pomaka na klizištu Kostanjek za GNSS stanice 01, 02, 03, 04 i 05.....	81
Slika 5.2. Dijagrami rasipanja dnevnih kumulativnih pomaka na klizištu Kostanjek za GNSS stanice 06, 07 i 08.....	82
Slika 5.3. Dijagrami rasipanja dnevnih kumulativnih pomaka na klizištu Kostanjek za GNSS stanice 09, 10 i 11.....	83
Slika 5.4. Dijagrami rasipanja dnevnih kumulativnih pomaka na klizištu Kostanjek za GNSS stanice 12, 13, 14 i 15.	84
Slika 5.5. Smjerovi i iznosi kumulativnih horizontalnih pomaka GNSS stanica na klizištu Kostanjek te prosječne brzine gibanja klizišta određene na temelju izmjerenih pomaka.....	85
Slika 5.6. Vremenski nizovi vertikalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 01, 02, 03, 04 i 05.....	87
Slika 5.7. Vremenski nizovi vertikalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 06, 07, 08, 09 i 10.....	88
Slika 5.8. Vremenski nizovi vertikalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 11, 12, 13, 14, 15.....	89
Slika 5.9. Vremenski nizovi horizontalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 01, 02, 03 i 04.	91

Slika 5.10. Vremenski nizovi horizontalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 05, 06 i 07.....	92
Slika 5.11. Vremenski nizovi horizontalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 08, 09 i 10.....	93
Slika 5.12. Vremenski nizovi horizontalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 11, 12, 13, 14 i 115.....	94
Slika 5.13. Vremenski nizovi brzina (7-dnevni pomični prosjeci) određeni na temelju mjerenja GNSS stanica s označenim razdobljima bržeg (osjenčano sivom bojom) i sporijeg gibanja (osjenčano bijelom bojom) klizišta Kostanjek.	96
Slika 5.14. Vremenski nizovi kumulativnih horizontalnih pomaka, brzina i akceleracija gibanja, izmjerenih stanicom GNSS 08, u I. i II. razdoblju bržeg gibanja. Sivo su osjenčana razdoblja sporijeg gibanja.	102
Slika 5.15. Vremenski nizovi kumulativnih horizontalnih pomaka, brzina i akceleracija gibanja, izmjerenih stanicom GNSS 08, u III., IV. i V. razdoblju bržeg gibanja. Sivo su osjenčana razdoblja sporijeg gibanja.	103
Slika 5.16. Pomaci izmjereni inklinometrom u bušotini B-1. Nulto mjerenje provedeno je 4.4.2012.	104
Slika 5.17. Interval jezgre bušotine B-1 od 60 do 65 m s označenom zonom klizne plohe.	105
Slika 5.18. Kumulativne i dnevne oborine zabilježene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič i na ombrografu instaliranom na klizištu Kostanjek za razdoblje od rujna 2011. do listopada 2013. godine.....	107
Slika 5.19. Korelacija dnevnih oborina s meteorološke postaje Zagreb-Grič i ombrografa na klizištu Kostanjek za razdoblje od rujna 2011. do listopada 2013. godine.	107
Slika 5.20. Dnevne i kumulativne oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič za razdoblje od rujna 2012. do siječnja 2015.....	108
Slika 5.21. Povratna razdoblja za dnevne oborine u razdoblju od 1862. do 2012. godine, za meteorološku postaju Zagreb-Grič.	109
Slika 5.22. Vremenski nizovi dubina do podzemne vode izmjerenih u piezometru na središnjoj mjernejoj lokaciji 08L (WLS-1) te u četiri kopana zdenca (WLS-2, WLS-3, WLS-4 i WLS-5).....	110
Slika 5.23. Vremenski nizovi apsolutnih razina podzemne vode izmjerenih u piezometru (WLS-1) na središnjoj mjernejoj lokaciji te u četiri kopana zdenca (WLS-2, WLS-3, WLS-4 i WLS-5).....	111
Slika 5.24. Karta dubina do podzemne vode, apsolutnih razina podzemne vode (RPV) te pornih tlakova na kliznoj plohi koju je interpretirao Ortolan (1996).	112
Slika 5.25. Histogrami učestalosti brzina promjene dubine do razine podzemne vode na klizištu Kostanjek. Negativne vrijednosti brzine promjene dubine ukazuju na podizanje razine podzemne vode.	114
Slika 6.1. Kumulativni horizontalni pomaci, dubine do podzemne vode i dnevne oborine u razdoblju od siječnja 2013. do siječnja 2015. godine.	115
Slika 6.2. Dnevne i kumulativne oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode izmjerene na klizištu Kostanjek, za razdoblje od rujna 2012. do siječnja 2015 godine.....	116
Slika 6.3. Oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjek za razdoblja podizanja razine podzemne vode A i B.....	117
Slika 6.4. Oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjek za razdoblja podizanja razine podzemne vode C i D.	118
Slika 6.5. Oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjek za razdoblja podizanja razine podzemne vode E i F.....	119
Slika 6.6. Oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjek za razdoblja podizanja razine podzemne vode G i H.....	120
Slika 6.7. Oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjek za razdoblja podizanja razine podzemne vode I, J i K.	121
Slika 6.8. Dijagram toka određivanja dnevnih oborina s otopljenim snijegom.	122

Slika 6.9. Unakrsna korelacija razine podzemne vode i kumulativne oborine za svih 11 glavnih razdoblja podizanja razine podzemne vode. Na slici je označen i vremenski pomak u danima između razdoblja oborina koje su prouzročile podizanje razine podzemne vode i razdoblja podizanja razine podzemne vode.	123
Slika 6.10. Koeficijenti korelacije između kumulativnih prethodnih oborina i promjene razine podzemne vode tijekom 11 glavnih (tamno siva boja), odnosno svih 16 razdoblja (svijetlo siva boja) podizanja razina podzemne vode.	124
Slika 6.11. Odnos između kumulativne prethodne oborine i podizanja razine podzemne vode na klizištu Kostanjek.	126
Slika 6.12. Dijagram trajanja i količine oborina.	126
Slika 6.13. Nivogrami podizanja razina podzemne vode na klizištu Kostanjek za razdoblja podizanja od A do K.	128
Slika 6.14. Teoretski nivogrami podizanja razina podzemne vode na klizištu Kostanjek za promjene od 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3 i 3,5 m.	129
Slika 6.15. Najdulja recesija razine podzemne vode izmjerena na središnjem dijelu klizištu Kostanjek i njena teoretska krivulja.	130
Slika 6.16. Prikaz izmjerene razine podzemne vode i razina podzemne vode određenih višestrukom linearnom regresijom.	135
Slika 6.17. Prikaz izmjerene brzine promjene razine podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode određene višestrukom linearnom regresijom.	136
Slika 6.18. Prikaz izmjerene dubine i dubine do podzemne vode određene metodom slučajnih šuma.	137
Slika 6.19. Značajnost prediktorskih varijabli u predviđanju razine podzemne vode metodom slučajnih šuma.	138
Slika 6.20. Prikaz izmjerene brzine promjene razine podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode određene metodom slučajnih šuma.	139
Slika 6.21. Značajnost prediktorskih varijabli u predviđanju razine podzemne vode metodom slučajnih šuma.	140
Slika 6.22. Razine podzemne vode dobivene <i>k</i> -strukom unakrsnom validacijom modela višestruke linearne regresije i modela slučajnih šuma.	141
Slika 6.23. Dubine do podzemne vode dobivene validacijom modela višestruke linearne regresije i modela slučajnih šuma. Siva i bijela područja na dijagramu predstavljaju skupove od 30 dana, odnosno 40 dana za skup 24.	142
Slika 6.24. Brzine promjene razine podzemne vode dobivene <i>k</i> -strukom unakrsnom validacijom modela višestruke linearne regresije i modela slučajnih šuma.	143
Slika 6.25. Brzine promjene razine podzemne vode dobivene validacijom modela višestruke linearne regresije i modela slučajnih šuma. Siva i bijela područja na dijagramu predstavljaju skupove od 30 dana, odnosno 40 dana za skup 24.	144
Slika 6.26. Predviđanje dubine do razine podzemne vode metodom višestruke linearne regresije.	146
Slika 6.27. Predviđanje dubine do razine podzemne vode metodom slučajnih šuma.	147
Slika 6.28. Dubine do razine podzemne vode za različita razdoblja, određene na temelju predviđanja brzine promjene razine podzemne vode metodom višestruke linearne regresije.	147
Slika 6.29. Dubine do razine podzemne vode za različita razdoblja, određene na temelju predviđanja brzine promjene razine podzemne vode metodom slučajnih šuma.	148
Slika 6.30. Srednje kvadratne pogreške predviđanja za različita razdoblja određene na temelju modela višestruke linearne regresije i modela slučajnih šuma.	148
Slika 6.31. Kumulativni horizontalni pomaci i dubine do razine podzemne vode u razdobljima bržeg gibanja. Sivo osjenčana područja na dijagramu predstavljaju razdoblja sporijeg gibanja.	150

Slika 6.32. Odnos brzine gibanja klizišta i razine podzemne vode u razdobljima bržeg gibanja. Na dijagramima je točkama prikazan odnos između 7-dnevnih pomičnih prosjeka brzine i dnevnih dubina do podzemne vode, a linije sa strelicama prikazuju vremenski slijed događaja. Crna linija predstavlja uprosječene vrijednosti točkaka na dijagramu (5-dnevni pomični prosjek) radi jasnijeg prikaza.	152
Slika 6.33. Brzine gibanja klizišta i razine podzemne vode za sva razdoblja podizanja i sva razdoblja snižavanja razine podzemne vode.	153
Slika 6.34. Odnos između izmjerenih brzina gibanja klizišta i brzina gibanja klizišta modeliranih višestrukom linearnom regresijom.	155
Slika 6.35. Odnos između izmjerenog kumulativnog horizontalnog pomaka klizišta i pomaka klizišta određenih na temelju brzina modeliranih višestrukom linearnom regresijom.	156
Slika 6.36. Odnos između izmjerenih brzina gibanja klizišta i brzina modeliranih metodom slučajnih šuma.	157
Slika 6.37. Značajnost parametara u modelu slučajnih šuma primijenjenom na cijeli skup podataka.	157
Slika 6.38. Značajnost parametara u predviđanju brzine gibanja metodom slučajnih šuma: a) za razdoblja podizanja razine podzemne vode; b) razdoblja snižavanja razine podzemne vode.	158
Slika 6.39. Odnos između izmjerenih kumulativnih pomaka i kumulativnih pomaka izračunatih iz brzina gibanja klizišta modeliranih metodom slučajnih šuma.	158
Slika 6.40. Brzine gibanja klizišta dobivene <i>k</i> -strukom unakrsnom validacijom modela slučajnih šuma primijenjenog na cijelom skupu podatka i modela primijenjenog zasebno za razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode.	160
Slika 6.41. Brzine gibanja klizišta dobivene validacijom modela slučajnih šuma primijenjenog na cijelom skupu podatka i modela primijenjenog zasebno za razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode. Siva i bijela područja na dijagramu predstavljaju skupove od 30 dana, odnosno 37 dana za skup 24.	161
Slika 6.42. Kumulativni horizontalni pomaci, dnevne oborine i kumulativne dnevne oborine u razdobljima bržeg gibanja I (Ia, Ib, Ic) i II.	163
Slika 6.43. Kumulativni horizontalni pomaci, dnevne oborine i kumulativne dnevne oborine u razdobljima bržeg gibanja III, IV i V.	163
Slika 6.44. Odnos između kumulativne oborine i horizontalnog pomaka na klizištu Kostanjek.	164
Slika 6.45. Predviđanje kumulativnih pomaka za različita vremenska razdoblja dobivena metodom slučajnih šuma.	166
Slika 6.46. Srednja kvadratna pogreška za različita vremenska razdoblja predviđanja određena na temelju modela slučajnih šuma te apsolutne razlike izmjerenog kumulativnog pomaka i pomaka predviđenog modelom na kraju svakog razdoblja predviđanja.	166
Slika 6.47. Predviđanje kumulativnih pomaka na temelju predviđene razine podzemne vode za razdoblje od 30 dana.	167
Slika 6.48. Predviđanje kumulativnih pomaka na temelju predviđene razine podzemne vode za razdoblje od 60 dana.	167
Slika 6.49. Predviđanje kumulativnih pomaka na temelju predviđene razine podzemne vode za razdoblje od 90 dana.	168
Slika 6.50. Srednja kvadratna pogreška za različita razdoblja predviđanja modelom slučajnih šuma na temelju predviđene razine podzemne vode te razlike između izmjerenog kumulativnog pomaka i predviđenog pomaka na kraju svakog razdoblja predviđanja.	169
Slika 6.51. Pogreška predviđanja modelom slučajnih šuma na temelju podataka predviđene razine podzemne vode, s obzirom na izmjereni kumulativni pomak u razdoblju predviđanja.	169

Popis tablica

Tablica 2.1. Klasifikacija brzine klizanja (Cruden i Varnes, 1996).....	7
Tablica 2.2. Klasifikacija stanja aktivnosti klizišta (Cruden i Varnes, 1996).	8
Tablica 2.3. Klasifikacija puzanja (modificirano prema Hutchinson, 1988 i Ng, 2007).	11
Tablica 2.4. Obrasci gibanja u odnosu na porni tlak, na klizištu Wealden Beds (Ng, 2007; preuzeto iz Allison i Brunsden, 1990).....	22
Tablica 2.5. Obrasci gibanja u odnosu na porni tlak, na klizištu Tessina (Ng, 2007; preuzeto iz Petley i dr., 2005).	22
Tablica 3.1. Dimenzije klizišta Kostanjek prema Stanić i Nonveiller (1995, 1996) i Ortolan (1996).	46
Tablica 3.2. Fizički i mehanički parametri materijala s klizišta Kostanjek (Stanić i Nonveiller, 1996).....	51
Tablica 3.3. Analiza srednjih vrijednosti horizontalnih pomaka klizišta Kostanjek u razdobljima od 1963. do 1988. godine i od 1988. do 1994. godine po pojedinim kliznim ploham (Ortolan, 1996).	57
Tablica 5.1. Pokrivenost podacima GNSS mjerenja od početka mjerenja do 15.1.2015.	77
Tablica 5.2. Izračunate preciznosti mjerenja 15 permanentnih GNSS stanica.	78
Tablica 5.3. Kumulativni površinski pomaci i prosječna brzina gibanja GNSS stanica izračunati iz 7-dnevnih pomičnih prosjeka od početka mjerenja do 14.1.2015.	79
Tablica 5.4. Smjerovi i nagibi vektora ukupnog pomaka GNSS stanica.	86
Tablica 5.5. Razdoblja sporijeg gibanja na klizištu Kostanjek od rujna 2012. do siječnja 2015. godine.	97
Tablica 5.6. Kumulativni horizontalni pomaci tijekom razdoblja sporijeg gibanja, izraženi u milimetrima.	98
Tablica 5.7. Prosječne brzine gibanja tijekom razdoblja sporijeg gibanja.	98
Tablica 5.8. Razdoblja bržeg gibanja na klizištu Kostanjek u razdoblju od rujna 2012. do siječnja 2015.	100
Tablica 5.9. Kumulativni horizontalni pomaci tijekom razdoblja bržeg gibanja.....	100
Tablica 5.10. Maksimalne brzine gibanja tijekom razdoblja bržeg gibanja.	101
Tablica 5.11. Ukupne i maksimalne oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič za razdoblje od 1862. do 2015. te tijekom razdoblja praćenja klizišta Kostanjek (rujan 2012. - siječanj 2015.) i razdoblja od nastanka klizišta (1963. - 2012.).....	108
Tablica 5.12. Maksimalne i minimalne dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjek.	111
Tablica 5.13. Brzine promjene dubine do razine podzemne vode (RPV) na klizištu Kostanjek.	113
Tablica 6.1. Podizanje razine podzemne vode i oborine tijekom 11 glavnih, odnosno tijekom svih 16 razdoblja podizanja razine podzemne vode.	125
Tablica 6.2. Dnevna oborina i prethodne oborine korištene kao prediktori dubine do podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode s prikazom statističke značajnosti (p-vrijednost) i regresijskih koeficijenata (koeficijent) dobivenih analizom višestruke linearne regresije.....	132
Tablica 6.3. Oborinski događaji korišteni kao prediktori dubine do podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode s prikazom statističke značajnosti (p-vrijednost) i regresijskih koeficijenata (koeficijent) dobivenih analizom višestruke linearne regresije.	132
Tablica 6.4. Efektivne oborine korištene kao prediktori dubine do podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode s prikazom statističke značajnosti (p-vrijednost) i regresijskih koeficijenata (koeficijent) dobivenih analizom višestruke linearne regresije.	133

Tablica 6.5. Modificirane oborine različitih trajanja korištene kao prediktori dubine do podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode s prikazom statističke značajnosti (p-vrijednost) i regresijskih koeficijenata dobivenih analizom višestruke linearne regresije.	133
Tablica 6.6. Vremenske varijable koje opisuju sezonske utjecaje na dubinu do podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode s prikazom statističke značajnosti (p-vrijednost) i regresijskih koeficijenata (koeficijent) dobivenih analizom višestruke linearne regresije.	134
Tablica 6.7. Statistički pokazatelji dobiveni usporedbom izmjerenih podataka i podataka dobivenih modelima višestruke linearne regresije i slučajnih šuma.	138
Tablica 6.8. Statistički pokazatelji dobiveni usporedbom izmjerenih podataka o brzini promjene razine podzemne vode i podataka dobivenih modelima višestruke linearne regresije i slučajnih šuma.	139
Tablica 6.9. Srednja kvadratna pogreška za razdoblja testiranja modela razine podzemne vode metodama višestruke linearne regresije i slučajnih šuma.	143
Tablica 6.10. Srednja kvadratna pogreška za razdoblja testiranja modela brzine promjene razine podzemne vode metodama višestruke regresije i slučajnih šuma.	145
Tablica 6.11. Dubine do podzemne vode tijekom razdoblja bržeg gibanja.	151
Tablica 6.12. Nezavisne varijable korištene u predviđanju brzina gibanja te p-vrijednosti i regresijski koeficijenti statistički značajnih varijabli u analizama višestruke linearne regresije.	154
Tablica 6.13. Srednje kvadratne pogreške, prosječno odstupanje i maksimalne razlike između izmjerenih i modeliranih vrijednosti dobivene na temelju različitih modela odnosa razine podzemne vode i brzine gibanja klizišta.	159
Tablica 6.14. Usporedba kvalitete modela slučajnih šuma na temelju statističkih pokazatelja određenih <i>k</i> -strukom unakrsnom validacijom i validacijom.	160
Tablica 6.15. Srednja kvadratna pogreška za razdoblja testiranja modela slučajnih šuma.	161
Tablica 6.16. Odnos oborina i kumulativnih pomaka klizišta Kostanjek.	164

1. UVOD

Klizanje je proces gibanja stijene ili tla niz padinu pod utjecajem gravitacije (Cruden i Varnes, 1996), a klizište je pojava koja nastaje procesom klizanja. Klizišta predstavljaju različite i složene procese kao što su primjerice translacijsko ili rotacijsko klizanje, tečenje, odronjavanje, prevrtanje ili bočno razmicanje. Iako predstavljaju prirodnu pojavu (primjerice Bromhead i Ibsen, 2007; Chigira i dr., 2010), klizišta se sve češće nastaju i kao posljedica ljudskih aktivnosti (primjerice Muller, 1968; Ulusay i Aksoy, 1994; Guadagno i dr., 1999; Sammarco, 2004). Jedno od takvih klizišta nastalih kao posljedica ljudske aktivnosti je i klizište Kostanjek, najveće klizište u Republici Hrvatskoj.

Klizište Kostanjek se nalazi na jugozapadnim obroncima planine Medvednica u zapadnom dijelu grada Zagreba u gradskoj četvrti Podsused-Vrapče. S obzirom na dimenzije klizišta prema modelu koji je interpretirao Ortolan (1996), prema kojemu volumen pokrenute mase iznosi $32 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, a dubina klizne plohe 90 m, ovo klizište spada u velika i duboka klizišta. Klizište Kostanjek pokrenuto je početkom 1963. godine kao posljedica rudarskih aktivnosti u podnožju brda uz Ulicu Aleja Bologna (Stanić i Nonveiller, 1995). Eksploatacija lapora u zaleđu bivše tvornice cementa „Sloboda“ u Podsusedu prouzročila je globalnu nestabilnost padina izgrađenih od sarmatskih i pontskih lapora čime je formirano klizište približne površine oko jedan kvadratni kilometar. Tijekom svih 52 godine brzina gibanja klizišta Kostanjek je ekstremno spora do vrlo spora prema klasifikaciji Cruden i Varnes (1996). 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.

Maksimalni kumulativni pomaci klizišta Kostanjek u razdoblju od pokretanja klizišta 1963. godine do 1988. godine iznosili su 6,1 m (Ortolan, 1996), a isti autor je pretpostavio da je razdoblje maksimalnih brzina klizanja trajalo između 1973. i 1976. godine kada je prosječni maksimalni horizontalni pomak iznosio 44 cm godišnje. 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.

Na klizištu Kostanjek je u razdoblju od 2011. do 2013. godine, u okviru znanstvenog hrvatsko-japanskog SATREPS FY2008 projekta „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje rizika klizanja i bujica u Hrvatskoj“, uspostavljen integrirani sustav automatiziranog praćenja klizišta (Mihalić i Arbanas, 2013; Krkač i dr., 2013a, 2014d) pod nazivom „Opservatorij za praćenje klizišta Kostanjek“. Svrha uspostavljanja ovog sustava je kontinuirano praćenje parametara klizanja klizišta Kostanjek u

realnom vremenu, odnosno gibanja klizišta i pojava koje utječu na aktivnost klizišta kao što su oborine, promjene razine podzemne vode i potresi (Mihalić Arbanas i dr., 2013a; Krkač i dr., 2014b). Kontinuirani nizovi podataka prikupljeni senzorskim mrežama omogućavaju analize gibanja klizišta i uzroka klizanja, kao i analize međusobne zavisnosti između dinamike klizanja i pojava koje na nju utječu.

U prošlosti je učestalost opažanja mjernim uređajima uobičajeno bila mala zbog čega se pretpostavljalo da je gibanje sporih klizišta između dva mjerenja jednoliko (Picarelli, 2007). Današnja tehnologija (kakvom je opremljen i integrirani sustav praćenja na klizištu Kostanjek) omogućava gotovo kontinuirana mjerenja, na temelju čega je ustanovljeno da je gibanje klizišta promjenljivo u vremenu, čak i u kratkim vremenskim intervalima, te da pokazuje različite obrasce (engl. *pattern*) ponašanja (Petley i dr., 2005). Brzina gibanja sporih klizišta najviše ovisi o promjenama razine podzemne vode (Corominas i dr., 2005; Gonzalez i dr., 2008).

Razlog zbog kojega oborina, otapanje snijega i ciklus smrzavanja i odmrzavanja utječu na stabilnost padine je taj što uzrokuju porast razine podzemne vode, a time i povećanje pornih tlakova (smanjenje efektivnih naprezanja u tlu) zbog čega dolazi do smanjenja posmične čvrstoće stijena i tala (Picarelli, 2007). Drugi razlog je to što voda koja se infiltrira u stijene ili tlo povećava stupanj saturiranosti tla iznad razine podzemne vode, a time i težinu tla čime uzrokuje povećanje aktivnih sila što može dovesti do pojave sloma i nestabilnosti padine. Utjecaji oborina na razine podzemne vode su raznoliki i složeni (Cascini i dr., 2006). Iako se razine podzemne vode i porni tlakovi rutinski prate na mnogim klizištima, njihov složen odnos iziskuje primjenu znanstvenih metoda istraživanja. Unatoč dokazanoj zavisnosti, postoji vrlo malo istraživanja koja se bave kinematikom klizanja te modeliranjem pomaka u zavisnosti o promjenama razine podzemne vode, a neki od takvih primjera su istraživanja koja su proveli Allison i Brunnsden (1990) i Massey (2010).

Konačni rezultat istraživanja klizišta na temelju analiza podataka praćenja su modeli koji opisuju parametre gibanja klizišta u funkciji parametara uzroka klizanja kao što su oborine i promjene razine podzemne vode. U pregledom radu Federico i dr. (2012) definirani su fenomenološki modeli predviđanja gibanja klizišta, odnosno sloma kosine, kao oni koji su razvijeni na temelju empirijskih, odnosno statističkih odnosa, izvedenih iz analiza potpunih nizova podataka kao što su primjerice gibanje na padini u vremenu, razina podzemne vode u padini te oborine na užem ili širem području klizišta. Pri definiranju fenomenoloških modela, za razliku od modela koji se temelje na fizičkim značajkama, u obzir se ne uzimaju fizičko-mehanički parametri stijena i tala, budući da njih često nije moguće u potpunosti definirati (Federico i dr., 2012). Osim predviđanja sloma kosine, fenomenološkim modelima definiraju se i odnosi između oborina i promjena razine podzemne vode i/ili pornih tlakova (Cascini i dr., 2010).

Rezultati analiza gibanja klizišta te odnosa između uzroka i gibanja klizišta su osnova 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.

1.1. Svrha i ciljevi istraživanja

Svrha istraživanja za disertaciju je uspostava fenomenološkog modela klizišta Kostanjek, odnosno modela ponašanja velikog, dubokog i sporog klizišta, koji se temelji na empirijskim analizama parametara klizanja dobivenih kontinuiranim praćenjem klizišta Kostanjek. Ovako definirano istraživanje zasniva se na sljedećim hipotezama:

1. Postoji zavisnost između oborina i promjena razine podzemne vode na klizištu Kostanjek.
2. Postoji zavisnost između promjena razine podzemne vode i gibanja klizišta Kostanjek.
3. Na temelju uspostavljenih odnosa između oborina, razina podzemne vode i gibanja moguće je predvidjeti ponašanje klizišta Kostanjek u odnosu na glavni inicijator klizanja (oborine).

Kao ciljevi istraživanja definirano je sljedeće:

1. Uspostava integriranog sustava praćenja klizišta Kostanjek za dugoročno, kontinuirano i automatizirano prikupljanje podataka o gibanju i uzrocima klizanja koji se mogu koristiti za izradu prognoznih modela gibanja klizišta Kostanjek.
2. Analiza kontinuiranih nizova konzistentnih podataka o pomacima i brzinama gibanja na površini klizišta, na temelju podataka praćenja GNSS (engl. *Global Navigation Satellite System*) permanentnom mrežom, i određivanje reprezentativnih obrazaca gibanja.
3. Analiza kontinuiranih nizova konzistentnih podataka o oborinama i razinama podzemne vode i određivanje reprezentativnih hidrometeoroloških i hidrogeoloških parametara.
4. Razvoj fenomenološkog modela klizišta Kostanjek na osnovi statističkih analiza parametara uzroka klizanja i gibanja klizišta i to: (1) oborina i promjena razine podzemne vode; (2) promjena razine podzemne vode i gibanja klizišta; (3) oborina, promjena razina podzemne vode i gibanja.
5. Verifikacija modela, odnosno predviđanje pomaka klizišta Kostanjek, na temelju uspostavljenog fenomenološkog modela.

U svrhu ostvarivanja ciljeva, prvo je uspostavljen integrirani sustav praćenja klizišta za dugoročno, kontinuirano i automatizirano prikupljanje podataka. Sustav praćenja sastoji se od 40-tak uređaja koji mjere parametre gibanja, deformacije i aktivnosti klizišta te parametre hidroloških i hidrogeoloških uvjeta. Parametri gibanja, deformacije i aktivnosti klizišta mjere se pomoću mreže 15 GNSS stanica i sedam žičanih ekstenzometara na površini klizišta te jednog inklinometra, četiri vertikalna ekstenzometra i pet akcelometara ispod površine. Hidrološki i hidrogeološki parametri mjere se u dvije bušotine, četiri zdenaca i na dva površinska toka uređajima za kontinuirano mjerenje razine vode.

Istovremeno s uspostavom sustava praćenja, u razdoblju od ožujaka 2011. do veljače 2013. godine, započelo je i prikupljanje te obrada kontinuiranih nizova podataka o gibanju klizišta i uzrocima klizanja. Razdoblje prikupljanja podataka korištenih u ovom radu, završilo je u siječnju 2015. godine. Podaci mjerenja najprije su filtrirani, odnosno zaglađeni tehnikom pomičnog prosjeka (engl. *moving average*). Svrha filtracije je bila određivanje i smanjenje pogrešaka mjerenja koje nastaju kao posljedica nepreciznosti mjernog instrumenta, ali i vanjskih uvjeta kao što su primjerice meteorološki uvjeti. Također, iz filtriranih podataka moguće je točnije odrediti vrijeme reaktivacije klizanja što je nužno za pravilnu interpretaciju odnosa između gibanja klizišta i uzroka gibanja. Vrijeme reaktivacije određeno je

na podacima mjerenja GNSS stanica korištenjem statističke metode koja se naziva analiza točke promjene (eng. *change point analyses*).

Na temelju prikupljenih podataka uspostavljene su dvije hipoteze: (1) postoji zavisnost između oborina i promjene razine podzemne vode na klizištu Kostanjek; te (2) postoji zavisnost između promjene razine podzemne vode i brzine gibanja klizišta Kostanjek. Navedene hipoteze dokazane su i provjerene na temelju podataka mjernih uređaja instaliranih na središnjem dijelu klizišta statističkim metodama, odnosno metodama korelacijske analize.

Nakon što su dokazane hipoteze 1 i 2, uspostavljena je i hipoteza 3, koja u okviru ove disertacije predstavlja krajnji cilj istraživanja. Hipoteza 3 pretpostavlja da je na temelju uspostavljenih odnosa između oborina, razine podzemne vode i gibanja moguće predvidjeti gibanje klizišta Kostanjek. Metode koje su korištene pri predviđanju pomaka su metoda višestruke linearne regresije te metode slučajnih šuma (eng. *random forest*). Ovako određeni odnosi između uzroka gibanja i gibanja klizišta Kostanjek, na temelju statističkih analiza, predstavljaju fenomenološki model klizišta Kostanjek.

Fenomenološki model klizišta Kostanjek verificiran je tako da je na temelju uspostavljenog fenomenološkog modela provedeno predviđanje gibanja za razdoblje od posljednjih 10 do 90 dana praćenja klizišta Kostanjek. S obzirom na preciznost, fenomenološki model koji se temelji na metodi slučajnih šuma može poslužiti za predviđanje daljnjih pomaka klizišta Kostanjek, odnosno za razvoj sustava ranog upozoravanja koji će se zasnivati na podacima kontinuiranog praćenja u realnom vremenu senzorskim mrežama „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek“.

1.2. Struktura disertacije

U prvom poglavlju (Uvod) opisan je značaj predmetnog istraživanja u odnosu na relevantne znanstvene spoznaje i potreba za praktičnom primjenom rezultata istraživanja te su definirani svrha i ciljevi istraživanja, kao i struktura disertacije.

U drugom poglavlju (Pregled literature) opisana su dosadašnja istraživanja obrazaca gibanja klizišta, uzroci nastanka odnosno gibanja klizišta s naglaskom na oborine i razine podzemne vode te njihovi međusobni odnosi i problematika istraživanja. Također su opisane i teorijske osnove na temelju kojih se određuju odnosi između oborina i razine podzemne vode, odnosno razine podzemne vode i gibanja klizišta te oborina i gibanja klizišta. Navode se dvije osnovne vrste modela koji opisuju ove odnose, a to su fenomenološki modeli i modeli koji se temelje na fizičkim značajkama.

U prvom dijelu trećeg poglavlja (Područje istraživanja) dan je sažeti sveobuhvatni pregled najvažnijih značajki područja istraživanja koje su relevantne za pojavu klizišta, a koji se odnosi na prirodne značajke šireg područja klizišta Kostanjek. U drugom dijelu trećeg poglavlja sustavno su navedena i opisana sva povijesna istraživanja klizišta Kostanjek, dok su u trećem opisane povijesne interpretacije klizišta koje se odnose na inženjerskogeološki model klizišta, preduvjete i pokretače klizanja, analize pomaka, analize stabilnosti i projekte sanacije u razdoblju od 1965. do 2008. godine.

U prvom dijelu četvrtog poglavlja (Metode istraživanja) opisan je integrirani sustav praćenja klizišta Kostanjek kojim su prikupljeni ulazni podaci za istraživanje u razdoblju od ukupno dvije godine. Navedeno je svih 40-ak senzora kojima se provodi praćenje klizišta, a detaljnije su opisani permanentna GNSS mreža za praćenje gibanja klizišta na površini, inklinometarska mjerenja za praćenje gibanja u podzemlju te uređaji za kontinuirano praćenje oborina i promjena razina podzemne vode kao uzroka klizanja. U drugom dijelu četvrtog poglavlja prikazane su teorijske osnove statističkih metoda primijenjenih na analizama podataka praćenja izmjerenih integriranim sustavom praćenja klizišta Kostanjek.

U petom poglavlju (Rezultati praćenja klizišta Kostanjek) prikazuju se rezultati praćenja gibanja klizišta i uzroka klizanja u razdoblju od dvije godine. Gibanje klizišta analizirano je na temelju podataka GNSS praćenja s 15 GNSS stanica te na temelju inklinometarskih mjerenja. Prikazane su analize pomaka i brzina gibanja na površini klizišta te identificirani obrasci gibanja klizišta Kostanjek. Uzroci klizanja analizirani su na temelju podataka s ombrografa na klizištu Kostanjek i meteorološke postaje Zagreb Grič, odnosno kontinuiranih mjerenja promjena razine podzemne vode u četiri kopana zdenca i jednoj bušotini.

U šestom poglavlju (Fenomenološki model klizišta Kostanjek) prikazuju se statističke analize odnosa između gibanja klizišta i uzroka klizanja na temelju podatka o gibanju i razini podzemne vode izmjerenih na središnjem dijelu klizišta Kostanjek te podataka o oborinama izmjerenim na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič. U ovom poglavlju na temelju statističkih metoda definiran je fenomenološki model odnosa oborina i promjene razine podzemne vode, promjene razine podzemne vode i gibanja klizišta Kostanjek te je opisan izravni odnos između oborina i gibanja klizišta. Posljednji dio poglavlja predstavlja verifikaciju definiranog fenomenološkog modela na temelju predviđanja razine podzemne vode i gibanja klizišta Kostanjek u razdoblju od posljednjih 10 do 90 dana praćenja klizišta Kostanjek.

U sedmom poglavlju (Diskusija) daje se kritički osvrt na sustav praćenja klizišta Kostanjek te rezultate praćenja klizišta koji su korišteni kao ulazni podaci za istraživanje. Također se raspravlja o rezultatima analiza i statističkim modelima odnosa između uzroka i gibanja klizišta Kostanjek s naglaskom na ograničenja fenomenološkog modela.

U osmom poglavlju (Zaključak) ukratko se iznose najvažniji zaključci koji proizlaze iz rezultata istraživanja i provedenih analiza. Najvažniji zaključci odnose se na potvrdu hipoteza disertacije te na mogućnost predviđanja ponašanja klizišta Kostanjek u odnosu na glavni inicijator klizanja (oborine).

2. PREGLED LITERATURE

Klizišta su česta pojava, kako u prirodnom, tako i u urbanom okolišu. Kada klizišta predstavljaju rizik za ljude i građevine, najčešće se provode mjere sanacije u svrhu smanjenja ili otklanjanja hazarda (Piteau i Peckover, 1978; Holtz i Schuster, 1996; Wyllie i Mah, 2004; Cornforth, 2005). Kod veliki i složenih klizišta uobičajene mjere sanacije, kao što su promjene geometrije padine, drenaže, potporne konstrukcije i/ili unutarnje ojačanje padine, često nije moguće provesti ili su vrlo skupe (Crosta i Agliardi, 2003; Blikra, 2012). U takvim slučajevima provode se preventivne mjere smanjenja rizika, a koje uključuju uspostavu sustava praćenja klizišta. Svrha praćenja klizišta je određivanje uvjeta u kojima dolazi do gibanja klizišta te predviđanje klizanja, odnosno razvoj sustava ranog upozoravanja. Prema definiciji Ujedinjenih naroda sustav ranog upozoravanja predstavlja „skup mjera potrebnih za dobivanje smislenih informacija, vezanih za upozoravanje pojedinaca, zajednica ili organizacija pod utjecajem hazarda, da bi se omogućila priprema i pravovremeno djelovanje radi smanjenja štete ili gubitka“ (UNISDR, 2009).

Praćenje, odnosno monitoring, je definirano kao opažanje određene građevine ili pojave koje se sustavno ponavlja (slika 2.1). Pojave, odnosno veličine, vezane za klizanje mase stijena ili tla niz padinu, koje se mogu mjeriti u vremenu predstavljaju parametre praćenja klizanja. Praćenje parametara vremenski može varirati, od primjerice inklinometarskih mjerenja jednom godišnje pa do primjerice automatiziranih mjerenja u intervalima od jedne sekunde (Olalla, 2004). Prema Schäfer (2008) integrirani sustav praćenja obuhvaća različite vrste senzora kao što su primjerice geodetski, geotehnički i meteorološki senzori. Izbor 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, a primjeri klizišta s integriranim sustavima praćenja su: Ancona (Cotecchia, 2006), Corvara (Corsini i dr., 2005), Tessina (Angeli i dr., 2000; Petley i dr., 2005) i Valoria (Castagnetti i dr., 2013) u Italiji; Gradenbach (Brückl i dr., 2006) u Austriji; Åknes (Blikra, 2012) u Norveškoj; Turtle Mountain (Froese i dr., 2012) u Kanadi; i Grohovo (Arbanas i dr., 2012) u Hrvatskoj. Slijedeća poglavlja detaljnije obrađuju ciljeve dugoročnog praćenja klizišta, odnosno uzroke klizanja i gibanje klizišta.



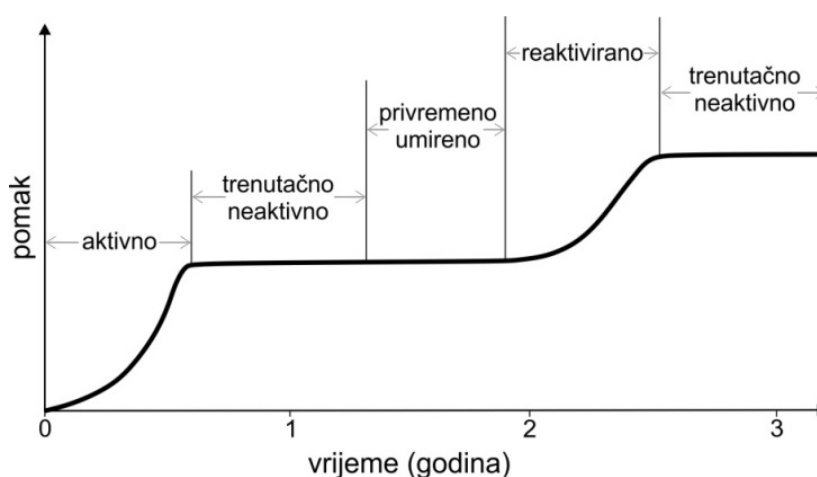
Slika 2.1. Definicija praćenja kao sustavnog ponavljanja opažanja (Stumpf i dr., 2011).

2.1. Gibanje klizišta

Poznavanje obrazaca gibanja omogućava bolje razumijevanje procesa klizanja (Terzaghi, 1950). Jedna od klasifikacija klizanja zasniva se na brzini klizanja (tablica 2.1). 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 kao što su debritni tokovi, zemljani tokovi, odroni 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 (Mansour 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 (slika 2.2) također su definirana su na osnovi brzine gibanja klizišta, a podijeljena su u osam grupa prikazanih u tablici 2.2. 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 (Baroš i dr., 2012).

Tablica 2.1. Klasifikacija brzine klizanja (Cruden i Varnes, 1996).

	opis	brzina (mm/s)	brzina
1	ekstremno sporo	$<5 \times 10^{-7}$	<15 mm/god
2	vrlo sporo	$5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-7}$	15 mm/god - 1,6 m/god
3	sporo	$5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-3}$	1,6 m/god - 13 m/mj
4	srednje brzo	$5 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-1}$	13 m/mj - 1.8 m/h
5	brzo	$5 \times 10^{-1} - 5 \times 10^1$	1.8 m/h - 3 m/min
6	vrlo brzo	$5 \times 10^1 - 5 \times 10^3$	3 m/min - 5 m/s
7	ekstremno brzo	$>5 \times 10^3$	>5 m/s

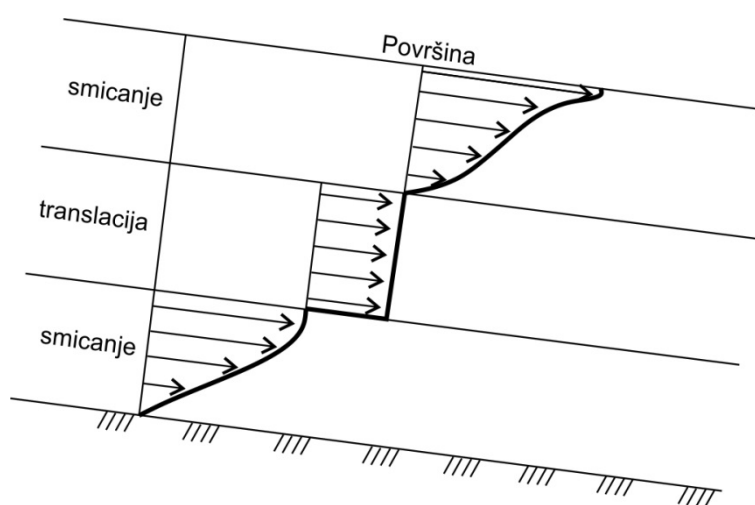


Slika 2.2. Stanja aktivnosti klizišta prema klasifikaciji Cruden i Varnes (1996).

Tablica 2.2. Klasifikacija stanja aktivnosti klizišta (Cruden i Varnes, 1996).

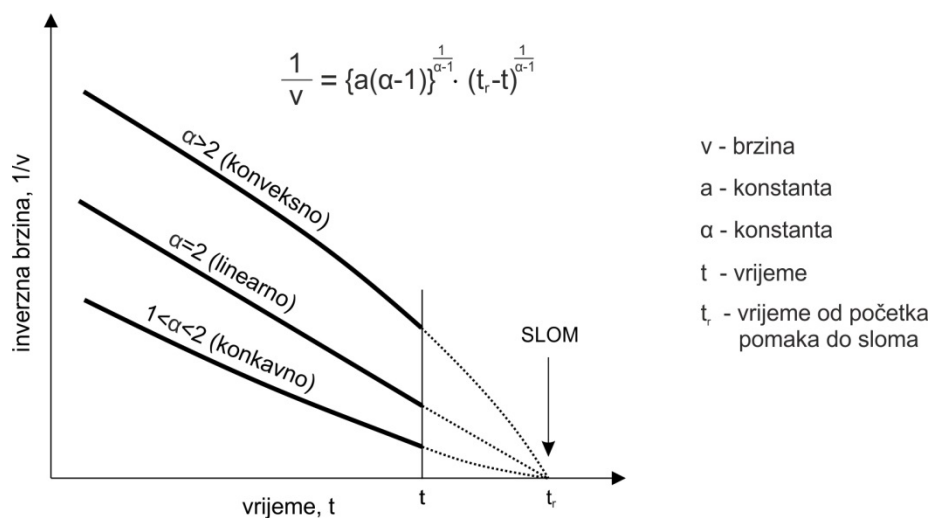
	naziv	definicija
1	aktivno (eng. <i>active</i>)	klizište u pokretu
2	trenutačno neaktivno (eng. <i>suspended</i>)	klizište koje se kretalo u posljednjih 12 mjeseci, ali se trenutačno ne kreće
3	reaktivirano (eng. <i>reactivated</i>)	aktivno klizište koje je prije bilo neaktivno
4	neaktivno (eng. <i>inactive</i>)	klizište koje se nije pokretalo posljednjih 12 mjeseci. Neaktivna klizišta se dijele na: privremeno umirena (4.1), trajno umirena (4.2), stabilizirana (4.3) i reliktna (4.4)
4.1	privremeno umireno (eng. <i>dormant</i>)	neaktivno klizište koje se može reaktivirati zbog istih ili nekih drugih uzroka
4.2	trajno umireno (eng. <i>abandoned</i>)	neaktivno klizište koje više nije pod utjecajem uzroka klizanja
4.3	stabilizirano (eng. <i>stabilized</i>)	neaktivno klizište zaštićeno mjerama sanacije
4.4	reliktno (eng. <i>relict</i>)	neaktivno klizište koje je bilo aktivno u klimatskim i geomorfološkim uvjetima koji više ne vladaju

Vektor koji opisuje ukupnu promjenu položaja točke naziva se vektor pomaka. Analizom razvoja vektora pomaka u nekom vremenskom intervalu moguće je odrediti veličinu i smjer pomaka klizišta te brzinu i ubrzanje (akceleraciju) gibanja klizišta ili klizanja. Mjerenjima pomaka u podzemlju mogu se odrediti različiti mehanizmi gibanja unutar kliznog tijela, kao na primjeru prikazanom na slici 2.3. Kontinuirano mjerenje pomaka klizišta nužno je za pravilnu interpretaciju podataka i razumijevanje kinematike klizanja. Jedan od nedostataka povremenih mjerenja pomaka je pretpostavka da pomak između dva mjerenja ima konstantnu brzinu. Ova pretpostavka može dovesti do netočne interpretacije ponašanja klizišta budući da se određeni ukupan pomak klizišta sastoji od izmjena razdoblja naglog ubrzanja i razdoblja relativnog mirovanja. Na osnovi razlike povremenih mjerenja nije moguće uspostaviti korelaciju koja dobro opisuje odnose između gibanja klizišta i pornih tlakova, odnosno oborina (Corominas i dr., 2000).



Slika 2.3. Različiti mehanizmi gibanja unutar kliznog tijela (Baroň i dr., 2012).

Continuirano praćenje koje omogućava poznavanje brzine i ubrzanja klizanja je nužan uvjet za uspostavu sustava za rano upozoravanje. 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. Postoji nekoliko metoda predviđanja sloma klizišta koje se zasnivaju na mjerenju pomaka i brzina klizanja. Fukuzono (1985) predviđa slom na temelju inverzne vrijednosti brzine klizanja na površini klizišta ($1/v$). Ukoliko se brzina klizanja povećava, njezina inverzna vrijednost će se smanjivati. Teoretski bi se slom padine trebao dogoditi kada se inverzna vrijednost brzine približi nuli (slika 2.4), odnosno kada se brzina približi beskonačnosti.

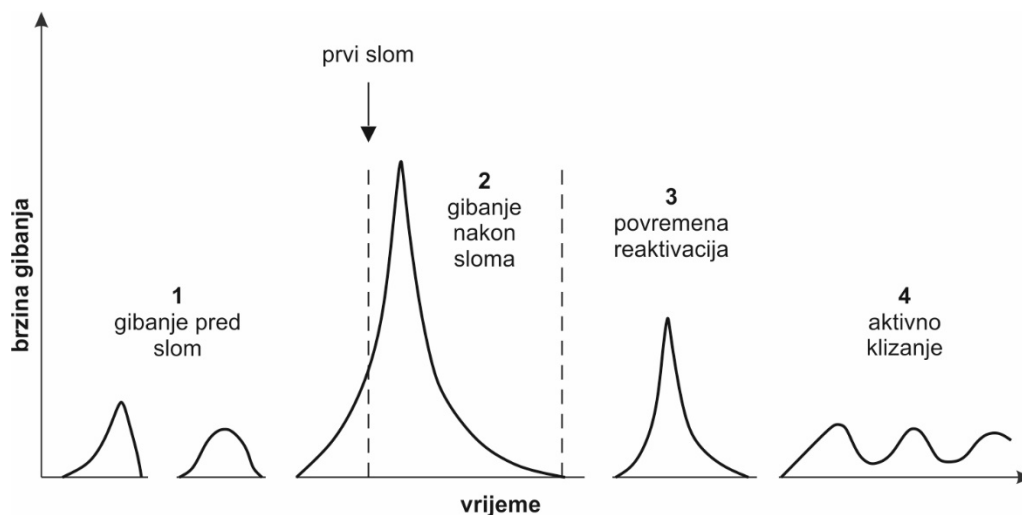


Slika 2.4. Promjena inverzne brzine klizanja u odnosu na vrijeme sloma (Fukuzono, 1985).

Rose i Hungr (2007), odnosno Busslinger (2009), predlažu sljedeća opća pravila vezana za primjenu metode inverzne brzine klizanja: (1) metoda se ne bi trebala primjenjivati samostalno budući da mjerenje brzine predstavlja samo jedan od parametara monitoringa klizišta; (2) metoda nije primjenjiva kod odrona u stijenskoj masi, kod kojih prevladava krti slom; (3) podaci opažanja moraju se obraditi kako bi se uklonile pogreške nastale mjerenjem te se iz mjerenja moraju izuzeti pomaci nastali kao posljedica lokalnih deformacija; (4) predviđanje sloma zasniva se na identifikaciji pouzdanih trendova te je opažanja potrebno obavljati što je moguće duže prije samog sloma, pri čemu je nužno kontinuirano procjenjivati rezultate opažanja, a uspostavljene odnose ažurirati s najnovijim podacima; (5) postupci pri analizi cikličkih promjena brzina ovise o odnosu veličine amplitude ciklusa i udaljenosti krivulje inverznih brzina od horizontalne osi te ako je odnos između ovih dviju veličina velik, može se pretpostaviti da donja točka ciklusa predstavlja slom; (6) podaci koji se podudaraju s nelinearnim trendovima krivulje inverznih brzina pružaju točnije procjene sloma za duža razdoblja, no to metodu čini složenijom.

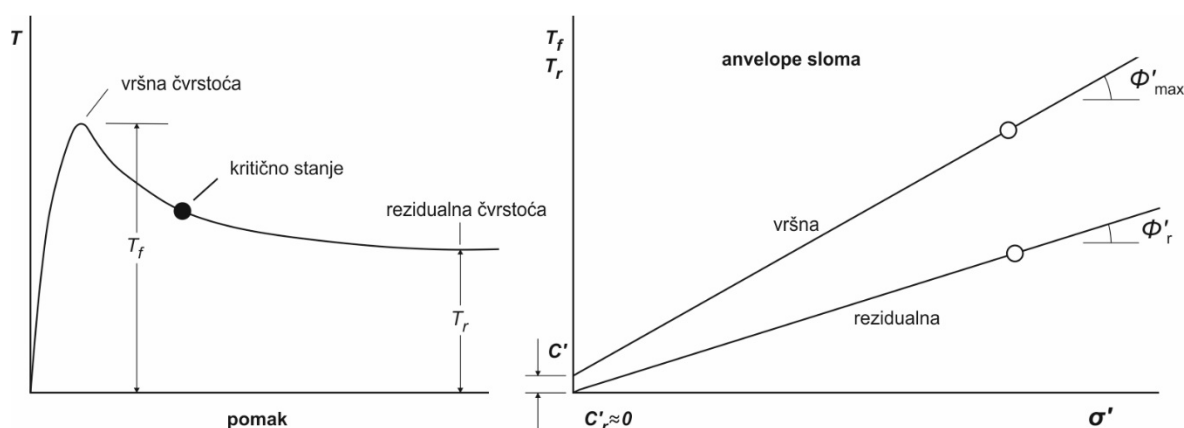
Za razliku od metode prema Fukuzono (1985), Crosta i Agliardi (2002, 2003) predložili su metodu određivanja graničnih vrijednosti brzina za odrone u stijenskoj masi. Metoda se temelji na teoriji ubrzanog puzanja (eng. *accelerated creep*) prema Voight (1988) prema kojoj će se slom dogoditi u trenutku koji odgovara određenom iznosu pomaka. Ova metoda se može primijeniti samo u slučaju nepromjenjivih vanjskih uvjeta.

Prema Leroueil i dr. (1996) i Corominas i dr. (2013) gibanje na padini se može podijeliti u četiri faze prikazane na slici 2.5: (1) gibanje pred slom (eng. *pre-failure*), (2) gibanje nakon sloma (eng. *post-failure*), (3) povremena reaktivacija (eng. *occasional reactivation*) i (4) aktivno klizanje (eng. *active landslide*). Treća i četvrta faza gibanja (povremena reaktivacija i aktivno klizanje) odnose se na klizišta koja se gibaju nakon sloma (Urciuoli i dr., 2007) pri čemu se gibanje kliznog tijela (klizanje) odvija po jednoj ili više kliznih ploha (Fell i dr., 2000). Fell i dr. (2000) svrstavaju treću i četvrtu fazu u jednu fazu, odnosno fazu reaktivacije (eng. *reactivation stage*) budući da je u toj fazi klizna ploha u potpunosti razvijena i da materijali na kliznoj plohi imaju rezidualne parametre čvrstoće. Slom klizišta, koji označava prijelaz između faza gibanja pred slom i gibanja nakon sloma, predstavlja trenutak kada posmična naprezanja u kosini postanu veća od posmične čvrstoće materijala, nakon čega dolazi do smanjenja posmične čvrstoće materijala na rezidualne vrijednosti (Massey, 2010). Dakle, tijekom klizanja po kliznoj plohi, odnosno nakon sloma, vrijednosti parametara čvrstoće materijala, odnosno kohezije (c') i kuta unutarnjeg trenja (ϕ'), smanjuju se s vršnih na rezidualne vrijednosti parametra čvrstoće (c_r' i ϕ_r') (Skempton, 1985) što je prikazano na slici 2.6. Zbog toga su pri ponovnom pokretanju klizišta dovoljna manja posmična naprezanja na kliznoj plohi, da bi se dosegla čvrstoća materijala, nego što su bila pri nastanku klizišta.



Slika 2.5. Faze gibanja klizišta (Leroueil i dr., 1996)

Faza pred slom uobičajeno odgovara puzanju, koje predstavlja deformaciju padine pod utjecajem posmičnih sila manjih od posmične čvrstoće materijala (Varnes, 1978). Pojava puzanja proučava se u okviru različitih disciplina, kao što su geomorfologija (primjerice Selby, 1993), geotehnika (primjerice Varnes, 1983), mehanika tla (primjerice De la Cruz-Reyna i Reyes-Dávila, 2001) i reologija (primjerice Ranalli, 1995). Sveobuhvatnu klasifikaciju puzanja (tablica 2.3) dao je Hutchinson (1988), koji puzanje dijeli na: (1) površinsko puzanje ili puzanje pokrivača (eng. *superficial creep* ili *mantle creep*) koje se uglavnom odnosi na sezonsko puzanje; (2) duboko, kontinuirano puzanje (eng. *deep-seated continuous creep* ili *mass creep*); (3) puzanje pred slom ili progresivno puzanje (eng. *prefailure creep* ili *progressive creep*); i (4) puzanje nakon sloma (eng. *post-failure creep*). Tipovi puzanja 2 i 3 odnose se na mehanizam klizanja, dok se tip 4 odnosi samo na brzinu klizanja.

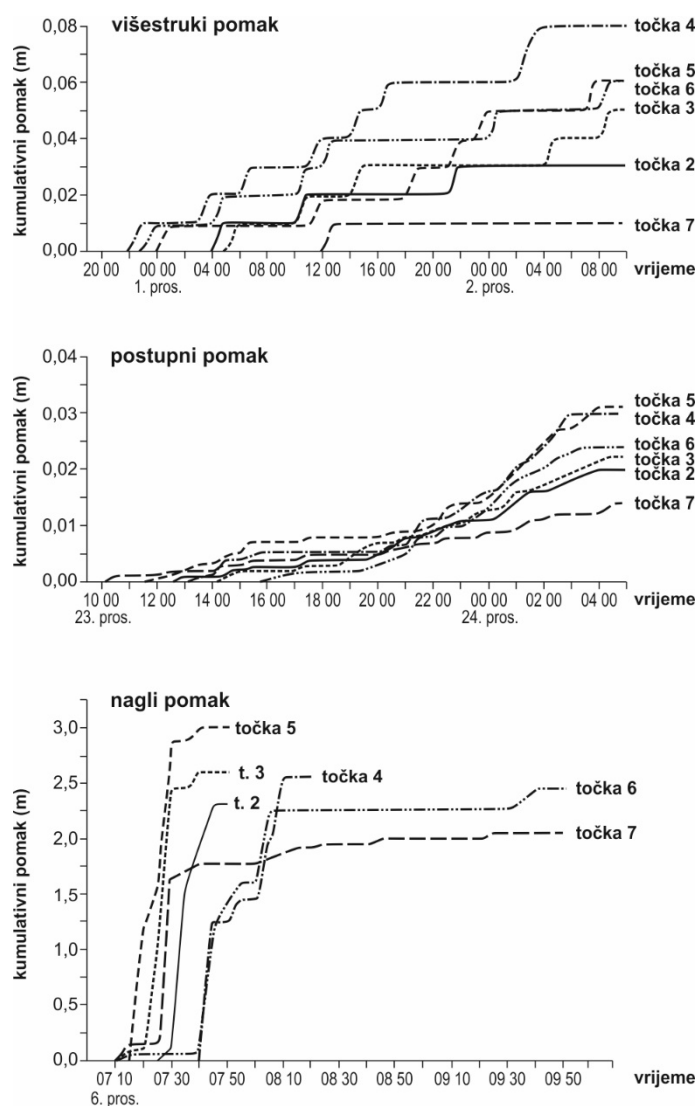


Slika 2.6. Smanjenje parametara čvrstoće nakon sloma s vršnih na rezidualne (Craig, 1997).

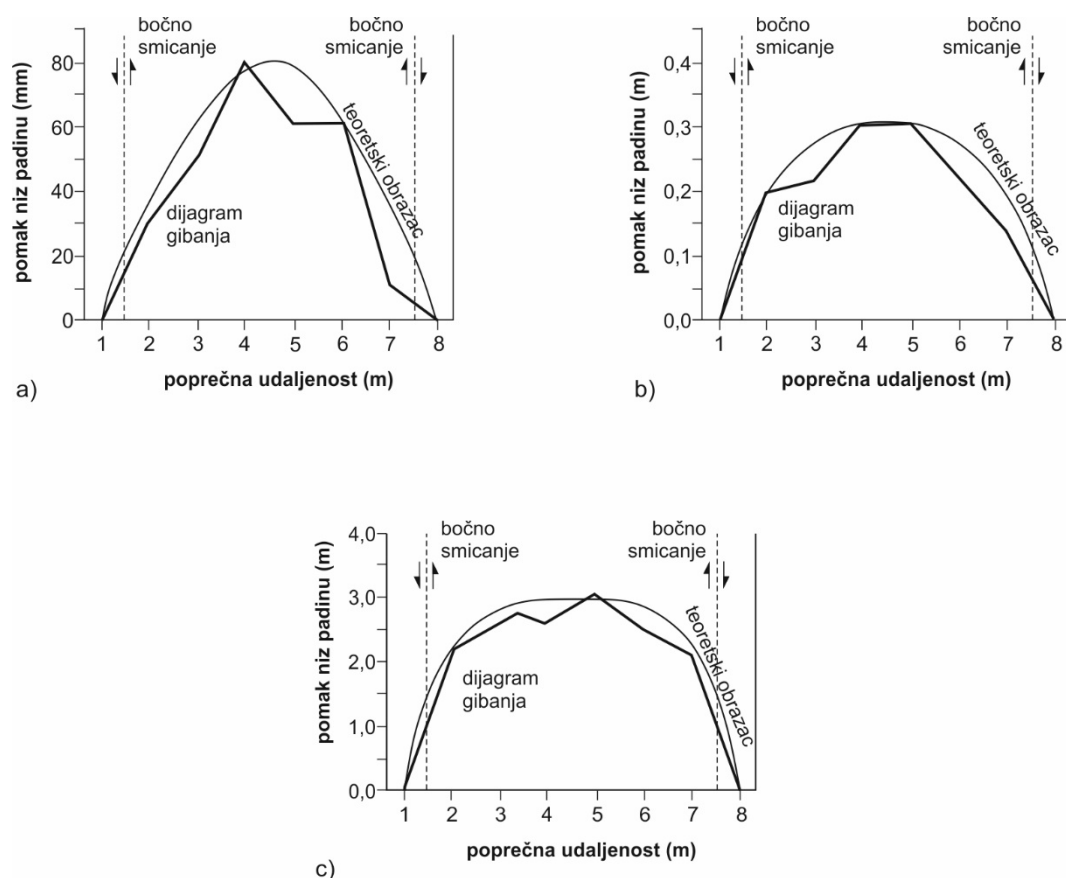
Tablica 2.3. Klasifikacija puzanja (modificirano prema Hutchinson, 1988 i Ng, 2007).

	znanstvena disciplina	tip puzanja	karakteristike	literatura
1	geomorfologija	površinsko, uglavnom sezonsko puzanje ili puzanje pokrivača	ograničeno na pokrivač (manje od 1 m dubine); uključuje volumne promijene uslijed promjena vlažnosti tla i temperature	Carson i Kirkby (1972); Selby (1993)
2	geotehnika	duboko, kontinuirano puzanje	nastaje uslijed konstantnog naprezanja manjeg od čvrstoće materijala	Varnes (1978, 1983); Selby (1993); Fell i dr. (2000)
3	mehanika tla	puzanje pred slom ili progresivno puzanje	ubrzano gibanje pri nastajanju klizne plohe pri čemu dolazi do progresivnog širenja međusobno odijeljenih zona smicanja i njihovog povezivanja u jednu kontinuiranu plohu	Terzaghi (1950); Bjerrum (1967); Ter-Stipanian (1980); De la Cruz-Reyna i Reyes-Dávila (2001)
4	reologija	puzanje poslije sloma	uključuje ponovne pomaka po postojećoj kliznoj plohi	Van Asch (1984); Ranalli (1995)

Allison i Brunsden (1990) su na klizištu Wealden Beds (Engleska) identificirali četiri obrasca gibanja u fazi nakon sloma (slika 2.7): (1) višestruki pomak (eng. *multiple movement*), sastoji se od uzastopnih pomaka malog iznosa u određenim vremenskim intervalima; (2) postupni pomak (eng. *graded slip*), karakteriziran je većim iznosom pomaka unutar kraćeg vremenskog razdoblja u odnosu na višestruki pomak; (3) nagli pomak (eng. *rapid „surge“ movement*), predstavlja veliki pomak u vrlo kratkom vremenskom razdoblju; (4) nasumični pomak (eng. *random movement*). Opisani obrasci gibanja ovisni su o vlažnosti tla, razini podzemne vode, ali i položaju promatrane točke unutar klizišta te se događaju redoslijedom kako su i opisani. Osim toga, Allison i Brunsden (1990) uočili su da brzina gibanja varira unutar granica klizišta, odnosno da se najveće brzine gibanja događaju u središnjim dijelovima klizišta, a najmanje uz bočne granice klizišta (slika 2.8). Ova promjena obrasca gibanja može se objasniti otporom klizanju uslijed trenja na bokovima klizišta. Slične obrasce gibanja klizišta zabilježili su primjerice i Malet i dr. (2002) na klizištu Super-Sauze u Francuskoj i Massey (2010) na klizištu Utiku na Novom Zelandu.

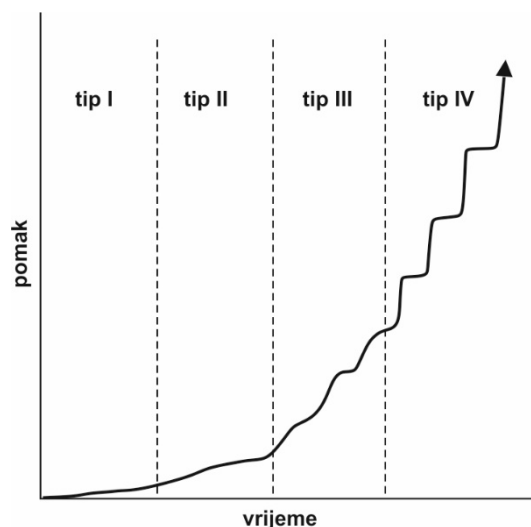


Slika 2.7. Obrasci gibanja klizišta Wealden Beds (Allison i Brunsden, 1990).



Slika 2.8. Prikaz horizontalnih pomaka na poprečnom profilu klizišta Wealden Beds s obzirom na različite obrasce gibanja (Allison i Brunsden, 1990): a) višestruki pomaci; b) postupni pomaci; c) nagli pomaci.

Petley i dr. (2005) odredili su slične obrasce gibanja kao i Allison i Brunsden (1990) na temelju istraživanja klizišta Tessina (Italija), ali su zaključili da oni ovise o morfo-dinamičkom položaju mjerene točke u klizištu te da se obrasci mijenjaju kako se mjerena točka giba od vrha klizišta prema nožici. Petley i dr. (2005) razlikuju četiri tipa obrazaca gibanja klizišta (slika 2.9): (1) tip I - vrlo spori pomaci (obično <1 mm/dan) koji se događaju u području iznad krune klizišta; (2) tip II - spori pomaci (obično 2 do 3 mm/dan) s mogućim većim promjenama brzine, koji se događaju na blokovima klizišta unutar klizne mase; (3) tip III - pomaci do 10 mm/dan s relativno malim godišnjim promjenama, koji se odvijaju na dezintegriranim blokovima; (4) tip IV - povremeni, brzi pomaci veličine 1-2 m/dan u zoni akumulacije između kojih se događaju razdoblja mirovanja.



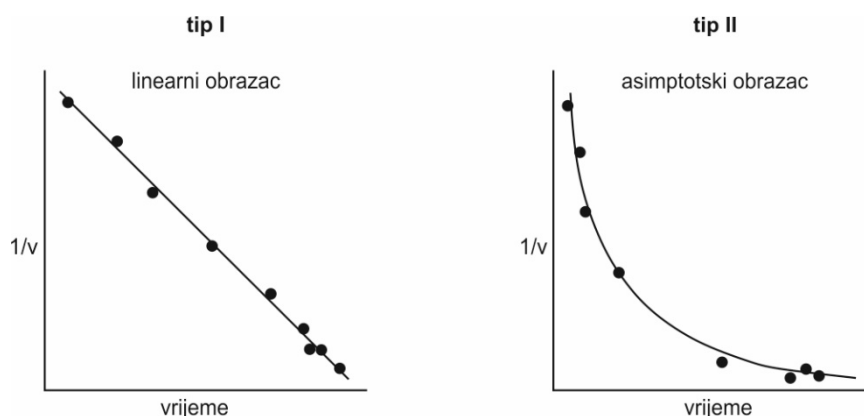
Slika 2.9. Različiti obrasci gibanja na klizištu Tessina (Petley i dr., 2005).

Tip I i II odnose se na fazu pred slom, odnosno fazu razvoja klizne plohe, dok se tipovi III i IV odnose na fazu poslije sloma kada je klizna ploha u potpunosti formirana i kada materijali na kliznoj plohi posjeduju rezidualne parametre čvrstoće. Tip III prema Petley i dr. (2005) je sličan višestrukim i postupnim pomacima prema Allison i Brunsden (1990) dok je tip IV sličan naglim/iznenadnim pomacima (Massey, 2010). Ukoliko je gibanje tijekom faze tipa IV prema Petley i dr. (2005), odnosno faze naglih pomaka prema Allison i Brunsden (1990), dovelo do značajnog smanjenja vrijednosti parametara čvrstoće materijala te promjene mehanizma klizanja, može doći do potpunog sloma klizišta (Terzaghi, 1950).

Massey i dr. (2013) uočili su tri obrasca gibanja na dubokom translacijskom klizištu Utiku: (1) relativno kratka razdoblja bržeg gibanja klizišta, koja su posljedica gibanja po kliznoj plohi, a uzrokovana su promjenom razine vode; (2) duža razdoblja sporijeg klizanja koje uključuje gibanje po kliznoj plohi, ali i plastične deformacije i klizanje po oslabljenim ploham unutar kliznog tijela; te (3) reverzibilne sezonske pomake koje nastaju kao posljedica bubrenja i stezanja uzrokovanih sezonskim promjenama vlažnosti tla.

Nekoliko autora ukazuje na to da se kod velikih, dubokih i translacijskih klizišta različite faze gibanja nakon sloma (faze reaktivacije) pojavljuju s različitom učestalošću i u različitim vremenskim razdobljima (Allison i Brunsden, 1990; Crosta i Agliardi, 2003; Corominas i dr., 2005, Van Asch i dr., 2007). Učestalost i veličina pomaka u fazi reaktivacije ovisi o učestalosti i veličini destabilizirajućih događaja kao što su primjerice porast razine podzemne vode, potresi ili opterećenje gornjih dijelova klizišta (Massey, 2010).

Petley i dr. (2002) su na temelju proučavanja inverznih brzina klizanja različitih klizišta odredili postojanje dva osnovna obrasca gibanja: (1) linearni obrazac; i (2) asimptotski obrazac (slika 2.10). Linearni obrazac ukazuje na razvoj klizne plohe karakteriziran nastankom pukotina i u kojem dominiraju vrlo kratka, isprekidana razdoblja krstog sloma (Kilburn i Petley, 2003; Petley i dr., 2005; Massey, 2010). Asimptotski obrazac ukazuje na klizanje po postojećoj kliznoj plohi, kojeg karakterizira plastična deformacija (Petley i dr., 2005). Ovaj obrazac predstavlja razdoblja reaktivacije klizišta. Procesi reaktivacije, nastali uslijed destabilizirajućih uzroka klizanja, mogu se izmjenjivati s razdobljima mirovanja tijekom dugih razdoblja. U rijetkim slučajevima, u fazi reaktivacije može doći i do potpunog sloma, kao što se primjerice dogodilo na klizištu Abbotsford na Novom Zelandu (Hancox, 2008). Neki autori (primjerice Kilburn i Petley, 2003) smatraju da je klizište Vaiont u Italiji reaktivirano klizište na kojemu je u fazi reaktivacije nastupio potpuni slom.



Slika 2.10. Linearni i asimptotski obrazac inverznih brzina klizanja (modificirano prema Petley i dr., 2002).

2.2. Uzroci klizanja

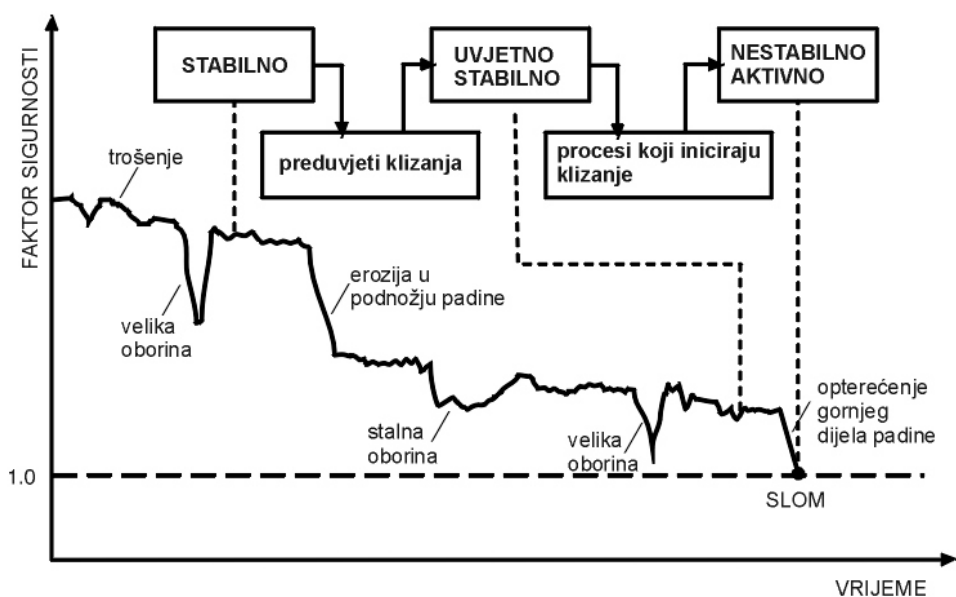
Uzroci klizanja mogu se podijeliti na preduvjete (eng. *preparatory causal factors*) klizanja i pokretače (eng. *triggering causal factors*) klizanja (Cruden i Varnes, 1996). Preduvjeti klizanja čine padinu podložnom klizanju, ali ga ne iniciraju, već samo dovode padinu u stanje granične ravnoteže, a dijele se na četiri glavne skupine: (1) uvjeti na padini (primjerice vrsta stijene koja izgrađuje padinu, položaj slojevitosti, propusnost materijala); (2) geomorfološki uvjeti (primjerice razni oblici erozije i tektonika); (3) fizički procesi (primjerice ekstremni hidrološki događaji, ciklusi smrzavanja i odmrzavanja, potresi); i (4) antropogeni procesi (primjerice opterećenje padine, navodnjavanje, uklanjanje vegetacije). Pokretači klizanja su procesi koji iniciraju klizanje, jer padinu iz granično stabilnog stanja dovode u aktivno, nestabilno stanje. Prema Schuster i Highland (2007) i Mansour i dr. (2010) četiri najvažnija inicijatora klizanja su: (1) porast razine podzemne vode uzrokovan oborinama; (2) potresi; (3) erozija podnožja padine; i (4) aktivnosti ljudi. Klizišta mogu imati mnogo preduvjeta, ali obično imaju samo jedan inicijator klizanja (Varnes, 1978), dok je u određenim uvjetima moguć nastanak i klizišta bez jasno uočljivog inicijatora klizanja (Massey, 2010).

Za razliku od Cruden i Varnes (1996), Terzaghi (1950) dijeli uzroke klizanja na: (1) vanjske uzroke (eng. *external causes*) uslijed kojih se povećavaju posmična naprezanja (primjerice promjene geometrije padine, rasterećenje nožičnog dijela padine, opterećenje gornjeg dijela padine, vibracije, promjene razine podzemne vode); i (2) unutarnje uzroke (eng. *internal causes*) zbog kojih se umanjuje posmična čvrstoća materijala (primjerice progresivni slom, trošenje, sufozija). Međutim, neki od ovih uzroka mogu istovremeno utjecati i na posmična naprezanja i na posmičnu čvrstoću. Dakle, klizišta nastaju kada posmična naprezanja u padini dosegnu posmičnu čvrstoću materijala koji izgrađuju padinu. Odnos spomenutih naprezanja, odnosno omjer između posmične čvrstoće materijala (τ_f) i posmičnih naprezanja (τ) po pretpostavljenoj ili određenoj plohi sloma izražava se kao faktor sigurnosti (F):

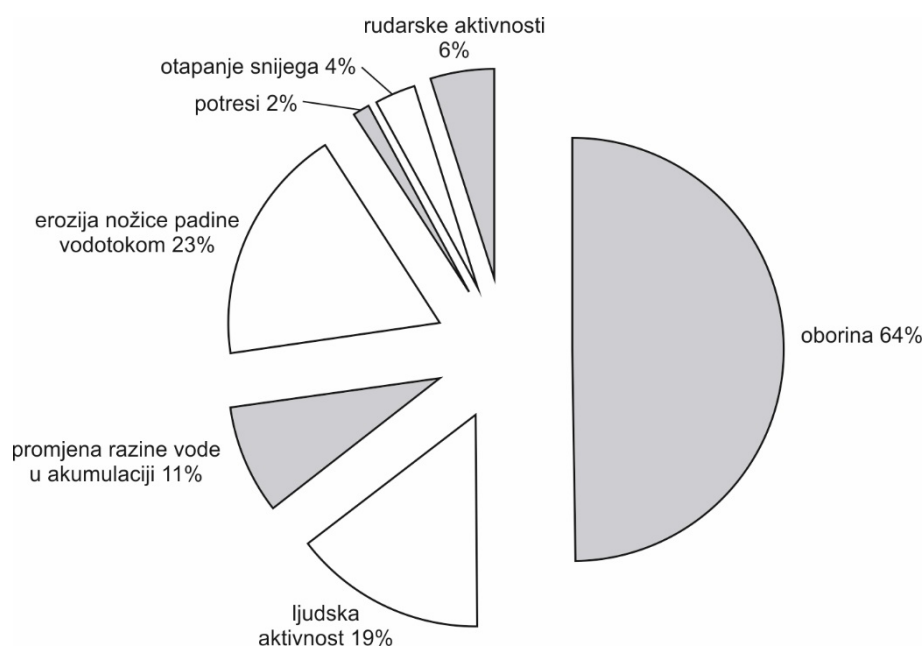
$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (1)$$

Padina je stabilna kada je $F > 1$, a nestabilna kada je $F \leq 1$. Promjena faktora sigurnosti u vremenu, kao posljedica promjena uvjeta na padini i utjecaja pokretača klizanja prikazana je na slici 2.11.

Na temelju istraživanja više od 50 velikih i sporih klizišta, Mansour i dr. (2010) odredili su da je oborina jedan od inicijatora klizanja u 64% slučajeva (slika 2.12). U 23% slučajeva jedan od inicijatora je bilo zasijecanje nožice padine površinskim vodotocima, u 11% slučajeva jedan od inicijatora je bila promjena razine vode u akumulacijama, a u 4% slučajeva jedan od inicijatora je bilo otapanje snijega. Gattinoni (2009) zaključuje da je voda jedan od glavnih uzroka nestabilnosti padina i da je pri procjeni hazarda potrebno uzeti u obzir podzemnu vodu i njen utjecaj na stabilnost. U slijedećim poglavljima najveća pažnja posvećena je utjecaju vode na postanak klizišta, odnosno na oborinu i razinu podzemne vode, kao glavne inicijatore klizanja.



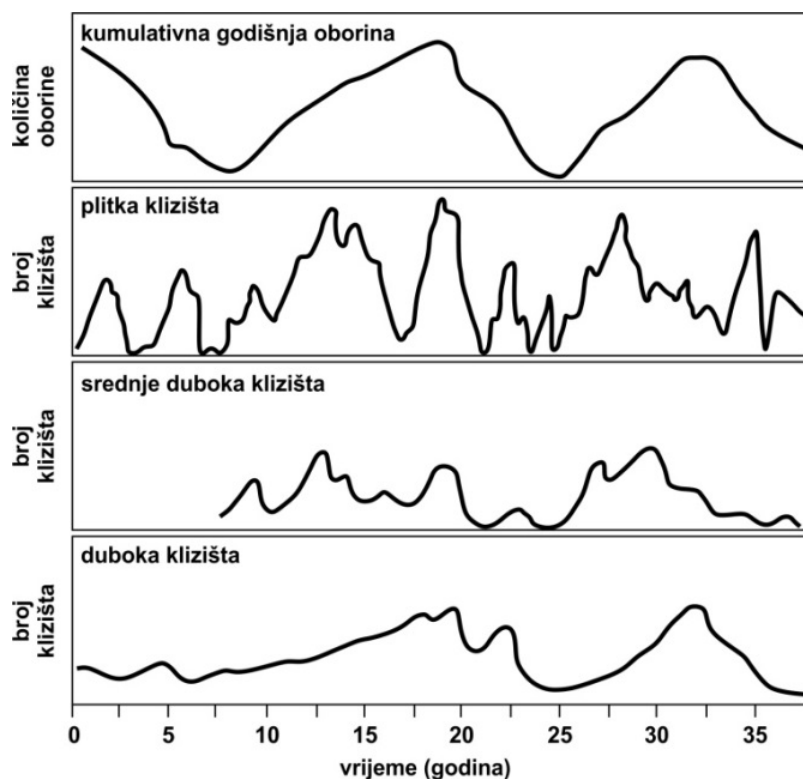
Slika 2.11. Promjena faktora sigurnosti u vremenu (Popescu, 1994).



Slika 2.12. Udjeli utjecaja pojedinih pokretača klizanja u aktiviranju klizišta (Mansour i dr., 2010).

2.2.1. Oborine

Oborine mogu inicirati klizanje u svim tipovima klizišta. Za potrebe analize utjecaja oborina na klizišta Sangrey i dr. (1984) podijelili su klizišta u sljedeće tri skupine: (1) duboka klizišta s kliznom plohom dubljom od 10 m; (2) plitka klizišta s kliznom plohom dubokom između 1 i 10 metara; (3) površinska klizišta i debritni tokovi. Za sva tri slučaja kao inicijatora klizanja mogu se razmatrati oborine različitih intenziteta i trajanja. Primjerice aktiviranje plitkih debritnih tokova je u izrazitoj povezanosti s kratkotrajnim oborinama (trajanja do nekoliko sati) dok su duboka klizišta vezana za kumulativne sezonske, odnosno godišnje oborine. Na slici 2.13 se vidi da broj dubokih klizišta u znatnoj mjeri ovisi o vlažnim razdobljima, odnosno povećan je u godinama u kojima je pala relativno veća količina oborina. Za razliku od dubokih klizišta, plitka klizišta ne pokazuju ovisnost o vlažnim razdobljima, već isključivo o kratkim i intenzivnim oborinama koja se pojavljuju i u sušnim i u vlažnim razdobljima.



Slika 2.13. Odnos kumulativnih godišnjih oborina i učestalosti klizišta različitih dubina (Sangrey i dr., 1984).

Određivanje graničnih vrijednosti oborina koje iniciraju pokretanje klizišta predstavlja jedan od glavnih zadataka u istraživanjima klizišta (Berardi i dr., 2005) i pri uspostavi sustava ranog upozoravanja (Terlien, 1998). Termin granična vrijednost može se definirati kao kritična razina neke vrijednosti po kojoj započinje određeni proces (Reichenbach i dr., 1998). Granične vrijednosti oborina mogu se koristiti kao kriterij za upozoravanje u sustavima ranoga upozoravanja (Bacchini i Zannoni, 2003). Parametri koji se koriste za određivanje graničnih vrijednosti oborina se obično izražavaju kao intenzitet oborine, trajanje oborine, kumulativna oborina i prethodna oborina. Granične vrijednosti oborina mogu se koristiti za analizu u globalnom, regionalnom i lokalnom mjerilu (Guzzetti i dr., 2007). Odnos između klizanja i granične vrijednosti oborina može se odrediti na temelju statističkih ili empirijskih, ali i determinističkih metoda (Guzzetti i dr., 2007). Kada je dostupno mnogo podataka o uzrocima klizišta, granične vrijednosti se određuju statistički, međutim kada podataka ima malo, koriste se determinističke metode da bi se odredilo ponašanje klizišta u određenim hidrološkim uvjetima (Terlien, 1998). Granične vrijednosti oborina najčešće se određuju za plitka klizišta (primjerice Jakob i Weatherly, 2003; Crosta i Frattini, 2003; Komac, 2005; Baum i Godt, 2009; Jemec i Komac, 2013), a tek u rjeđim slučajevima za duboka klizišta (primjerice Hong i dr., 2005). Granične vrijednosti oborina razlikuju se ovisno o hidrološkim, klimatološkim, morfološkim, geološkim i hidrogeološkim uvjetima određenog područja (Crosta, 1998), a također mogu varirati i za isto područje ovisno o razdoblju koje se analizira (Crozier, 1999) pa tako primjerice mogu ovisiti o sezonskim promjenama vegetacije.

2.2.2. Razina podzemne vode i porni tlak

Iako se oborine smatraju glavnim inicijatorom klizanja, proces koji uzrokuje klizanje je infiltracija vode u podzemlje i povećanje pornih tlakova na potencijalnoj kliznoj plohi (Reichenbach i dr., 1998; Ekanayake i Phillips, 1999; Leroueil, 2004). Naime, otpor materijala na smicanje u točki određen je njegovom posmičnom čvrstoćom (τ_f) koja je definirana Mohr-Coulombovim zakonom kao linearna funkcija efektivnog normalnog naprezanja (σ') u određenoj ravnini (Craig, 1997):

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' . \quad (2)$$

Efektivno normalno naprezanje je onaj dio naprezanja koje preuzimaju čestice tla, a definirano je kao ukupno normalno naprezanje (σ) umanjeno za iznos pornog tlaka (u):

$$\sigma' = \sigma - u . \quad (3)$$

Iz toga proizlazi da porast razine podzemne vode u padini, koji nastaje kao posljedica procjeđivanja vode u tlo, uzrokuje porast pornih tlakova, odnosno smanjenje normalnih efektivnih naprezanja. Smanjenjem efektivnih naprezanja smanjuje se posmična čvrstoća tla, sve do iznosa posmičnih naprezanja, kada je zadovoljen Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće i kada dolazi do aktiviranja, odnosno reaktiviranja klizišta.

Prema Van Asch i dr. (1999) duboka klizišta su u većini slučajeva inicirana pornim tlakovima nastalim kao posljedica porasta razine podzemne vode. Ray i Jacobs (2007) navode da je većina slomova na padinama posljedica povećane vlažnosti tla i porasta razine podzemne vode koje uzrokuje porast pornih tlakova i smanjenje posmične čvrstoće. Matsuura i dr. (2008) definira koncept kritičnog pornog tlaka kao onog pri kojemu započinje gibanje klizišta uslijed gubitka balansa odnosa posmične čvrstoće i posmičnih naprezanja.

Prema Leroueil (2001) promjene razine podzemne vode, odnosno pornog tlaka, posljedica su vertikalne infiltracije vode, procjeđivanja vode kroz propusnije slojeve tla ili raspucanu stijenu, kroz rupe koje su iskopale životinje u tlu i kroz rupe od korijenja. Promjena razne podzemne vode može biti brza ili postupna, a stupanj promjene ovisi o intenzitetu oborine, površinskom utjecanju, infiltraciji, evapotranspiraciji, vegetaciji, morfologiji padine i vrsti materijala koja izgrađuje padinu. Brza promjena razine podzemne vode obično je posljedica postojanja preferiranih putova za infiltraciju vode, kao što su primjerice pukotine (Pierson, 1980; Jenkins i dr., 1988; Crosta i Di Prisco, 1999). Također, promjena razine podzemne vode ovisi i o njezinoj dubini pa tako plitki vodonosnici obično reagiraju brže nego duboki (Wu i dr., 1996). Ponašanje podzemne vode ovisi i o debljini nesaturirane zone (Lee i dr., 2006). Nesaturirana zona je obično manje debljine i veće vlažnosti u zimskim mjesecima, a veće debljine i manje vlažnosti u ljetnim mjesecima, što ukazuje na to da je promjena razine podzemne vode pod utjecajem i sezonskih klimatskih promjena. Glastonbury i Fell (2008) proučavali su 45 velikih i sporih klizišta te su zaključili da su pomaci dominantno posljedica promjena pornoga tlaka s različitim stupnjem utjecaja. Na klizišta s većim udjelom krupnozrnastih materijala veći utjecaj imaju intenzivne kratkotrajne oborine, odnosno olujne oborine, nego na klizišta s većim udjelom sitnozrnastih materijala.

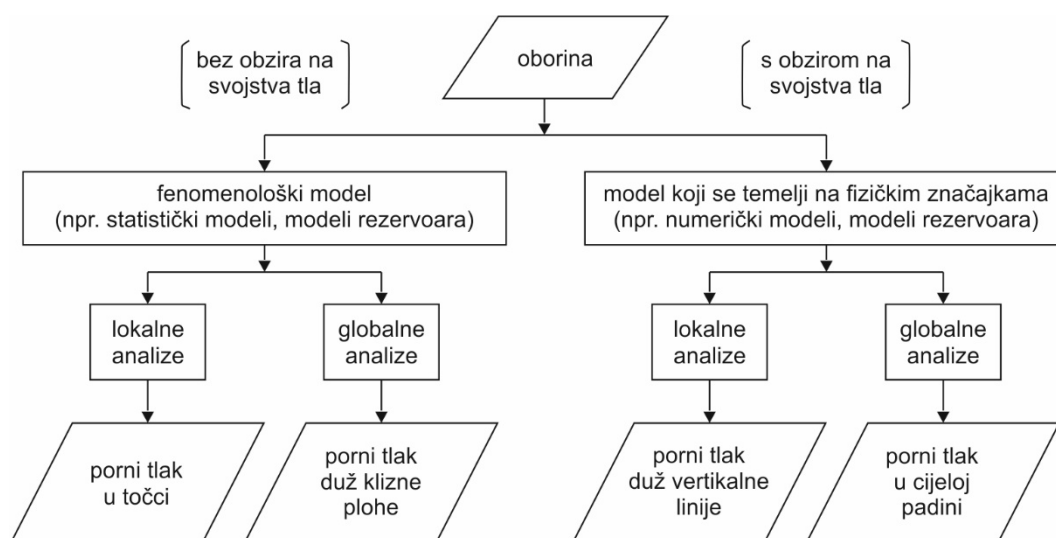
Iskustvo je pokazalo da su višestruki piezometri, postavljeni na različite lokacije i dubine, potrebni da bi se odredio režim podzemnih voda i pornih tlakova (Baroň i dr., 2012). Pri istraživanju klizišta, monitoring podzemnih voda obično je usmjeren na područje klizne plohe gdje porni tlakovi izravno utječu na stabilnost klizišta. Ukoliko je lokacija klizne plohe poznata, senzori se mogu instalirati neposredno iznad te zone da bi se izbjeglo oštećenje uređaja uslijed klizanja. Podaci o piezometarskim razinama omogućavaju uspostavljanje korelacije između pornoga tlaka i deformacija padine (Corominas i dr., 2005). Piezometarske razine i porni tlakovi trebaju se bilježiti s dovoljnom učestalosti da se mogu odrediti utjecaji intenzivnih oborina, ali i sezonskih promjena. U slučajevima kada piezometar brzo reagira na intenzivne oborine, opažanja moraju biti kontinuirana. Korelacija između pornih tlakova i pomaka može biti vrlo korisna za određivanje graničnih vrijednosti pornog tlaka pri uspostavljanju sustava ranoga upozoravanja. Iz tog razloga, kontinuirano praćenje pornog tlaka osobito je važno na padinama na kojima se pojavljuju deformacije i postoji mogućnost sloma te na kojima se uspostavlja sustav ranoga upozoravanja jer zbog veličine, cijene i drugih razloga nije moguće sanirati i stabilizirati takve padine (Read i dr., 2005; Grøneng i dr., 2005; Blikra, 2008).

2.2.3. Modeliranje oborina, razine podzemne vode i pornih tlakova

Iako postoji značajna veza između oborina i razina podzemne vode, odnosno pornih tlakova, ne postoji standardni postupak za određivanje pornih tlakova na temelju oborina (Persson i dr., 2007). Cascini i dr. (2010) razlikuju dva tipa modela kojima se na temelju oborina određuju porni tlakovi (slika 2.14): (1) fenomenološki modeli; i (2) modeli koji se temelje na fizičkim značajkama. Obje vrste modela mogu se primjenjivati i u slučaju pojedinih klizišta, u lokalnom mjerilu, ali i za šire područje, odnosno za regionalne analize.

Fenomenološki modeli određuju se na temelju analiza odnosa između razina podzemne vode ili pornog tlaka i oborina dobivenih praćenjem, pri čemu se ne uzimaju u obzir hidraulički uvjeti u padini. Primjerice Cascini i Cascini (1994) određuju izdašnosti izvora na temelju statističkih analiza podataka mjesečnih oborina i povremenih mjerenja izdašnosti na izvorima. Jan i dr. (2007) statistički određuju odnos između oborina i razine podzemne vode za duboki vodonosnik na temelju kontinuiranih podataka praćenja oborina i razina podzemne vode. Matsushi i Matsukura (2007) su granične vrijednosti intenziteta i trajanja oborina odredili na temelju višestrukih regresijskih analiza rezultata piezometarskih mjerenja. Godt i dr. (2006) su sličnim pristupom odredili granične vrijednosti oborina, usporedivši količinu oborina sa sadržajem vode u tlu. Osim statističkih metoda, za predviđanje razina podzemne vode, odnosno pornih tlakova, upotrebljavaju se i različite druge metode. Butterworth i dr. (1999) koriste model rezervoara (eng. *tank model*), kod kojeg srednja oborina definira količinu vode koja se može zadržavati u tlu. Kada je oborina veća od srednje oborine, razina podzemne vode raste, a kada je manja, razina vode u tlu se snižava. U novije vrijeme često se pri određivanju utjecaja oborina na razinu podzemne vode koriste i neuralne mreže (eng. *artificial neural network*) i strojno učenje (eng. *support vector machine*) kao što je primjerice prikazano u Yoon i dr. (2011).

Za razliku od fenomenoloških modela, modeli koji se temelje na fizičkim značajkama nastoje simulirati prolazne promjene pornih tlakova u određenoj točki (lokalna analiza) ili za cijelu padinu (globalna analiza). Modeli koji se temelje na fizičkim značajkama uzimaju u obzir hidrauličke parametre tla (propusnost tla, vlažnost tla) i fizičke procese koji se odnose na režim oborina i promjene razina podzemne vode (Cascini i dr., 2010). Odnos između razine podzemne vode i oborina može se odrediti numeričkim aproksimacijama osnovnih hidrauličkih jednažbi (primjerice Iverson, 2000; Cascini i dr., 2010), ali i primjenom modela rezervoara koji curi (eng. *leaky barrel*) (Wilson, 1989). Butterworth i dr. (1999) ukazuju na to da i fenomenološki model i model koji se temelji na fizičkim značajkama, koje su primijenili u slivu Romwe (Zimbabve), uspješno simuliraju razine podzemne vode, ali da je za model koji se temelji na fizičkim značajkama potrebno poznavanje većeg broja reprezentativnih parametara.



Slika 2.14. Shematski prikaz analiza razine podzemne vode (modificirano prema Casini i dr., 2010 i Grimaldi, 2008).

2.3. Gibanje klizišta u odnosu na oborine i promjene razine podzemne vode

Terensko praćenje nekoliko reaktiviranih klizišta pokazala su da se različiti obrasci gibanja klizišta, osim s morfološkim položajem mjerene točke unutar kliznog tijela, mogu povezati i s različitim obrascima promjena razine vode (tablice 2.4 i 2.5). Odnos između razine podzemne vode ili pornih tlakova i gibanja klizišta može biti dodatno složen kao posljedica složenih hidrogeoloških uvjeta u padini, osobito zbog prisutnosti materijala različite propusnosti, pukotina i zona smicanja te zona izravnog prihranjivanja površinskom vodom (Corominas i dr., 1999; Van Asch i dr., 2007).

Tablica 2.4. Obrasci gibanja u odnosu na porni tlak, na klizištu Wealden Beds (Ng, 2007; preuzeto iz Allison i Brunsden, 1990).

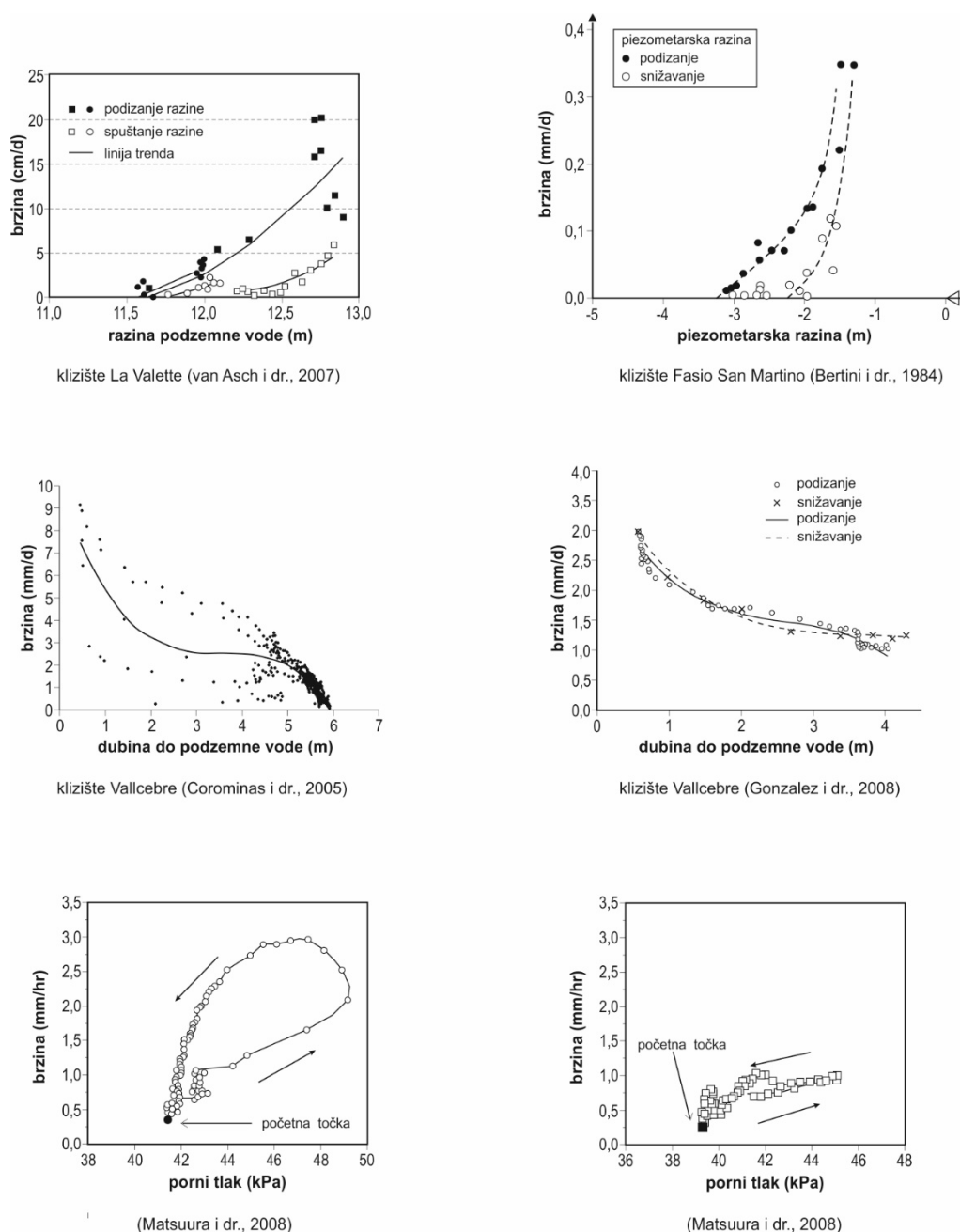
tip gibanja	karakteristike gibanja	promjena pornog tlaka
višestruko	-mali pojedinačni pomaci veličine <1 cm, odijeljeni razdobljima mirovanja -ukupni pomaci do 8 cm	-spori porast pornih tlakova -sporo smanjenje pornih tlakova
postupno	-veći postupni pomaci kroz kraće vremensko razdoblje	-postupni porast pornih tlakova -brzi porast nakon kojeg slijedi smanjenje pornih tlakova
naglo	-najveći pomaci u najkraćem vremenskom razdoblju	-velika brzina porasta pornih tlakova
nasumično	-mali, nepravilni pomaci u vremenu i prostoru	-vezano za druge faktore kao što su sezonske promjene, gravitacijske sile, unutarnju deformaciju

Tablica 2.5. Obrasci gibanja u odnosu na porni tlak, na klizištu Tessina (Ng, 2007; preuzeto iz Petley i dr., 2005).

tip gibanja	karakteristike gibanja	promjena pornog tlaka
tip I	-vrlo spori pomaci s brzinama manjim od 1 mm/dan	-povećanje brzine vezano za vlažne zimske mjesece
tip II	-male brzine 2 - 3 mm/dan s mogućim većim oscilacijama	-postupni porast pornog tlaka -brži pomaci se događaju tijekom mjeseci s visokim razinama podzemne vode
tip III	-pomaci do 10 mm/dan	-relativno male sezonske promijene
tip IV	-povremeni, vrlo brzi pomaci s najvećim brzinama 1-2 m/dan	-visoki porni tlakovi u zimskim, vlažnim razdobljima

Skempton i dr. (1989) opisali su staro sporo klizište na brdu Mam Tor u Engleskoj, za koje postoje podaci vezani za oborine, razine podzemne vode i pomake od 1965. godine. Skempton i dr. (1989) razlikuju odziv klizišta s obzirom na olujnu oborinu (eng. *storm response*) i sezonske promjene (eng. *seasonal response*). Odziv klizišta na olujnu oborinu predstavlja omjer između promjene razine podzemne vode i iznosa oborine ($\Delta h/R$). Klizišta s visokim odzivom pokazuju bržu reakciju na oborine. Ukoliko na klizište utječe velika kumulativna oborina nastala tijekom duljeg razdoblja, onda je odziv klizišta sezonski.

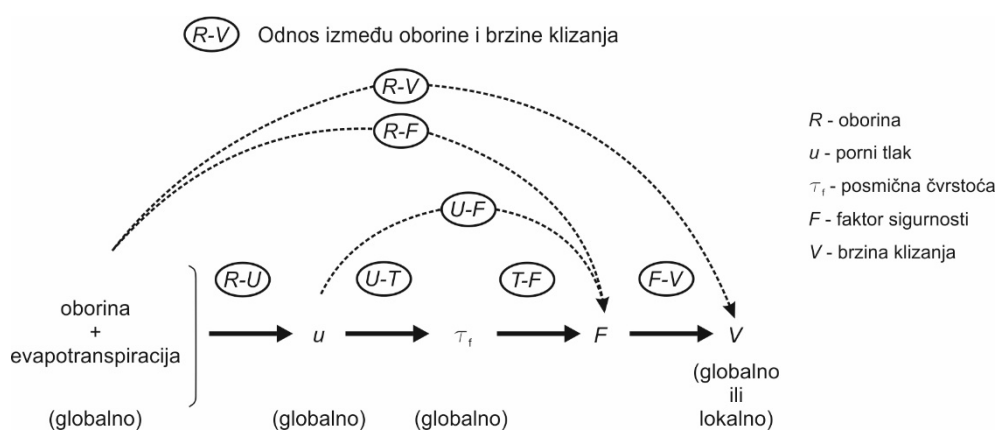
Nekoliko je istraživača ustanovilo da odnos između pornih tlakova i brzine pomaka nije linearan (primjerice Skempton, 1985; Corominas i dr., 2005; Gonzalez i dr., 2008; Matsuura i dr., 2008). Dodatni problem u određivanju odnosa između pornog tlaka i gibanja klizišta je taj što je brzina klizanja za vrijeme podizanja razine vode, pri određenom pornom tlaku, različita od brzine klizanja za vrijeme spuštanja razine podzemne vode, pri istom iznosu pornog tlaka (Bertini i dr., 1984; Corominas i dr., 2005; Gonzalez i dr. 2008; Matsuura i dr., 2008; Van Asch i dr. 2007). Primjeri odnosa brzine klizanja i razine podzemne vode/pornog tlaka prikazani su na slici 2.15.



Slika 2.15. Primjeri različitih odnosa između razine podzemne vode/pornog tlaka i brzine klizanja tijekom podizanja, odnosno tijekom snižavanja razine podzemne vode/pornog tlaka (preuzeto iz Massey, 2010).

Pretpostavlja se da je nelinearni odnos posljedica toga što na brzinu klizanja utječe i promjena posmične čvrstoće materijala nastala promjenom brzine gibanja (eng. *rate induced changes*). Razlog promjene posmične čvrstoće materijala je ponašanje čestica gline tijekom smicanja (Lupini i dr., 1981; Skempton, 1985; Angeli i dr., 1996; Picarelli, 2007) te konsolidacija i povećanje čvrstoće tijekom razdoblja mirovanja (Nieuwenhuis, 1991; Angeli i dr., 2004). Mnogi autori su pri opisivanju obrazaca gibanja uzeli u obzir i viskozno ponašanje materijala, uz pretpostavku da se klizište kreće kao viskozno-plastični tok (primjerice Iverson, 1985; Angeli i dr., 1996; Corominas i dr., 2005; Van Asch i dr., 2007; Ranalli i dr., 2009).

Leroueil (2001) daje shematski prikaz mogućih pristupa određivanja pomaka tla po postojećim kliznim ploham, koji je uzrokovan oborinom, odnosno posljedičnim porastom pornog tlaka (slika 2.16). Brzina (v) može biti modelirana u odnosu na oborine (R), pri čemu u model može biti uključena analiza faktora sigurnosti duž klizne plohe (F), posmična čvrstoća materijala (τ_f) te porni tlakovi u padini (u). Cascini i dr. (2010) naglasili su važnost pouzdanog modela razine podzemne vode pri predviđanju pokreta sporih klizišta koja imaju kontinuirane pomake. U preglednom radu Federico i dr. (2012) fenomenološki modeli predviđanja gibanja klizišta, odnosno sloma kosine, su oni koji se određuju na temelju empirijskih, odnosno statističkih odnosa, temeljenih na potpunim nizovima podataka kao što su primjerice gibanje u vremenu, gibanje u odnosu na razinu podzemne vode te gibanje u odnosu na oborine. Pri definiranju fenomenoloških modela, za razliku od modela koji se temelje na fizičkim značajkama, u obzir se ne uzimaju fizičko-mehanički parametri stijena i tala, budući da njih često nije moguće u potpunosti definirati (Federico i dr., 2012). Primjeri fenomenološkog pristupa predviđanja sloma kosine na temelju kontinuiranog praćenja gibanja klizišta su prikazani u Fukuzono (1985) te u Crosta i Agliardi (2002, 2003).



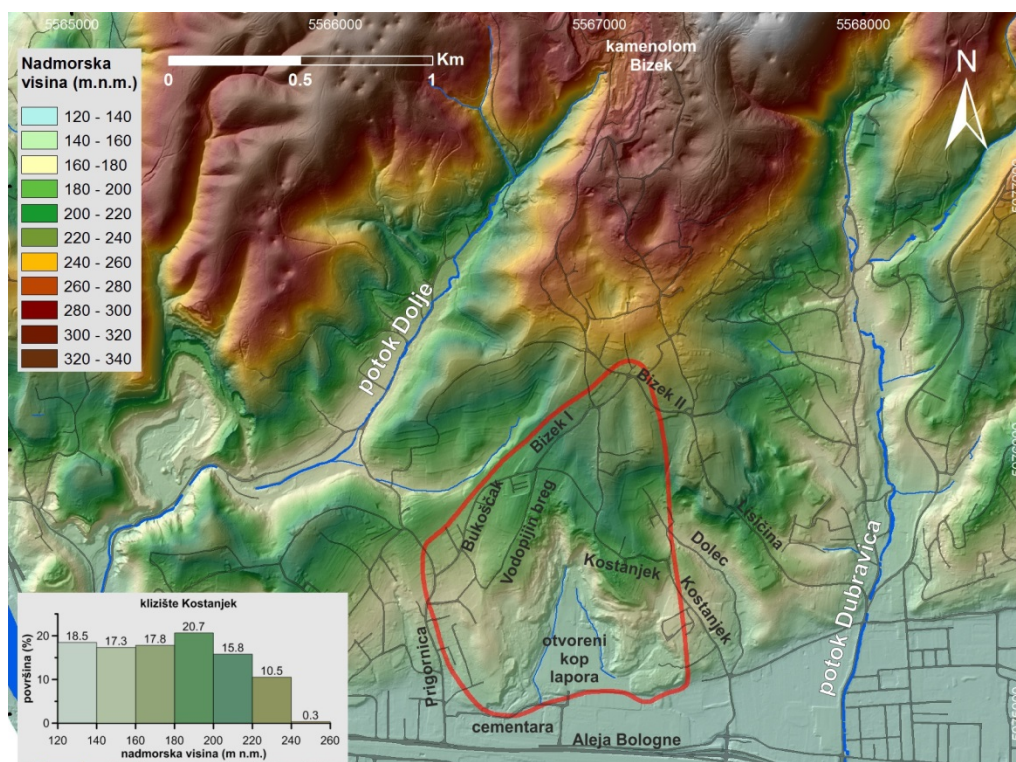
Slika 2.16. Shematizirani prikaz pristupa modeliranju gibanja klizišta s obzirom na oborine (modificirano prema Cascini i dr., 2010 i Leroueil, 2001).

3. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

U prvom dijelu ovog poglavlja daje se općeniti prikaz prirodnih uvjeta na širem području klizišta Kostanjek. Svrha opisa prirodnih uvjeta je prikaz preduvjeta klizanja, odnosno uvjeta koji čine padinu osjetljivom na klizanje (Cruden i Varnes, 1996). Drugi dio poglavlja je povijesni pregled istraživačkih radova koji su provedeni na području klizišta, kao i pregled interpretacija rezultata povijesnih istraživanja drugih autora. Opisanim istraživanjima obuhvaćena su inženjerska istraživanja u svrhu utvrđivanja uzroka oštećenja i sanacije objekata bivše tvornice cementa „Sloboda“ u Podsusedu kao i na samom klizištu Kostanjek, nakon što je njegovo postojanje dokazano tijekom osamdesetih godina dvadesetog stoljeća.

3.1. Prirodne značajke na širem području klizišta Kostanjek

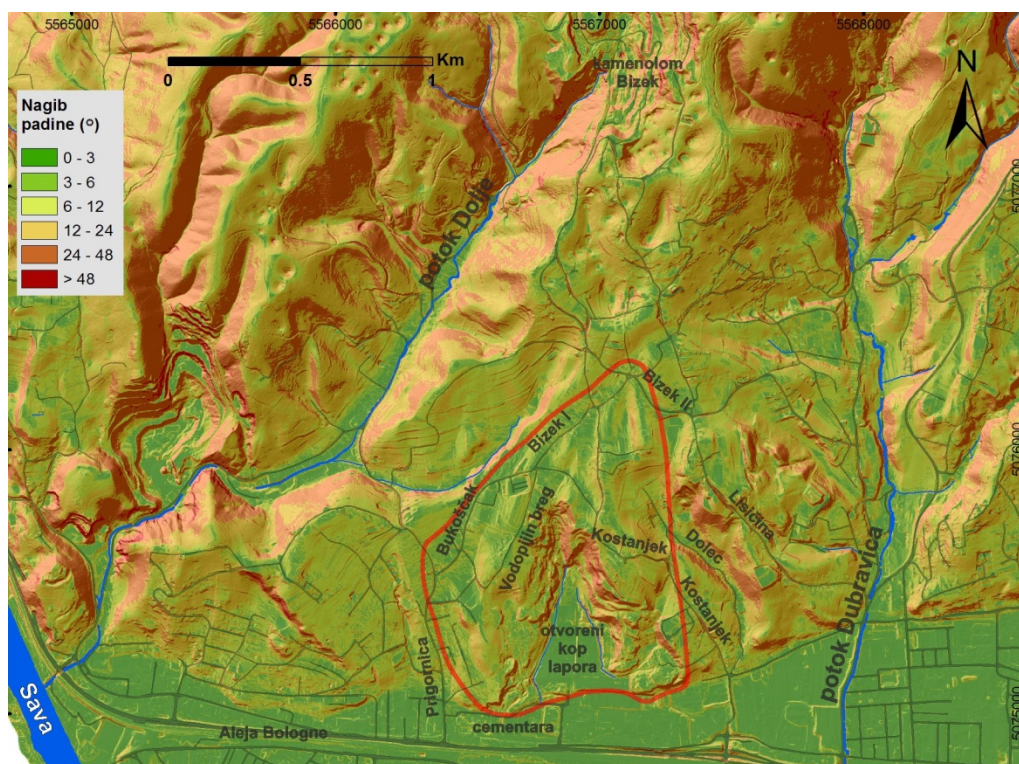
Prirodni uvjeti na širem području klizišta Kostanjek odnose se na geomorfološke uvjete, geološku građu, hidrogeološke uvjete te klimatske uvjete. Površina klizišta Kostanjek prema inženjerskogeološkom modelu koji je interpretirao Ortolan (1996) iznosi oko 1 km². Južna granica klizišta nalazi se unutar područja nekadašnje tvornice cementa. Zapadna granica klizišta djelomično se podudara s ulicom Prigornica, dok se krajnji sjeverozapadni dio klizišta djelomično podudara s ulicama Bukošćak i Bizek I. Istočna granica klizišta presijeca ulicu Bizek II, dolinu u čijem središnjem dijelu se nalazi ulica Dolec te dio grebena na kojemu je smještena ulica Kostanjek (slika 3.1).



Slika 3.1. Karta šireg područja klizišta Kostanjek. Granica klizišta prema Ortolan (1996) označena je crvenom linijom.

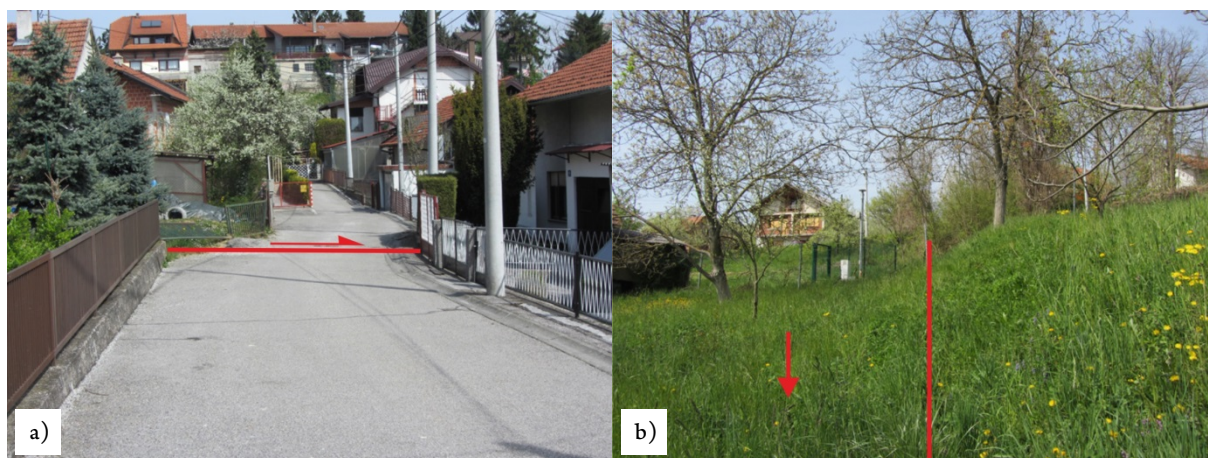
3.1.1. Geomorfološki uvjeti

Klizište Kostanjek se proteže na tri grebena, međusobno odvojenih manjim dolinama: (1) greben na kojemu se nalaze ulice Bukošćak, Vodopijlin breg i Bizek I; (2) greben na kojemu je ulica Kostanjek; (3) te dio grebena na kojemu je početak ulice Bizek II. Nadmorske visine na području klizišta iznose od 130 do 243 metara, a njihova prostorna zastupljenost prikazana je na slici 3.1. Najveći dio istraživanog terena (oko 70%) je blagog nagiba, do 12°, a najstrmije padine koncentrirane su u području napuštenog kopa (slika 3.2), u središnjem dijelu klizišta. Kosine kopa su strme, maksimalnog nagiba 40°, međusobno odvojene subhorizontalnim bermama. Visina pojedinačnih kosina odvojenih bermama je u rasponu od 4 do 30 m, a ukupna maksimalna visina napuštenog kopa je 60 m. Strme kosine uglavnom su preostale na istočnoj strani napuštenog otvorenog kopa, dok su na zapadnoj strani većim dijelom ublažene nasipavanjem. Na širem istraživanom području moguće je uočiti i asimetričnost dolina (npr. potoka Dolje i potoka Dubravica), što je posljedica relativne orijentacije miocenskih naslaga, s prevladavajućim nagibom slojeva u smjeru jugoistoka.



Slika 3.2. Nagib padina na širem području klizišta Kostanjek.

Morfologija samog klizišta je vrlo slabo izražena, bez jasno vidljivih elementa kao što su čelo i stopa klizišta, bokovi klizišta, zona depresije te zona akumulacije pokrenutog materijala. Djelomičan razlog tome je duga povijest klizanja, tijekom koje je teren kontinuirano modificiran različitim aktivnostima ljudi, a prvenstveno urbanizacijom prostora (građenje, nasipavanja, iskapanja i sl.). Aktivnost klizišta danas je najlakše uočljiva prema oštećenjima na stambenim i industrijskim objektima (napuštena tvornica cementa) te na infrastrukturi. Osim toga, na više mjesta na području klizišta uočavaju se deformacije na površini terena u obliku usijedanja i izdizanja bez jasno izraženih pukotina. Izuzetak predstavlja nekoliko lokacija na kojima postoje jasno izražena izdizanja zbog zbijanja pokrenutog materijala te otvorene vlačne i smične pukotine. Primjerice, na zapadnoj granici klizišta jasno se uočava konitnuirana zona smicanja s lokalnim izdizanjima maksimalne visine do 0,5 m (slika 3.3a) koja je položena približno okomito na ulice Skoki i odvojak Prigorničke ulice. Vidljivi pomak dijela ulice koji se nalazi na klizištu, u odnosu na dio ulice koji se nalazi na stabilnom terenu iznosi do 1,5 m u smjeru pružanja zone smicanja. Na istočnoj stani klizišta je također jasno izražena pukotina veće postojanosti (približne duljine oko 200 m), s vertikalnom denivelacijom terena u iznosu od 0,5 do 1,75 m (slika 3.3b). Tijekom reaktivacije klizišta 2013. i 2014. godine registriran je niz novih defomacija na području koje se nalaze unutar granice klizišta prema Stanić i Nonveiller (1995) i Ortolan (1996). Na temelju danas izraženih pukotina i morfologije klizišta, nije moguće jednoznačno odrediti granice klizišta Kostanjek na površini terena (Furuya i dr., 2012).



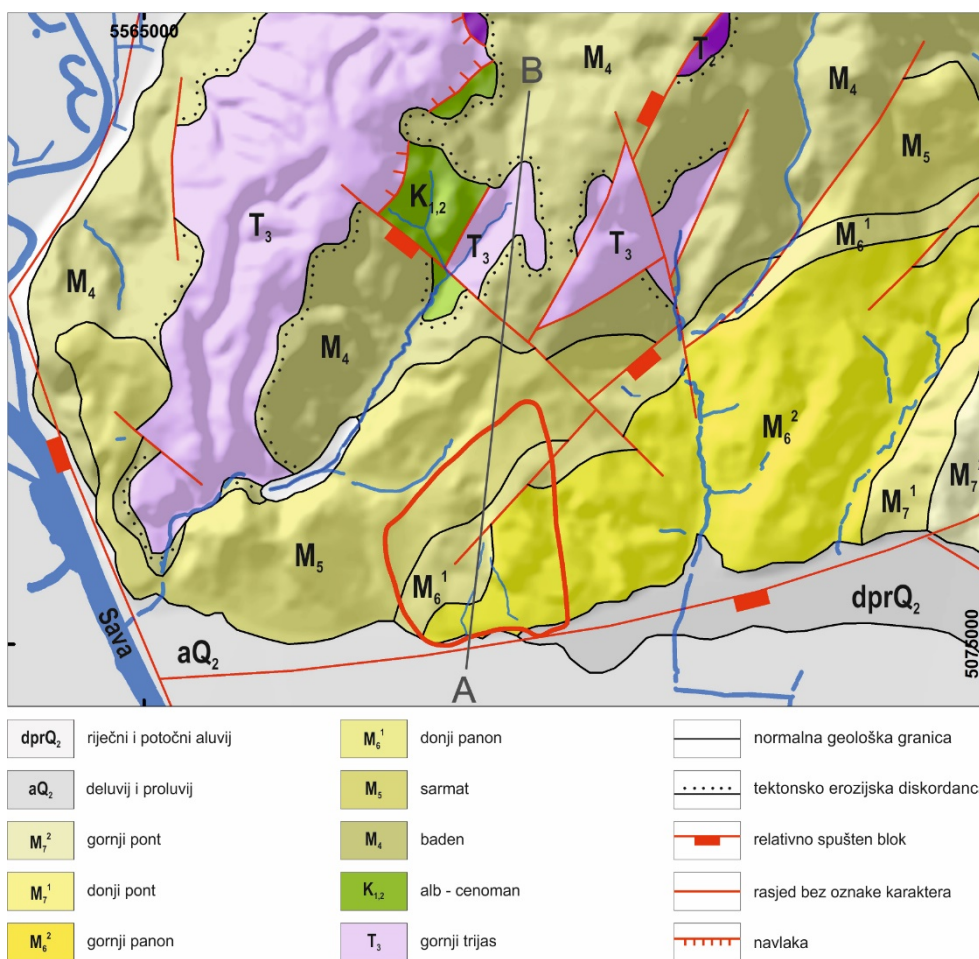
Slika 3.3. Pukotine na klizištu Kostanjek: a) smicanje uz zapadnu granicu klizišta; b) usijedanje uz pukotinu u istočnom dijelu klizišta.

3.1.2. Geološka građa

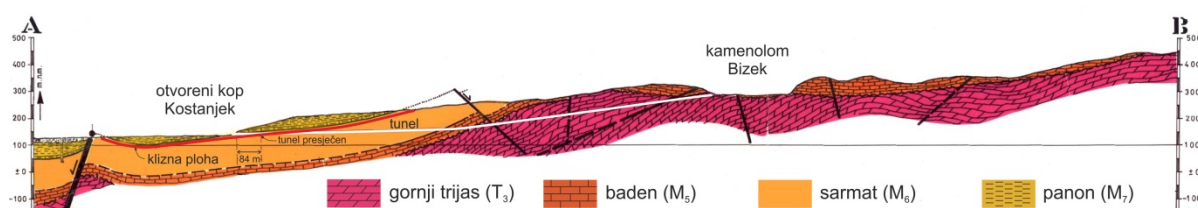
Područje klizišta Kostanjek je izgrađeno od trijaskih naslaga, miocenskih naslaga panonskog razvoja (gornji baden, sarmat, donji i gornji panon, pont) te najmlađih kvartarnih naslaga. Geološka građa šireg područja istraživanja prikazana je na isječku Geološke karte Medvednice mjerila 1:100.000 (Basch, 1995) na slici 3.4 i geološkim profilom (Ortolan, 1996) na slici 3.5. Općenito, u južnim dijelovima istraživanog područja, bliže Savskoj ravnici, miocenske naslage su nagnute u smjeru juga i jugoistoka, s kutom nagiba manjim od 20°, a odijeljene su normalnim geološkim granicama. U sjevernim dijelovima istraživanog područja starije trijaske i mlađe miocenske naslage različito su orijentirane, što je posljedica deformacija uslijed tektonskih aktivnosti, a međusobno su odijeljene diskordantnim i rasjednim granicama. Na slici 3.6a prikazan je geološki stup šireg područja istraživanja (Vrsaljko i dr., 2012), kojim su obuhvaćene naslage od gornjeg trijasa do pont. Najvažniji podaci za izradu geološkog stupa prikupljeni su s izdanaka otvorenog kopa lapora na klizištu Kostanjek te u kamenolomima Bizek i Podsusedsko Dolje. Detaljni geološki stup naslaga koje izgrađuju područje klizišta Kostanjek prikazan je na slici 3.6b.

Najstarije stijene na spomenutom području su trošni i tektonski razlomljeni dolomiti trijaske starosti (T_3) u kojima su česte pojave vrtača, kaverna i špilja, nastalih kao posljedica okršavanja stijena. Ove stijene se pojavljuju na površini terena zapadno od klizišta, primjerice u kamenolomu Podsusedsko Dolje, ali i sjeverno, u kamenolomu Bizek, gdje su otkrivene eksploatacijom litotamnijskog vapnenca (Ortolan, 1996).

Na peleoreljefu trijaskih naslaga diskordantno naliježu mlađe miocenske naslage. Naslage gornjeg badena (M_4) koje Vrsaljko i dr. (2012) svrstavaju u litostratigrafsku jedinicu „*Bizek formacija*“, nalaze se sjeverno od klizišta Kostanjek. Naslage „*Bizek formacije*“ taložene su u obalnom i plitkomorskom pojasu, a izgrađene su od breča i raznih litotipova pješčenjaka, od biokalkrudita do biokalkarenita, koji tvore tzv. litotamnijski vapnenac (Kochansky, 1944; Kranjec i dr., 1973; Pikija i dr., 1995; Tomljenović, 2002; Vrsaljko i dr., 1995; Vrsaljko, 2003; Vrsaljko i dr., 2005, 2006, 2007; Basso i dr., 2008). Litotamnijski vapnenci su biogene stijene karakterizirane velikom poroznošću i propusnošću te kao takvi predstavljaju kolektor slatke i termalne vode. Lateralni ekvivalent litotamnijskih vapnenaca su masivni do slojeviti (centimetarskih dimenzija) lapori taloženi na području dubljih dijelova bazena. Ove naslage nalaze se na površini terena sjeverozapadno od klizišta Kostanjek, u njegovoj neposrednoj blizini na području Susedgrada i Dolja (Kochansky, 1944; Vrsaljko i dr., 2006) te Bizeka. Prosječna debljina „*Bizek formacije*“ iznosi oko 70 m.



Slika 3.4. Uvećani isječak Geološke karte Medvednice originalnog mjerila 1:100.000 (modificirano prema Šikić i dr., 1978 i Basch, 1995) s prikazom položaja klizišta Kostanjev.



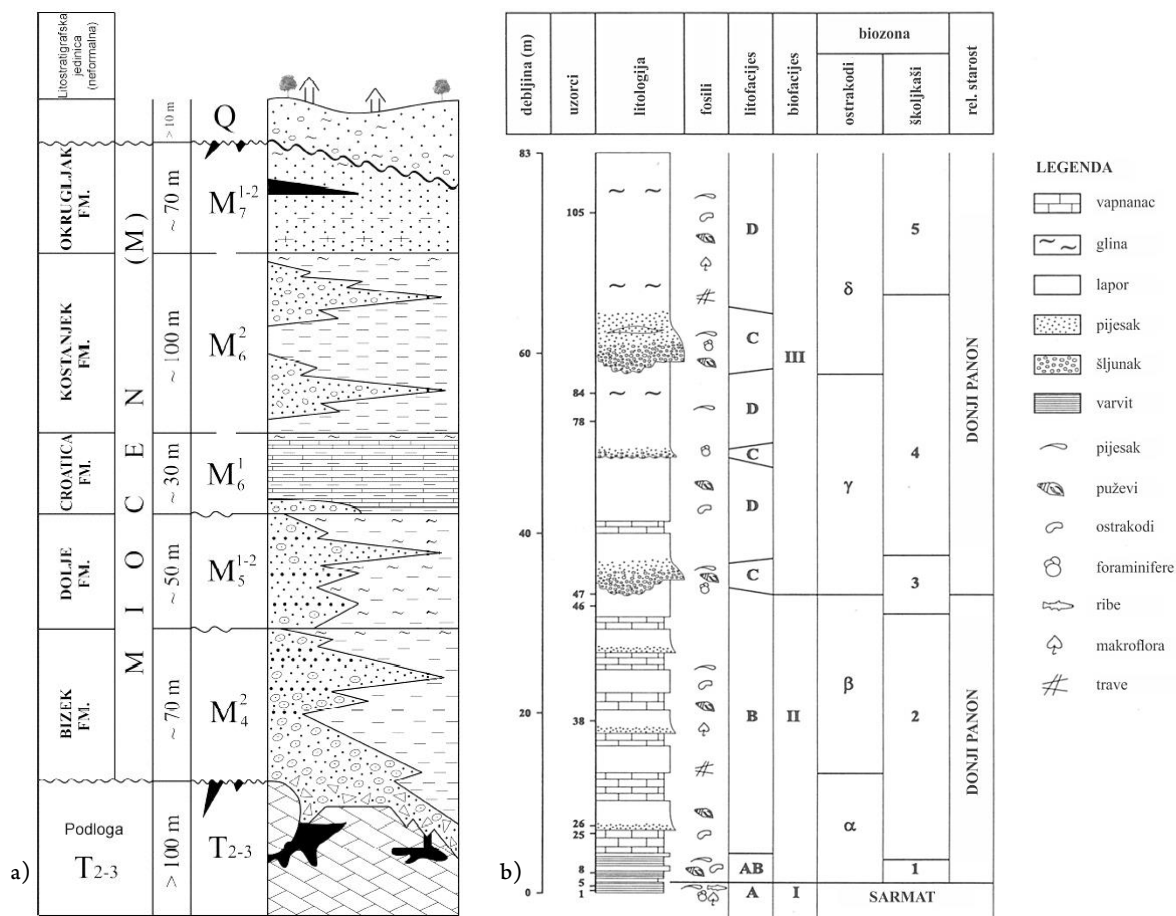
Slika 3.5. Geološki profil područja otvorenog kopa lapora, klizišta Kostanjev te kamenoloma Bizek (modificirano prema Ortolan, 1996).

Sarmatske naslage (M₅), koje prema Vrsaljko i dr. (2012) pripadaju litostratigrafskoj jedinici „Dolje formacija“, kontinuirano slijede na „Bizek formaciji“. Razdoblje sarmata karakterizira oplicavanje uz veći utjecaj kopna (Vrsaljko, 1997, 1999, 2003; Vrsaljko i dr., 2006, 2007). Glavna karakteristika „Dolje formacije“ je pravilna i ritmična sedimentacija što je rezultiralo izmjenama slojeva i lamina (milimetarske do centimetarske debljine) svjetlijeg, kalcitom bogatog lapora i tamnijeg lapora bogatog glinom i

organskom tvari. Sedimenti karakterizirani ovakvom izmjenom materijala nazivaju se varviti (Weinheimer i Biondi, 2003). Lapor i sadrži i proslojke vapnenca i pješčenjaka debljine od nekoliko centimetara do jedan metar. Pješčenjaci su slični badenskim pješčenjacima, samo s nešto višim sadržajem siliciklastičnog materijala (Vrsaljko i dr., 2012). Prosječna debljina „*Dolje formacije*“ formacije iznosi oko 50 m.

Naslage donjo panonske starosti (M_6^1) koje Vrsaljko i dr. (2012) svrstavaju u litostratigrafsku jedinicu „*Croatia formacija*“, nazvanu prema pužu *Radix Croatica*, nalaze se u normalnom, konkordantnom kontaktu sa starijom „*Dolje formacijom*“. Debljina ovih naslaga na istraživanom području nije u potpunosti definirana. Prema Vrsaljko (1999) ona na području klizišta Kostanjek iznosi oko 30 m. Naslage „*Croatia formacije*“ nastale su taloženjem u slatkovodnim jezerskim uvjetima, a glavna karakteristika im je vertikalna izmjena slojeva lapora i glinovitog vapnenca debljine od nekoliko centimetara do nekoliko decimetara (Vrsaljko, 1997, 1999, 2003). Mjestimično se pojavljuju i proslojci sitnozrnastog pijeska debljine do nekoliko centimetara. U ovoj formaciji učestale su deformacije izazvane tektonikom, zbog čega je karakterizirana mnogobrojnim pukotinama i rasjedima (Vrsaljko, 2012).

Litostratigrafska jedinica „*Kostanjek formacija*“ sastoji se od gornjo panonskih lapora (M_6^2) koji su kontinuirano taloženi na starije, donjopanonske naslage (Vrsaljko i dr., 2012). Lapor i se relativno čvrsti, masivni, tek s mjestimičnom slojevitosti debljine do nekoliko decimetara (Kranjec i dr., 1973; Vrsaljko i dr., 1995; Vrsaljko, 1997, 1999, 2003; Vrsaljko i Sremac, 1999; Vrsaljko i dr., 2007). Ove naslage su taložene u relativno dubljim dijelovima bazena. Unutar lapora nalaze se i dva tijela izgrađena od šljunkovito-pjeskovitog materijala, čija je kaotična struktura vjerojatno nastala kao posljedica paleoklizanja, odnosno sinsedimentacijskog podvodnog klizišta, na što ukazuje i alohtoni fosilni sadržaj (Vrsaljko, 1999). Klasti ovih naslaga su dobro zaobljeni i slabo cementirani, a po sastavu su to stijene s planine Medvednice i ostalih okolnih uzvišenja (Vrsaljko, 2012). Ova krupnozrnasta sedimenta tijela mijenjaju svoju debljinu od nekoliko metara do nekoliko decimetara i lateralno isklinjavaju u laporu tvoreći leće. Ukupna debljina naslaga gornjeg panona za šire područje klizišta Kostanjek iznosi oko 100 m.

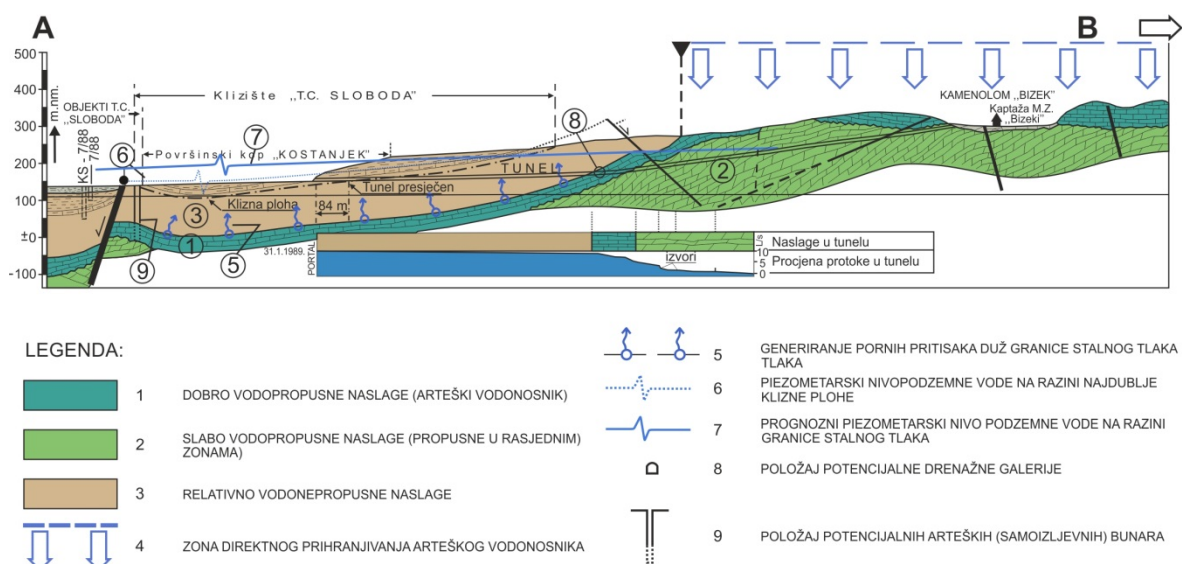


Slika 3.6. Litološki stup: a) šireg područja istraživanja (Vrsaljko i dr. 2012) i b) zasjeka otvorenog kopa lapora (Vrsaljko, 1999).

3.1.3. Hidrološki i hidrogeološki uvjeti

Naslage koje izgrađuju šire područje istraživanja, osim po litološkim karakteristikama, razlikuju se i po hidrogeološkim karakteristikama. Hidrogeološka svojstva ovih naslaga interpretirao je Otolan (1996), a prostorni raspored hidrogeoloških jedinica prema ovoj interpretaciji prikazan je na slici 3.7.

Dolomiti trijasa (T_3), koji se nalaze sjeverno od klizišta Kostanjek, predstavljaju generalno nepropusnu sredinu, osim u zoni rasjeda, gdje su ove stijene tektonski poremećene i gdje je moguća veća propusnost te pojava izvora (Ortolan, 1996). U tunelu za transport sirovine, koji povezuje kamenolom Bizek i otvoreni kop lapora, približno 850 m od južnog ulaza, nalazi se stalan izvor izdašnosti oko 4 l/s.



Slika 3.7. Hidrogeološki profil šireg područja istraživanja (Ortolan, 1996).

Litotamnijski vapnenci badena predstavljaju stijene relativno velike vodopropusnosti, koja je posljedica poroznosti, raspucanosti i okršenosti ovih stijena. Ortolan (1996) navodi da područje sjeverno od klizišta, izgrađeno od litotamnijskih vapnenaca, ima tipična obilježja krša s mnoštvom jama, vrtača, ponora i špilja (primjerice Veternica, Javornica i Križevščak). Laporovite naslage badena, odnosno bočni ekvivalenti litotamnijskih vapnenaca taloženi u dubljoj morskoj sredini, izgrađuju predjele sjeverozapadno od klizišta i mogu se smatrati praktički nepropusnima. Prema Ortolanu (1996) ove naslage, u odnosu na litotamnijske vapnence, predstavljaju lateralnu hidrogeološku barijeru te se na njihovom kontaktu pojavljuje veći broj izvora. Ortolan (1996) također navodi da su naslage vapnenaca lateralno ograničene i s istočne strane nepropusnim naslagama trijasa, s kojima su u rasjednom kontaktu. Kolektorska funkcija litotamnijskih vapnenaca i dolomitno-vapnenih breča gornjeg tortona te izolatorska funkcija trijaskih dolomita, osim u rasjednim zonama, gdje postoje značajnije mogućnosti protjecanja podzemnih voda, utvrđena je i ranijim istraživanjima krških fenomena Medvednice (Božičević, 1974, 1976).

Naslage sarmata i panona, većim dijelom izgrađene od sitnozrnastih, laporovitih stijena općenito se mogu smatrati nepropusnim sredinama, s koeficijentima filtracije od 10^{-4} do 10^{-6} cm/s (Ortolan, 1996). Ove naslage predstavljaju krovinsku hidrogeološku barijeru u odnosu na litotamnijske vapnence, osim u zonama većih rasjeda u kojima su propusnosti povećane zbog čega je duž njih nastao niz zamočvarenja i izvora, kao na primjer u dolini ulice Dolec (Ortolan, 1996).

S obzirom na hidrogeološke karakteristike opisanih naslaga te njihov prostorni raspored na širem istraživanom području, Ortolan (1996) zaključuje da šire područje oko kamenoloma Bizek (Ponikve), izgrađeno od vodopropusnih litotamnijskih vapnenaca, predstavlja zonu prikupljanja vode i njezine infiltracije u podzemlje. Ovako infiltrirana voda se procjeđuje u smjeru juga, gdje su litotamnijski vapnenci izolirani s manje propusnim naslagama (lateralno s trijaskim dolomitima i badenskim laporima te u krovini s naslagama sarmata i panona). Posljedica je arteški karakter vode u badenskom vodonosniku, na kontaktu litotamnijskih vapnenaca i naslaga sarmata (slika 3.7).

Na temelju postojanja velikog broja bunara u okolici klizišta Kostanjek (više od 100), Ortolan (1996) zaključuje da osim badenskog vodonosnika, postoje i vodonosnici vezani za proslojke pjeskovitih materijala u panonskim naslagama te zonu trošenja naslaga koje se nalaze blizu površine.

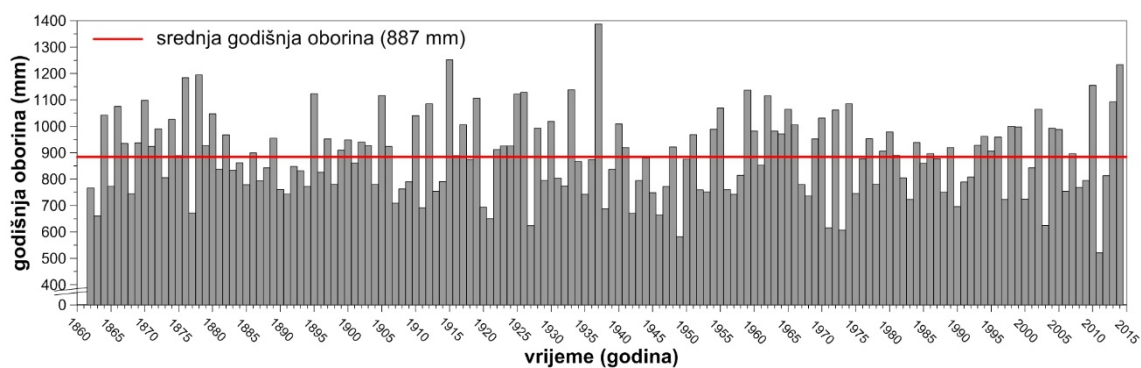
Od površinskih voda, danas su na širem području istraživanja najznačajniji vodotoci potok Dolje (zapadno od područja istraživanja), potok Dubravica (istočno od područja istraživanja) te manji potok sjeverozapadno od klizišta (pritoka potoka Dolje). Na području klizišta Kostanjek također se nalazi i potok koji je nekada tekao dolinom između grebena na kojoj se nalazi istočni krak ulice Vodopijin breg i grebena na kojemu je ulica Kostanjek. Tijekom rudarskih radova u otvorenom kopu lapora, sjeverni dio te potočne doline je zatrpan te se površinsko otjecanje vode mjestimično zamjećuje tek nakon duljih vlažnih razdoblja. Spomenuti potok utjecao je u umjetno jezero, koje se nalazilo u podnožju zapadnih kosina otvorenog kopa lapora, a koje je ispražnjeno zbog izgradnje tvorničkih objekata 1969. godine (Ortolan, 1996). Danas na području otvorenog kopa postoji jedino kanalizirani potok, od ulaza u napušteni tunel (na sjeveru) do južne ograde Robnih terminala. Na području klizišta prisutno je više zamočvarenja: u podnožju istočnog dijela napuštenog kopa (sjeverno od skladišnog prostora „Strojoprometa“); na zapadnim padinama otvorenog kopa (zapadno od Robnih terminala); te u središnjem dijelu doline uz ulicu Dolec, gdje se nalazi kaptirani izvor. U hidrogeološkom smislu također je značajan i napušteni tunel (duljine oko 1.800 m), kojim se dreniraju podzemne vode iz središnjeg dijela klizišta.

3.1.4. Klimatski uvjeti

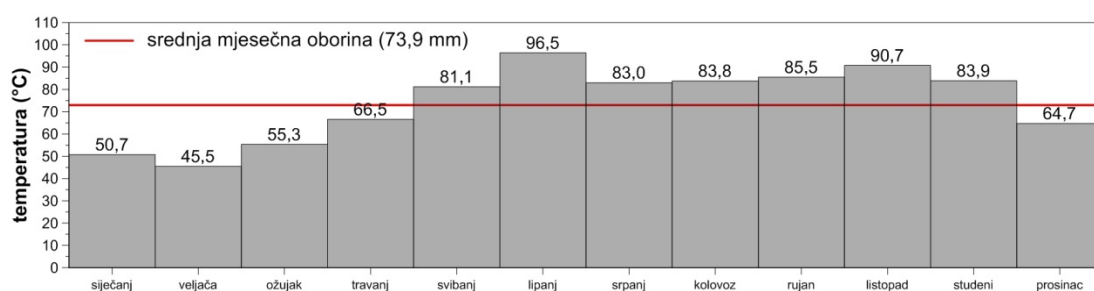
Područje istraživanja ove disertacije, kao i cijeli Grad Zagreb, nalazi se u predjelu s umjerenom kontinentalnom klimom, koju karakteriziraju oštre i hladne zime te izrazito topla i suha ljeta. Prikaz karakteristika područja istraživanja načinjen je na temelju podataka s meteorološke postaje Zagreb-Grič, koja se nalazi približno devet kilometara istočno od klizišta Kostanjek (Krkač i dr., 2014a).

Podaci o temperaturama zraka preuzeti su iz Veselić Bruvo (2011), a odnose se na razdoblje od 1862. do 2010. godine. Srednja temperatura zraka za ovo vremensko razdoblje iznosi 11,5°C, najhladniji mjesec je siječanj s prosječnom temperaturom od 0,4°C, a najtopliji srpanj s prosječnom temperaturom 21,8°C. Najniža temperatura zabilježena na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič iznosila je -22,2°C i zabilježena je 24.1.1942., dok je najviša temperatura zabilježena 5.7.1950. i iznosila je 40,3°C.

Srednja godišnja količina oborine za razdoblje od 1862. do 2014. godine iznosi 887 mm. Maksimalna godišnja oborina zabilježena je 1937. godine, a iznosila je 1.387 mm, dok je minimalna godišnja količina oborine zabilježena 2011. i iznosila je 521 mm. Najveća dnevna oborina zabilježena je 9.8.1926. i iznosila je 118,8 mm. Godišnje oborine za razdoblje od 1862. do 2014. godine prikazane su na slici 3.8, dok su srednje mjesečne oborine za isto razdoblje prikazane na slici 3.9.

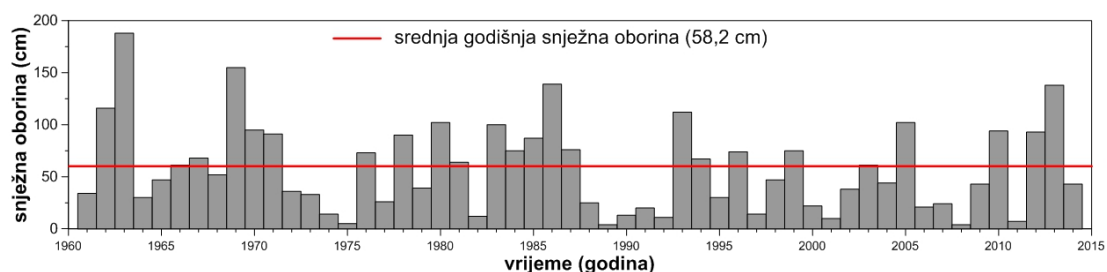


Slika 3.8. Prikaz godišnjih oborina izmjenjenih na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič za razdoblje od 1862. do 2014. godine.



Slika 3.9. Prikaz srednjih mjesečnih oborina za postaju Zagreb-Grič za razdoblje od 1862. do 2012. godine.

Podaci o snježnim oborinama odnose se na razdoblje od 1961. do 2014. godine. Maksimalna godišnja snježna oborina zabilježena je 1963. godine, a iznosila je 188 cm, dok je minimalna snježna oborina zabilježena 1989. godine i iznosila je svega 4 cm. Srednja godišnja snježna oborina za navedeno razdoblje iznosi 58,2 cm. Najveća dnevna snježna oborina, za razdoblje od 1961. do 2012. godine, zabilježena je 8.12.2012. i iznosila je 38 cm. Prikaz godišnjih snježnih oborina za razdoblje od 1961. do 2012. godine dan je na slici 3.10.



Slika 3.10. Prikaz godišnjih snježnih oborina za meteorološku postaju Zagreb-Grič za razdoblje od 1961. do 2012. godine.

3.2. Povijesni podaci o istraživanjima klizišta Kostanjek

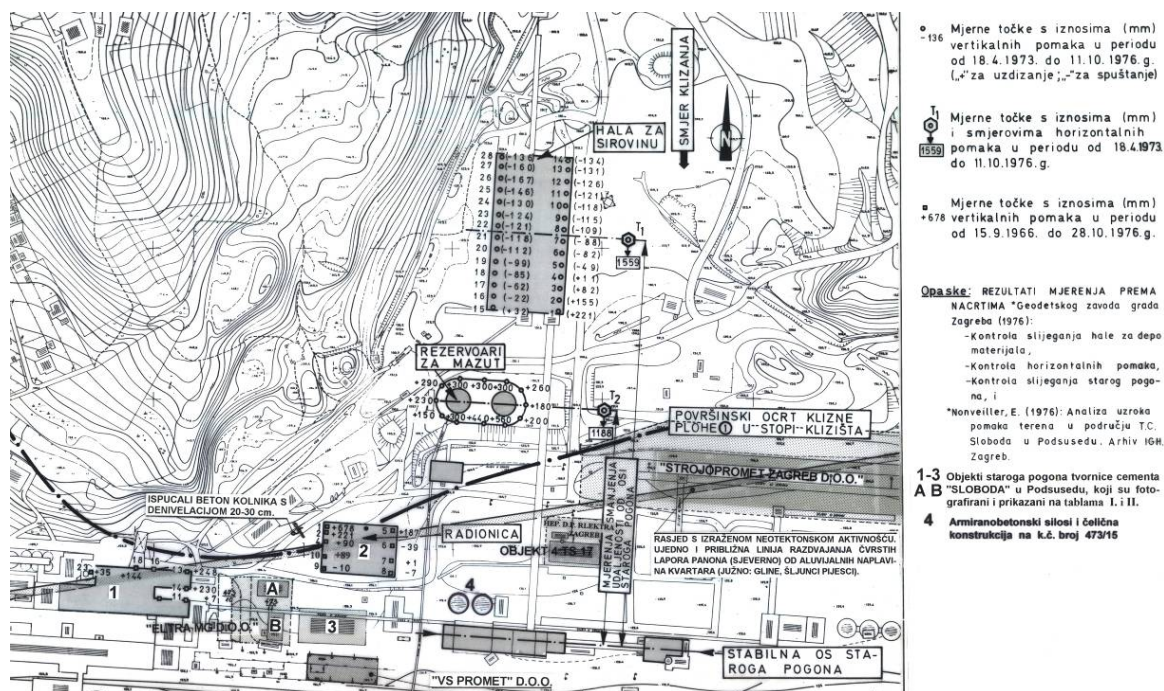
Istraživanja deformacija terena i oštećenja objekata u krugu tvornice cementa započela su tijekom 1966. godine, a najopsežnija istraživanja klizišta Kostanjek provedena su u razdoblju od 1988. do 1989. godine. Na temelju rezultata istraživanja interpretiran je i model klizišta (Stanić i Nonveiller, 1995, 1996; Ortolan, 1996). Istraživanja na području klizišta Kostanjek u ovom radu podijeljena su na površinska istraživanja koja se odnose na geodetska snimanja i kartiranje terena, na istraživanja podzemlja koja se odnose na istraživačko bušenje i geofizička istraživanja te na ostala istraživanja.

3.2.1. Geodetska snimanja

Geodetska mjerenja pomaka započela su 1966. godine mjerenjima vertikalnih pomaka na 28 repera ugrađenih na industrijske građevine starog pogona tvornice cementa (zgrade za pripremu sirovine, radionice i skladišta). Na spomenutim građevinama prva oštećenja se pojavljuju u razdoblju od 1963. do 1964. godine, a intenziviraju se tijekom 1966. godine (Pehnec, 1967). Rezultati mjerenja preciznim nivelmanom, s točnošću ± 1 mm, provedenih u razdoblju od 15.9.1966. do 5.12.1970., kao i rezultati mjerenja provedenih 28.10.1976., pokazali su konstantnu brzinu izdizanja repera (Nonveiller, 1976). U razdoblju od 1966. do 1976. godine najveće izdizanje zabilježeno je na reperima na sjeverozapadnom uglu radionice (u iznosu od 221 do 678 mm) te na reperima na sjevernoj i sjeveroistočnoj strani zgrade za pripremu sirovine (u iznosu od 144 do 248 mm), što je prikazano na slici 3.11.

U razdoblju od 18.4.1973. do 11.10.1976. mjereni su horizontalni pomaci unutar kruga tvornice (Čubranić, 1976) te vertikalni pomaci na rezervoarima za mazut i hali za sirovinu (slika 3.11). Na temelju ovih mjerenja interpretirana je granica između zone horizontalnih pomaka i stabilne zone. Horizontalni pomaci izmjereni u smjeru sjever-jug za razdoblje od približno 3,5 godine, za dvije točke mjerenja iznose 1,188 m (istočno od rezervoara za mazut), odnosno 1,559 m (istočno od hale za sirovinu). Vertikalni pomaci (izdizanje) na rezervoarima iznose od 150 do 560 mm te od 11 do 221 mm na južnoj strani i jugoistočnom rubu hale za sirovinu. Na zapadnoj i sjevernoj, kao i na većem dijelu istočne strane hale za sirovinu zabilježeno je usijedanje (u iznosu od 22 do 167 mm).

Ortolan (1996) navodi se da je 1978. godine na širem području klizišta ugrađeno 105 stabiliziranih geodetskih točaka. Rezultati između nultog i prvog mjerenja, u razmaku od približno pola godine (od kraja ljeta/početka jeseni 1978. do proljeća 1979. godine) prikazani su u Lasić i Birin (1979), s usvojenom preciznošću mjerenja od 2 cm. Ortolan (1996) navodi da je na nekim točkama zabilježen pomak od oko 50 cm te da je generalni smjer pomaka prema jugu, uz veća lokalna odstupanja prema jugozapadu i jugoistoku.

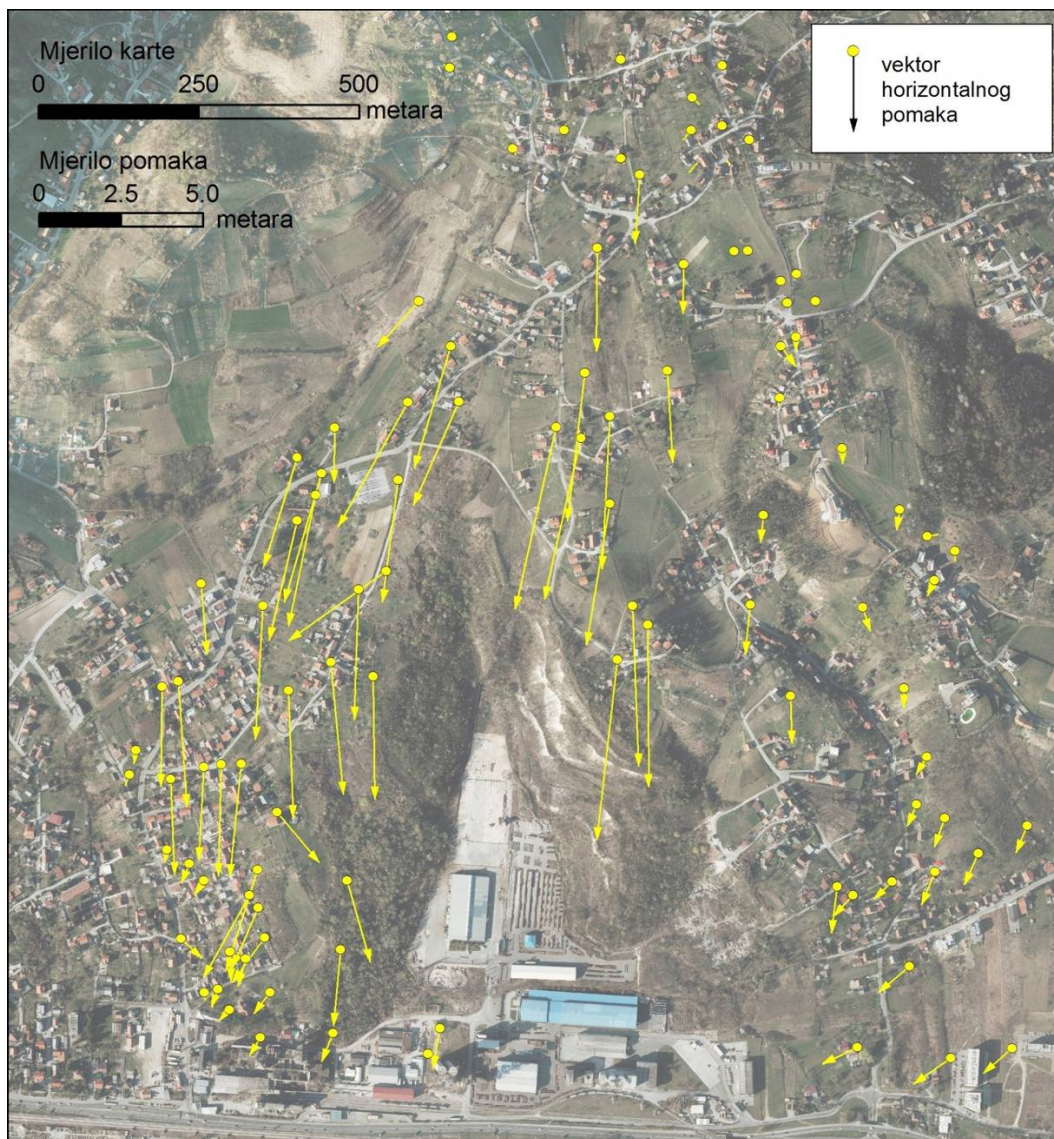


Slika 3.11. Položaji i pomaci mjernih točaka na tvorničkim objektima za razdoblje od 1966. do 1976. godine (Ortolan, 1996).

Prostorni pomaci na području klizišta Kostanjek i u neposrednoj okolici određeni su 1987. godine na temelju položaja 110 točaka odabranih na dvije generacije stereoparova avionskih snimaka, iz 1963. (približno mjerilo snimaka 1:8.000) i 1985. godine (približno mjerilo snimaka 1:5.500), uz procijenjenu srednju pogrešku određivanja pomaka $m_y = m_x = 22$ cm (Ortolan i dr., 1987). Horizontalni vektori pomaka, od kojih je većina reda veličine 3 do 6 metara, prikazani su na slici 3.12. Pleško (1988) analizira prostorne pomake 120 točaka na temelju interpretacije pet generacija stereoparova avionskih snimaka iz 1963., 1979., 1981., 1985. i 1988. godine.

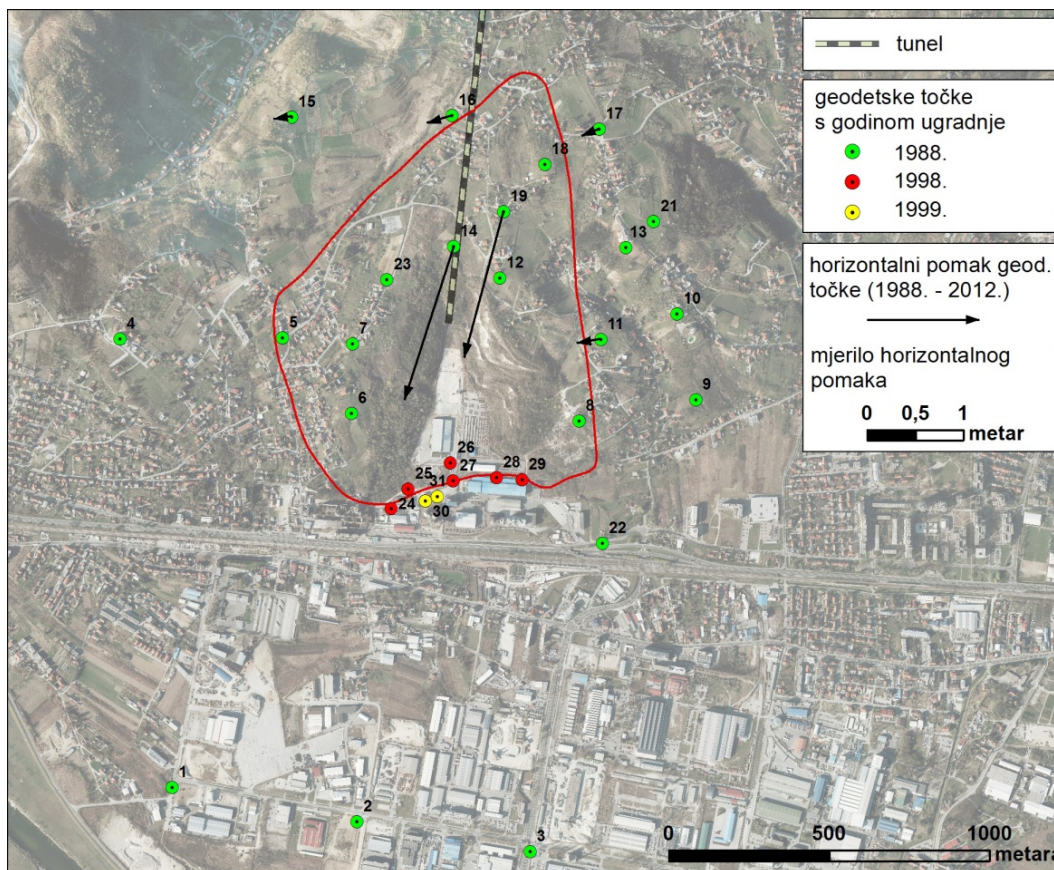
Godine 1988. ugrađeno je 20 stabiliziranih geodetskih točaka na području klizišta i u bližoj okolici te tri bazne točke južno od klizišta (slika 3.13). Nulto mjerenje provedeno je u srpnju 1988. godine (Lasić i dr., 1989). Prvo mjerenje pomaka provedeno je početkom veljače 1994. godine na 18 točaka, a rezultati su prikazani u Kukuruzović i dr. (1994). Za razdoblje od četiri godine i pet mjeseci veličina ukupnog horizontalnog pomaka varira u rasponu od 18,4 do 44,32 cm, a veličina vertikalnog pomaka od 0,4 do 8,2 cm. Na svim točkama, izuzev točke 5, izmjereno je usijedanje, a izmjereni smjerovi horizontalnog vektora pomaka su generalno bili u smjeru juga.

Geodetska mjerenja relativnih pomaka u tunelu (slika 3.13) trajala su u razdoblju od 1988. do 1995. godine, iako su prva oštećenja tunela uočena već tijekom druge polovice 1974. godine (Nikolić i dr., 1977). Mjerenja su započela postavljanjem stakalaca na tri pukotine, a proširena su 1989. godine postavljanjem po četiri para stabiliziranih točaka na svaku od tri pukotine. Mjerena je promjena relativne udaljenosti između dionica tunela ispred i iza oštećene zone. Ortolan (1996) daje rezultate mjerenja za navedeno razdoblje, kao i izračun horizontalnih komponenti vektora pomaka koji iznosi oko 26 cm za razdoblje šest godina i deset mjeseci.



Slika 3.12. Prostorni pomaci na području klizišta Kostanjek i u neposrednoj okolici određeni na temelju položaja 110 točaka iz dvije generacije stereoparova avionskih snimaka (1963. i 1985. godina) preuzeti iz Ortolan i dr. (1987). Vektori pomaka prikazani su na ortofoto karti iz 2012. godine.

Tijekom 2009. godine ugrađeno je novih 35 stabiliziranih točaka na području klizišta Kostanjek. Nulto mjerenje ovih 35 točaka kao i mjerenje osam točaka stabiliziranih 1988. godine provedeno je listopada 2009. Prvo mjerenje 43 spomenute točke izvršeno je u ožujku 2010 (Gjuretek i Miljković, 2010). Dobiveni rezultati su bili unutar preciznosti mjerenja, odnosno $\pm(1 \text{ cm} + 1 \text{ ppm})$ u horizontalnom smjeru i $\pm(2 \text{ cm} + 1 \text{ ppm})$ u vertikalnom smjeru. Drugo mjerenje proveli su studenti Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu 2.2.2012. kada su izmjerili položaje 35 geodetskih točaka relativnom statičkom metodom (Županović i dr., 2012). Horizontalni pomak točaka u razdoblju između listopada 2009. i veljače 2012. godine iznosio je od 3 do 92 mm u smjeru juga. Od 1988. do 2012. godine preostale su samo dvije geodetske točke (točke 12 i 14) unutar granica klizišta. Njihov horizontalni pomak tijekom tog razdoblja iznosio je 1,56 i 1,68 m (slika 3.13).



Slika 3.13. Položaji geodetskih točaka na širem području klizišta Kostanjek za razdoblje od 1988. do 1999. godine te horizontalni pomaci dviju preostalih geodetskih točaka za razdoblje od 1988. do 2012. godine. Podaci su prikazani na ortofoto karti iz 2007. godine.

3.2.2. Inženjerskogeološko kartiranje

Prve deformacije tla na području klizišta Kostanjek registrirane su u izvještaju Šikić (1972) tijekom inženjerskogeoloških istraživanja za temeljenje trafostanice, rasklopnog postrojenja i stupova dalekovoda, u kojemu se spominje zona usijedanja (duljine 200 m, širine 8 m, dubine 0,8 m) pružanja sjever-jug s jako oštećenim kućama uz ulicu Bukošćak koja se nalazi u sjeverozapadnom dijelu klizišta. Magdalenić i dr. (1979) proveli su inženjerskogeološko kartiranje značajki klizišta, pukotina i oštećenja na ogradama i cestama, koja interpretiraju kao niz manjih lokalnih klizišta.

U geotehničkom elaboratu izrađenom za potrebe projektiranja završnih pokosa u otvorenom kopu lapora Ortolan i Stanić (1985) prikazuju rezultate rekognoscirajućeg inženjerskogeološkog kartiranja šire okolice površinskog kopa, provedenog krajem 1984. godine. U elaboratu Ortolan (2008) navodi 50-ak pukotina decimetarskih dimenzija sa strijama smjera nagiba prema jugoistoku, koje su izmjerene tijekom kartiranja 1984. godine u višim dijelovima duž istočne fronte kopa. Krajem iste godine (21.12.1984.) tim stručnjaka provodi rekognoscirajuće inženjerskogeološko kartiranje s ciljem utvrđivanja granice klizišta Kostanjek pri čemu su definirane granice klizišta na sljedećim lokacijama:

- istočna granica klizišta
 - o presijeca ulicu Kostanjek,
 - o proteže se dolinom u kojoj se nalazi ulica Dolec,
 - o prelazi preko osnovne škole u ulici Bizek II na kojoj su tada uočena veća oštećenja;
- sjeveroistočna granica klizišta
 - o oštećena cesta na adresi Bizek III, kbr. 3,
 - o usijedanje i pomak kolnika s denivelacijom jugoistočnog dijela od 40 cm na adresi Bizek II, kbr. 29,
 - o veće oštećenje kuće s horizontalnim pomakom od oko 45 cm (puknuće SZ ugla kuće izgrađene 1980. godine) udaljene 20 m SI od pukotine na cesti;
- sjeverozapadna granica klizišta
 - o depresija sjeverno od ulice Bukošćak,
- zapadna granica klizišta
 - o deformacije u bližoj okolini kuće na adresi Prigornica 45 (zgrada jako oštećena, horizontalni pomak ograde od tri metra u smjeru juga).

Južna granica klizišta tom je prilikom definirana na temelju interpretacije geodetskih mjerenja vertikalnih i horizontalnih pomaka na industrijskim građevinama iz razdoblja od 1966. do 1976. godine. Ostao je nerazjašnjen samo položaj granice klizišta u jugozapadnom i jugoistočnom dijelu klizišta (Ortolan, 1996). Tijekom 1987. godine Ortolan i Nonveiller pronalaze tragove klizne plohe sa strijama na prvoj radnoj bermi istočnog dijela površinskog kopa lapora.

U razdoblju od 10.3. do 6.5.1988. na području uže okolice klizišta snimljena su 162 kopana zdenca, od kojih je 24 zdenca presječeno kliznim plohami. Rezultati su objavljeni u Jančin i Ortolan (1988). Većina presječenih zdenaca smještena je duž zapadne i sjeverozapadne granice klizišta. Dubina kliznih ploha registriranih u zdencima je u rasponu od 4 do 21 metar. Rezultati detaljnog inženjerskogeološkog kartiranja prikazani su na inženjerskogeološkoj karti mjerila 1:2.000 koja je objavljena u Ortolan (1996), a originalno je nazvana „Strukturno-tektonska karta klizišta Podsused s piezometarskim tlakovima na razini klizne plohe“.

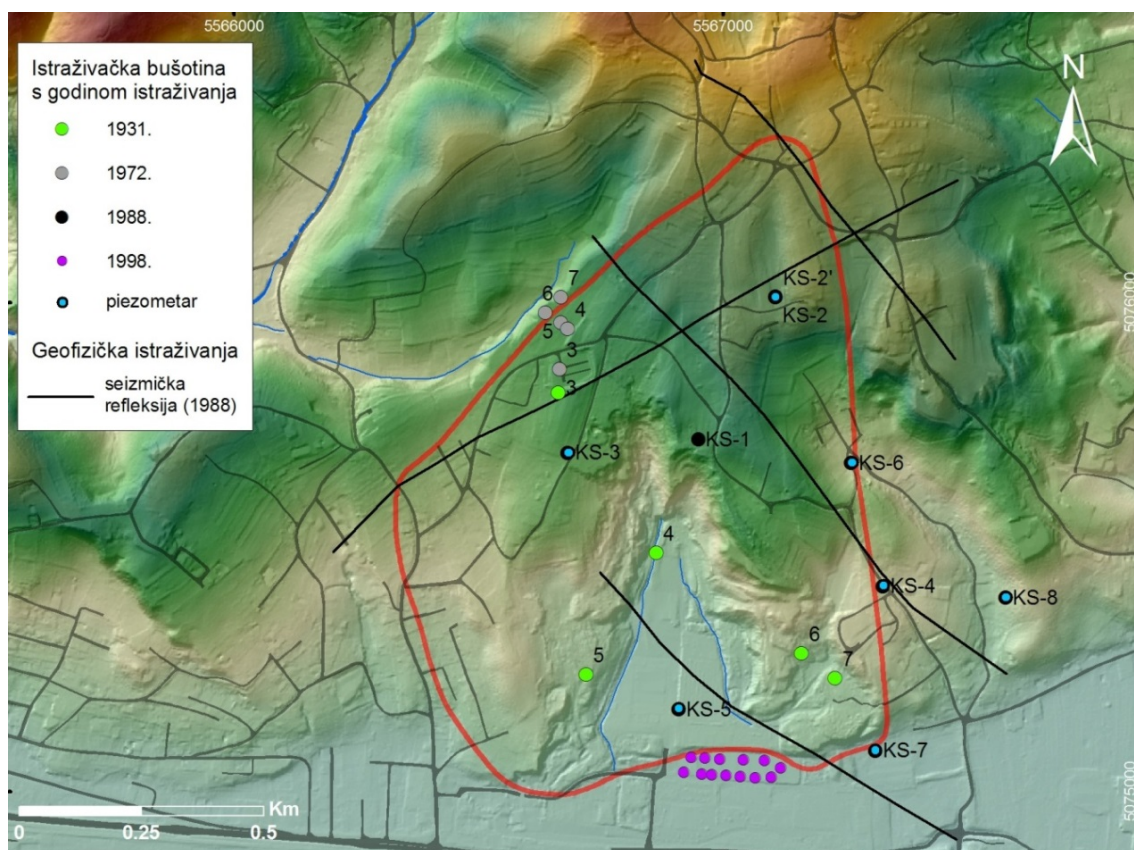
Krajem 2007. i početkom 2008. godine provedeno je rekognoscirajuće kartiranje (Ortolan, 2008) na sljedećim lokacijama: (1) radni plato Robnih terminala (bivši posjed tvrtke C.I.O.S. d.o.o.); (2) napušteni tunel za dopremu sirovine; i (3) granice klizišta. Tom je prilikom utvrđeno izdizanje armirano-betonske ploče između ulaza u tunel i zgrade Robnih terminala i daljnje oštećenje podgrade i betonske obloge tunela. Na granicama klizišta zabilježena su daljnja oštećenja na objektima i cestama, na istim mjestima kao i tijekom ranijih kartiranja.

3.2.3. Istraživačko bušenje

Na slici 3.14 prikazani su položaji istraživačkih bušotina iz različitih razdoblja, izvedenih na području klizišta Kostanjek te u njegovoj neposrednoj okolini. U elaboratu Roboz i Zambelli (1965) sadržani su podaci determinacije jezgre bušotina iz 1931. godine izbušenih za rudarski projekt. Ortolan (1996) daje podatke o kalcimetrijskim analizama (sadržaj CaCO_3) 571 uzorka iz bušotina izbušenih 1931. godine te ih koristi za korelaciju miocenskih naslaga. Istraživačko bušenje za projekte temeljenja industrijskih objekata tvornice cementa „Sloboda“ provedeno je tijekom 1964. (Müller i dr., 1964) i 1970. godine (Pehnec i Horvat, 1970). Ortolan (1996) navodi da su u ovim bušotinama pronađene aluvijalne naslage, kojih na višim dijelovima terena nema. U izvještaju Šikić (1972) dani su rezultati inženjerskogeoloških istraživanja provedenih za potrebe temeljenja trafostanice, rasklopnog postrojenja i stupova dalekovoda u sjeverozapadnom dijelu klizišta, a sastavni dio izvještaja su i rezultati determinacije šest istraživačkih bušotina dubine od 15,4 do 25 metara. Godine 1973. također su provedena geotehnička istraživanja za proširenje tvornice cementa (Pehnec i dr., 1973), u okviru kojih je provedeno istraživačko bušenje te je izveden istraživački raskop dubine tri metra (Ortolan, 1996). U bušotinama je registrirana visoka razina podzemne vode koja potječe iz slojeva pijeska, dok je u istraživačkoj jami zabilježeno istjecanje vode iz pukotina. Za potrebe geotehničkog projekta za projektiranje završnih pokosa eksploatacije (Ortolan i Stanić, 1985) izvedena je jedna istraživačka bušotina (KS-1) dubine 80 m u kojoj su nabušeni sedimenti sarmatske starosti s tragovima smicanja u intervalu od 56,2 do 58,0 m.

Najopsežnija istraživanja podzemlja na području klizišta Kostanjek proveli su Ortolan, Stanić i Nonveiller iz bivšeg Građevinskog instituta (danas Institut IGH d.d.) u okviru geotehničkih istraživanja za potrebe stabilizacije i sanacije klizišta Kostanjek u razdoblju od 1988. do 1989. godine. Ova istraživanja sastojala su se od: (1) istraživačkog bušenja s ugradnjom piezometara; (2) ispitivanja vodopropusnosti; (3) karotažnih mjerenja u bušotinama; (4) down hole ispitivanja; te (5) seizmičko refleksijskih ispitivanja. Rezultati istraživanja i analiza stabilnosti su prikazani u ukupno 12 elaborata od kojih se pet odnosi na istraživanje podzemlja.

Istraživačko bušenje osam bušotina (oznaka KS-2 do KS-8 i KS-2') s ugradnjom piezometara (slika 3.14), provedeno je u razdoblju od veljače do svibanja 1988. godine (Klasnić i Ortolan, 1988). U sve bušotine su ugrađeni piezometri, a opažanja razine podzemne vode u piezometrima provedena su u razdoblju 8.3.1988. do 8.3.1994. godine, s povremenim prekidima. Osnovni podaci o piezometrima su navedeni u Ortolan (1996). Ugrađeno je ukupno 15 piezometara u osam bušotina. Rezultati mjerenja razine podzemne vode u razdoblju od ožujka 1988. do kolovoza 1994. godine su prikazani u Ortolan (1996), gdje je istaknuto da dublji piezometri pokazuju više razine podzemne vode nego plići piezometri.



Slika 3.14. Prikaz lokacija istraživačkog bušenja na području klizišta Kostanjek, provedenih u četiri etape tijekom 20 stoljeća te geofizičkih istražnih radova iz 1988. godine.

Tijekom mjerenja u piezometrima, također su registrirane i deformacije metalnih piezometarskih cijevi sa svrhom utvrđivanja dubine do klizne plohe. Ortolan (1996) navodi podatke o mjerenjima prohodnosti prema kojima proizlazi da u razdoblju od 17.1.1991. do 8.3.1994. nije bilo deformacija samo na piezometrima KS-3/I (prohoda do dubine ugradnje od 22,4 m), KS-5/I (prohoda do dubine ugradnje od 7 m) i KS-8 (prohoda do dubine ugradnje od 90 m). U nastavku se navode tumačenja prohodnosti u ostalim bušotinama prema Ortolan (1996). Piezometar u KS-2 bio je prohoda samo do 21,8 m (ukupna dubina cijevi je 25 m) što se tumači unosom pijeska u piezometar tijekom crpljenja vode. Oba piezometra u bušotini KS-2' bila su prohodna do 43 m (ukupne dubine cijevi su 51 i 90,5 m), što se tumači presijecanjem po plicoj kliznoj plohi. Piezometar u KS-3/III bio je deformiran na dubini od 40,3 m (ukupna dubina cijevi je 48,7 m) što odgovara dubini klizne plohe. Oba piezometra u KS-4 bila su neprohodna na 36,4 m (ukupna dubina cijevi je 40 i 66 m), a piezometar KS-5/II bio je prohoda samo do 28 m (ukupna dubina cijevi je 37,6 m), što se tumači kao posljedica deformacije po kliznoj plohi. Piezometri u bušotini KS-6 prethodno su uništeni; a piezometri KS-7 bili su otvoreni zbog čega se smatra da je prohodnost do 19,2 m prouzročena nasipavanjem u cijev.

3.2.4. Geofizička istraživanja

Prva geofizička ispitivanja na području klizišta Kostanjek provedena su 21.5.1963. (Slimak, 1963), a sa svrhom utvrđivanja mogućeg štetnog utjecaja potresanja tla na oštećivanje privatnih objekata, izazvanog masovnim miniranjima. U interpretaciji rezultata ovih ispitivanja navodi se da su registrirane niske vrijednosti brzina oscilacija tla uslijed umjetno izazvanih potresa pri kojima su izravna štetna djelovanja miniranja na oštećivanja objekata gotovo isključena. U okviru ovih istraživanja također je razmatran i utjecaj razine podzemne vode na intenzitet potresanja te se navodi općeniti zaključak da miniranja treba izbjegavati pri visokim razinama podzemne vode zbog negativnog utjecaja na stabilnost padina.

Krajem 70-tih godina na području klizišta Kostanjek provedena su geofizička ispitivanja u svrhu interpretacije deformacija objekata, a sastojala su se od seizmičke refrakcije, mjerenja spontanog potencijala i geoelektričnog sondiranja metodom prividnog otpora. Rezultati ovih ispitivanja objavljeni su u izvještaju Zagorac (1978/1979). Na temelju rezultata ispitivanja metodom seizmičke refrakcije, pretpostavljena je klizna ploha na dubinama od 2,5 do 10,5 m, u naslagama gdje je brzina longitudinalnih valova manja od 2.000 m/s. Mjerenja spontanog potencijala izvršena su na području približne površine 1 km², na preko 1.300 točaka. U Ortolan (1996) je prikazana karta spontanog potencijala iz navedenog izvještaja, u kojemu se također navodi da pozitivne anomalije ukazuju na područja tlačnih naprezanja i strujanje vode prema gore, a negativne anomalije na područja vlačnih naprezanja i strujanje vode prema dolje.

Karotažna mjerenja (elektrokarotaža, radioaktivna i temperaturna karotaža) izvedena su u istraživačkim bušotinama KS-2 do KS-8 u razdoblju od 15.2. do 28.4.1988. (Urli i Sviben, 1988). Svrha ovih mjerenja bila je utvrditi oslabljene zone unutar lapora, jer se očekivalo da je klizna ploha formirana po zaglinjenim proslojcima. U Ortolan (1996) su prikazani primjeri rezultata izvršenih elektrokarotažnih ispitivanja s temperaturnim karotažnim mjerenjima u tri bušotine koje se nalaze unutar klizišta (KS-2', KS-3 i KS-5) te se navodi da su elektrokarotažna mjerenja ukazala na položaj najdublje klizne plohe, koja je identificirana prema intervalima najnižih vrijednosti specifičnih otpora. Također se ističe da je moguće razlučiti geološku granicu između sarmata i donjeg panona na dubinama od 10 i više metara, na temelju oblika krivulja pripadajućih otpora.

Plitka seizmička refleksija provedena je 1988. godine duž četiri profila (slika 3.14) u svrhu interpretacije strukturno-geološke građe (odnosno slojevitosti i rasjeda) plićih dijelova podzemlja. Rezultati su prikazani u izvještaju Andrić (1989). Na temelju interpretacije seizmičkih valova bilo je moguće determinirati samo položaj slojevitosti u naslagama listićavih glinovitih lapora (varvita) sarmatske starosti u bazi klizišta i geološku granicu između naslaga sarmata i tortonskih litotamnijskih vapnenaca. Na sva četiri profila interpretirane su rasjedne zone kao diskontinuiteti koji su prekinuli kontinuitet geoloških granica. Položaji profila seizmičke refleksije i interpretirane rasjedne zone prikazani su na inženjerskogeološkoj karti mjerila 1:2.000 objavljenoj u Ortolan (1996).

Ispitivanja seizmičkih parametara na širem području klizišta Kostanjek provedena su 1989. godine mjerenjem horizontalne komponente mikrosezmičkog nemira kratkog perioda na tri mjerne točke,

smještene uz istraživačke bušotine KS-2, KS-5 i KS-6 (Herak i Kuk, 1989). Dobiveni seizmički parametri za potres magnitude $M=6,5$, s epicentrom u Kašinskom području udaljenom 11 km, bili su sljedeći:

- maksimalni dinamički faktor amplifikacije (DAF) za model tla usvojen na lokaciji ispitivanja mikronemira KS-2, $DAF(KS-2)=1,86$;
- maksimalna očekivana horizontalna akceleracija na osnovnoj stijeni, $a_{max,o}=0,253$ g;
- maksimalna očekivana horizontalna akceleracija na površini terena, $a_{max,p}=0,470$ g;
- maksimalni očekivani intenzitet potresa na srednjem tlu, $I_{max}=9,2^{\circ}MCS$;
- maksimalni očekivani intenzitet potresa na lokaciji uz očekivani prirast intenziteta za III kategoriju tla ($0,5^{\circ}MCS$), $I_{max}=9,7^{\circ}MCS$;
- preporučeni omjeri vertikalne komponente akceleracije u iznosu od 2/3 horizontalne komponente.

3.2.5. Ostala istraživanja

Na području klizišta Kostanjek od ostalih istraživanja provedene su mineraloške i paleontološke analize, analize fizičko-kemijskih karakteristika uzoraka vode sa šireg područja te hidrološka istraživanja. Od spomenutih istraživanja u daljnjem tekstu opisana su hidrološka istraživanja. Ortolan (1996) pri procjeni piezometarskih razina u tlu, koristi postupak određivanja bilance vode u tlu prema Palmer (1965). Za proračune Ortolan (1996) koristi podatke o oborinama s meteorološke postaje Zagreb-Grič te podatke mjesečnih mjerenja izdašnosti na pet izvora (Žuti zdenec, Trpučev krč I i II, Trtnjak i Žlebec I), preuzetih iz izvještaja Vodovod-Zagreb (1961 - 1989), koje korelira s izdašnostima izvora na slivnom području kojemu pripada klizište Kostanjek, izmjerenim u razdoblju od srpanja do rujana 1967. godine i preuzetim iz Božičević i dr. (1967). Ortolan (1996) koristi i podatke o komponentama hidrološke bilance: (1) za razdoblje od 1962. do 1970. godine iz neobjavljenih podataka od Penzar (1974); te (2) za razdoblje od 1988. do 1989. godine iz Pandžić (1989, 1990).

Iz podataka godišnjih oborina s meteorološke postaje Zagreb-Grič i hidroloških parametara punjenja tla vodom (R) i gubitka vode iz tla (L) prema neobjavljenim podacima od Penzar (1974), napravljen je proračun vodne bilance za slivno područje veličine 8 km^2 za razdoblje od 1962. do 1974. godine. Rezultati objavljeni u Ortolan (1996) su sljedeći: od ukupne količine oborine za razmatrano slivno područje, u promatranom razdoblju od 11 godina prosječno 10,9% (min. 7,59%, maksimalno 13,97%) odlazi na duboko poniranje, odnosno na punjenje podzemne vodne retencije. Količina vode koja duboko ponire određena je na temelju omjera ukupne oborine i ukupne izdašnosti izvora tijekom spomenutog razdoblja. Ukupna 11 godišnja vrijednost otjecanja dobivena je kao zbroj mjesečnih otjecanja preuzetih iz Penzar (1974) i iznosi 2,85 m. U odnosu na ukupnu količinu oborina od 10,5 m (za isto razdoblje) prosječno višegodišnje otjecanje, izračunato po Palmerovoj metodi, iznosi 27,1%. Budući da se u metodi prema Palmeru (1965) ne razlikuju podzemno i površinsko otjecanje, površinsko otjecanje je izračunato kao razlika između otjecanja izračunatog po Palmeru (27,1%) i izračunate vrijednosti dubokog poniranja (10,9%) te iznosi 16,2% od ukupno pale oborine.

Na temelju podataka o mjerenjima izdašnosti pet izvora u razdoblju od siječnja 1961. do prosinca 1974. godine, preuzetih iz izvještaja Vodovod-Zagreb (1961 - 1989) i komponenti hidrološke bilance prema Penzar (1974), Ortolan (1996) je usporedio zavisnost izdašnosti pet izvora (pojedinačne i srednje izdašnosti) o sljedećim parametrima hidrološke bilance: S - sadržaju vode u tlu (količini vode u prvom metru dubine tla); i RO - površinskom otjecanju. Iz navedenih analiza zaključeno je da su izdašnosti izvora u dobroj korelaciji sa sadržajem vode u prvom metru tla te da su opadanja i porasti izdašnosti vezani uz deficit vlage, ili potpuno zasićenje vodom u prvom metru tla. Na osnovi analiza varijacija površinskog otjecanja (RO) uočeno je da pojava viška vode u hidrološkoj bilanci, koji bi trebao površinski otjecati, označava i nastupanje početka porasta izdašnosti izvora. Prestanak površinskog otjecanja označava i prestanak porasta izdašnosti izvora, odnosno smanjenje njihove izdašnosti. Porast ili smanjenje izdašnosti izvora je u korelaciji s nastupanjem ili prestankom površinskog otjecanja određenog Palmerovom metodom proračuna komponenata bilance vode u tlu. Maksimalne izdašnosti javljaju se pri kraju neprekidnih višemjesečnih razdoblja površinskog otjecanja, a njihova veličina ovisi o duljini trajanja i veličini površinskog otjecanja. Ortolan (1996) zaključuje da maksimalnim izdašnostima izvora odgovaraju i maksimalne piezometarske razine vode u tlu, i obrnuto, minimalnim izdašnostima izvora odgovaraju i minimalne piezometarske razine vode u tlu. Na taj način Ortolan (1996) koristi podatke o izdašnostima izvora kao indirektno pokazatelje oscilacija piezometarskih razina podzemne vode. Analizama je utvrđeno da su 1962. i 1963. godine (kada je aktivirano klizište) bile najveće ukupne mjesečne izdašnosti izvora. U razdoblju od 1961. do 1974. godine minimumi izdašnosti zabilježeni su u zimskim mjesecima, od studenog do veljače, a maksimumi izdašnosti izvora pojavljuju se od siječnja do svibnja.

U razdoblju od 1989. do 1991. godine Ortolan provodi mjerenja protoke Thomsonovim preljevom u tunelu za dopremu sirovine, kako bi utvrdio odakle potječu vode koje istječu iz tunela na južnom portalu. Na osnovi mjerenja 31.1.1989. te mjerenja nakon izrazito dugog sušnog razdoblja (21.3.1991.) i nakon kišnog razdoblja (21.5.1991.) utvrđeno je da se 90% dotoka podzemne vode u tunel odvija u zonama raspucanih dolomitima (rasjedne zone) i u zonama litotamnijskih vapnenaca. Izmjerene protoke su u rasponu od 4,4 do 10 l/s.

3.3. Povijesni podaci o interpretaciji klizišta Kostanjek

Interpretacija inženjerskogeološkog modela klizišta Kostanjek je prvi puta objavljena u radovima Stanić i Nonveiller (1995, 1996), zatim je detaljno elaborirana u Ortolan (1996), a u cijelosti je preuzeta u Ortolan (2008) kao model klizišta za projekt sanacije. Prikaz inženjerskogeološkog modela klizišta daje se po sljedećim elementima koje je bilo nužno interpretirati: (1) geometrija klizišta na površini i u podzemlju; (2) materijali i podzemna voda u klizištu i u podlozi klizišta; (3) uzroci i kinematika klizanja. Na kraju ovog poglavlja daje se sažeti prikaz prijedloga sanacije klizišta Kostanjek.

3.3.1. Geometrija klizišta

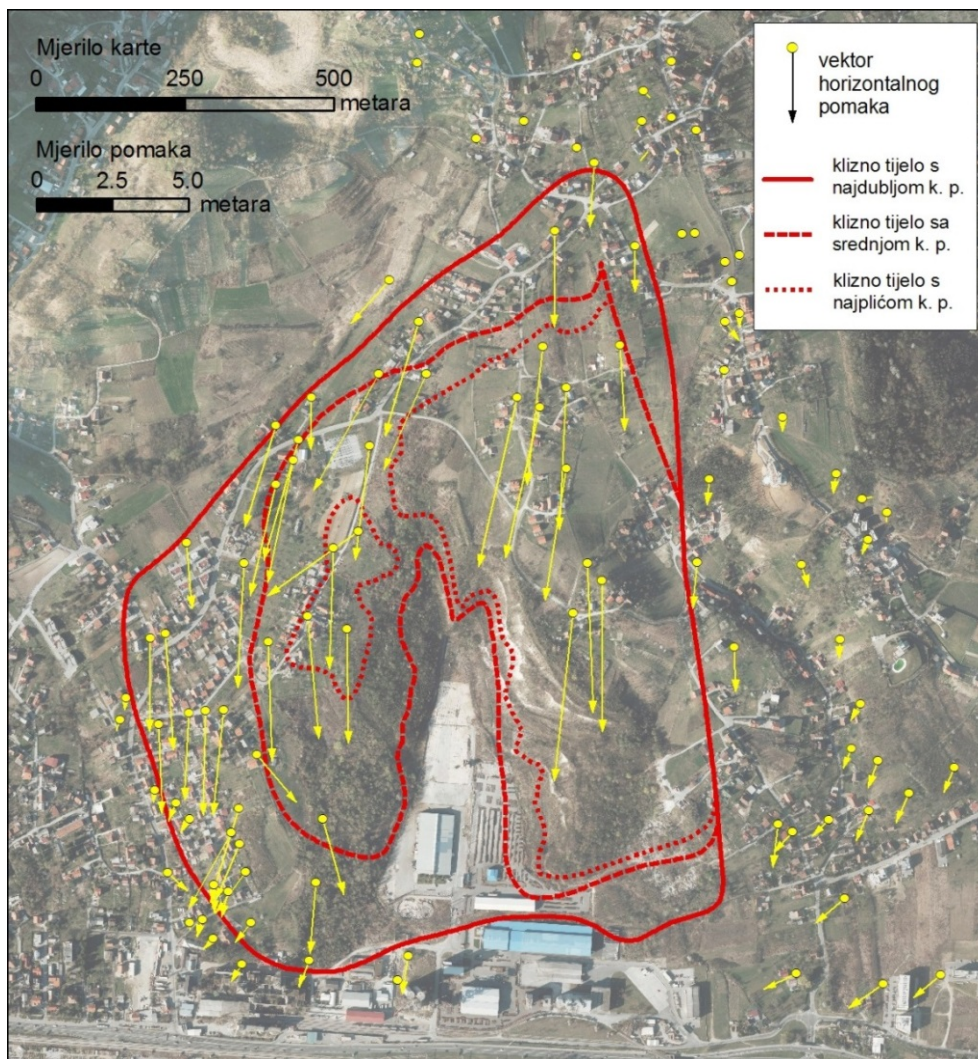
Klizište Kostanjek interpretirano je kao translacijsko, duboko klizište s tri klizne plohe (slika 3.15). Granice klizišta nikada nisu bile jasno izražene, jer nema denivelacije terena duž glavne pukotine, niti zone usijedanja pokrenute mase, niti jasno izražene zone akumulacije materijala u nožičnom dijelu klizišta. Iz tog razloga kao dokaz klizanja poslužila su mnogobrojna oštećenja na industrijskim i infrastrukturnim objektima, na privatnim kućama i pratećim objektima (primjerice ograde), na prometnicama te mjestimično slijeganje terena u gornjim dijelovima klizišta i uzdizanje terena u donjim dijelovima klizišta, odnosno u zoni akumulacije.

Geometrija klizišta na površini interpretirana je na temelju sljedećih istraživanja i podataka iz razdoblja od 1966. do 1992. godine:

- južna granica klizišta u nožičnom dijelu interpretirana je na temelju mjerenih horizontalnih pomaka između objekata starog i novog pogona razdoblju od 1973. do 1976. godine, dokumentiranih u Nonveiller (1976);
- istočna, sjeverna, sjeverozapadna i zapadna granica klizišta interpretirane su na temelju inženjerskogeološkog kartiranja koje je proveo Ortolan u razdoblju od 1984. do 1988. godine (detaljnije opisano u poglavlju 3.2.2.);
- granice tri klizna tijela određene su na temelju veličine horizontalnih pomaka iz Pleško (1988), Ortolan i Pleško (1992) kao što je to prikazano na slici 3.15.

Geometrija klizišta u podzemlju interpretirana je na temelju sljedećih istraživanja i podataka iz razdoblja od 1985. do 1994. godine:

- tragovi plićih kliznih ploha pronađeni su na svježem zasjeku površinskog kopa 1988. godine (Ortolan, 1996);
- najdublja klizna ploha interpretirana je na temelju determinacije bušotine KS-1 (u tanko laminiranim zelenkastosivim sedimentima sarmatske starosti utvrđeni su tragovi smicanja na dubini od 56,2 do 58 m); elektrokarotažnih mjerenja u bušotinama; inženjerskogeološkog kartiranja tunela gdje su pronađeni tragovi najdublje klizne plohe;
- deformacije piezometara u razdoblju od 1991. do 1994. godine i to oba piezometra u bušotini KS-2', piezometar KS-3/III, oba piezometra u bušotini KS-4 te piezometar KS-5/II.



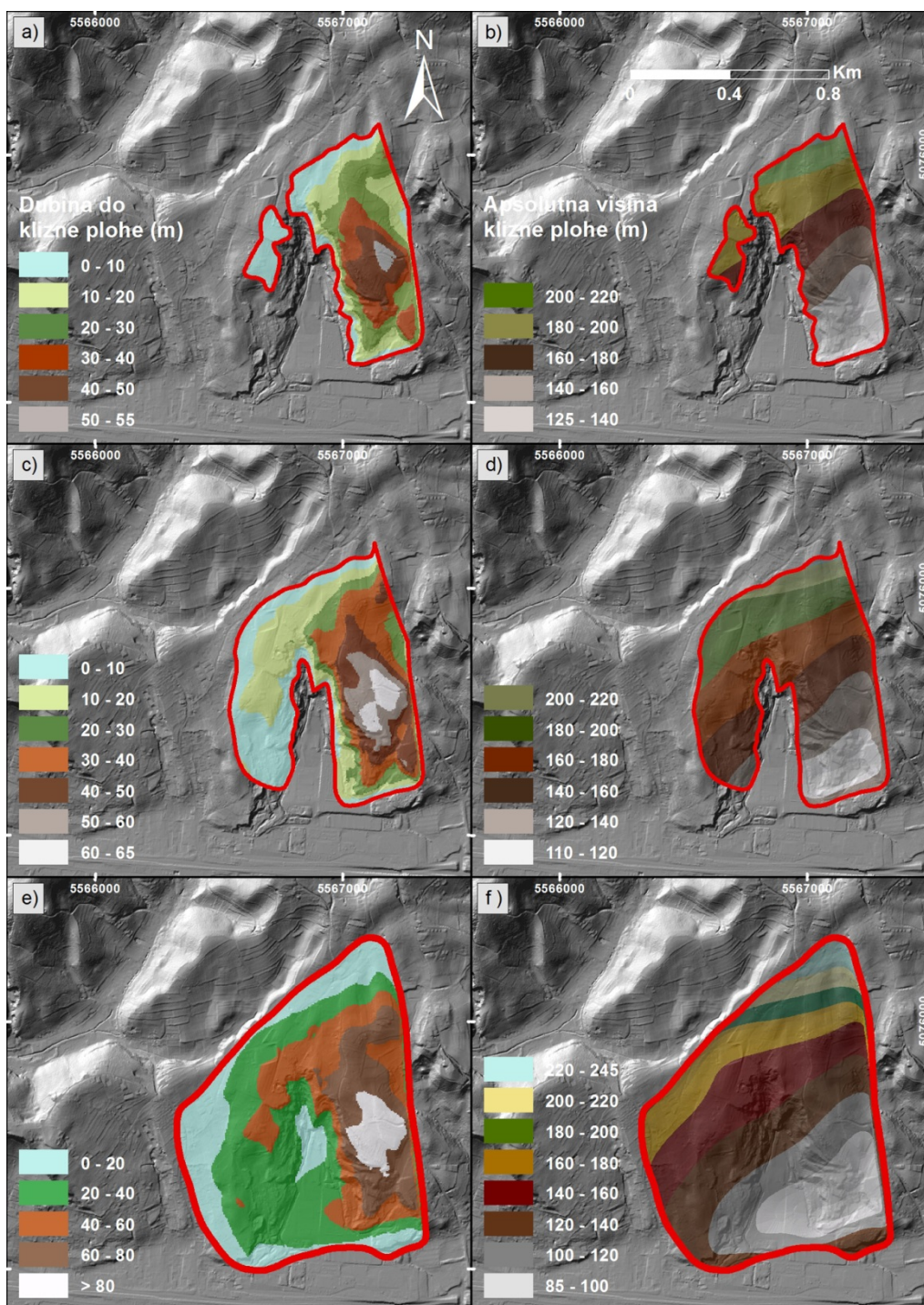
Slika 3.15. Granice tri klizna tijela na području klizišta Kostanjek s prikazom horizontalnih pomaka dobivenih na temelju analize stereoparova avionskih snimaka za razdoblja od 1963 do 1988. godine (Pleško, 1988; Ortolan i Pleško, 1992).

Tablica 3.1. Dimenzije klizišta Kostanjek prema Stanić i Nonveiller (1995, 1996) i Ortolan (1996).

Opis dimenzije klizišta	Dimenzija
širina pokrenute mase, W_d	1.116 m
širina plohe sloma, W_r	1.116 m
ukupna duljina klizišta, L	1.430 m
duljina pokrenute mase, L_d	1.430 m
duljina plohe sloma, L_r	1.430 m
dubina pokrenute mase, D_d	90 m
dubina plohe sloma, D_r	90 m

Dimenzije klizišta prema postojećem modelu dane su u tablici 3.1. Prema Ortolan i Pleško (1992) i Ortolan (1996) površina klizišta Kostanjek iznosi oko $1,2 \text{ km}^2$, a ukupni volumen pokrenute mase iznosi $32,6 \times 10^6 \text{ m}^3$. Maksimalna dubina najdublje klizne plohe je 90 m, a formirana je po plohama slojevitosti unutar laminiranih glinovitih lapora (varvita) sarmatske starosti, približno devet metara ispod geološke granice između donjeg panona i sarmata. Smjer nagiba klizne plohe generalno je u smjeru jug-jugoistok (slika 3.16f), a dubina klizne plohe generalno se povećava u smjeru istoka i jugoistoka (slika 3.16e) pri čemu je najveća na području između ulice Kostanjek i istočnog pokosa otvorenog kopa lapora. Prema Ortolanu (1996) istočnu granicu klizišta predstavlja praktički vertikalni rasjed, pružanja sjever-jug.

Ortolan i Pleško (1992) i Ortolan (1996) interpretirali su dvije pliće klizne plohe, čiji je položaj subparalelan najdubljoj kliznoj plohi i čije dubine su 50 i 63 m. Volumen materijala iznad srednje duboke klizne plohe iznosi $12,8 \times 10^6 \text{ m}^3$, dok volumen materijala iznad najpliće klizne plohe iznosi $7 \times 10^6 \text{ m}^3$. Prema Ortolanu (1996) ove dvije klizne plohe formirane su u naslagama gornjeg panona, odnosno po proslojcima gline debljine od 1 do maksimalno 10 mm. S obzirom na distribuciju aktivnosti, tj. na tumačenje da su klizanja po plićim plohama nastala nakon klizanja po najdubljoj kliznoj plohi, klizište je interpretirano kao umanjujuće.



Slika 3.16. Inženjerskogeološki model tri klizišta prema Ortolanu (1996) s prikazom dubina do klizne plohe i apsolutnih visina: (a,b) najplića klizna ploha; (c,d) srednja klizna ploha; (e,f) najdublja klizna ploha.

3.3.2. Materijali u klizanju i podzemna voda u klizištu

Na temelju položaja kliznih ploha (opisanih u prethodnom poglavlju) klizanje je translacijsko, a klizanjem po najdubljoj kliznoj plohi zahvaćene su naslage sarmatske starosti u debljini od devet metara (dominantno varviti) te naslage panonske starosti. U nastavku se daje sažeti prikaz interpretacije cijelog litološkog profila, od podloge klizišta do površine terena. Pomi tlakovi na najdubljoj kliznoj plohi interpretirani su kao krajnji rezultat interpretacije svih hidroloških i hidrogeoloških istraživanja (Ortolan, 1996).

3.3.2.1. Interpretacija litološkog profila i fizičko-mehanička svojstva materijala

Slijed naslaga koje izgrađuju klizište i koje se nalaze u podlozi klizišta Kostanjek interpretirao je Ortolan (1996) na temelju podataka iz postojeće literature i istraživanja provedenih u razdoblju od 1984. do 1988. godine.

Holocenske naslage utvrđene su samo u bušotinama u krugu bivše tvornice cementa „Sloboda“. Ove naslage naliježu izravno na naslage gornjeg panona, pri čemu je donjih pet metara holocenskih naslaga izgrađeno od šljunaka i pijesaka, a gornjih 10 metara od prahovito-glinovito-pjeskovitih tala.

Slijed naslaga gornjeg i donjeg panona, utvrđen je inženjerskogeološkim kartiranjem na svježim zasjecima otkopne fronte i determinacijom jezgre bušotina iz 1988. godine. Ukupna debljina naslaga gornjeg panona procijenjena je na približno 60 m, a slijed naslaga čine: (1) glinoviti lapori, debelo slojeviti do masivni; (2) leće i proslojci šljunka i konglomerata, mjestimično pijesaka i pješčenjaka ("Lyrcea horizont" prema Šikić i dr., 1979); (3) glinoviti lapori, debelo slojeviti do masivni; (4) relativno tanki paket mekih tanko slojevitih glinovitih lapora s proslojcima i laminama pijeska, mjestimično s interkalacijama kalcitom bogatog lapora; (5) krti proslojci glinovitog vapnenca; (6) tanko do debelo slojeviti lapori do glinoviti lapori s proslojcima i lećama sitnozrnastog pijeska do srednjezrnastog šljunka.

Ukupna debljina naslaga donjeg panona, od pet do šest metara, procijenjena je na temelju rezultata paleontoloških analiza (Sokač, 1989). Utvrđeni slijed naslaga predstavljaju: (1) tanko do deblje slojeviti čvrsti vapneni lapori, mjestimično s tankim proslojcima pješčenjaka; (2) čvrsti glinoviti vapnenci do kalcitom bogati lapori debljine od 20 cm do jedan metar; (3) tanko slojeviti i laminirani lapori i šejlovi s karbonatnim proslojcima debljine jedan do dva metra; (4) tanko pločasti vapnenci debljine do 0,5 m.

Ukupna debljina sarmatskih naslaga (oko 75% pijesaka, šljunaka, raspucanih konglomerata, pješčenjaka, prahovnjaka i vapnenaca; oko 25 % kalcitičnih siltoznih šejlova i tanko uslojenih do laminiranih lapora) procijenjena je na oko 120 metara na temelju interpretacije profila plitke seizmičke refrakcije i korelacije bušotina s podacima geološkog kartiranja. U gornjem dijelu sarmatskih naslaga izdvojen je paket sedimenata debljine 12 m koji je dominantno izgrađen od varvita. Ovi varviti su prema klasifikaciji Tišljar (1994), a na temelju rezultata rendgenskih, termičkih i kemijskih analiza (Slovenec, 1989) definirani kao glinoviti šejl, kalcitični glinoviti šejl do siltozni šejl, laminirani kalcitično-glinoviti prahovnjaci do laminirani glinovito-kalcitični prahovnjaci, tanko laminirani siltozni aragonitni lapori i tanko laminirani

tripoli. Kao sporadične pojave utvrđeni su i čvršće vezani prahoviti (siltozni) vapnenci, u vidu tankih proslojaka (debljine oko 10 cm). U bušotini KS-2 zapažen je interval relativno čistog šejla (na dubini od sedam do 10 m ispod granice donji panon-sarmat) na temelju niskih otpora, koji ukazuju na visok udio glinovite komponente i nizak sadržaj karbonatne komponente. Na temelju korelacije sadržaja SiO_2 iz Ortolan i Stanić (1985) i montmorilonita iz Slovenec (1989), u bušotinama KS-2', KS-3, KS-4 i KS-5, utvrđeno je smanjenje sadržaja CaCO_3 i povećanje sadržaja SiO_2 s dubinom. Zapažene su lateralne izmjene litološkog sastava neposredno ispod geološke granice donji panon-sarmat. Na temelju mineraloških analiza Slovenec (1989) u gornjim slojevima sarmata utvrđeni su visoki težinski udjeli tinjčastih minerala (do 20%) čija zelenkasta boja potječe od klorita (u tragovima do 5 %), a siva od pirita. Opisani sedimenti odlikuju se vrlo tankom do tankom slojevitošću i listavošću.

U sarmatskim naslagama također je izdvojen paket sedimenata približne debljine 43 m (u intervalu od 12 do 55 m bušotine KS-2') u kojemu su čvršće stijene zastupljene s više od 75%. U ovom paketu se izmjenjuju tanko do debelo slojeviti gusto zbijeni pijesci (rjeđe sitnozrnasti šljunci) do čvrsto vezani pješčenjaci (rjeđe konglomerati) te siltiti i kalcisiltiti s tanko laminiranim tripolima, siltoznim šejlovima i tanko slojevitim laporima. Rijetke su interkalacije vapnenaca. Česte su pojave gradacijske, lentikularne i flazerske slojevitosti. Prema Roboz i Zabelli (1965), na dubinama od 35 m do 100 m ispod granice donji panon-sarmat sadržaj CaCO_3 je uglavnom veći od 45%, a najčešće je u granicama od 50 do 80%.

Debljina litotamnijskih vapnenaca (torton) od oko 20 m utvrđena je kartiranjem u tunelu za dopremu sirovine, a gornja granica litotamnijskih vapnenaca interpretirana je na profilima plitke seizmičke refrakcije.

Reprezentativni parametri materijala (tablica 3.2) određeni su na temelju laboratorijskih ispitivanja u okviru geotehničkih istraživanja Ortolan i Stanić (1985) i Stanić (1989), a sažeto su prikazani u članku Stanić i Nonveiller (1996). U geomehaničkom laboratoriju ispitani su neporemećeni i poremećeni uzorci uzeti iz bušotina u razdoblju od 1985. do 1988. godine iz slojeva gornjeg i donjeg panona te sarmata. Osobita pozornost posvećena je sarmatskim sedimentima tipa varviti u kojima se nalazi najdublja klizna ploha. Prema Stanić i Nonveiller (1996) mjerodavna rezidualna posmična čvrstoća za duboku kliznu plohu određena je parametrima $c_r=0$ i $\phi_r=9^\circ$.

Tablica 3.2. Fizički i mehanički parametri materijala s klizišta Kostanjek (Stanić i Nonveiller, 1996).

Parametar	Naslage panonske starosti		Naslage sarmatske starosti	
	glinoviti i kalcitom bogati lapor	proslojci gline	varviti	laminirani prašnasti lapor
Wl (%)	33,5 - 81,5	77,5 - 94,5	54,9 - 143,0	40,0 - 105,5
Wp (%)	14,1 - 41,6	30,3 - 42,2	31,5 - 126,7	13,8 - 62,9
Ip (%)	19,5 - 27,5	43,1 - 54,8	16,3 - 28,3	17,3 - 42,6
AC klasif.	-	CI/CH	MH	CI/CH
ρ (g/cm ³)	1,75	2,15	1,22 - 1,59	1,39 - 2,18
ρ_s (g/cm ³)	2,60	2,83	2,32 - 2,50	2,36 - 2,78
ρ_d (g/cm ³)	1,25	1,8	0,71 - 1,09	0,82 - 1,78
ϕ_d (90°)	27,5 - 35	-	23 - 28	23 - 28
c_d (KPa)	0 - 40	-	6 - 40	6 - 40
ϕ_r (90°)	-	7 - 8	8 - 20	8 - 20
c_r (KPa)	-	0	0	0
q_u (KPa)	500 - 5.000	-	-	-

3.3.2.2. Interpretacija varijacija razine podzemne vode

Hidrogeološke značajke slijeda naslaga koje izgrađuju klizište i koje se nalaze u podlozi klizišta Kostanjek interpretirao je Ortolan (1996) na temelju podataka iz postojeće literature, kao i brojnih istraživanja provedenih u razdoblju od 1984. do 1988. godine.

Za panonske naslage usvojeni su koeficijenti vodopropusnosti od 10^{-4} cm/s u plićem dijelu do 10^{-6} cm/s u dubljem dijelu, jer se dominantno sastoje od slabo propusnih lapora (oko 75%) s mjestimičnim pojavama leća ili proslojaka bolje propusnih slojeva (oko 25%) kao što su raspucani kalcitom bogati lapori, glinoviti vapnenci, pješčenjaci, konglomerati, pijesci i šljunci.

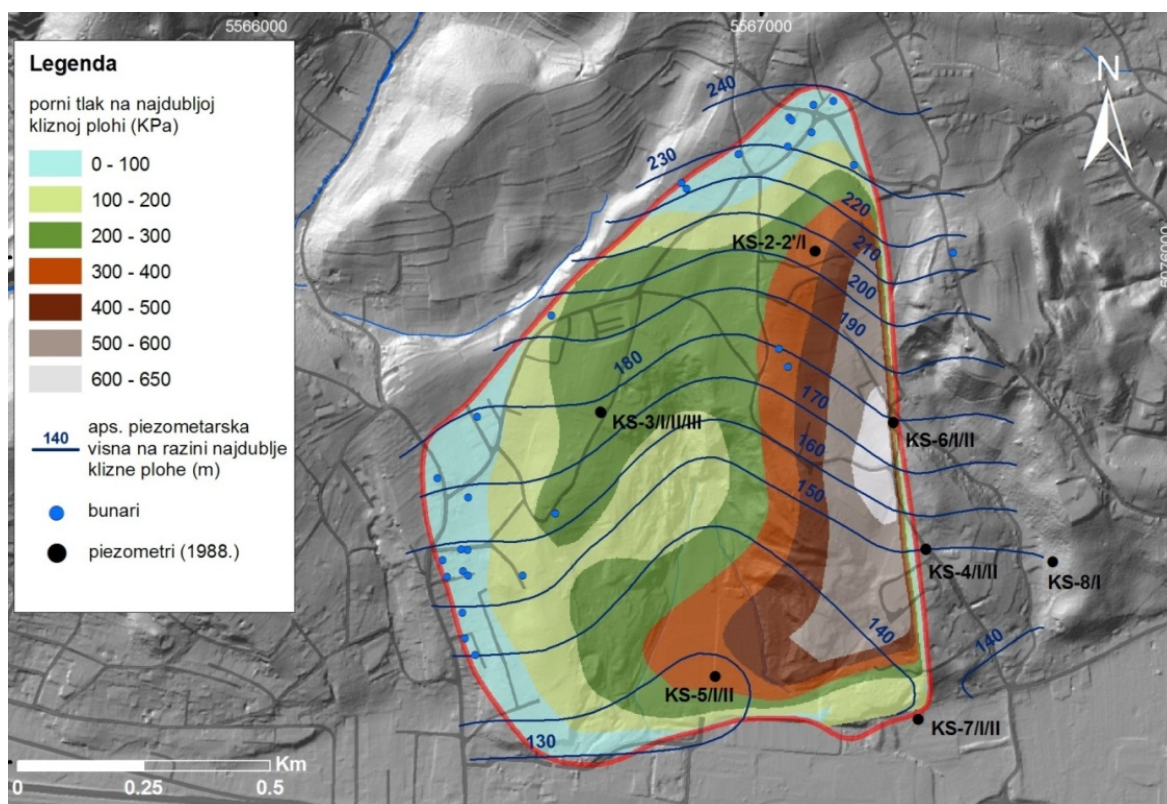
Gornji paket sarmatskih sedimenata, neposredno ispod granice s donjim panonom, približne debljine 12 m, izgrađen je od slabo propusnih stijena, odnosno tanko laminiranih glinovitih lapora (varvita), kalcitičnih siltoznih šejlova i tanko slojevitih do laminiranih lapora. Paket sarmatskih naslaga koji se nalazi na dubini od 20 do 120 m ispod geološke granice donji panon-sarmat sastoji se od oko 75% bolje vodopropusnih stijena i inženjerskih tala (pijesaka i šljunaka, raspucanih konglomerata, pješčenjaka, silita i vapnenaca) i 25% slabo propusnih stijena i inženjerskih tala (varvita, kalcitičnih siltoznih šejlova i tanko slojevitih do laminiranih lapora). Usvojena su dva tipa poroziteta, međuzrnski i pukotinski. Zbog izražene pukotinske poroznosti uslijed velike raspucanosti usvojen je prosječni koeficijenti filtracije za sarmatske naslage od 10^{-4} do 10^{-6} cm/s, određen na temelju ispitivanjima vodopropusnosti u bušotinama i piezometrima 1988. godine (Stanić i dr., 1989), kao i ujednačenost vertikalnog i horizontalnog koeficijenta filtracije.

U litotamnijskim vapnencima usvojeni su koeficijenti filtracije u približnom rasponu od 10^{-2} do 10^{-3} cm/s prema postojećim podacima iz istraživanja termalnih voda iz Dumančić (1985, 1989). Ove naslage

interpretirane su kao zatvoreni vodonosnici, jer su bočno ograničene relativno nepropusnim badenskim siltoznim laporima ili glinama, a s gornje strane relativno nepropusnim mlađim naslagama sarmata, koje predstavljaju hidrogeološku barijeru (što je dokazano pokusnim crpljenjem iz bunara B-1 i praćenjem razine podzemne vode u piezometrima KS-3/II i KS-3/III 1988. godine). Propusnost litotamnijskih vapnenaca znatno je veća u kavernoznim i rasjednim zonama. Duž geološke granice litotamnijskih vapnenaca i badenskih prahovitih lapora na površini se pojavljuju izvori. Prihranjivanje podzemnih voda u litotamnijskim vapnencima odvija se izravnom infiltracijom oborina u dijelu terena koji se nalazi sjeveroistočno od klizišta Kostanjek i poniranjem manjih ili većih stalnih i povremenih vodotoka u široj okolini klizišta.

Izolatorska funkcija panonskih i sarmatskih sedimenata utvrđena je i mjerenjima protoke u tunelu u razdoblju od 1989. do 1991. godine. Relativna izolatorska funkcija sarmatskih sedimenata potvrđena je pokusnim crpljenjem iz bunara B-1 i opažanjima razine podzemne vode u piezometrima KS-3/I (ugrađenom u panonskim naslagama), KS-3/II (ugrađenom u gornjim dijelovima sarmatskih naslaga) i KS-3/III (ugrađenom u donjim dijelovima sarmatskih naslaga) koja su provedena 1988. godine.

Izolinije apsolutnih visina piezometarskih pritisaka (hidroizopieze) na razini najdublje klizne plohe, za razdoblje od ožujka do travnja 1988. godine interpretirao je Ortolan (1996) interpolacijom podataka mjerenja razine podzemne vode u 15 piezometara i u 162 kopana bunara (slika 3.17).



Slika 3.17. Apsolutne piezometarske visine i porni tlakovi na razini najdublje klizne plohe za razdoblje ožujak-travanj 1988. godine, prema interpretaciji iz Ortolan (1996).

3.3.3. Kinematika i uzroci klizanja

S obzirom na stanje aktivnosti, klizište Kostanjek je aktivno, s različitim brzinama kretanja tijekom posljednjih 50 godina. U radu Stanić i Nonveiller (1996) navodi se da ukupni pomaci klizišta, u razdoblju od 1963. do 1994. godine, iznose od 3,4 do 6,5 m. Ukupni pomaci klizišta Kostanjek u posljednjih 50 godina do danas nisu objavljeni, iako postoje brojne analize brzine pomaka sažeto prikazane u izvještaju Ortolan (2008). U ovom poglavlju također su opisane i analize uzroka klizanja iz Ortolan (1996) na temelju korelacija pomaka klizišta i podataka o varijacijama količina iskopa u površinskom kopu, kao i prirodnih uzroka (prvenstveno oborina).

Ortolan (1996) je dao analizu brzine kretanja klizišta po najdubljoj kliznoj plohi za razdoblje od 1963. do 1988. godine, a kumulativni pomaci horizontalne komponente pomaka prikazani su na slici 3.18. Horizontalna komponenta je uzeta kao reprezentativna za prostornu komponentu pomaka. Početak klizanja 1963. godine rekonstruiran je na osnovi opisa oštećenja iz Slimak (1963), Pehnec (1967) i Nonveiller (1976). Za izračun ukupnih horizontalnih pomaka u iznosu od 3,47 m korišteni su sljedeći rezultati analiza stereoparova avionskih snimaka iz razdoblja od 1963. do 1988. godine:

- za razdoblje od 1963. do 1979. godine uzet je ukupni pomak od 2,7 m prema fotogrametrijskim mjeranjima iz Pleško (1988);
- za razdoblje od 1963. do 1985. uzet ukupni pomak od 2,91 m prema fotogrametrijskim mjeranjima iz Pleško (1988);
- za razdoblje od 1963. do 1988. uzet ukupni pomak od 3,47 m prema fotogrametrijskim mjeranjima iz Pleško (1988) i Ortolan i Pleško (1992).

U analizu ukupnih pomaka također su uvršteni i sljedeći rezultati geodetskih mjerenja instrumentima:

- za razdoblje od travnja 1973. do listopada 1976. godine uzet je izmjereni horizontalni pomak iz Čubranić (1976) u iznosu od 1,6 m;
- u dijagram pomaka u vremenu je također uključen i pomak od jednog metra registriran kao razmicanje konstrukcije transportera u tunelu (Nonveiller, 1976);
- za razdoblje od rujna 1978. do proljeća 1979. godine uzet je izmjereni pomak od 15 cm prema podacima mjerenja stabiliziranih geodetskih točaka iz Lasić i Birin (1979).

Na temelju prethodnih podataka, procijenjeni su sljedeći pomaci:

- za razdoblje od 1963. do 1973. godine procijenjen je pomak od 0,7 m;
- za razdoblje od listopada 1976. do rujna 1978. godine procijenjen je pomak od približno 0,4 m.

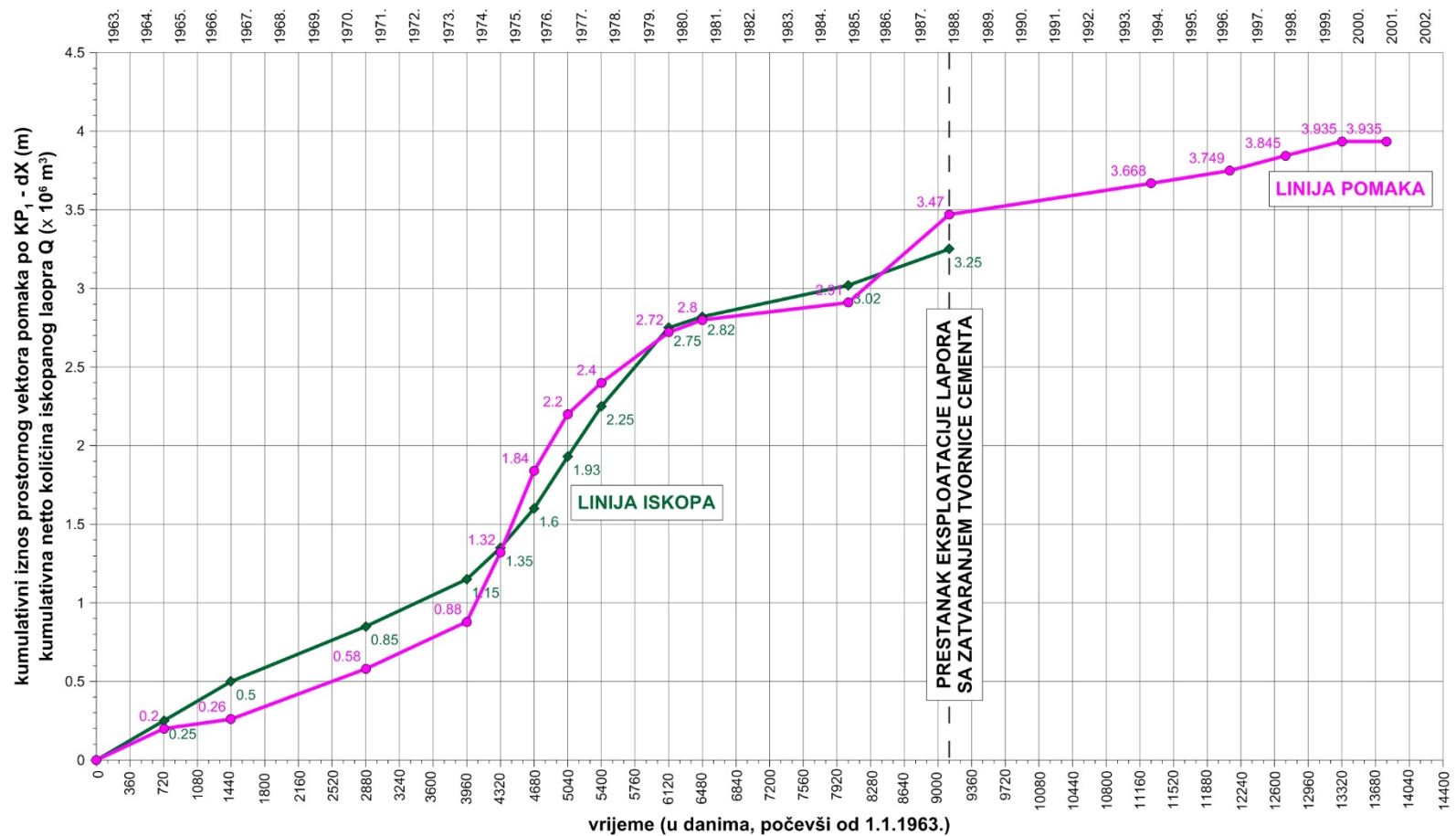
Osim ove analize, Ortolan (1996) navodi da je na građevinama starog pogona tvornice cementa „Sloboda“ glavnina deformacija nastala u razdoblju od 1966. do 1976. godine.

Ortolan (2008) daje kompilaciju rezultata analize horizontalnih pomaka za razdoblje od 1988. do 1995. godine prema Ortolan (1996) i za razdoblje od 1994. do 1998. godine prema Ortolan i Verić (1998). Analize horizontalnih pomaka temelje se na pomacima izmjerenim: (1) u tunelu na pojedinačnim pukotinama u razdoblju od 1988 do 1996. godine (izraženi kao ukupni pomak); (2) u tunelu na oštećenoj zoni u razdoblju od 1991. do 1996. godine; i (3) na jednoj geodetskoj stabiliziranoj točki u

razdoblju od 1988. do 1998. godine. Nije poznato gdje se nalazi stabilizirana točka, a ukupni horizontalni pomak od 375,4 mm izračunat je za razdoblje od 10 godina na osnovi nultog mjerenja iz 1988., prvog mjerenja iz veljače 1994. i drugog mjerenja iz ožujka 1998. godine. Na istoj stabiliziranoj točki tvrtka REPER d.o.o. provela je naknadno još dva mjerenja, u prosincu 1999. i u travnju 2001. godine. Ortolan (2008) dalje navodi da ukupni pomak klizišta Kostanjek po najdubljij kliznoj plohi od ožujka 1998. do prosinca 1999. godine iznosi 90 mm. Proizlazi da je ukupni pomak u razdoblju od 1988. do 1999. godine 465,4 mm. Na slici 3.19 prikazani su svi prostorni pomaci klizišta Kostanjek od 1963. do 2001. godine (3,94 m), iako nije jasno navedeno na temelju kojih podataka su izračunati ovi prostorni pomaci, osim za nekoliko ovdje spomenutih posljednjih mjerenja. Ortolan (2008) također navodi da nakon tog razdoblja pomaci više nisu mjereni jer su mnoge stabilizirane točke uništene, kao i reperne točke u tunelu.

Vrijeme početka klizanja dvaju plićih kliznih tijela nije poznato, a Ortolan (1996) navodi da su oba plića klizanja aktivirana u razdoblju između 1963. godine i prije proljeća 1979. godine. Kao razlog za to navode se različite veličine pomaka u različitim dijelovima klizišta, dobivene foto interpretacijom stereoparova avionskih snimaka za razdoblje od 1979. do 1988. godine (Pleško, 1988) i na osnovi rezultata geodetskih mjerenja sa stabilne geodetske baze od jeseni 1978. do proljeća 1979. godine (Lasić i Birin, 1979).





Slika 3.19. Kumulativni prostorni pomaci klizišta Kostanjek po najdubljoj kliznoj plohi KP1 od početka klizanja 1963. do travnja 2001. godine s kumulativnom neto količinom iskapanog lapora od početka klizanja do prestanka eksploatacije (precrtno iz Ortolan, 2008).

Iz ukupnih pomaka za razdoblje od 1963. do 1988. godine također je provedena analiza veličine pomaka po pojedinim kliznim plohama, a rezultati su prikazani u radovima Ortolan i dr. (1989). Kasnije je analiza veličine pomaka po pojedinim kliznim plohama napravljena i za razdoblje od srpnja 1988. do veljače 1994. godine (Ortolan, 1996). Sumarne vrijednosti ovih analiza prikazane su u tablici 3.3.

Tablica 3.3. Analiza srednjih vrijednosti horizontalnih pomaka klizišta Kostanjek u razdobljima od 1963. do 1988. godine i od 1988. do 1994. godine po pojedinim kliznim plohama (Ortolan, 1996).

Analizirano razdoblje	Klizna ploha	Srednja vrijednost pomaka	
		na kliznoj plohi	kumulativni pomak
1963. - 1988.	najplića klizna ploha (KP1)	1,767 m	6,087 m
	srednje duboka klizna ploha (KP2)	0,849 m	4,320 m
	najdublja klizna ploha (KP3)	3,471 m	3,471 m
1988. - 1994.	najplića klizna ploha (KP1)	134,1 mm	424,1 mm
	srednje duboka klizna ploha (KP2)	91,6 mm	290,0 mm
	najdublja klizna ploha (KP3)	198,4 mm	198,4 mm

3.3.4. Analize prirodnih i antropogenih uzroka klizanja

Na slici 3.18 u prethodnom poglavlju također su prikazani najvažniji podaci za analize uzroka klizanja u razdoblju od 1963. do 1988. godine (iz Ortolan, 1996), a koji se odnose na količine oborina i rudarske aktivnosti (količine iskopa lapora od početka rada tvornice 1907. godine i masovna miniranja od 1961. godine). Na osnovi rezultata ovih analiza Ortolan (1996) navodi sljedeće zaključke koji se odnose na uzroke klizanja:

- nije jasno vidljiv utjecaj oborina na brzinu klizanja;
- masovna miniranja u kopu lapora vremenski se poklapaju s početkom klizanja, ali to ne znači da su masovna miniranja inicirala klizanje;
- iskop tunela, odnosno dreniranje podzemnih voda kroz tunnelsku cijev, nije usporilo pomake, jer je po njegoj izgradnji povećan intenzitet eksploatacije;
- od početka klizanja u veljači 1963. godine do konačnog zatvaranja tvornice 1988. godine veličina pomaka klizišta podudara se s količinama iskopa.

Na temelju detaljne analize brzina pomaka i količina iskopa za razdoblje od 1963. do 1988. godine, Ortolan (1996) daje raspone srednjih brzina horizontalnih pomaka, od minimalno 0,025 m/god za razdoblje od 1980. do 1985. godine do maksimalno 0,44 m/god za razdoblje od 1973. do 1976. godine. Usporavanje pomaka u pojedinim razdobljima također se objašnjava i odlaganjem određenih količina jalovine u području stope klizišta. Izuzetak predstavlja razdoblje pojačanih brzina pomaka od 1985. do 1988. godine, koje nisu u korelaciji s količinama iskopa ili odlaganja jalovine, a za koje Ortolan (1996) smatra da je uzrok povećanje pornih tlakova uslijed spriječenog istjecanja podzemne vode u zonama

deponiranih materijala u podnožju pokosa iskopa na istočnoj strani kopa. Ortolan (1996) također smatra da se zone deponiranja nalaze ispod razine podzemne vode.

Ortolan (1996) prikazuje i analizu zavisnosti vertikalnog pomaka repera 1, postavljenog na sjeverozapadnom rubu radionice u području stope klizišta o klimatskim faktorima (mjesečne oborine, srednja mjesečna temperatura zraka, maksimalna dnevna visina snježnog pokrivača sa zapreminskim težinama snijega) s meteorološke postaje Podsused u razdoblju od 1961. do 1970. godine. Podaci mjerenja vertikalnog pomaka iz razdoblja od 1965. do 1969. godine ekstrapolirani su za cijelo razdoblje analize. Također su analizirani i vertikalni pomaci istog repera ovisno o komponentama analizirane hidrološke bilance (površinsko otjecanje i sadržaj vode u tlu) i ekvivalentnim sumarnim protocima na izvorima, za razdoblje od sredine 1966. do kraja 1970. godine. U Ortolan (1996) se navodi da se rezultati ovih analiza smatraju reprezentativnim za kretanje klizišta po najdubljoj kliznoj plohi u nožici klizišta te zaključuje sljedeće:

- brzina klizišta i količina mjesečnih oborina su obrnuto proporcionalne (klizište miruje ili se kreće vrlo malim brzinama u mjesecima s najvećom mjesečnom oborinom; i brzine klizišta su najveće u mjesecima s najmanjim mjesečnim oborinama);
- intenzitet pomaka se povećava u razdobljima od zime do proljeća, tj. od studenog do svibnja;
- s obzirom da je u promatranom razdoblju količina iskopa bila konstantna, kao uzrok povećanja brzine pomaka navodi se povećanje vlažnosti zbog topljenja snježnog pokrivača i povećanje razine podzemne vode zbog oborina.

Ortolan (1996) prikazuje i rezultate analiza zavisnosti brzine prostornih pomaka klizišta po najdubljoj kliznoj plohi (KP1) u razdoblju od srpnja 1988. do listopada 1995. godine (mjerene na reperima u tunelu i na jednoj stabiliziranoj geodetskoj točki kao što je opisano u prethodnom poglavlju), u odnosu na površinsko otjecanje i sadržaj vode u tlu. Na temelju ovih analiza doneseni su sljedeći zaključci:

- utjecaj sezonskih promjena vlažnosti tla vidljiv je već od 1989. godine;
- mjerenja pomaka u tunelu i pomaka na stabiliziranoj geodetskoj točki razlikuju se samo za približno 10%, čime se potvrđuje kretanje po istoj kliznoj plohi;
- smanjenje brzine kretanja interpretira se kao postupno smirivanje pomaka klizišta;
- očekivano kretanje klizišta po najdubljoj kliznoj plohi nije se zaustavilo s dosegnutim pomakom od maksimalno 15 cm po prestanku eksploatacije;
- maksimalne veličine pomaka od 15 cm uslijed sezonskih utjecaja premašene su, jer su izmjereni pomaci od 26 cm;
- kao uzroci povećanja pomaka u razdoblju 1991. do 1996. godine navodi se nasipavanje na divljoj deponiji na Vodopijinu bregu i zatrpavanje arteškog izvora istočno od hale za sirovinu.

3.3.5. Analize pomaka, analize stabilnosti i projekti sanacije na području tvornice cementa „Sloboda“ u razdoblju od 1965. do 2008. godine

Izvještaji i projekti u kojima su uglavnom sadržane interpretacije postojećih podataka iz prethodno navedenih elaborata odnose se na: (1) analize pomaka na području klizišta (Nonveiller, 1976; Pust, 1977); (2) projekte sanacije lokalnih nestabilnosti (Roboz i Zambelli, 1965; Ortolan i Stanić, 1985); (3) sanacije pojedinih objekata na klizištu (Brundić, 1969; Nikolić i dr., 1977); te na (3) interpretacija modela klizišta klizišta Kostanjek (Ortolan i dr., 1989; Stanić, 1999; Stanić, 2006; Ortolan, 2008).

U elaboratu Ortolan i dr. (1989) daje se prijedlog sanacije klizišta dreniranjem podzemnih voda. Dreniranje podzemnih voda obavljalo bi se drenažnom galerijom pružanja istok-zapad iz koje su bušeni drenovi u smjeru sjevera. Ulaz u drenažnu galeriju bi bio iz postojećeg tunela za transport sirovine, a sama galerija bi bila postavljena u zaleđu, sjeverno od klizišta. Drenažom bi bilo osobito važno obuhvatiti zone rasjeda kao glavnih sustava kojima teku podzemne vode. Procijenjeno je da bi količina drenirane vode iznosila od 30 do 50 l/s. U nožičnom dijelu klizišta reduciranje pornih tlakova postiglo bi se bušenjem drenažnih bunara radi smanjena arteškog tlaka u naslagama izgrađenim od badenskih vapnenaca, za koje se pretpostavlja da se nalaze na dubini od 120 do 150 m. Procijenjeno je da bi količina vode drenirana bunarima iznosila oko 30 l/s. Ortolan i dr. (1989) također predlažu stabilizaciju lokalne nestabilnosti otvorenog kopa lapora promjenom geometrije kosine te eventualnom izgradnjom građevina koje bi se oslanjale na pokos i na taj ga način stabilizirale.

Stanić (1999) također predlaže mjere sanacije, odnosno stabilizacije klizišta Kostanjek. Mjere stabilizacije klizišta sastojale bi se od preraspodjele masa i promjene režima podzemnih voda. Preraspodjela masa uključivala bi nasipavanje najmanje $3,45 \times 10^6 \text{ m}^3$ materijala u nožici klizišta, odnosno na području otvorenog kopa lapora. S preraspodjelom masa potrebno je kombinirati i promjenu režima podzemnih voda i to: (1) aktivnim dreniranjem horizontalno bušenim drenovima u području otvorenog kopa lapora i projektiranog nasipa radi povećanja sigurnosti od plićih klizanja; i (2) preventivnim dreniranjem drenažnim galerijama u podzemlju zaleđa, sjeverno od klizišta Kostanjek.

4. METODE ISTRAŽIVANJA

Interpretacija obrazaca gibanja te uzroka klizanja na klizištu Kostanjek temelji se na podacima izmjerenim integriranim sustavom praćenja uspostavljenim u okviru znanstvenog hrvatsko-japanskog SATREPS FY2008 projekta (Krkač i dr., 2014b). Mjerni uređaji „Opservatorija za praćenja klizišta Kostanjek“, čiji podaci su korišteni pri istraživanju, opisani su u prvom dijelu ovog poglavlja. U drugom dijelu poglavlja opisane su statističke metode koje su korištene u analizama izmjerenih podataka, odnosno pri uspostavljanju fenomenološkog modela klizišta Kostanjek.

4.1. Sustav praćenja klizišta Kostanjek

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 RGN fakultetu. Proces projektiranja sustava uključivao je definiranje preliminarnih zahtjeva za parametrima mjerenja i razmatranje mogućnosti instalacije određenog tipa senzora s obzirom na: (1) povijesne podatke o pomacima klizišta; (2) tehničke mogućnosti napajanja senzora i prijenosa podataka; (3) konfiguraciju terena i vegetacijski pokrov zbog dobivanja kvalitetnog GNSS signala (otvorenost GNSS antena prema nebu); te (4) namjenu korištenja zemljišta i dozvole za instalacije senzora. Senzorske mreže instalirane na klizištu Kostanjek obuhvaćaju više od 40 pojedinačnih senzora, instaliranih na površini terena i u bušotinama, na ukupno 24 lokacije. Prostorni raspored pojedinih uređaja prikazan je na slici 4.1.

4.1.1. Gibanje klizišta

Senzori za mjerenje pomaka, deformacija i aktivnosti na klizištu Kostanjek, odabrani su na način da osiguravaju pouzdano, automatizirano i kontinuirano prikupljanje podataka u realnom vremenu. Mjerenje pomaka na površini provodi se pomoću mreže permanentnih GNSS stanica i mreže žičanih ekstenzometara raspoređenih u različitim dijelovima klizišta. Mjerenje pomaka u podzemlju provodi se pomoću jednog inklinometra i četiri vertikalna žičana ekstenzometra smještena na istoj lokaciju u središnjem dijelu klizišta. Aktivnost klizišta mjeri se mrežom akcelerometara instaliranih u bušotinama u različitim dijelovima klizišta (Krkač i dr., 2014d).

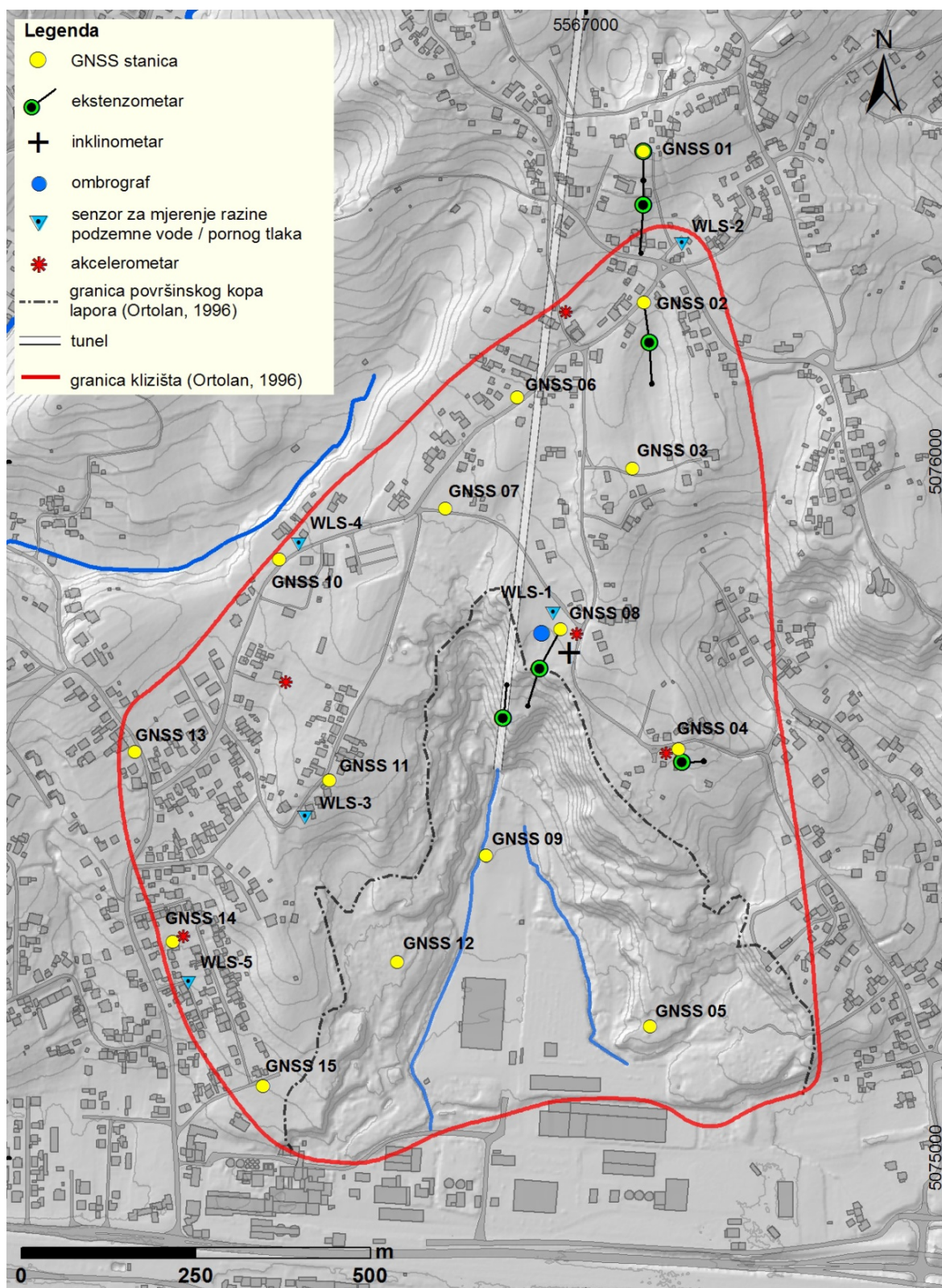
U ovom istraživanju za analize podataka o gibanju klizišta korišteni su rezultati opažanja svih permanentnih GNSS stanica, a također su prikazani i rezultati inklinometarskih mjerenja, važni za utvrđivanje dubine do klizne plohe u središnjem dijelu klizišta. Inklinometarska mjerenja predstavljaju izuzetak u sustavu praćenja klizišta Kostanjek jer ne omogućavaju kontinuirano prikupljanje podataka.

4.1.1.1. GNSS

GNSS predstavlja sustav satelita i zemaljskih stanica koji služi za precizno pozicioniranje na površini Zemlje. Sateliti kruže oko Zemlje dva puta dnevno po vrlo precizno određenim orbitama i kontinuirano odašilju signale s informacijom o vremenu odašiljanja signala i o svojoj poziciji u trenutku odašiljanja signala. Zemaljske stanice koje se sastoje od antena i prijemnika primaju satelitske signale te na temelju razlike u vremenu odašiljanja i primanja signala određuju udaljenost satelita. Na temelju određenih udaljenosti između antena i minimalno četiri satelita te položaja tih satelita prijemnici precizno računaju poziciju na Zemlji. GNSS prijemnici koriste signale GPS (eng. *Global Positioning System*) i GLONASS (rus. *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) satelita. GNSS sustav funkcionira kontinuirano 24 sata dnevno u svim vremenskim uvjetima te ne zahtijeva optičku vidljivost između mjernih senzora (Ghiliani i Wolf, 2012).

Mreža permanentnih GNSS stanica tvrtke Trimble, uspostavljena na području klizišta Kostanjek, sastoji se od 15 dvofrekventnih prijemnika tipa NetR9 TI-2 GNSS sa Zephyr Geodetic 2 GNSS antenama. GNSS antene postavljene su na četiri metra visoke stupove koji su pričvršćeni na armirano-betonske temelje ukopane jedan metar u tlo. GNSS prijemnici prikupljaju neobrađene podatke o položaju GNSS antena i šalju ih bežičnom vezom u realnom vremenu u centar podataka na RGN fakultetu. GNSS prijemnici, prema specifikacijama proizvođača (Trimble, 2010), prikupljaju podatke o apsolutnim položajima GNSS antena s preciznošću od $3 \text{ mm} + 0.1 \text{ ppm RMS}$ (eng. *Root Mean Square*) u horizontalnoj ravnini i $4 \text{ mm} + 0.4 \text{ ppm RMS}$ u vertikali. Sve mjerne stanice na kojima se nalaze GNSS prijemnici i ruteri za prijenos podataka napajaju se električnom energijom iz javne mreže. Jedna od 15 permanentnih GNSS stanica postavljena na klizištu Kostanjek prikazana je na slici 4.2.

Na RGN fakultetu se nalazi server na kojemu se pohranjuju podaci i na kojemu je instalirana aplikacija za obradu podataka Trimble 4D Control (T4DC). Ovaj program se sastoji od tri komponente: (1) T4D Control Server koji služi za prikupljanje, obradu i pohranjivanje podataka opažanja; (2) T4D Control Desktop koji služi za definiranje projekata i konfiguriranje senzora; i (3) T4D Control Web koji služi za prikaz podataka i njihovu analizu preko web sučelja (Karahayit, 2013). T4D Control Server je najvažniji dio T4DC softvera u kojemu je moguće definirati i granične (tj. kritične) vrijednosti pomaka koje se mogu koristiti i u sustavu ranog upozoravanja, definirati jednu ili više referentnih stanica te definirati različite vrste podataka koji se mjere (podaci u realnom vremenu i postprocesirani podaci za različite vremenske intervale). Vrste podataka koji se dobivaju mjerenjem pomaka na klizištu Kostanjek 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 posljednja 2 sata; (4) postprocesirani podaci za razdoblje od jednog sata; (5) te postprocesirani podaci za razdoblje od 24 sata.



Slika 4.1. Raspored senzora i senzorskih mreža integriranog „Opservatorija za praćenja klizišta Kostanjek“.

Lokacije GNSS stanica (slika 4.1) određene su u odnosu na dijelove klizišta na sljedeći način. Jedna GNSS stanica (GNSS 01) postavljena je iznad čela klizišta (sjeverno od klizišta), kako bi se potvrdila pretpostavka da je ova pozicija izvan granica klizišta. Četiri GNSS stanice (GNSS 04, 07, 08 i 11) smještene su iznad vrha napuštenih otkopnih fronti nekadašnjeg otvorenog kopa lapora, a tri GNSS stanice (GNSS 05, 09 i 12) se nalaze u području napuštenog kopa lapora. Pet GNSS stanica (GNSS 06, 10, 13, 14 i 15) postavljeno je duž zapadne i sjeverozapadne granice klizišta, a dvije GNSS stanice (GNSS 02 i 03) su u sjeveroistočnom dijelu klizišta. U GNSS mreži nužna je najmanje jedna referentna GNSS stanica, koja predstavlja referentnu nepomičnu točku za lokalnu mrežu stanica i koja omogućava vrlo precizno određivanje položaja preostalih GNSS stanica u lokalnoj mreži. Položaj referentne GNSS stanice mora biti izvan granica klizišta. U tu su svrhu u T4D Control Serveru definirane tri opcije: (1) referentnu stanicu predstavlja permanentna stanica GNSS 01 smještena sjeverno izvan granica klizišta; (2) referentnu stanicu predstavlja permanentna GNSS stanica u Gornjem Stupniku, koja je udaljena od klizišta Kostanjek približno 7,2 km u smjeru juga i koja za T4D Control Server predstavlja 16-tu GNSS stanicu; te (3) referentne stanice predstavljaju obje prethodno navedene permanentne GNSS stanice (GNSS 01 i 16).



Slika 4.2. Jedna od 15 permanentnih GNSS stanica „Opservatorija za praćenja klizišta Kostanjek“. GNSS antena je smještena na pocinčanom stupu visokom četiri metra, temeljenog s arminirano-betonskim temeljem dubine jedan metar. GNSS prijemnik, uređaji za bežični prijenos podataka i uređaji za napajanje električno energijom smješteni su u ormarićima.

4.1.1.2. Inklinometarska mjerenja

U proljeće 2012. godine u središnjem dijelu klizišta izvedena je bušotina dubine 100 metara s kontinuiranim jezgrovanjem, detaljno opisana u Benković (2013). Svrha bušenja bila je ugradnja inklinometarske cijevi, određivanje geološke građe terena i materijala koji se nalaze u tijelu klizišta i ispod klizne plohe te uzimanje uzoraka tla i stijenske mase za ispitivanje fizičkih i mehaničkih svojstava te za mineraloške (Martinčević i dr., 2014) i paleontološke analize. U ovu bušotinu je 16.3.2012. ugrađena vertikalna inklinometarska cijev duljine 100 metara za mjerenja pokretnim inklinometrom. Inklinometar je uređaj za mjerenje deformacije okomite na os inklinometarske cijevi, čijim se mjerenjem u vertikalnoj inklinometarskoj cijevi omogućava uvid u profil horizontalnih deformacija u podzemlju, a samim time i položaj i debljina klizne plohe. (Stark i Choi, 2008). Inklinometarska cijev ugrađena na klizištu Kostanjek je promjera 70 mm, a ugrađena je u bušotinu cijelom duljinom tako da je prostor između stijenki bušotine i inklinometarske cijevi ispunjen injekcijskom cementnom smjesom s dodatkom bentonita. Prema Stark i Choi (2008) ugradnja inklinometarskih cijevi i interpretacija rezultata inklinometarskih mjerenja moraju zadovoljiti slijedeće uvjete da bi mjerenja i izračunati pomaci u odnosu na nulto mjerenje bili valjani: (1) dno inklinometarske cijevi mora se nalaziti ispod klizne plohe u nepokrenutom materijalu; (2) za sva mjerenja je potrebno koristiti istu inklinometarsku sondu i isti električni kabel. Na klizištu Kostanjek zadovoljena su oba uvjeta.

Nulto mjerenje inklinometrom obavljeno je 4.4.2012., dok su tri dodatna mjerenja izvedena 15.5.2012., 7.2.2013. te 19.3.2013. Pri mjerenjima korišten je inklinometar proizvođača Slope Indicator, a mjerenja horizontalne deformacije obavljena su cijelom duljinom inklinometarske cijevi, na svakih 0,5 m dubine. Preciznost korištenog inklinometra iznosi ± 6 mm na 25 m duljine inklinometarske cijevi (Slope Indicator, 2005).

4.1.2. Uzroci klizanja

Senzori za mjerenje hidrogeoloških uvjeta na klizištu Kostanjek obuhvaćaju senzore za mjerenje površnog tlaka i senzore za mjerenje razine podzemne vode koji su postavljeni na različitim lokacijama i u različitim objektima (bušotine, preljevi i kopani zdenci). Općenita svrha mjerenja ovim senzorima na klizištu Kostanjek je praćenje razina podzemne vode te uspostavljanje korelacije s oborinama i s gibanjem klizišta.

Senzor za mjerenje razine podzemne vode mjerenjem hidrostatskih tlakova tipa DS-1 (na slici 4.1 označen kao WLS-1) proizvođača Osasi Technos Inc, instaliran je na glavnoj mjernoj postaji u istoj bušotini (B-2) u kojoj je instaliran i akcelerometar. Senzor je postavljen na dubini od 40 metara, zacjevljenje bušotine perforirano je na dubini od 26 do 36 m, a šljunčani zasip između stijenske bušotine i zacjevljenja se nalazi od površine terena do dubine od 36 m. Tako postavljeni senzor mjeri prosječnu razinu podzemne vode paketa naslaga od površine do dubine od 36 m. Senzor je na površini povezan s uređajem za bilježenje podataka tipa NetLG-001E (Osasi Technos Inc). Mjerenja se provode svakih sat vremena, a podaci se internetom prenose na server RGN fakulteta. Uređaj za bilježenje podataka napaja

se električnom energijom iz baterije. Senzori istog tipa (DS-1) s uređajima za bilježenje podataka (NetLG-001E) postavljeni su i u postojeće kopane zdence na još dvije lokacije. Jedna lokacija se nalazi na platou iznad zapadnog pokosa zasjeka otvorenog kopa lapora u ulici Vodopijin breg (WLS-3), a druga u području glavne vlačne pukotine u ulici Bizek II (WLS-2). Zdenac u ulici Vodopijin breg dubok je 23,7 m, a nalazi se približno 65 m južnije od stanice GNSS 11. Zdenac u ulici Bizek II dubok je 10,9 m.

Senzori za mjerenje hidrostatskih tlakova tipa The Rugged TROLL 100 (In-Situ Inc.) postavljeni su u kopanim zdencima u ulici Skoki (WLS-5) uz zapadnu granicu klizišta i u ulici Bukošćak (WLS-4) uz sjeverozapadnu granicu klizišta. Zdenac u ulici Skoki dubok je 5,63 m, a nalazi se približno 70 m južnije od stanice GNSS 14. Zdenac u ulici Bukošćak dubok je 10,94 m, a nalazi se oko 30 m zapadno od stanice GNSS 10. Voda iz ovih zdenaca se ne koristi ili se koristi vrlo rijetko tako da razina podzemne vode u zdencima nije značajno narušena. Svrha mjerenja je određivanje razine podzemne vode u površinskom vodonosniku. Senzori se napajaju električnom energijom iz baterija, a mjerenja se provode svakih sat vremena. Podaci o razinama podzemne vode povremeno se preuzimaju s uređaja za bilježenje podataka.

Intenzitet i količina kiše opaža se ombrografom instaliranim u središnjem dijelu klizišta, odnosno na središnjoj mjernoj postaji. Ombrograf s posudama za prevrtanje (eng. *tipping bucket*) tipa NetLG-201E proizvođača Osasi Technos Inc. može mjeriti količinu kiše s preciznošću od 0,5 mm. Ovaj senzor omogućava kontinuirano mjerenje količine kiše i automatizirani prijenos podataka u realnom vremenu na RGN fakultet. Osim ovih podataka, za potrebe istraživanja klizišta Kostanjek, korišteni su i podaci o oborinama s meteorološke postaje Zagreb-Grič za razdoblje od početka mjerenja 1862. do siječnja 2015. godine.

4.2. Metode analiza podataka praćenja klizišta Kostanjek

Statističke metode korištene u ovom radu obuhvaćaju analizu točke promjene (eng. *change point analysis*), višestruku linearnu regresiju, metodu slučajnih šuma (eng. *random forest*) te unakrsnu validaciju (eng. *cross-validation*). Analiza točaka promjene korištena je pri određivanju statistički značajnih razdoblja bržeg gibanja, dok su višestruka linearna regresija i metoda slučajnih šuma korištene za određivanje odnosa između oborina i razina podzemne vode te razina podzemne vode i gibanja klizišta, odnosno predviđanje razina podzemne vode i gibanja klizišta. Analizom unakrsne validacije međusobno su uspoređivani statistički modeli višestruke linearne regresije i slučajnih šuma. Sve statističke analize obavljene su u slobodno dostupnom programu R (<http://www.r-project.org/>), verzija 3.1.2, koji se koristi za statističke analize te grafički prikaz podataka.

4.2.1. Analiza točke promjene

Analiza točke promjene predstavlja proces određivanja promjene u distribuciji unutar vremenskih nizova podataka (James i Matteson, 2013). Analiza promjene distribucije provedena je na dnevnim podacima o brzini klizanja, odnosno na njihovim 7-dnevnim pomičnim prosjecima. Pomični prosjeci brzina za razdoblje od sedam dana predstavljaju srednju vrijednost brzine tijekom sedam dana, odnosno srednju vrijednost brzine za određeni dan mjerenja te tri dana prije i tri dana nakon dana mjerenja. Analiza točaka promjene provedena je u R programu, korištenjem paketa *ecp*, verzija 1.6.0, kojega su razvili James i Matteson (2013), a koji se temelji na radu Matteson i James (2013). Navedenim paketom se neparametarski određuju točke promjene distribucije na jednom ili više nizova podataka, a njegove teorijske osnove prikazane su u nastavku teksta.

Neka ϕ_x i ϕ_y predstavljaju karakteristične funkcije nezavisnih slučajnih vektora X i Y ($X, Y \in \mathbb{R}^d$). Prema Matteson i James (2013) mjera divergencije između distribucija dvaju slučajnih vektora X i Y iznosi:

$$\int_{\mathbb{R}^d} |\phi_x(t) - \phi_y(t)|^2 w(t) dt \quad (4)$$

gdje $w(t)$ predstavlja pozitivnu težinsku funkciju. Székely i Rizzo (2005) predlažu korištenje slijedeće težinske funkcije:

$$w(t; \alpha) = \left(\frac{2\pi^{d/2}\Gamma(1-\alpha/2)}{\alpha 2^\alpha \Gamma((d+\alpha)/2)} |t|^{d+\alpha} \right)^{-1} \quad (5)$$

gdje je α konstanta s vrijednostima između 0 i 2, odnosno $\alpha \in (0, 2)$, a Γ specijalna funkcija tzv. gama funkcija (Abramowitz i Stegun, 1965). Pod pretpostavkom $E|X|^\alpha$, $E|X|^\alpha < \infty$, prema Matteson i James (2013) divergencija se može izraziti :

$$D(X, Y; \alpha) = \int_{\mathbb{R}^d} |\phi_x(t) - \phi_y(t)|^2 \left(\frac{2\pi^{d/2}\Gamma(1-\alpha/2)}{\alpha 2^\alpha \Gamma((d+\alpha)/2)} |t|^{d+\alpha} \right)^{-1} dt \quad (6)$$

Kako za proizvoljne distribucije integral (6) može biti vrlo netrivialan za izračun, Székely i Rizzo (2005) predložili su alternativnu mjeru divergencije:

$$\mathcal{E}(X, Y; \alpha) = 2E|X - Y|^\alpha - E|X - X'|^\alpha - E|Y - Y'|^\alpha \quad (7)$$

pri čemu su X' i Y' nezavisne kopije od X i Y , što znači da imaju istu distribuciju, ali vrijednost koju će poprimiti X' ne ovisi o vrijednosti X , a analogno vrijedi i za Y' i Y . Prema *lemi 1* iz Matteson i James (2013) mjera divergencije $\mathcal{E}(X, Y; \alpha)$ poprima vrijednosti od 0 do ∞ , odnosno $\mathcal{E}(X, Y; \alpha) \in [0, \infty)$, a u slučaju kada su varijable X i Y jednako distribuirane, mjera divergencije je jednaka 0, odnosno $\mathcal{E}(X, Y; \alpha) = 0$. Dokaz za *lemu 1* je prikazan u radu Székely i Rizzo (2005).

Odnos uspostavljen *lemom 1* iz Matteson i James (2013) motivira jednostavno određivanje divergencije koje se temelji na U-statistici. Neka su X_n ($X_n = \{X_i : i=1, \dots, n\}$) i Y_m ($Y_m = \{Y_j : j=1, \dots, m\}$) nezavisni i jednako distribuirani uzorci iz distribucija $X, Y \in \mathbb{R}^d$, takvi da je $E|X|^\alpha, E|X|^\alpha < \infty$, za neki $\alpha \in (0, 2)$. U tom slučaju empirijska mjera divergencije analogna jednadžbi (7) se može definirati kao:

$$\widehat{\mathcal{E}}(X_n, Y_m; \alpha) = \frac{2}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |X_i - Y_j|^\alpha - \binom{n}{2}^{-1} \sum_{1 \leq i < k \leq n} |X_i - X_k|^\alpha - \binom{m}{2}^{-1} \sum_{1 \leq j < k \leq m} |Y_j - Y_k|^\alpha \quad (8)$$

Uz prethodno navedene pretpostavke slijedi da $\widehat{\mathcal{E}}(X_n, Y_m; \alpha)$ teži u $\mathcal{E}(X, Y; \alpha)$, odnosno $\widehat{\mathcal{E}}(X_n, Y_m; \alpha) \rightarrow \mathcal{E}(X, Y; \alpha)$, kad se broj mjerenja povećava, odnosno kad broj mjerenja teži u beskonačnost ($m \wedge n := \min\{m, n\} \rightarrow \infty$). Pod nul hipotezom, odnosno pretpostavkom jednakih distribucija ($\mathcal{E}(X, Y; \alpha) = 0$), normalizirana vrijednost empirijske mjere (8), $\widehat{\mathcal{Q}}(X_n, Y_m; \alpha) := \frac{mn}{m+n} \widehat{\mathcal{E}}(X_n, Y_m; \alpha)$, konvergira po distribuciji u nede degeneriranu slučajnu varijablu kada $m \wedge n \rightarrow \infty$. U slučaju alternativne hipoteze nejednakih distribucija ($\mathcal{E}(X, Y; \alpha) > 0$), $\widehat{\mathcal{Q}}(X_n, Y_m; \alpha)$ teži u beskonačnost, gotovo sigurno kada $m \wedge n \rightarrow \infty$.

Neka $Z_1, \dots, Z_T$ predstavlja niz opažanja, primjerice GNSS prijemnika, i neka su $1 \leq \tau < \kappa \leq T$ konstante. Označimo li s $X_\tau = \{Z_1, \dots, Z_\tau\}$ te s $Y_\tau(\kappa) = \{Z_{\tau+1}, Z_{\tau+2}, \dots, Z_\kappa\}$, pozicija točke promjene u distribuciji $\hat{\tau}$ predstavlja argument maksimum od $\widehat{\mathcal{Q}}(X_n, Y_m; \alpha)$:

$$(\hat{\tau}, \hat{\kappa}) = \operatorname{argmax} \widehat{\mathcal{Q}}(X_\tau, Y_\tau(\kappa); \alpha) \quad (9)$$

odnosno točku koja daje maksimalnu razliku u distribucijama između X_τ i $Y_\tau(\kappa)$. Za određivanje višestrukih točaka promjene opisana procedura se iterativno primjenjuje kako je opisano u nastavku. Uz pretpostavku da postoji $k-1$ točaka promjena na pozicijama $0 < \hat{\tau}_1 < \dots < \hat{\tau}_{k-1} < T$, čime je cijeli niz podijeljen na k klastera ($\hat{C}_1, \hat{C}_2, \dots, \hat{C}_k$), opisana procedura primjenjuje se pojedinačno na svaki klaster $\hat{C}_i$. Na temelju određenih točaka promjene za svaki klaster određuje se nova točka promjene za cijeli niz kao argument maksimum, odnosno kao ona točka promjene iz određenog klastera koja daje najveću razliku u distribucijama unutar svih klastera:

$$i^* = \operatorname{argmax} \widehat{\mathcal{Q}}(X_{\hat{\tau}(i)}, Y_{\hat{\tau}(i)}(\hat{\kappa}(i)); \alpha) \quad (10)$$

gdje su $X_{\hat{\tau}(i)}$ i $Y_{\hat{\tau}(i)}(\hat{\kappa}(i))$ definirani u odnosu na klaster $\hat{C}_i$. Vrijednost testne statistike u kojoj $\hat{\tau}_k = \hat{\tau}(i^*)$ označava k -tu točku promjene, a $\hat{\kappa}_k = \hat{\kappa}(i)$ odgovarajuću konstantu unutar klastera $\hat{C}_i$, iznosi:

$$\hat{q}_k = \widehat{\mathcal{Q}}(X_{\hat{\tau}_k}, Y_{\hat{\tau}_k}(\hat{\kappa}_k); \alpha). \quad (11)$$

Velike vrijednosti testne statistike ($\hat{q}_k$) ukazuju na potencijalnu promjenu distribucije unutar odgovarajućeg klastera. Da bi bilo moguće odrediti kritičnu vrijednost za $\hat{q}_k$, odnosno onu koja daje značajnu razliku u distribuciji, potrebno je poznavanje distribucije niza mjerenja, što obično nije slučaj. Iz tog razloga Matteson i James (2013) predlažu permutacijski test da bi se odredila statistička značajnost od $\hat{q}_k$. Procedura je takva da se mjerenja unutar svakog klastera permutiraju pri čemu nastaje novi niz mjerenja te se na permutiranom nizu ponovno određuju točke promjene. Ovaj postupak se ponavlja r puta, nakon kojeg se svaki puta bilježi vrijednost procjenitelja $\hat{q}_k^{(r)}$. Ukoliko se obave sve moguće permutacije, p-vrijednost (statistička značajnost) vrijednosti procjenitelja poprimiti će točnu vrijednost. Budući da to nije moguće, određuje se aproksimativna p-vrijednost na temelju r slučajnih permutacija. Zadana statistička značajnost vrijednosti procjenitelja može iznositi od 0 do 1, $p_0 \in [0,1)$. Ukoliko je p-vrijednost procjenitelja određene točke promjene manja od zadane statističke značajnosti p_0 , onda je točka promjene statistički značajna. Statistički značajna točka promjene određuje se tako da se vrijednosti testne statistike točaka promjene dobivenih iz r slučajnih permutacija određenog klastera poredaju po veličini od najveće do najmanje. Ukoliko se vrijednosti testne statistike q_k točke promjene nepermutiranog klastera nalazi unutar vrijednosti koje odgovaraju zadanoj statističkoj značajnosti onda je i točka promjene statistički značajna. Primjerice ako je zadana statistička značajnost od 5% ($p_0=0.05$), a vrijednost testne statistike q_k točke promjene se nalazi unutar 5% najvećih vrijednosti testne statistike iz r nasumično permutiranih klastera, onda je točka promjene statistički značajna.

4.2.2. Višestruka linearna regresija

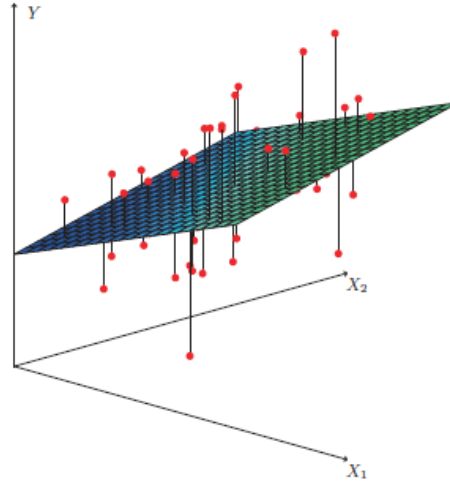
Teorijske osnove višestruke linearne regresije preuzete su iz Šošić i Serdar (1992). Općenito se može reći da vrijednosti zavisne varijable u modelu višestruke linearne regresije, predstavljaju linearnu kombinaciju nepoznatih parametara, vrijednosti K nezavisnih varijabli te nepoznatih vrijednosti varijable u . Prema tome, općeniti model višestruke linearne regresije glasi:

$$y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_iX_i + b_KX_K + u \quad (12)$$

gdje X_i predstavlja vrijednost i -te nezavisne varijable, b_i nepoznati parametar, a u nepoznatu varijablu. Varijabla u izražava odstupanja od funkcionalnog odnosa. Njezina je prisutnost uvjetovana nedeterminističkom prirodom odnosa između pojava (Šošić i Serdar, 1992). Pretpostavlja se da je za svaku varijablu na raspolaganju n vrijednosti, pa se model (12) zapisuje u obliku n linearnih jednadžbi:

$$y_i = a + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_jx_{ij} + b_Kx_{iK} + u_i. \quad (13)$$

Statističkom analizom modela višestruke linearne regresije potrebno je ocijeniti nepoznate parametre, odrediti mjere disperzije te ispitati kvalitetu modela (Šošić i Serdar, 1992). Prvi korak u analizi predstavlja određivanje nepoznatih parametara i to obično korištenjem metode najmanjih kvadrata (eng. *least squares method*). Geometrijski promatrano, problem ocjene parametara svodi se na traženje jednadžbe hiperravnine, koja se u smislu metode najmanjih kvadrata, najbolje prilagođava skupu n vrijednosti u prostoru dimenzija $(K + 1)$, što je prikazano na slici 4.3 Na slici je vidljivo da se odstupanja od modela mjere usporedno s osi Y .



Slika 4.3. Model višestruke linearne regresije s dva prediktora (James i dr., 2014).

Da bi se primijenila metoda najmanjih kvadrata potrebno je odrediti rezidualna odstupanja što predstavlja razlike između stvarnih vrijednosti i vrijednosti regresijske funkcije:

$$u_i = y_i - \hat{y}_i \quad (14)$$

S obzirom na jednadžbu (14), zbroj kvadrata rezidualnih odstupanja iznosi:

$$SQ = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{a} - \hat{b}_1 x_{i1} - \hat{b}_2 x_{i2} - \dots - \hat{b}_j x_{ij} - \hat{b}_K x_{iK})^2. \quad (15)$$

Budući da su u izrazu (15) poznate vrijednosti zavisne varijable y_i i vrijednosti nezavisnih varijabli x_{ij} , zbroj kvadrata rezidualnih odstupanja ovisi o parametrima $\hat{a}$ i $\hat{b}_j, j = 1, 2, \dots, K$. Da bi se ocijenili parametri $\hat{a}$ i $\hat{b}$ na temelju principa najmanjih kvadrata, potrebno je potražiti minimum funkcije (15). Ako se prve parcijalne derivacije po nepoznatim parametrima izjednače s nulom:

$$\frac{\partial SQ}{\partial \hat{a}} = \frac{\partial SQ}{\partial \hat{b}_1} = \dots = \frac{\partial SQ}{\partial \hat{b}_K} = 0, \quad (16)$$

dobiti će se sustav od $K + 1$ jednadžbi (Šošić i Serdar, 1992), a koje se pojednostavljeno mogu riješiti sustavom jednadžbi:

$$\begin{aligned} \hat{a}n + \hat{b}_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \hat{b}_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \dots + \hat{b}_K \sum_{i=1}^n x_{iK} &= \sum_{i=1}^n y_i \\ \hat{a} \sum_{i=1}^n x_{i1} + \hat{b}_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + \hat{b}_2 \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} + \dots + \hat{b}_K \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{iK} &= \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\ \dots &\dots \\ \hat{a} \sum_{i=1}^n x_{iK} + \hat{b}_1 \sum_{i=1}^n x_{iK}x_{i1} + \hat{b}_2 \sum_{i=1}^n x_{iK}x_{i2} + \dots + \hat{b}_K \sum_{i=1}^n x_{iK}^2 &= \sum_{i=1}^n x_{iK}y_i. \end{aligned} \quad (17)$$

Rješenjem sustava jednadžbi (17) određuju se nepoznati parametri $\hat{b}_j$, $j = 1, 2, \dots, K$. Broj jednadžbi smanjuje se za jedan ako se umjesto originalnih vrijednosti varijabli primjene njihove centrirane vrijednosti (Šošić i Serdar, 1992). Centriraju se vrijednosti zavisne i nezavisnih varijabli, a centriranje se provodi jednadžbama:

$$y'_i = y_i - \bar{y}, \quad x'_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_j; \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, K. \quad (18)$$

Budući da model s centriranim vrijednostima nema parametra a , konstantni član se izračunava pomoću regresijskih koeficijenata $\hat{b}$ i aritmetičkih sredina varijabli:

$$\hat{a} = y - \hat{b}_1 \bar{x}_1 - \hat{b}_2 \bar{x}_2 - \dots - \hat{b}_j \bar{x}_j - \dots - \hat{b}_K \bar{x}_K. \quad (19)$$

Konačan oblik jednadžbe višestruke linearne regresije s procijenjenim parametrima označen je:

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b}_1 x_1 + \hat{b}_2 x_2 + \dots + \hat{b}_j x_j + \dots + \hat{b}_K x_K. \quad (20)$$

Konstantni član $\hat{a}$ predstavlja vrijednost regresijske funkcije kada su sve nezavisne varijable jednake nuli. Ocjene parametara $\hat{b}_j$, $j = 1, 2, \dots, K$ su regresijski koeficijenti. Regresijski koeficijent predstavlja prosječan utjecaj jedinične promjene nezavisne varijable x_j na varijablu y u slučaju kada su ostale nezavisne varijable nepromijenjene.

Podlogu za izračunavanje mjera disperzije te drugih statističko-analitičkih pokazatelja predstavljaju rezidualna odstupanja (14), zbroj kvadrata rezidualnih odstupanja (15) te relativna rezidualna odstupanja:

$$u_i = \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} 100\%. \quad (21)$$

Raščlanjena jednadžba zbroja kvadrata rezidualnih odstupanja (15) dana je slijedećim odnosom:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (22)$$

pri čemu izraz s lijeve strane predstavlja ukupni zbroj kvadrata (ST). Prvi član s desne strane jednakosti predstavlja zbroj kvadrata odstupanja regresijskih vrijednosti od njihove aritmetičke sredine, odnosno zbroj kvadrata odstupanja protumačen modelom višestruke linearne regresije (SP). Drugi član predstavlja zbroj kvadrata odstupanja stvarnih vrijednosti zavisne varijable od regresijskih vrijednosti, odnosno zbroj kvadrata koji nije protumačen modelom (SR). Opisane komponente služe za izračunavanje varijance, standardne devijacije i koeficijenta determinacije u analizi modela višestruke linearne regresije.

Varijanca višestruke regresije dana je izrazom:

$$\sigma_{\hat{y}}^2 = \frac{SR}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}, \quad (23)$$

pri čemu n označava broj opažanja. Standardna devijacija regresije dana je izrazom:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{SR}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}. \quad (24)$$

Jednadžba (24) pokazuje koliko je prosječno odstupanje empirijskih vrijednosti zavisne varijable od regresijskih vrijednosti. Relativna mjera koeficijenta varijacije višestruke linearne regresije dana je izrazom:

$$V_y = \frac{\sigma_y}{\bar{y}}. \quad (25)$$

Što je manja standardna devijacija, odnosno koeficijent varijacije, to je u pravilu veća reprezentativnost višestruke regresije. Za procjenu reprezentativnosti višestruke regresije koristi se i koeficijent determinacije:

$$R^2 = \frac{SP}{ST} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad 0 \leq R^2 \leq 1. \quad (26)$$

Koeficijent determinacije predstavlja udio zbroja rezidualnih kvadrata protumačenih modelom višestruke linearne regresije u odnosu na ukupan zbroj rezidualnih kvadrata, a njegove vrijednosti iznose od nula do jedan. Veća vrijednost koeficijenta determinacije ukazuje na reprezentativniji model. Budući da je koeficijent determinacije monotonno rastuća funkcija, odnosno s povećanjem broja nezavisnih varijabli povećava se i koeficijent determinacije, u praksi se koristi i korigirani koeficijent determinacije:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-K-1}(1-R^2), \quad \bar{R}^2 \leq R^2. \quad (27)$$

Pri analizama višestrukim linearnom regresijom često se određuje p-vrijednost statističkog testa kojim se, grubo rečeno, testira ima li određena nezavisna varijabla utjecaja na zavisnu varijablu, odnosno da li je statistički značajna. U svrhu određivanja p-vrijednosti postavljaju se dvije hipoteze: (1) nul hipoteza; H_0 : varijabla X ne utječe na varijablu Y ; i (2) alternativna hipoteza; H_a : varijabla X utječe na varijablu Y . Matematički se to može izraziti kao:

$$H_0 : b_i = 0 \quad (28)$$

nasuprot

$$H_a : b_i \neq 0. \quad (29)$$

Da bi se testirala nul hipoteza, potrebno je odrediti da li je vrijednost $\hat{b}_i$, koji predstavlja procjenu od b_i , dovoljno udaljena od nule da možemo biti sigurni da b_i nije jednak nuli. Postavlja se pitanje koliko vrijednost $\hat{b}_i$ treba biti udaljena od nule? Ukoliko je standardna greška (SE) od $\hat{b}_i$ mala, onda relativno male vrijednosti od $\hat{b}_i$ pružaju snažan dokaz da je $b_i \neq 0$ te da postoji veza između nezavisne varijable X i zavisne varijable Y , pri čemu je standardna greška od $\hat{b}_i$ jednaka:

$$SE(\hat{b}_i) = \frac{SR/n}{ST}. \quad (30)$$

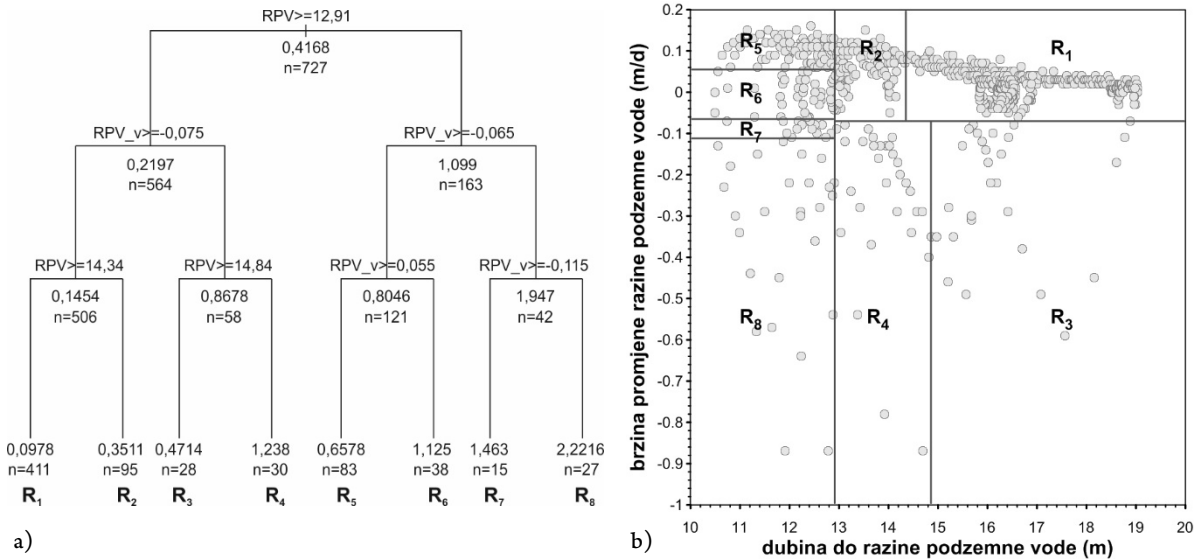
Nasuprot tome, ako je standardna greška od $\hat{b}_i$ velika, vrijednost od $\hat{b}_i$ mora biti velika da li se odbacila nul hipoteza. Slijedeći korak u testiranju nul hipoteze je računanje testne statistike (eng. *t-statistic*):

$$t = \frac{\hat{b}_1 - 0}{SE(\hat{b}_1)}, \quad (31)$$

koja mjeri udaljenost $\hat{b}_i$ od nule u terminima standardne devijacije. Ukoliko ne postoji veza između X i Y očekuje se da će vrijednost testne statistike imati t -distribuciju s $n-2$ stupnja slobode. T -distribucija ima oblik zvona za vrijednosti n veće od otprilike 30 i vrlo je slična normalnoj distribuciji. Kao posljedica toga, može se izračunati vjerojatnost da testna statistika poprimi vrijednosti veće ili jednake od $|t|$, uz pretpostavku da je nulta hipoteza H_0 točna. Ova vjerojatnost se naziva p -vrijednost. Grubo rečeno p -vrijednost se može interpretirati na slijedeći način: mala p -vrijednost ukazuje na to da je vrlo mala vjerojatnost da je odnos između zavisne i nezavisne varijable posljedica slučaja, uz pretpostavku da ne postoji neka stvarna veza između varijabli (James i dr., 2014). Tako, ako je p -vrijednost mala, možemo pretpostaviti da postoji veza između zavisne i nezavisne varijable te se u tom slučaju može odbaciti nul hipoteza. Uobičajene p -vrijednosti za odbacivanje nul hipoteze su 5 ili 1%.

4.2.3. Metoda slučajnih šuma

Tumačenje metode slučajnih šuma iziskuje objašnjenje jednostavnijih metoda koje se temelje na principu klasifikacijskih stabala, a to su metode regresijskih stabala (eng. *regression trees*) i *bagginga* (skraćenica od eng. *bootstrap aggregation*). Prilikom izgradnje regresijskih stabala najprije se prostor nezavisnih varijabli (prediktora) dijeli na J različitih i međusobno odvojenih regija $R_1, R_2, \dots, R_J$. Svako vrijednosti zavisne varijable unutar određene regije R_j daje se ista vrijednost predviđanja, koja je jednaka srednjoj vrijednosti svih opažanja u regiji R_j . Primjer regresijskog stabla za predviđanje brzina gibanja klizišta Kostanjek, na temelju podataka o dubini do razine podzemne vode i brzinama promjene razine podzemne vode, prikazan je na slici 4.4. Primjer na slici 4.4 izveden je u programu R, pomoću paketa *rpart*, verzija 4.1-8. Na slici su prikazane srednje vrijednosti brzina te broj nezavisnih varijabli za svaki čvor regresijskog stabla (ukupni broj nezavisnih varijabli je 727).



Slika 4.4. Primjer izgradnje regresijskog stabla: a) regresijsko stablo za predviđanje brzine gibanja klizišta Kostanjek (RPV - dubina do razine podzemne vode; RPV_v - brzina promjene razine podzemne vode); b) podjela regija s obzirom na regresijsko stablo.

Regije $R_1, R_2, \dots, R_8$ predstavljaju krajnje čvorove (eng. *terminal nodes*) ili listove (eng. *leaves*) regresijskog stabla. Točka u stablu gdje se prediktorski prostor dijeli naziva se unutarnji čvor (eng. *internal node*). Dijelovi stabla koji povezuju čvorove nazivaju se grane (eng. *branches*). Odabirom regija $R_1, R_2, \dots, R_J$ u regresijskom stablu nastoji se minimalizirati zbroj kvadrata rezidualnih odstupanja:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i \in R_j} (y_i - \hat{y}_{R_j})^2, \quad (32)$$

gdje je $\hat{y}_{R_j}$ srednja vrijednost treniranih podataka unutar j -te regije. Budući da je računski zahtjevno uzeti u obzir sve moguće podjele prediktorskog prostora, podjela na regije obavlja se tzv. *pohlepnim* pristupom (eng. *greedy*) poznatim i kao rekursivno binarno razdvajanje (eng. *recursive binary splitting*). Podjela započinje od vrha stabla (sva opažanja u istoj regiji) pri čemu se postupno dijeli prediktorski prostor i pri čemu svakom podjelom nastaju dvije nove grane. Naziv *pohlepna* podjela se koristi zbog toga što se prilikom dijeljenja u svakom koraku nastoji maksimalno reducirati zbroj kvadrata rezidualnih odstupanja, bez obzira što bi neka druga podjela u tom istom koraku mogla dovesti do „boljeg“ stabla u slijedećim koracima (podjelama). Podjela se nastavlja do određenog kriterija, primjerice kad svaka regija sadrži podatke unaprijed definiranog broja mjerenja.

Regresijsko stablo može dati dobro predviđanje na treniranim podacima, ali pri izradi stabla vjerojatno će doći do pretreniravanja podataka (eng. *overfit*), što uzrokuje slaba predikcijska svojstva modela (James i dr., 2014). Takva pretrenirana klasifikacijska stabla generalno imaju visoku varijancu, što primjerice znači, da ukoliko trening podatke podijelimo na dva dijela i na oba dijela primijenimo klasifikacijsko stablo, rezultat može biti značajno različit. Suprotno tome, u slučaju niske varijance, rezultati će biti slični za različite skupove treniranih podataka. *Bagging* predstavlja proceduru smanjivanja varijance, u kojoj se regresijska stabla koriste kao elementi modela za predviđanje (James i dr., 2014). *Bagging* procedura uzima u obzir veliki broj treniranih uzoraka na temelju kojih se izrađuje model i na čijim prosjecima se temelji predviđanje (Briševac i dr., 2014). Primjerice, uspostavi li se na treniranim podacima B različitih skupova podataka, za svaki skup se može uspostaviti regresijsko stablo i na temelju njega $\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_B$ predviđanja, čijim se uprosječivanjem dobiva konačno predviđanje $\hat{y}_{bag}$:

$$\hat{y}_{bag} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i. \quad (33)$$

Iako preciznost *bagging* modela može biti značajno viša od preciznosti pojedinog regresijskog stabla, problem je što kod *bagginga* stabla mogu biti međusobno jako korelirana, odnosno mogu izgledati slično. Primjerice, ako postoji jedan značajan prediktor, većina stabala će na početku izgradnje taj prediktor koristiti kao unutarnji čvor (Briševac i dr., 2014). Uprosjječivanjem predviđanja međusobno sličnih stabala neće se dobiti značajno smanjenje varijance. Metodom slučajnih šuma nastoji se smanjiti opisani problem tako da se prilikom svakog dijeljenja grana u obzir uzima slučajni uzorak od m prediktora od ukupnog skupa p prediktora (James i dr., 2014). Ovakvim pristupom prilikom dijeljenja stabla prosječno $(p - m)/p$ unutarnjih čvorova neće u obzir uzeti jaki prediktor te će manje značajni prediktori više doći do izražaja. Obično se kao vrijednost m uzima drugi korijen iz ukupnog broja prediktora ($\sqrt{p}$). Male vrijednosti m općenito će biti korisne u predviđanju kad postoji veliki broj međusobno koreliranih prediktora.

Za razliku od regresijskih stabala, koja se lako interpretiraju, skup stabala nastalih *bagging*-om ili slučajnim šumama nije jednostavno interpretirati, a rezultati se ne mogu prikazati kao jedno stablo. Unatoč tome, važnost pojedinih parametara može se odrediti koristeći zbroj kvadrata rezidualnih odstupanja. Naime, dijeljenje grana u čvorovima (prema određenom prediktoru) smanjuje zbroj kvadrata rezidualnih odstupanja. Prosjek promjene zbroja kvadrata rezidualnih odstupanja uzrokovan

određenim prediktorom za sva stabla u modelu ukazuje na važnost tog prediktora u modelu. Veća prosječna promjena zbroja kvadrata rezidualnih odstupanja ukazuje na važniji prediktor.

4.2.4. Procjena statističkih modela

Postupak određivanja učinkovitosti modela naziva se procjenom modela, a postupak odabira određenog modela se naziva selekcijom modela (James i dr., 2014). Pri procjeni statističkih modela koji opisuju odnose između oborina, razina podzemne vode te gibanja klizišta (poglavlje 6), korištene su metode validacije i unakrsne validacije (eng. *cross validation*). Validacija predstavlja relativno jednostavan pristup u kojem se skup podataka dijeli na skup na kojem se model trenira i na skup podataka na kojem se provodi validacija modela. Model određen na temelju treniranja primjenjuje se na skup podataka za validaciju te se određuju razlike između dobivenih i stvarnih podataka. Greška modela na podacima za validaciju obično se određuje kao varijanca regresije, odnosno kao prosječni kvadrat rezidualnih odstupanja ili srednja kvadratna pogreška (eng. *mean squared error, MSE*), dana izrazom (23). Srednja kvadratna pogreška može se odrediti i za model određen na treniranim podacima i za model primijenjen na skupu podataka za validaciju. Niža vrijednost srednje kvadratne greške ukazuje na model koji bolje opisuje podatke, odnosno model s boljim predviđanjem. Unatoč jednostavnosti, nedostatak koncepta validacije je da procijenjena greška može značajno varirati o podacima koji se nalaze u skupu za treniranje i podacima koji se nalaze u skupu za validaciju te da greška ovisi o veličini skupa za validaciju.

Koncept k -struke unakrsne validacije (eng. *k-fold cross-validation*) predstavlja postupak validacije u kojemu se cijeli skup podataka međusobno dijeli na k nasumičnih skupova, približno jednakih po veličini. U prvom koraku validacije, prvi skup podataka predstavlja skup za validaciju, dok ostalih $k - 1$ skupova predstavljaju skup podataka za treniranje modela. Nakon završetka validacije određuje se srednja kvadratna pogreška između modela nastalog na temelju $k - 1$ skupova podataka i skupa za validaciju. Ova procedura se ponavlja k puta, svaki puta za drugi skup podataka za validaciju. Postupak rezultira s k procjena grešaka za svaki od k skupova podataka za validaciju. Ukupna procjena greške k -struke unakrsne validacije predstavlja srednju vrijednost k procjena grešaka:

$$CV_{(k)} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sigma_{y_i}^2. \quad (34)$$

5. REZULTATI PRAĆENJA KLIZIŠTA KOSTANJEK

U ovom poglavlju prikazani su rezultati praćenja parametara klizanja na klizištu Kostanjev koji su prikupljeni kontinuiranim opažanjem senzorima integriranog sustava za praćenje opisanog u poglavlju 4.1. Na temelju GNSS opažanja određena je pogreška mjerenja pojedinih stanica, pomaci i brzina gibanja na površini, kao i obrasci gibanja. Pomaci u podzemlju, opažani u inklinometru u središnjem dijelu klizišta, uspoređeni su s GNSS opažanjima u svrhu interpretacije gibanja kliznog tijela po kliznoj plohi. Također, prikazani su rezultati praćenja uzroka klizanja, razine podzemnih vode i njihove promjene te meteorološki uvjeti za vrijeme razdoblja praćenja i njihov odnos prema podacima izmjerenim na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič.

5.1. Gibanje klizišta

Gibanje klizišta Kostanjev kontinuirano se prati s 15 GNSS stanica, sedam žičanih ekstenzometara, četiri vertikalna ekstenzometra te povremeno s inklinometrom. GNSS praćenje započelo je u rujnu 2012. godine na tri GNSS permanentne stanice (GNSS 05, 09 i 12) unutar područja napuštenog kopa lapora. U razdoblju od prosinca 2012. do veljače 2013. započelo je praćenje s preostalim GNSS stanicama (GNSS 01, 02, 03, 04, 06, 07, 08, 10, 11, 13 i 14), osim na stanici GNSS 15 na kojoj je mjerenje započelo je u travnju 2013. Od početka praćenja samo je nekoliko puta došlo do prekida GNSS mjerenja, a najčešći uzroci su bili nestanak struje ili prekid internet veze te nepravilnosti u radu uređaja uzrokovane neodgovarajućim postavkama. Pokrivenost podacima GNSS mjerenja iznosi od 89,7 do 99,9 % (tablica 5.1), a prikazana mjerenja se odnose na dnevne podatke dobivene 24 satnim postprocesiranjem, pri čemu proces postprocesiranja predstavlja softversko uklanjanje greške mjerenja. Opažanja sa sedam žičanih ekstenzometara kratkog i dugačkog raspona započela su u razdoblju od ožujka 2011. do ožujka 2013. godine. U radu Krkač i dr. (2014d) opisani su rezultati praćenja žičanim ekstenzometrima na površini klizišta koji ukazuju na to da pouzdanost rezultata mjerenja uvelike varira ovisno o relativnom položaju u odnosu na dijelove klizišta te o meteorološkim i ostalim utjecajima (primjerice deformacije invarne žice zbog antropogenih utjecaja). Praćenje gibanja u podzemlju započelo je inklinometarskim mjerenjem u travnju 2012., a nastavljeno je opažanjima s četiri vertikalna ekstenzometra od rujna 2013. godine.

U slijedećim poglavljima detaljno su prikazani i analizirani površinski pomaci opažani permanentnom GNSS mrežom, koja omogućava visoku preciznost mjerenja te dobru prostornu i vremensku pokrivenost podacima. Brzine gibanja klizišta izračunate za različite dijelove klizišta omogućile su diferencijaciju karakterističnih obrazaca gibanja. Od praćenja pomaka u podzemlju prikazani su samo rezultati mjerenja inklinometrom, reprezentativni za središnji dio klizišta kao i za interpretaciju mehanizma klizanja kao translacijskog, što je važno zbog mogućnosti ekstrapolacije rezultata površinskih pomaka u podzemlje. Podaci mjerenja žičanim ekstenzometrima dugačkog i kratkog raspona na površini klizišta, kao i vertikalnih ekstenzometara ugrađenih u bušotinu nisu detaljnije prikazani zbog velike nepouzdanosti podataka.

Tablica 5.1. Pokrivenost podacima GNSS mjerenja od početka mjerenja do 15.1.2015.

oznaka GNSS stanice	datum početka mjerenja	ukupan broj dana opažanja (do 15.1.2015.)	ukupan broj dana bez podataka	pokrivenost podacima (%)
GNSS 01	21.2.2013.	693	2	99,7
GNSS 02	10.1.2013.	735	7	99,0
GNSS 03	11.1.2013.	734	2	99,7
GNSS 04	11.1.2013.	734	33	95,4
GNSS 05	7.9.2012.	860	55	93,5
GNSS 06	11.1.2013.	734	1	99,9
GNSS 07	31.12.2012.	745	8	98,9
GNSS 08	11.1.2013.	734	1	99,9
GNSS 09	31.8.2012.	867	22	97,5
GNSS 10	20.12.2012.	756	9	98,8
GNSS 11	20.12.2012.	756	76	89,8
GNSS 12	31.8.2012.	867	44	94,8
GNSS 13	20.12.2012.	756	4	99,5
GNSS 14	11.1.2013.	734	34	95,3
GNSS 15	21.4.2013.	635	64	89,7

5.1.1. Površinski pomaci

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 topofere; (3) pogreške u efemeridima putanja satelita; (4) višestruke putanje satelitskih signala (eng. *multipathing*); (5) načina na koji je instalirana antena; i (6) položaja satelita. Sve navedene pogreške utječu na ukupnu pogrešku GNSS mjerenja.

U ovom radu je preciznost GNSS stanice određena kao korijen srednje kvadratne pogreške, odnosno kao standardna devijacija, kao što je prikazano u Massey (2010). Za svaku GNSS stanicu vizualno je odabrano razdoblje od približno 150 podataka 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 (ΔS), I-Z (ΔI), horizontalno u smjeru gibanja (ΔH) i vertikalno (ΔV), 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%. Podaci određivanja pogreške poslužili su za procjenu pogreške mjerenja, odnosno za zaključke o statističkoj značajnosti pomaka. Naime, ukoliko 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.

Izračunate pogreške uz 95%-tnu pouzdanost za svih 15 GNSS stanica prikazane su u tablici 5.2. Mjerenja na kojima je određena pogreška predstavljaju podatke dobivene 24 satnim postprocesiranjem. Pogreške GNSS mjerenja na svim stanicama u smjeru S-J iznose od $\pm 3,13$ do $\pm 4,93$ mm, dok su pogreške u smjeru I-Z nešto manje, a iznose od $\pm 2,02$ do $\pm 3,84$ mm. Pogreške u horizontalnoj ravnini u smjeru gibanja iznose od $\pm 3,17$ do $\pm 4,55$ mm, dok su pogreške u vertikalnom smjeru dva do tri puta veće nego u horizontalnom smjeru i iznose od $\pm 6,4$ do $\pm 10,47$ mm. Najveću preciznost pokazuju podaci sa stanice GNSS 08 za koju se općenito može reći da ima najbolju otvorenost prostora prema nebu, odnosno prema satelitima, te da ima najmanje višestrukih putanja satelitskog signala nastalih kao posljedica refleksije signala od okolnih objekata. Izračunate preciznosti podudaraju se sa 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.

Tablica 5.2. Izračunate preciznosti mjerenja 15 permanentnih GNSS stanica.

oznaka GNSS stanice	razlika između izmjerenih vrijednosti i vrijednosti linearnog trenda dnevnih kumulativnih pomaka							
	standardna devijacija (mm)				pogreška pri intervalu pouzdanosti od 95 % (mm)			
	$\sigma_{\Delta S}$	$\sigma_{\Delta I}$	$\sigma_{\Delta H}$	$\sigma_{\Delta V}$	$\sigma_{\Delta S}$	$\sigma_{\Delta I}$	$\sigma_{\Delta H}$	$\sigma_{\Delta V}$
GNSS 01	$\pm 1,7$	$\pm 1,79$	$\pm 1,62$	$\pm 4,05$	$\pm 3,33$	$\pm 3,51$	$\pm 3,18$	$\pm 7,94$
GNSS 02	$\pm 2,09$	$\pm 1,73$	$\pm 2,32$	$\pm 3,99$	$\pm 4,09$	$\pm 3,39$	$\pm 4,54$	$\pm 7,81$
GNSS 03	$\pm 1,82$	$\pm 1,33$	$\pm 1,95$	$\pm 3,87$	$\pm 3,57$	$\pm 2,61$	$\pm 3,83$	$\pm 7,58$
GNSS 04	$\pm 2,51$	$\pm 1,39$	$\pm 2,32$	$\pm 4,35$	$\pm 4,93$	$\pm 2,72$	$\pm 4,55$	$\pm 8,52$
GNSS 05	$\pm 2,05$	$\pm 1,69$	$\pm 2,04$	$\pm 5,34$	$\pm 4,02$	$\pm 2,02$	$\pm 4,00$	$\pm 10,47$
GNSS 06	$\pm 2,03$	$\pm 1,73$	$\pm 2,0$	$\pm 4,22$	$\pm 3,98$	$\pm 3,39$	$\pm 3,91$	$\pm 8,26$
GNSS 07	$\pm 1,75$	$\pm 1,67$	$\pm 1,82$	$\pm 4,3$	$\pm 3,44$	$\pm 3,28$	$\pm 3,56$	$\pm 8,43$
GNSS 08	$\pm 1,6$	$\pm 1,03$	$\pm 1,62$	$\pm 3,27$	$\pm 3,13$	$\pm 2,02$	$\pm 3,17$	$\pm 6,4$
GNSS 09	$\pm 1,9$	$\pm 1,91$	$\pm 1,8$	$\pm 4,55$	$\pm 3,73$	$\pm 3,75$	$\pm 3,53$	$\pm 8,92$
GNSS 10	$\pm 1,7$	$\pm 1,7$	$\pm 1,72$	$\pm 4,99$	$\pm 3,34$	$\pm 3,34$	$\pm 3,37$	$\pm 9,89$
GNSS 11	$\pm 2,17$	$\pm 1,74$	$\pm 2,14$	$\pm 3,88$	$\pm 4,24$	$\pm 3,41$	$\pm 4,18$	$\pm 7,6$
GNSS 12	$\pm 1,68$	$\pm 1,7$	$\pm 1,71$	$\pm 4,16$	$\pm 3,3$	$\pm 3,33$	$\pm 3,35$	$\pm 8,14$
GNSS 13	$\pm 1,88$	$\pm 1,8$	$\pm 1,97$	$\pm 4,15$	$\pm 3,69$	$\pm 3,53$	$\pm 3,86$	$\pm 8,13$
GNSS 14	$\pm 1,65$	$\pm 1,96$	$\pm 1,72$	$\pm 4,12$	$\pm 3,24$	$\pm 3,84$	$\pm 3,39$	$\pm 8,07$
GNSS 15	$\pm 1,55$	$\pm 1,39$	$\pm 1,56$	$\pm 4,14$	$\pm 3,05$	$\pm 2,72$	$\pm 3,05$	$\pm 8,12$

Od početka mjerenja do 15. siječnja 2015. godine na gotovo svim GNSS stanicama zabilježen je pomak koji je značajno veći od utvrđene preciznosti mjerenja. Iznimka je stanica GNSS 01, smještena oko 130 m sjeverno od glavne pukotine (sjeverne granice klizišta), na kojoj izmjereni pomak nije posljedica klizanja već sezonskih promjena kao što su bubrenje i stezanje tla uslijed promjene sadržaja vode u tlu.

Zbog pogreške mjerenja, odnosno preciznosti uređaja (tablica 5.2), na podacima dnevnih pomaka dobivenih 24-satnim postprocesiranjem nije moguće sa sigurnošću uočiti određene obrasce gibanja, niti je moguće odrediti točno vrijeme promjene određenih obrazaca gibanja. Zbog toga su u daljnjim analizama podataka korišteni 7-dnevni pomični prosjeci dnevnih podataka mjerenja. 7-dnevni pomični

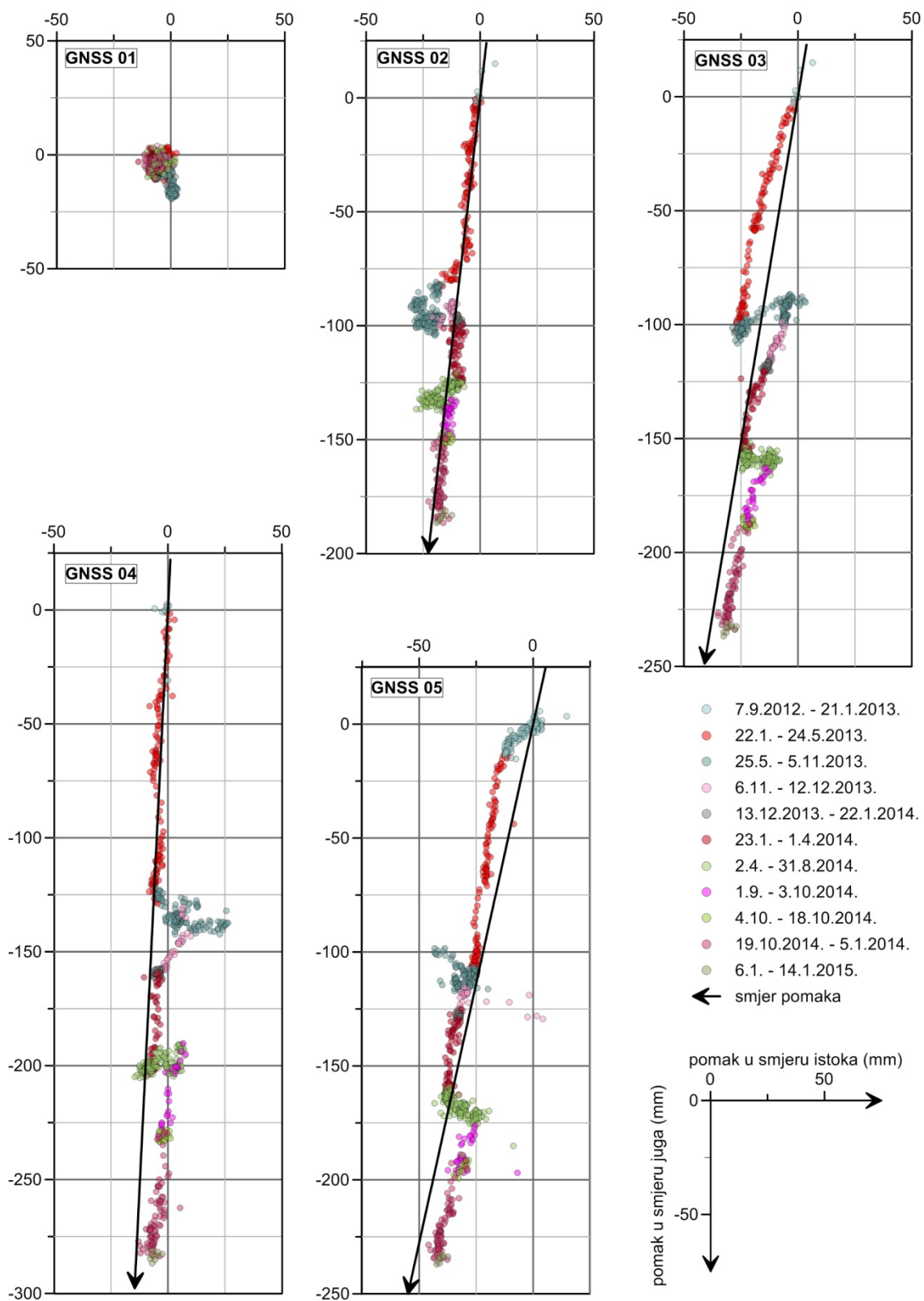
prosjeci kumulativnih pomaka predstavljaju srednju vrijednost kumulativnog pomaka za razdoblje od sedam dana, odnosno srednju vrijednost kumulativnog pomaka za određeni dan mjerenja te tri dana prije i tri dana poslije dana mjerenja. 7-dnevni pomični prosjeci su odabrani i zato što dijelom eliminiraju dnevnu pogrešku mjerenja, a dovoljno su kratki da vrijednosti krajnjih članova niza ne mijenjaju znatno vrijednost središnjeg dijela niza. U tablici 5.3 prikazani su kumulativni pomaci (horizontalni pomaci u smjeru S-J i I-Z, vertikalni pomaci, horizontalni pomaci i prostorni pomaci) i prosječna godišnja brzina gibanja dobiveni na temelju 7-dnevnih pomičnih prosjeka kumulativnih pomaka GNSS stanica. Osim kumulativnih pomaka u tablici 5.3 su prikazana i 95%-tna odstupanja dnevnih mjerenja od 7-dnevnih pomičnih prosjeka.

Tablica 5.3. Kumulativni površinski pomaci i prosječna brzina gibanja GNSS stanica izračunati iz 7-dnevnih pomičnih prosjeka od početka mjerenja do 14.1.2015.

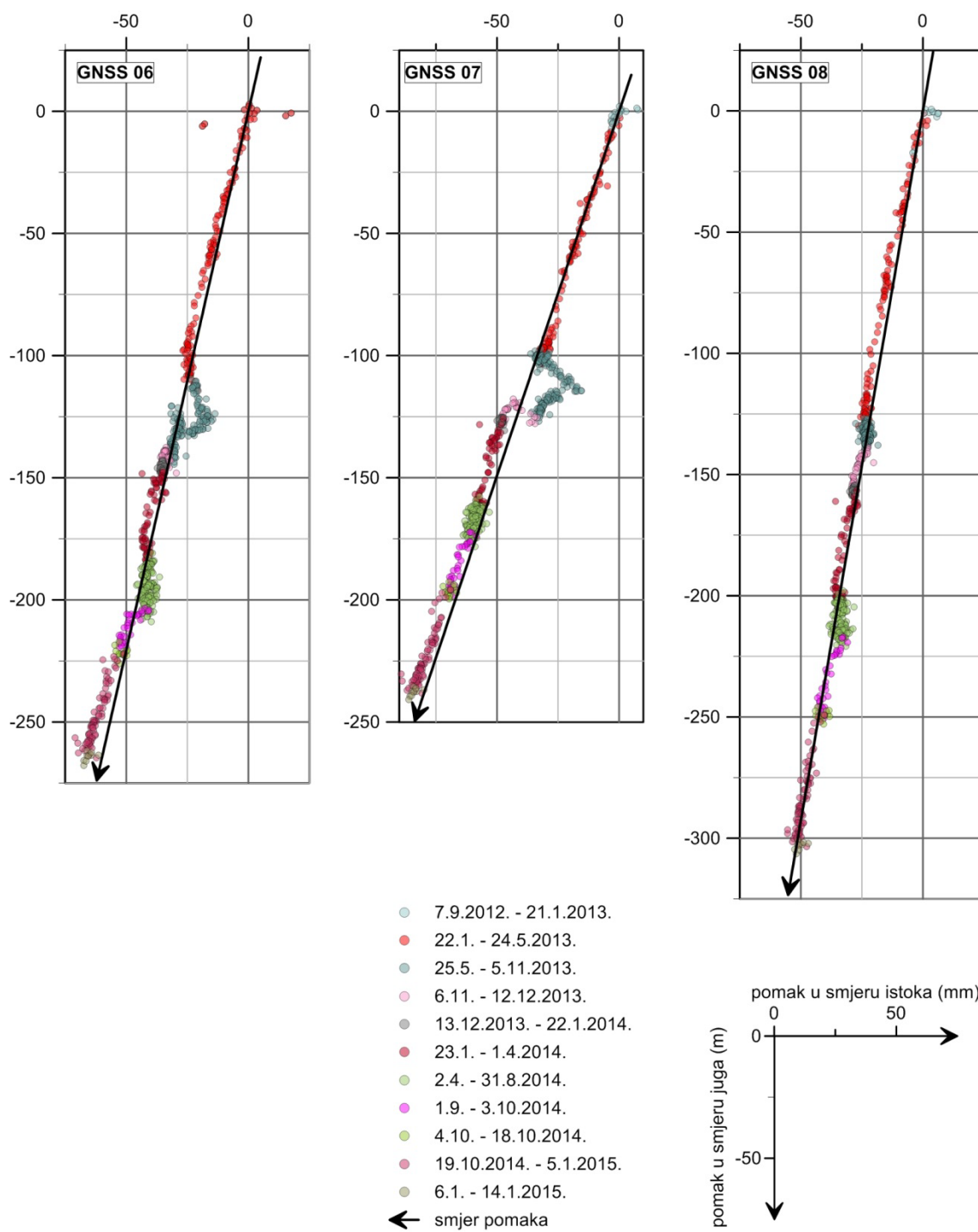
oznaka GNSS stanice	kumulativni pomaci dobiveni 7-dnevnim pomičnim prosjecima					prosječna brzina (mm/god)
	pomak u smjeru S-J (mm)	pomak u smjeru I-Z (mm)	vertikalni pomak (mm)	kumulativni horizontalni pomak (mm)	kumulativni prostorni pomak (mm)	
GNSS 01	-3,93±2,9	-6,03±2,3	-3,01±6,9	7,32±2,6	8,08±4,4	5,25
GNSS 02	-183,73±2,9	-16,10±2,3	-46,19±9,2	184,44±2,9	190,14±3,5	94,42
GNSS 03	-233,48±2,7	-30,28±2,2	-33,02±7,1	235,44±2,7	237,75±2,9	118,23
GNSS 04	-283,74±2,8	-5,26±2,2	-128,34±9,4	283,79±2,8	311,47±3,7	154,89
GNSS 05	-234,83±2,9	-40,19±3,4	80,59±9,0	238,25±2,8	251,52±5,5	106,75
GNSS 06	-264,46±2,8	-65,10±2,2	-45,65±9,6	272,36±2,7	276,16±2,9	137,33
GNSS 07	-237,96±2,7	-83,70±2,2	-48,82±9,6	252,25±2,7	256,94±2,9	125,88
GNSS 08	-303,25±2,5	-49,27±2,1	-60,78±6,7	307,34±2,5	313,30±2,7	155,80
GNSS 09	-414,25±3,4	-99,72±5,3	241,24±8,8	426,09±3,0	489,64±5,7	206,134
GNSS 10	-212,83±2,6	-77,80±2,3	-21,91±7,3	226,61±2,6	227,67±3,6	109,92
GNSS 11	-312,76±2,6	48,86±2,3	-51,38±9,3	316,56±2,6	320,70±2,8	154,84
GNSS 12	-188,40±2,5	80,26±2,4	-12,15±9,4	204,79±2,3	205,17±3,9	86,37
GNSS 13	-86,58±2,6	42,70±2,1	-36,53±9,0	96,56±2,6	103,26±3,8	49,85
GNSS 14	-183,56±2,7	-33,76±2,0	-9,13±9,0	186,64±2,7	186,88±3,7	92,93
GNSS 15	-37,85±2,5	-2,17±2,1	-2,07±6,0	37,94±2,3	38,06±3,7	21,88

5.1.1.1. Pomaci i brzine gibanja

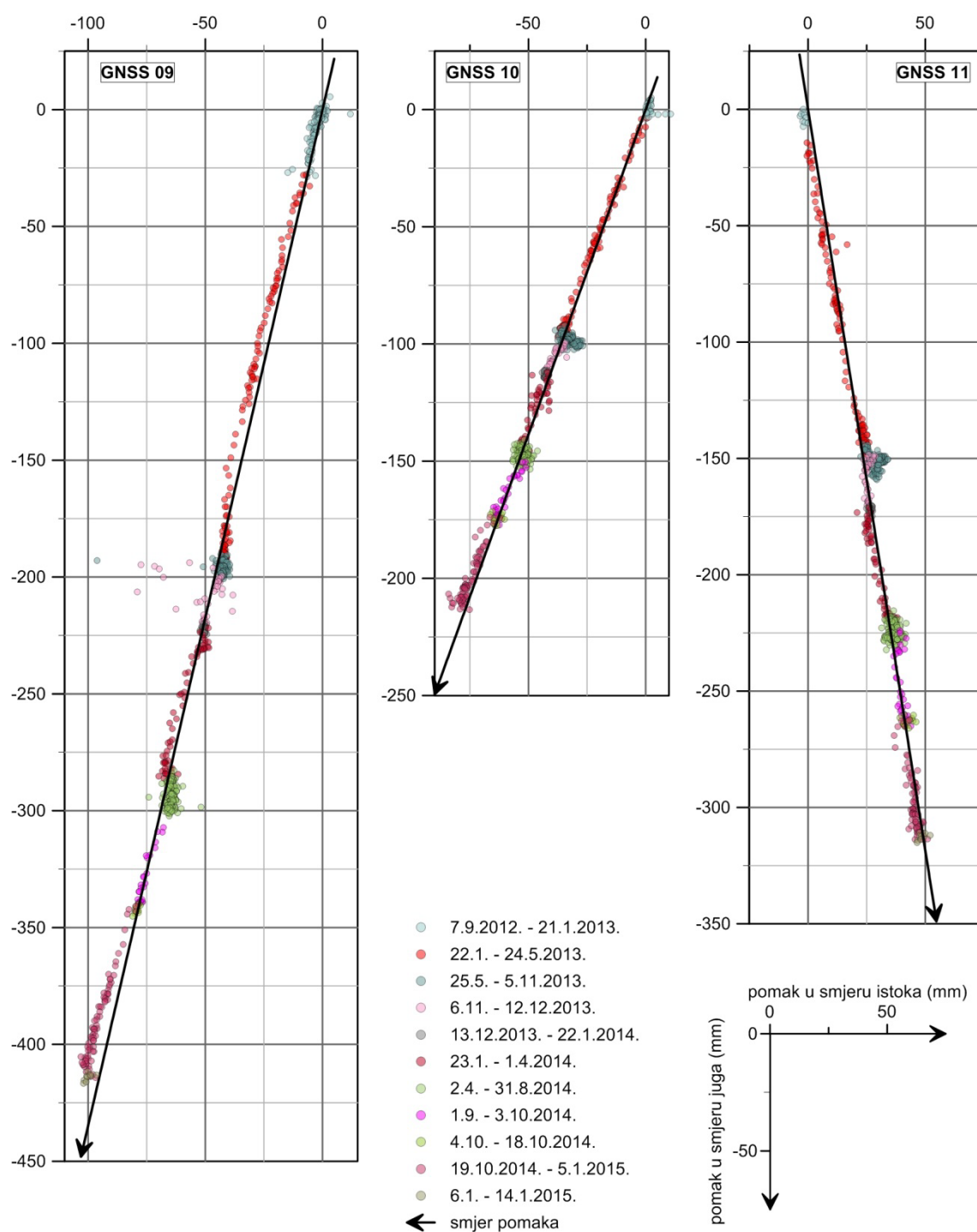
Na slikama 5.1, 5.2, 5.3 i 5.4 prikazani su dijagrami rasipanja (eng. *scatter plot*) vrijednosti mjerenja dnevnih kumulativnih pomaka u horizontalnoj ravnini, od početka mjerenja do siječnja 2015. godine, te smjerovi pomaka za sve GNSS stanice. Smjer pomaka svake pojedine GNSS stanice određen je metodom najmanjih kvadrata odstupanja uz pretpostavku da je pomak pojedine GNSS stanice pravocrtan. Pri primjeni metode najmanjih kvadrata na mjerenjima GNSS stanica 02, 03, 04, 05, 06, 07, 11, 13 i 15 iz analize su djelomično uklonjeni podaci za razdoblja ljeto-jesen 2013. i ljeto 2014. godine. Uklonjeni podaci karakteristični su za spomenute GNSS stanice tijekom razdoblja relativnog mirovanja klizišta, a vjerojatno su posljedica sezonskih promjena koje se odražavaju na položaj temelja i stupa na kojemu je instalirana GNSS antena, ali i posljedica lokalnih deformacija temeljnog tla. Ovi pomaci vjerojatno se mogu usporediti i sa reverzibilnim sezonskim pomacima koje su na klizištu Utiku uočili Massey i dr. (2013). Ovi sezonski pomaci u odnosu na ukupni pomak, odnosno pomak tijekom razdoblja aktivnog klizanja, su relativno mali te neće biti predmet danjih analiza. Azimuti smjera pomaka (slika 5.5 i tablica 5.4) GNSS stanica iznose od 154.5° do 199.8° . Pomaci na središnjem i sjevernom dijelu te zapadnom i jugozapadnom dijelu klizišta, izmjereni GNSS stanicama 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09 i 10, 14 i 15, generalno su usmjereni prema J-JZ i J. Pomaci zapadno od otvorenog kopa lapora, izmjereni na GNSS stanicama 11 i 12, usmjereni su prema J-JI, kao i pomaci GNSS stanice 13 u sjeverozapadnom dijelu klizišta.



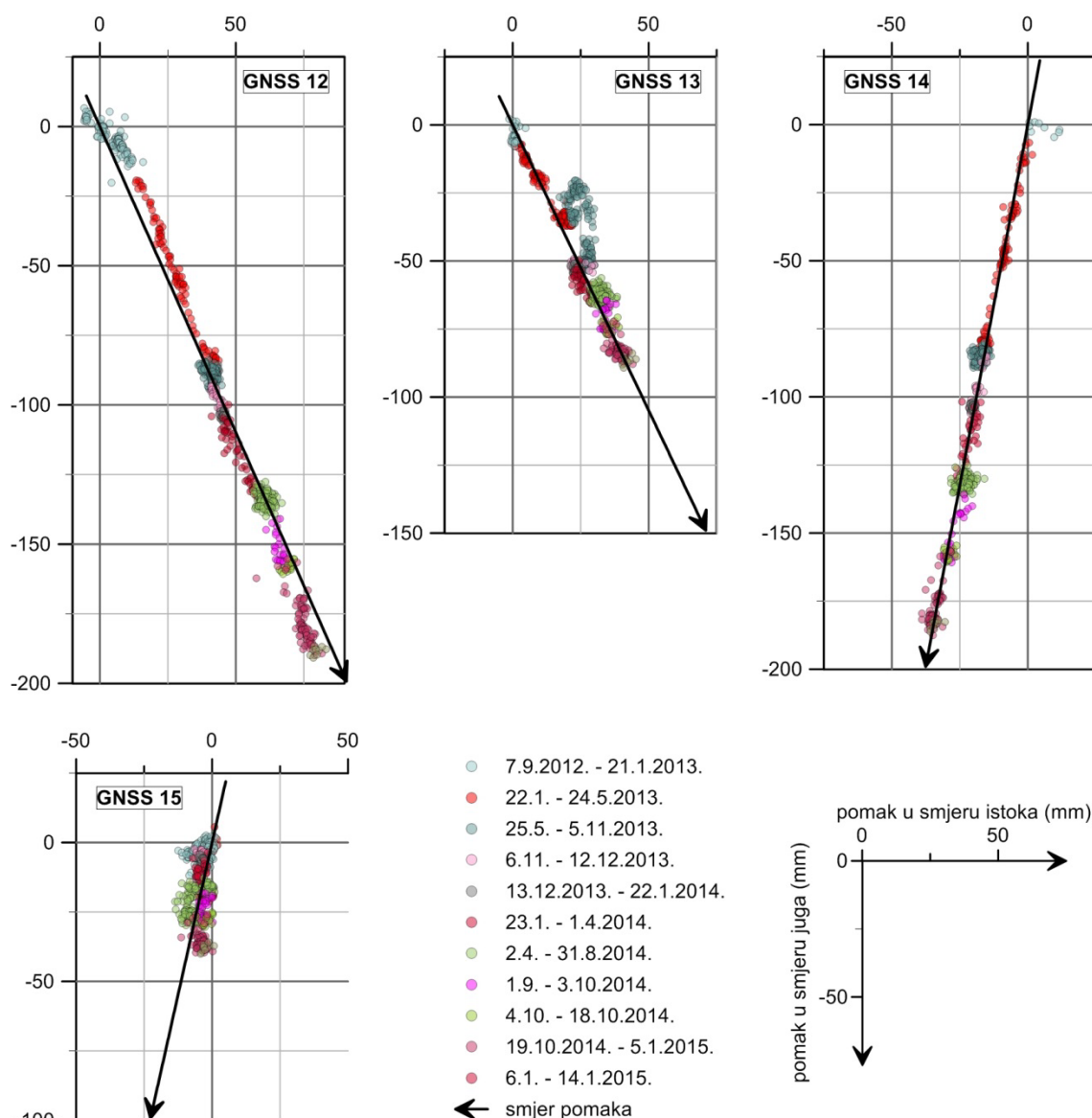
Slika 5.1. Dijagrami rasipanja dnevnih kumulativnih pomaka na klizištu Kostanjev za GNSS stanice 01, 02, 03, 04 i 05.



Slika 5.2. Dijagrami rasipanja dnevnih kumulativnih pomaka na klizištu Kostanjek za GNSS stanice 06, 07 i 08.



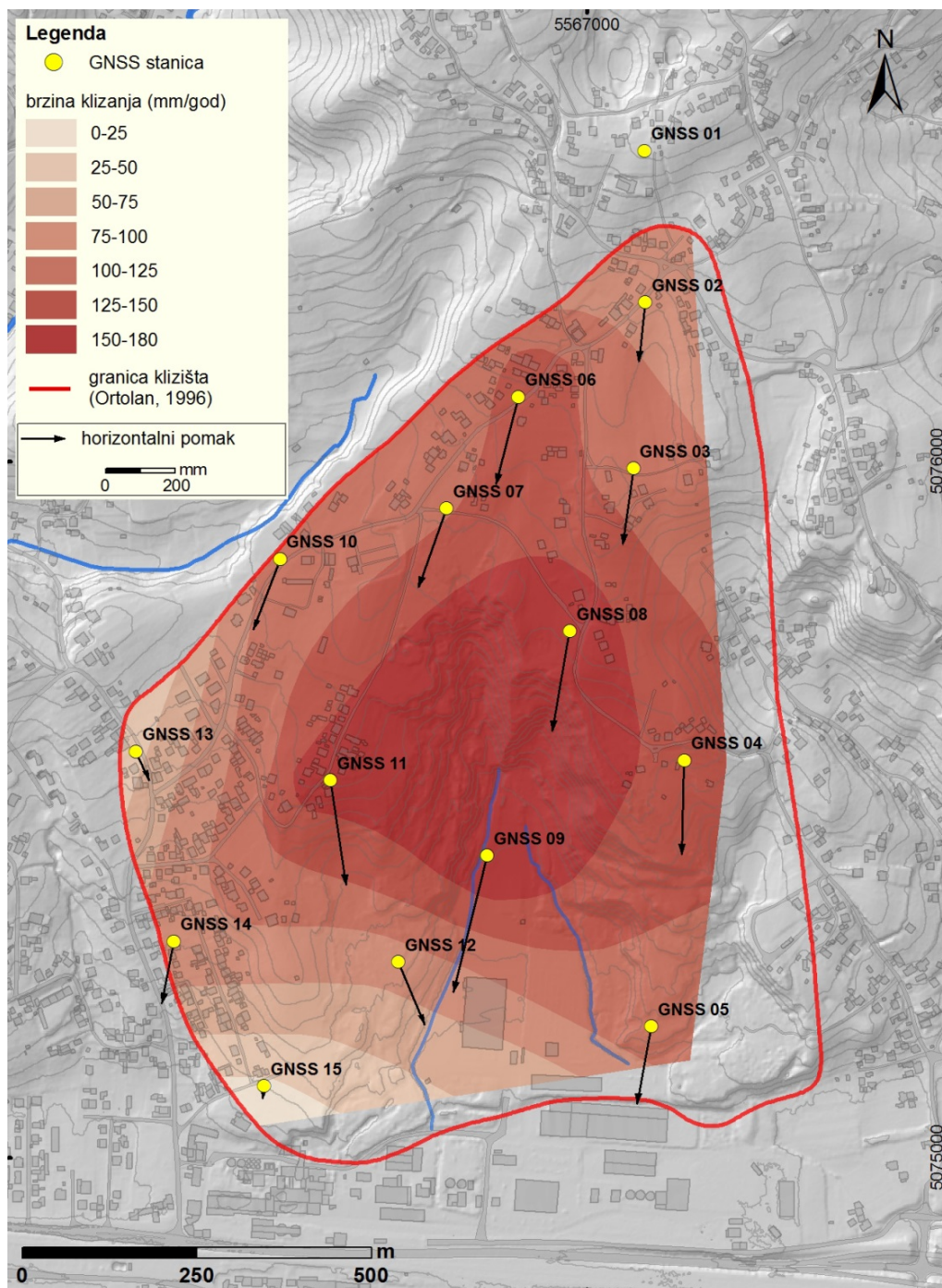
Slika 5.3. Dijagrami rasipanja dnevnih kumulativnih pomaka na klizištu Kostanjev za GNSS stanice 09, 10 i 11.



Slika 5.4. Dijagrami rasipanja dnevnih kumulativnih pomaka na klizištu Kostanjek za GNSS stanice 12, 13, 14 i 15.

S obzirom da su kumulativni pomaci izmjereni na GNSS stanicama različiti i zbog različite duljine praćenja, uz smjerove i iznose kumulativnih pomaka na slici 5.5 prikazane su i prosječne godišnje brzine gibanja. Radi boljeg uvida u prostornu distribuciju gibanja na području klizišta, interpolirane su i prosječne brzine gibanja. Iz slike 5.5 vidljivo je da su u središnjem dijelu klizišta, odnosno na GNSS stanicama 08, 09 i 11, zabilježeni najveći pomaci i najveće prosječne brzine gibanja. Najmanje prosječne brzine gibanja zabilježene su uz zapadnu i južnu granicu klizišta, odnosno na GNSS stanicama 13 i 15. Smanjenje prosječnih godišnjih brzina pomaka približno je koncentrično idući od središnjeg dijela klizišta prema rubnim dijelovima. Najmanji iznos kumulativnog pomaka zabilježen je na stanici GNSS 15, koja je posljednja započela s mjerenjima i koja se nalazi na području jugozapadnog dijela klizišta gdje granica nije jasno izražena. Ukupni prostorni pomak stanice GNSS 15 iznosi 38,06 mm, dok ukupni horizontalni pomak iznosi 37,94 mm. Najveći iznos kumulativnog pomaka zabilježen je na stanici GNSS

09 u središnjem dijelu klizišta, u području otvorenog kopa lapora. Ukupni prostorni pomak stanice GNSS 09 iznosi 489,64 mm, dok horizontalni pomak iznosi 426,09 mm.



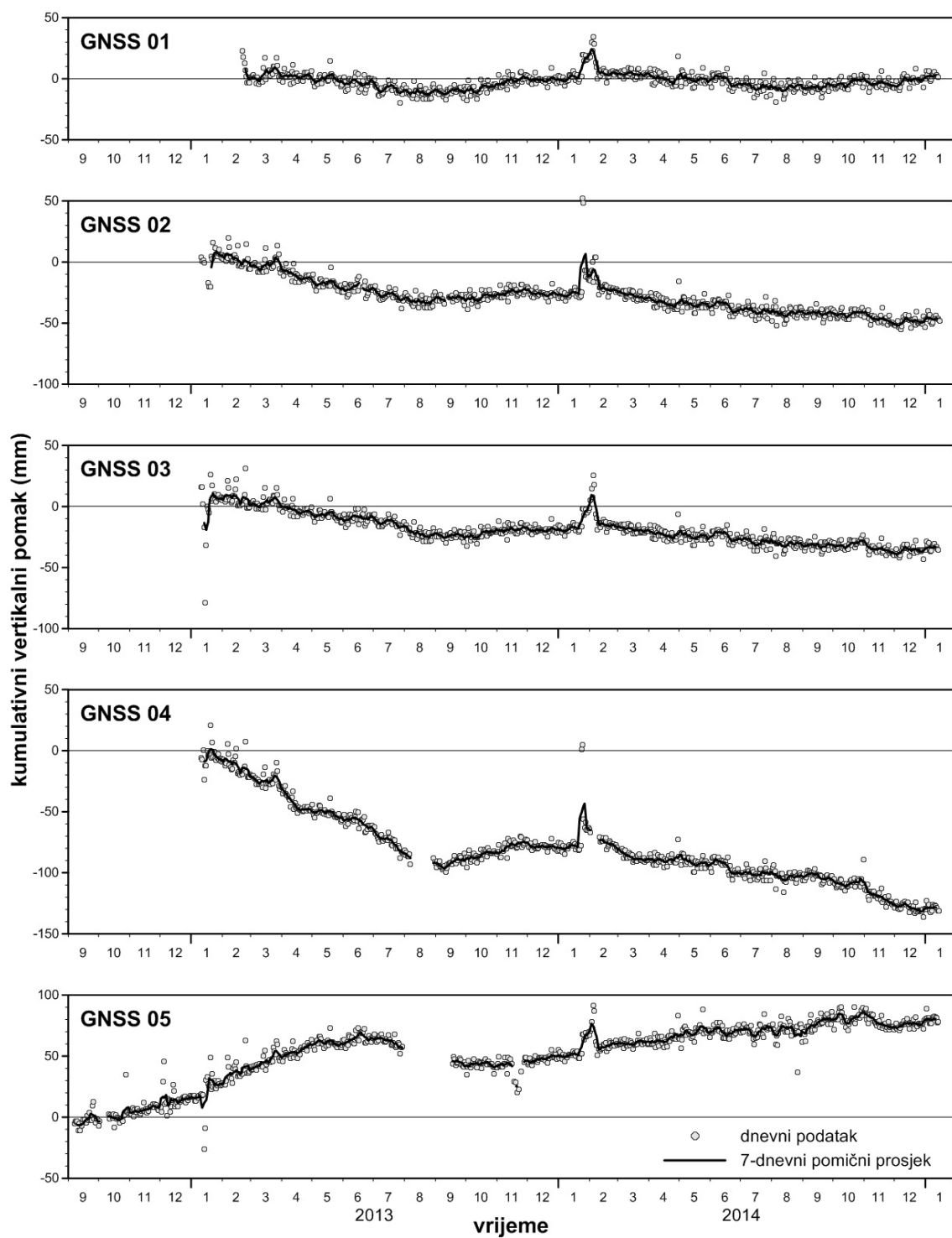
Slika 5.5. Smjerovi i iznosi kumulativnih horizontalnih pomaka GNSS stanica na klizištu Kostanjevka te prosječne brzine gibanja klizišta određene na temelju izmjerenih pomaka.

Općenito se može zaključiti da je kumulativni iznos pomaka GNSS stanica u središnjem dijelu klizišta 1,5 do 4 puta veći nego na zapadnim i sjevernim granicama klizišta. Manji iznos pomaka uz zapadnu granicu (desni bok klizišta), zabilježena GNSS stanicama 14 i 15, vjerojatno je posljedica otpora klizanju uslijed smicanja na bočnoj pukotini, između kliznog tijela i nepokrenutog okolnog terena. Slične pojave na klizištima uočili su Allison i Brunsten (1990), Malet i dr. (2002) te Massy (2010). Na pojavu zone smicanja uz desnu bočnu pukotinu ukazuje i izdizanje terena u visini do 0,5 m nastalo kao posljedica zajedničkog djelovanja zbijanja materijala i smicanja uz pukotinu. Manji iznos pomaka zabilježen na GNSS stanicama 02 i 13 južno od glavne pukotine, na području sjeverne i sjeverozapadne granice klizišta, može se objasniti mjestimičnim formiranjem zone usijedanja (njem. *graben*) u gornjem dijelu kliznog tijela, koja je od središnjeg dijela kliznog tijela odvojena sekundarnom vlačnom pukotinom (engl. *minor scarp*) ili setom pukotina.

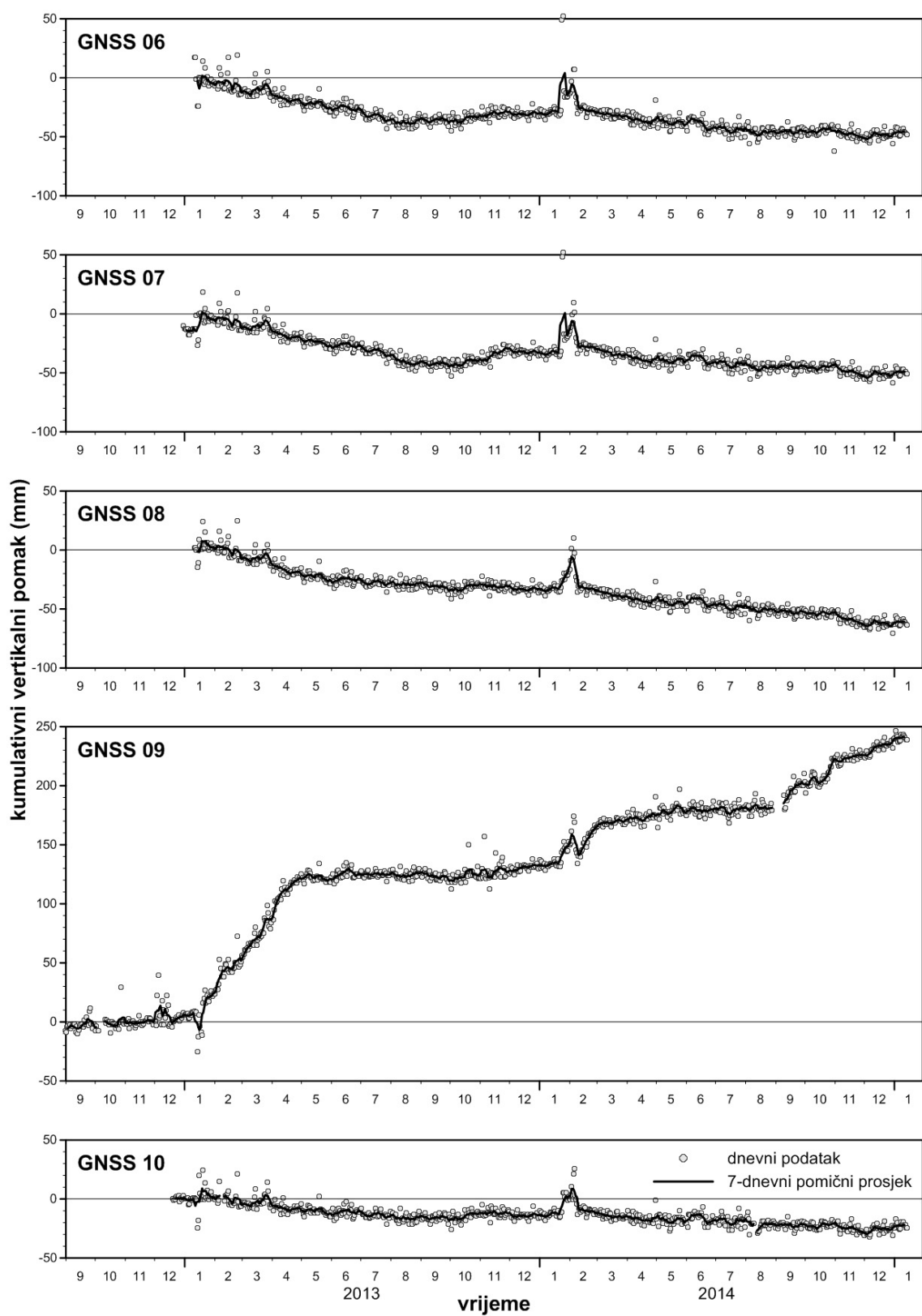
Tablica 5.4. Smjerovi i nagibi vektora ukupnog pomaka GNSS stanica.

oznaka GNSS stanice	kut nagiba gibanja u smjeru klizanja (°)	smjer gibanja (°)
GNSS 01	-	-
GNSS 02	-16,3	186,5
GNSS 03	-9,7	189,4
GNSS 04	-24,8	182,8
GNSS 05	17,9	192,4
GNSS 06	-11,1	192,8
GNSS 07	-12,2	199,1
GNSS 08	-12,0	189,7
GNSS 09	29,2	193,0
GNSS 10	-7,2	199,8
GNSS 11	-10,4	171,1
GNSS 12	-4,7	155,5
GNSS 13	-24,6	154,5
GNSS 14	-	190,7
GNSS 15	-	192,9

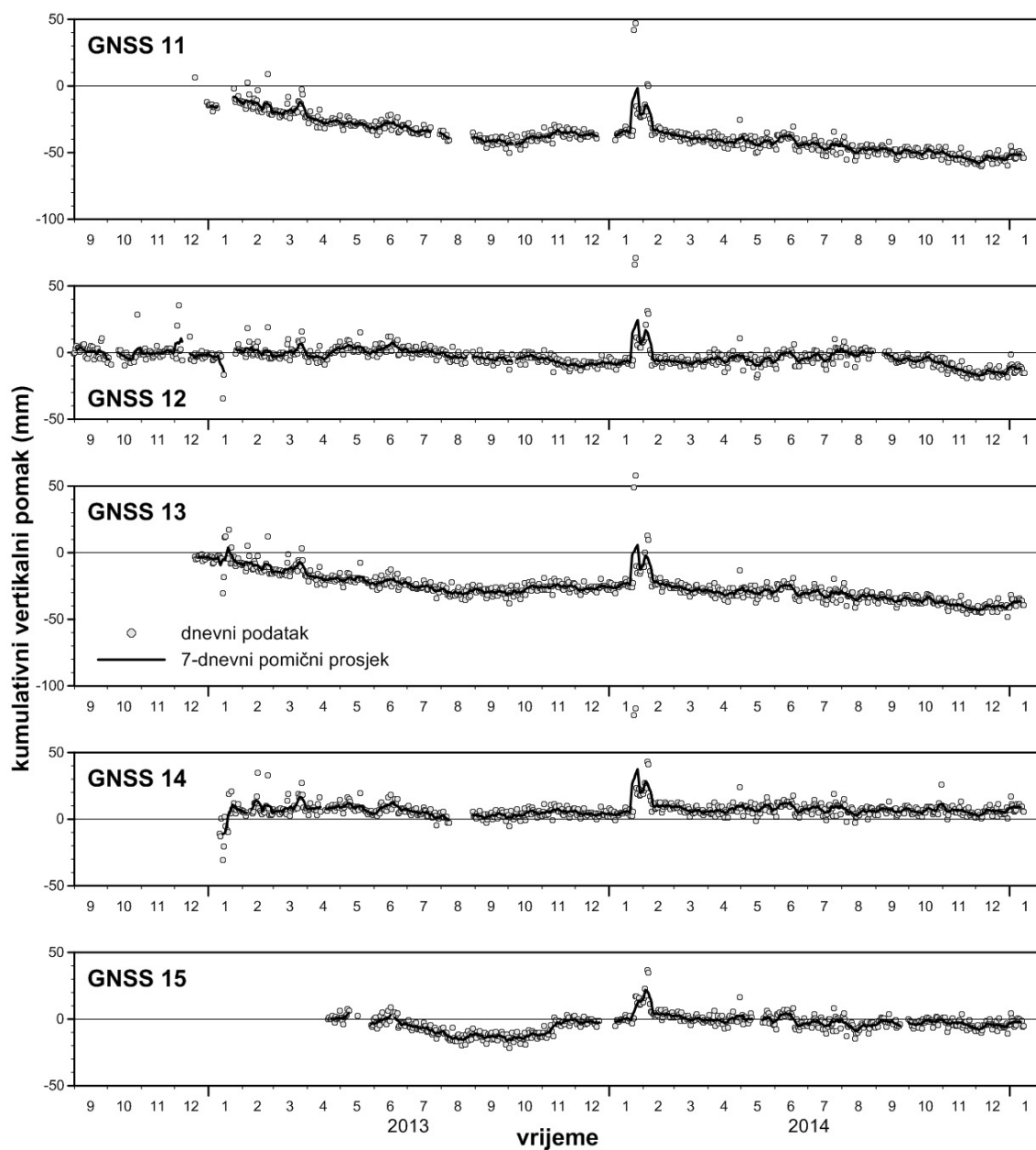
Tijekom razdoblja praćenja na svim GNSS stanicama zabilježeni su i vertikalni pomaci, osim na prijemnicima 01, 14 i 15, na kojima vertikalne pomake nije moguće odrediti jer su iznosi pomaka unutar izračunate pogreške mjerenja. Vremenski nizovi mjerenja vertikalnih pomaka GNSS stanicama prikazani su na slikama 5.6, 5.7 i 5.8. Najveći vertikalni pomak zabilježen je na stanici GNSS 09 i iznosio je 241,24 mm u vidu izdizanja stanice. Osim stanice GNSS 09, izdizanje je zabilježeno još samo na stanici GNSS 05 i iznosilo je 80,59 mm. Na svim ostalim stanicama zabilježeno je usijedanje, a najveći pomak iznosio je -128,34 mm na GNSS stanici 04. Pomaci ostalih stanica u vidu usijedanja iznosili su od -12,15 mm (GNSS 12) do -60,78 mm (GNSS 08).



Slika 5.6. Vremenski nizovi vertikalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 01, 02, 03, 04 i 05.



Slika 5.7. Vremenski nizovi vertikalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 06, 07, 08, 09 i 10.



Slika 5.8. Vremenski nizovi vertikalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 11, 12, 13, 14, 15.

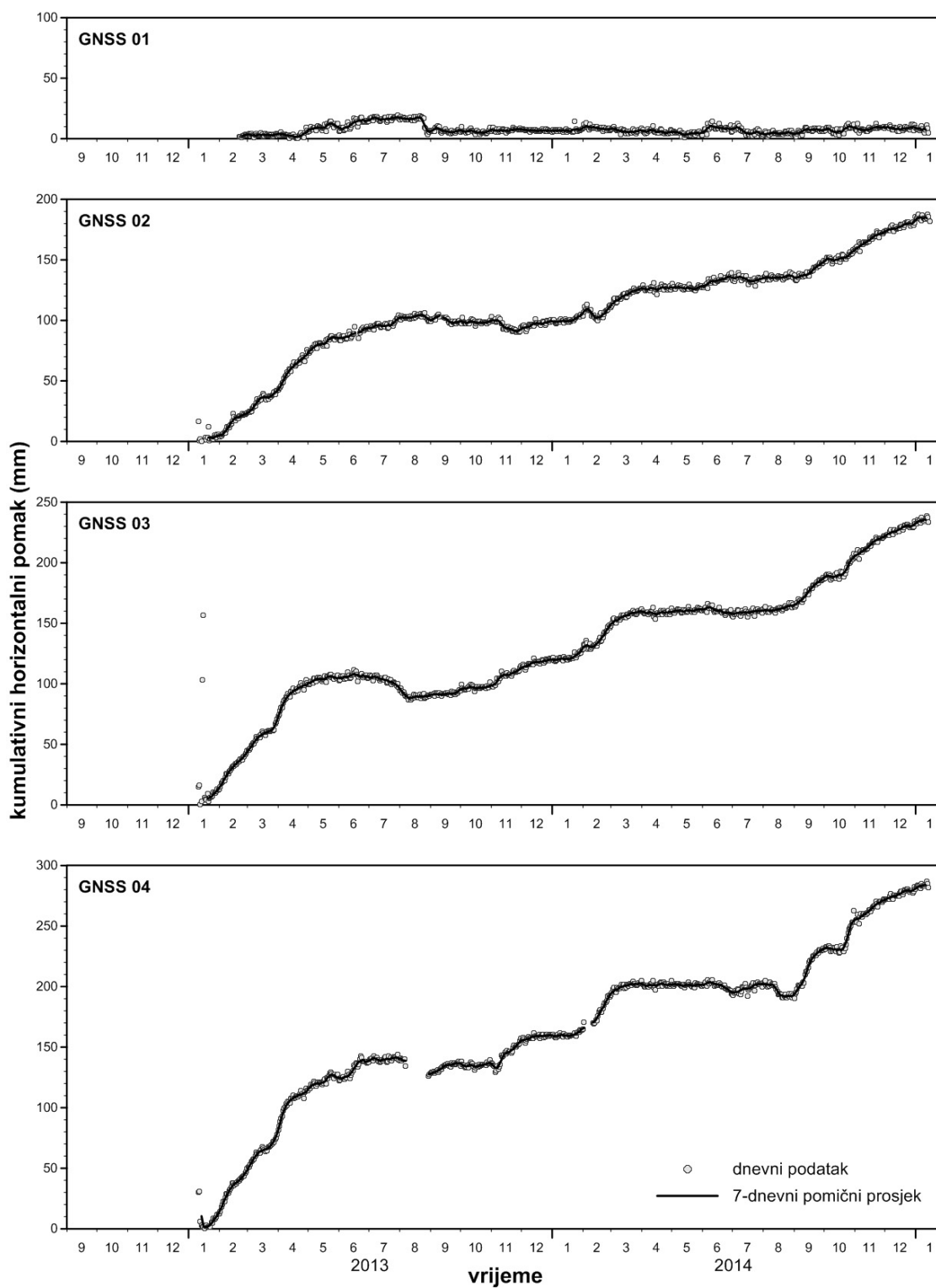
Odnos između horizontalnih i vertikalnih pomaka, izmjerenih GNSS stanicama 03, 06, 07, 08, 10 i 11, u središnjem i sjevernom dijelu klizišta ukazuju na to da je kut nagiba vektora pomaka od $-7,2^\circ$ do $-12,2^\circ$ (tablica 5.4). Manji omjer između horizontalnih i vertikalnih pomaka, odnosno nešto veći kut nagiba (od $-16,3^\circ$ do $-24,6^\circ$), utvrđen je na stanicama GNSS 02 i 13 i ukazuje na zonu usijedanja na sjevernom i sjeverozapadnom dijelu klizišta, odnosno na pojavu grabena u zoni južno od glavne pukotine. Još manji omjer između horizontalnih i vertikalnih pomaka s kutom nagiba vektora pomaka od $-24,8^\circ$, utvrđen je na stanici GNSS 04, a posljedica je lokalnog usijedanja uz vlačnu pukotinu u istočnom dijelu klizišta (slika 3.3b). Pozitivne vrijednosti kuta nagiba vektora pomaka ($17,9^\circ$) i izdizanje,

izmjereno na stanici GNSS 05, posljedica je izdizanja u zoni akumulacije, relativno blizu stope klizišta. Mala negativna vrijednost kuta nagiba vektora pomaka ($-4,7^\circ$) izmjerena na stanici GNSS 12 ukazuje na zonu usijedanja, blizu prijelaza u zonu akumulacije. Relativno veliko izdizanje, odnosno veliki pozitivni kut nagiba vektora pomaka od $29,2^\circ$, utvrđen na stanici GNSS 09, ukazuje da se vjerojatno radi o zoni lokalnog izdizanja u središnjem dijelu klizišta, odnosno o zoni kompresije nastale na granici dvaju blokova u kliznom tijelu.

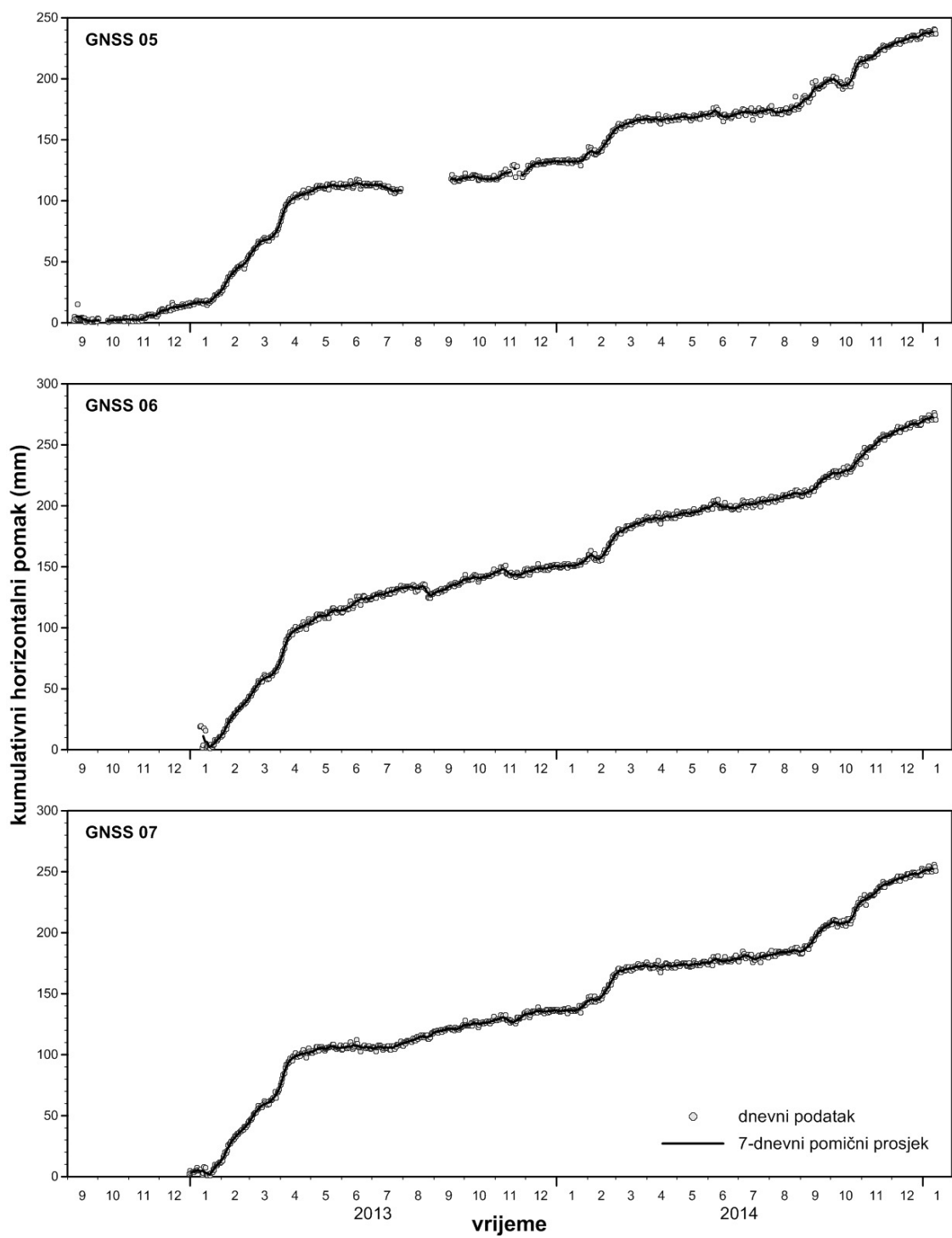
Zbog malog nagiba klizne plohe, veličina ukupnih kumulativnih prostornih pomaka uglavnom je neznatno veća od kumulativnih horizontalnih pomaka, a horizontalna komponenta pomaka iznosi od 95,55% do 99,97% ukupnih prostornih pomaka. Nešto manji udio horizontalne komponente pomaka u ukupnim prostornim pomacima (od 87,28 do 90,93%) zabilježen je na GNSS prijemnicima 04, 09 i 13, koji se nalaze u zonama lokalnih usijedanja i izdizanja. U daljnjem tekstu i analizama koristiti će se vrijednosti horizontalnih komponenti pomaka za analize gibanja klizišta.

5.1.1.2. Obrasci gibanja

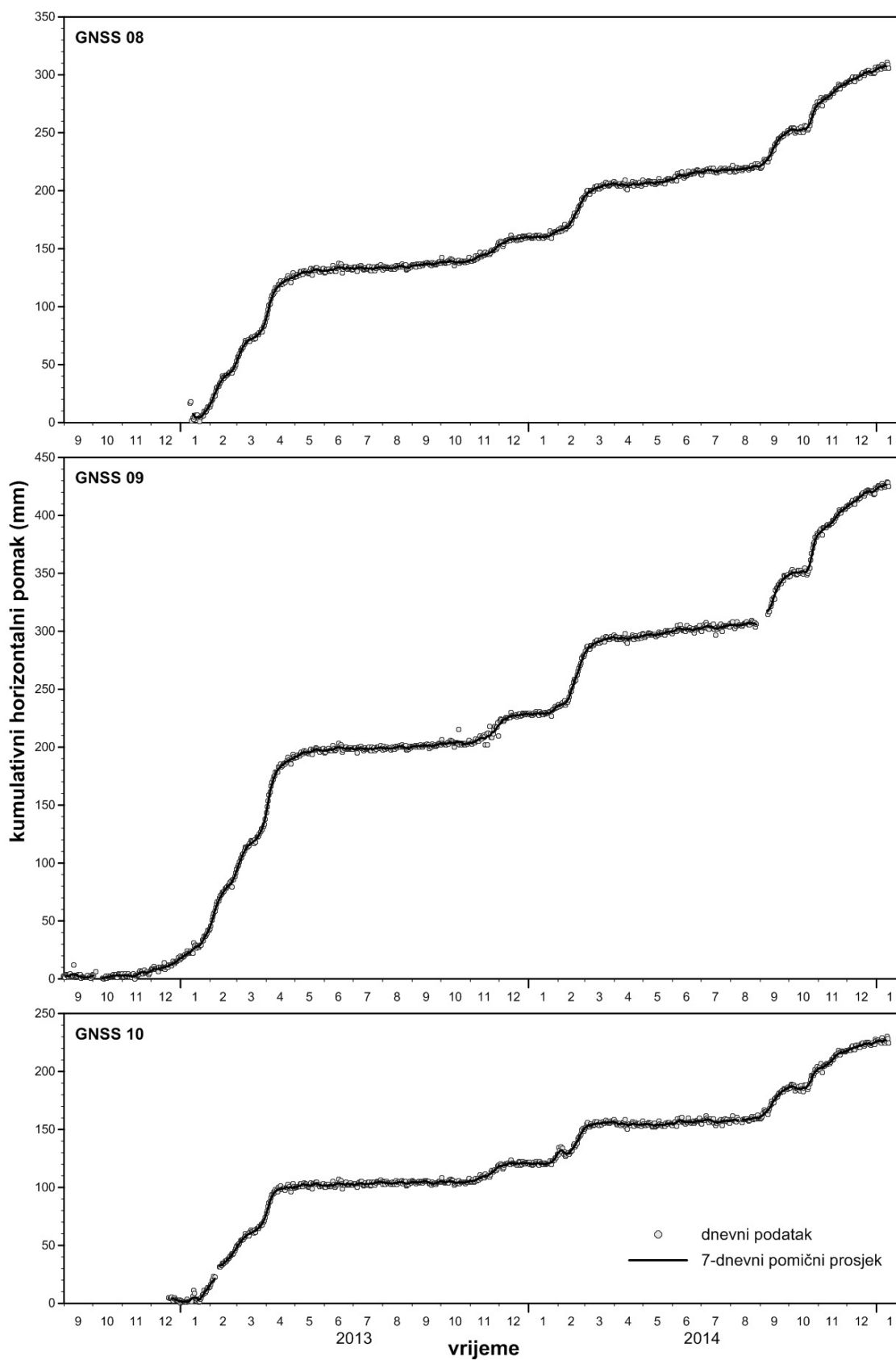
Obrasci gibanja klizišta Kostanjek određeni su na temelju vremenskih nizova podataka mjerenja GNSS stanica. Vremenski nizovi dnevnih kumulativnih horizontalnih pomaka i kumulativnih horizontalnih pomaka dobivenih pomoću 7-dnevnih pomičnih prosjeka prikazani su na slikama 5.9, 5.10, 5.11 i 5.12. Iz dijagrama vremenskih nizova vidljivo je da pomaci za većinu GNSS prijemnika nisu jednoliki u vremenu, odnosno da se brzine gibanja mijenjaju u vremenu. Općenito se može zaključiti da postoje dva glavna obrasca gibanja, a to su: (1) duža razdoblja mirovanja ili sporijeg gibanja, koja obično traju više mjeseci; te (2) relativno kratka razdoblja povećanih brzina ili bržeg gibanja, uobičajenog trajanja od nekoliko tjedana. Ova dva obrasca gibanja generalno predstavljaju fazu povremenih reaktivacija i aktivnog klizanja prema Leroueil i dr. (1996), odnosno fazu reaktivacije prema Fell (2000), u kojoj klizno tijelo klizi po potpuno razvijenoj kliznoj plohi. Obrasci bržeg i sporijeg gibanja klizišta Kostanjek slični su obrascima bržeg i sporijeg gibanja koje su na klizištu Utiku opisali Massey i dr. (2013) i koji smatraju da obrazac bržeg gibanja odgovara obrascu naglog gibanju prema Allison i Brunnsden (1990).



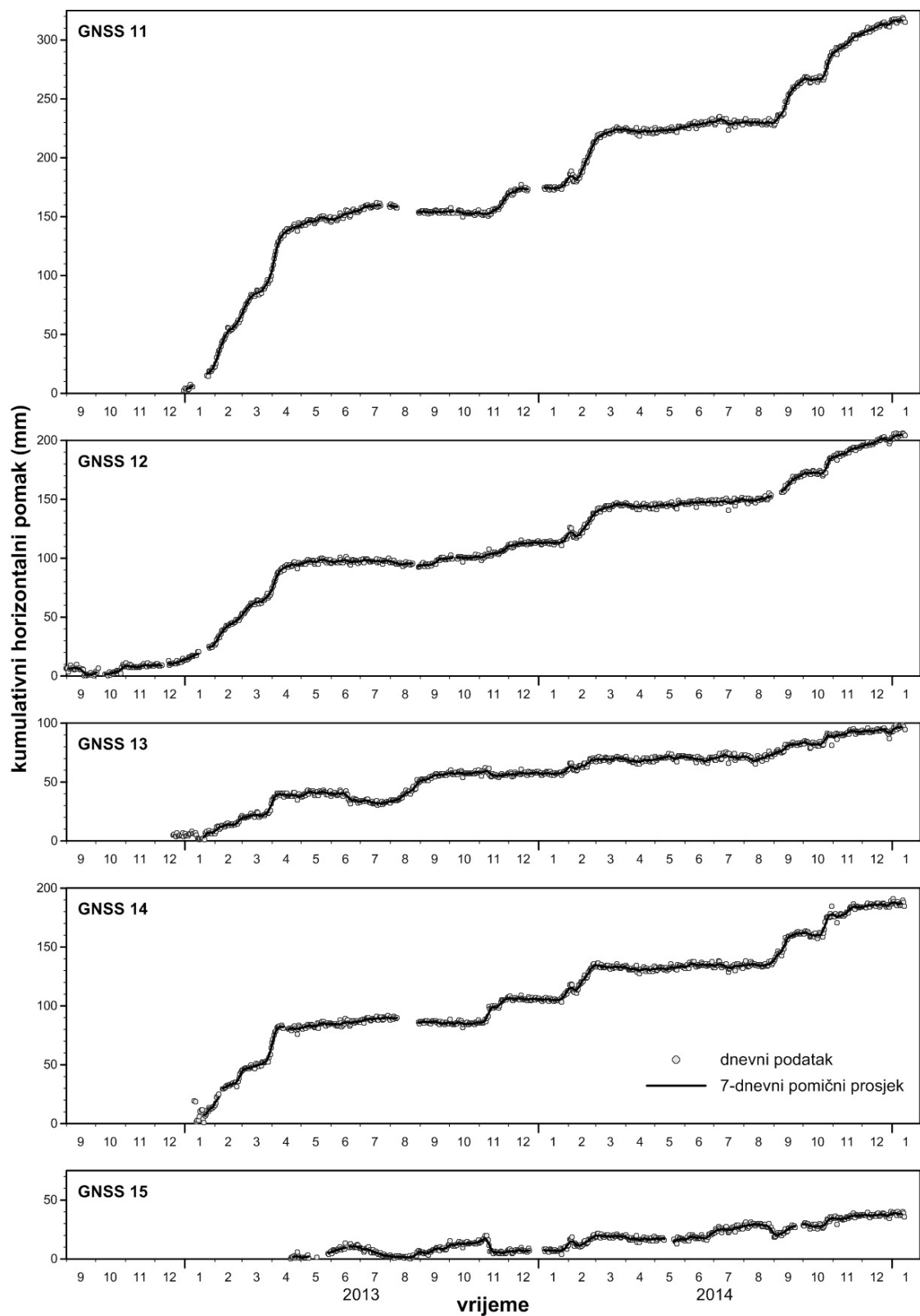
Slika 5.9. Vremenski nizovi horizontalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 01, 02, 03 i 04.



Slika 5.10. Vremenski nizovi horizontalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 05, 06 i 07.

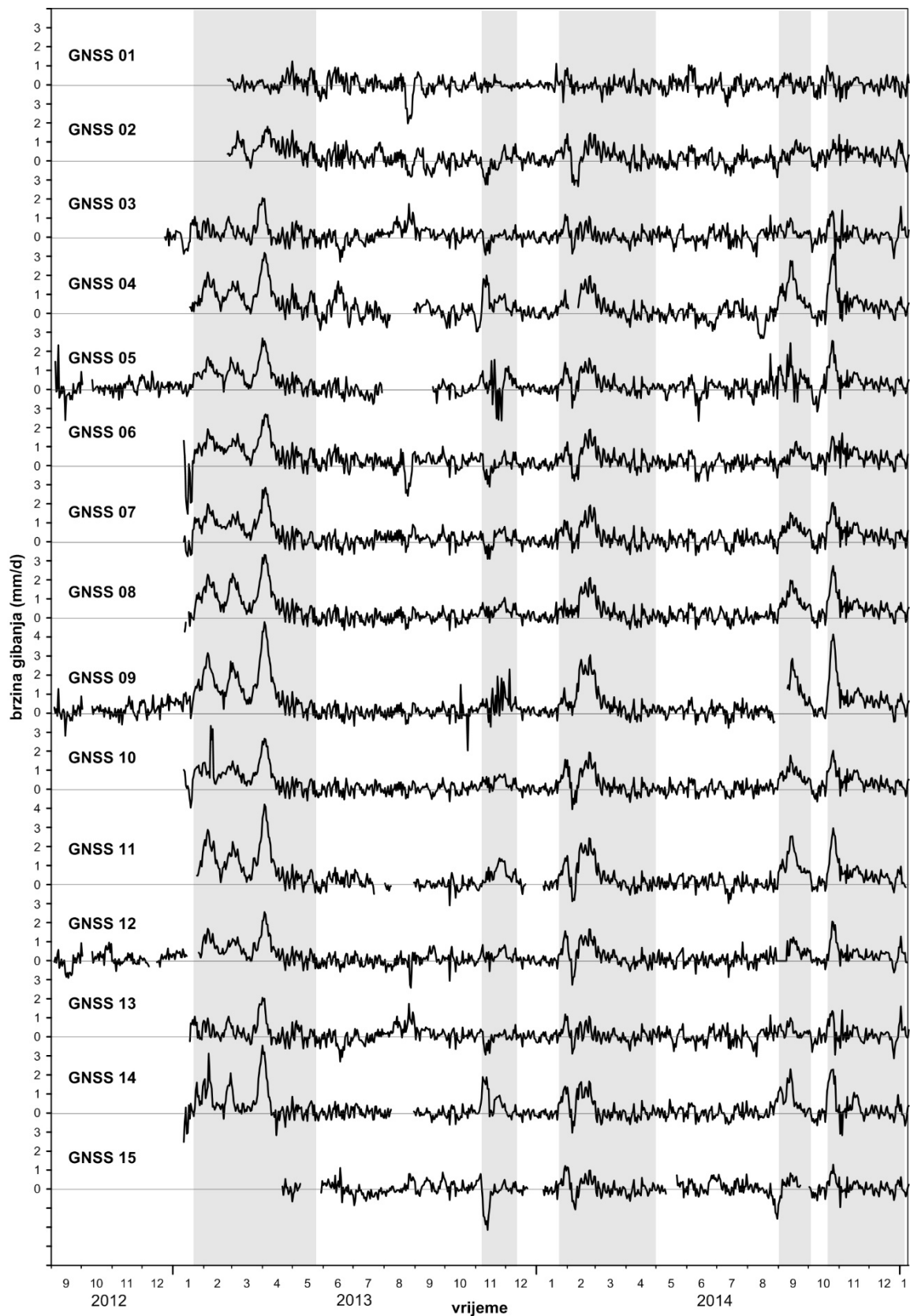


Slika 5.11. Vremenski nizovi horizontalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 08, 09 i 10.



Slika 5.12. Vremenski nizovi horizontalnih pomaka izmjerenih GNSS stanicama 11, 12, 13, 14 i 115.

Statistički značajna razdoblja sporijeg i bržeg gibanja određena su analizom točke promjene u vremenu, čije su teorijske osnove prikazane u poglavlju 4.2.1. Analiza je primijenjena na vremenske nizove brzina izračunatih iz podataka kumulativnih horizontalnih pomaka dobivenih pomoću 7-dnevnih pomičnih prosjeka. U analizi su korišteni podaci mjerenja stanica GNSS 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12 i 14 koji pokazuju vrlo slične obrasce gibanja (slike 5.9, 5.10, 5.11 i 5.12), a na kojima su ujedno izmjereni i najveći pomaci, odnosno brzine, te se stoga smatraju reprezentativnim za gibanje klizišta Kostanjek. Podaci mjerenja GNSS stanicama 02, 13 i 15, koje se nalaze uz rubove klizišta, nisu uzeti u obzir jer su njihovi pomaci relativno mali, a karakteristični obrasci nisu dovoljno izraženi što bi utjecalo na točnost analize točke promjene. Analizom podataka određeno je ukupno deset točaka promjene koje ukazuju na promjenu u brzinama gibanja klizišta Kostanjek. Ove točke promjene izdvajaju šest razdoblja sporijeg gibanja i pet razdoblja bržeg gibanja s različitim iznosima brzina (slika 5.13) i kumulativnog pomaka.



Slika 5.13. Vremenski nizovi brzina (7-dnevni pomični prosjeci) određeni na temelju mjerenja GNSS stanica s označenim razdobljima bržeg (osjenčano sivom bojom) i sporijeg gibanja (osjenčano bijelom bojom) klizišta Kostanjek.

5.1.1.2.1. Obrazac sporijeg gibanja

Šest razdoblja sporijeg gibanja, ukupnog trajanja 525 dana, prikazana su u tablici 5.5. Posljednje razdoblje sporog gibanja (VI) trajalo je vrlo kratko (9 dana) te je izuzeto iz daljnjih razmatranja. Razdoblja sporijeg gibanja odnose se na ukupno 61% razdoblja pokrivenog GNSS praćenjem, a trajala su od 15 do 165 dana, pri čemu su iznosi pomaka, odnosno brzine gibanja varirale od stanja mirovanja do 6 mm/mj (tablice 5.6 i 5.7).

Tijekom III. i V. razdoblja, koja su trajala vrlo kratko u odnosu na ostala razdoblja sporijeg gibanja, odnosno 41 i 15 dana, nisu zabilježeni statistički značajni pomaci, odnosno pomaci veći od utvrđene pogreške mjerenja. U III. razdoblju samo je stanica GNSS 03 izmjerila pomak nešto veći od utvrđene pogreške mjerenja koji je iznosio 4,4 mm. U V. razdoblju izmjeren je pomak od -4,2 mm stanicom GNSS 05, ali kako je taj podatak veoma blizak pogrešci mjerenja ($\pm 4,0$ mm), usvojeno je da je i to posljedica pogreške mjerenja. Također, za sve izmjerene negativne pomake pretpostavljeno je da su posljedica sezonskih uvjeta ili lokalnih deformacija. Ove promjene, mogu se uočiti na slikama 5.1, 5.2, 5.3 i 5.4 gdje se vidi da tijekom razdoblja sporijeg gibanja dolazi do većeg rasipanja kumulativnih pomaka, a time i otklona smjera pomaka GNSS stanica od njihovog generalnog smjera gibanja.

Tijekom I. razdoblja sporijeg gibanja, koje je trajalo 143 dana i kada su mjerenja provedena samo na stanicama GNSS 05, 09 i 12, izmjeren je pomak na sva tri uređaja. Pomak je iznosio od 17,3 mm (GNSS 05) do 28,8 mm (GNSS 09), a brzine su iznosile od 0,12 mm/dan do 0,2 mm/dan. Tijekom II. razdoblja, koje je trajalo 165 dana, zabilježen je pomak na stanicama GNSS 02, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 13 i 15, a iznosio je od 6,3 mm (GNSS 04) do 31,9 mm (GNSS 06). Brzine su prosječno iznosile od 0,04 mm/dan do 0,19 mm/dan. Tijekom IV. razdoblja, koje je trajalo 152 dana, zabilježen je pomak na svim GNSS stanicama, osim na 01 i 04. Pomak je iznosio od 3,9 mm (GNSS 13) do 20,7 mm (GNSS 06), a prosječne brzine su iznosile od 0,03 mm/dan do 0,14 mm/dan. Iz ovih podataka se može zaključiti da su brzine tijekom razdoblja sporijeg gibanja, kao i u razdobljima bržeg gibanja, veće u središnjem dijelu klizišta nego na rubnim dijelovima klizišta.

Tablica 5.5. Razdoblja sporijeg gibanja na klizištu Kostanjek od rujna 2012. do siječnja 2015. godine.

razdoblje sporog gibanja		
razdoblje	od - do	trajanje (dani)
I	1.9.2012. - 21.1.2013.	143
II	25.5. - 5.11.2013.	165
III	13.12.2013. - 22.1.2014.	41
IV	2.4. - 31.8.2014.	152
V	4.10. - 18.10.2014.	15
VI	6.1. - 14.1.2015.	9

Tablica 5.6. Kumulativni horizontalni pomaci tijekom razdoblja sporijeg gibanja, izraženi u milimetrima.

oznaka GNSS stanice	kumulativni horizontalni pomaci za razdoblja sporog gibanja (mm)				
	I	II	III	IV	V
GNSS 01		-5,7*	0,6*	-2,2*	-2,5*
GNSS 02		13,8	3,5*	9,1	0,4*
GNSS 03		-5,9*	4,4	5,0	0,4*
GNSS 04		6,3	1,2*	-8,7*	-2,0*
GNSS 05	17,3	6,6	1,3*	11,0	-4,2*
GNSS 06		31,9	3,0*	20,7	1,8*
GNSS 07		23,0	0,9*	11,6	-0,6*
GNSS 08		8,6	2,9*	15,0	0,1*
GNSS 09	28,8	6,4	2,6*	11,4	0,8*
GNSS 10		2,7*	-0,3*	3,9	-1,7*
GNSS 11		3,2*	0,4*	5,3	-0,7*
GNSS 12	18,9	2,5*	0,2*	6,7	-0,4*
GNSS 13		17,2	-0,2*	3,9	-1,8
GNSS 14		1,2*	-1,6*	5,2	-2,6*
GNSS 15		16,5	-0,7*	4,0	-2,3*

*izmjereni pomak je manji od pogreške mjerenja GNSS stanice ili je posljedica sezonskih promjena i lokalnih deformacija.

Tablica 5.7. Prosječne brzine gibanja tijekom razdoblja sporijeg gibanja.

oznaka GNSS stanice	prosječne brzine gibanja za razdoblja sporog gibanja (mm/dan / mm/mj)				
	I	II	III	IV	V
GNSS 01	-	-	-	-	-
GNSS 02	-	0,08 / 2,5	-	0,06 / 1,0	-
GNSS 03	-	-	0,03 / 0,8	0,03 / 0,99	-
GNSS 04	-	0,04 / 1,15	-	-	-
GNSS 05	0,12 / 3,63	0,04 / 1,2	-	0,07 / 2,17	-
GNSS 06	-	0,19 / 5,8	-	0,14 / 4,09	-
GNSS 07	-	0,14 / 4,18	-	0,08 / 2,29	-
GNSS 08	-	0,05 / 1,56	-	0,1 / 2,96	-
GNSS 09	0,2 / 6,04	0,04 / 1,16	-	0,08 / 2,25	-
GNSS 10	-	-	-	0,03 / 0,77	-
GNSS 11	-	-	-	0,04 / 1,05	-
GNSS 12	0,13 / 3,97	-	-	0,04 / 1,32	-
GNSS 13	-	0,1 / 3,13	-	0,03 / 0,77	-
GNSS 14	-	-	-	0,03 / 1,03	-
GNSS 15	-	0,1 / 3,0	-	0,03 / 0,8	-

5.1.1.2.2. Obrazac bržeg gibanja

Uzroci bržeg gibanja klizišta Kostanje su intenzivne oborine i promjene razine podzemne vode, odnosno pornog tlaka u kliznom tijelu, koje su opisane su u poglavlju 5.2. Razdoblja povećanih brzina trajala su od 33 do 123 dana (tablica 5.8), a ukupno su trajala 340 dana, što iznosi 39% ukupnog vremena pokrivenog GNSS praćenjem. Tijekom pet razdoblja bržeg gibanja najveći kumulativni horizontalni pomaci dogodili su se u prvom razdoblju koje je trajalo i najduže, od 22.1. do 24.5.2013., a iznosili su od 36,9 mm (GNSS 13) do 168,0 mm (GNSS 09), kao što je prikazano u tablici 5.9. Tijekom tog razdoblja maksimalne brzine klizanja su iznosile od 1,8 mm/dan (GNSS 02) do 4,8 mm/dan (GNSS 09), a navedene su u tablici 5.10. Najmanji kumulativni horizontalni pomaci dogodili su se u drugom razdoblju, koje je trajalo od 6.11. do 12.12.2013. Tijekom tog razdoblja na GNSS stanicama 02, 06, 13 i 15 nisu zabilježeni statistički značajni pomaci, dok je najveći pomak u iznosu od 21,4 mm zabilježen stanicom GNSS 09 (tablica 5.9). Tijekom navedenog razdoblja maksimalna brzina klizanja iznosila je 2,3 mm/dan, što je također zabilježeno mjerenjima na stanici GNSS 09 (tablica 5.10).

U daljnjem tekstu razdoblja bržeg gibanja biti će opisana za podatke mjerenja stanicom GNSS 08 koji se nalazi u središnjem dijelu klizišta i koja od svih GNSS stanica ima najveću preciznost, što je prikazano u poglavlju 5.1.1 (tablica 5.2). Osim toga na istoj lokaciji se nalaze senzori koji mjere oborine, razinu podzemne vode i porne tlakove u kliznom tijelu. Ovi podaci su također korišteni za uspostavljanje veze između brzine gibanja i opažanih parametara uzroka klizanja koji su prouzročili povećane brzine gibanja. Ukupni horizontalni pomak stanice GNSS 08 od siječnja 2013. do siječnja 2015. iznosio je 307,34 mm. Pomak ove GNSS stanice tijekom pet razdoblja bržeg gibanja iznosio je 273,79 mm, što čini 89% ukupnog pomaka tijekom cijelog razdoblja mjerenja. Vremenski nizovi kumulativnih horizontalnih pomaka stanice GNSS 08, 7-dnevni pomični prosjeci brzine te akceleracije gibanja za svih pet razdoblja bržeg gibanja prikazani su na slikama 5.14 i 5.15. Prikaz ukazuje na sličan obrazac ponašanja tijekom svih pet razdoblja. Razdoblje bržeg gibanja započinje postupnim ili naglim ubrzanjem, nakon kojeg slijedi razdoblje ujednačenih brzina, zatim razdoblje naglog usporavanja te potom sporog usporavanja i malih brzina. Slične obrasce ponašanja na dubokom translacijskom klizištu Utiku opisao je Massey (2010).

Tijekom I. razdoblja bržeg gibanja kumulativni horizontalni pomak izmjeren stanicom GNSS 08 iznosio je 127,4 mm. U ovom razdoblju mogu se izdvojiti i tri zasebna razdoblja većih brzina, odijeljenih razdobljima manjih brzina jasno vidljivih na slici 5.14: (1) razdoblje Ia koje traje od 22.1. do 21.2.2013.; (2) razdoblje Ib koje traje od 22.2. do 20.3.2013.; (3) razdoblje Ic koje traje od 20.3. do 24.5.2013. Ova razdoblja jasno se uočavaju i na podacima opažanja svih ostalih GNSS stanica, osim na podacima GNSS stanica 01 i 15. Tijekom razdoblja Ia i Ib maksimalne dnevne brzine iznosile su 2,3 mm/dan, dok je tijekom razdoblja Ic maksimalna zabilježena brzina iznosila 3,3 mm/dan.

Kumulativni horizontalni pomaci i maksimalne brzine gibanja, izračunate za mjerenja stanicom GNSS 08 tijekom ostalih razdoblja bržeg gibanja prikazani su u tablicama 5.9 i 5.10. Općenito se može reći da tijekom II., III., IV. i V. razdoblja bržeg gibanja dominira po jedno razdoblje većih brzina (slika 5.13 i 5.14). Slične distribucije brzina jasno se uočavaju i na podacima opažanja svih ostalih GNSS stanica, osim na podacima GNSS stanica 01 i 15.

Tablica 5.8. Razdoblja bržeg gibanja na klizištu Kostanjek u razdoblju od rujna 2012. do siječnja 2015.

razdoblje bržeg gibanja		
	od - do	trajanje (dani)
I	22.1. - 24.5.2013.	123
II	6.11. - 12.12.2013.	37
III	23.1. - 1.4.2014.	69
IV	1.9. - 3.10.2014.	33
V	19.10.2014. - 5.1.2015.	78

Tablica 5.9. Kumulativni horizontalni pomaci tijekom razdoblja bržeg gibanja.

oznaka GNSS stanice	kumulativni horizontalni pomaci za razdoblja bržeg gibanja (mm)				
	I	II	III	IV	V
GNSS 01	12,2*	0,1**	-0,7**	4,0**	2,32**
GNSS 02	82,1	-3,0**	25,2	15,3	33,92
GNSS 03	100,0	16,1	37,5	24,0	44,75
GNSS 04	119,0	25,3	41,9	38,3	52,70
GNSS 05	94,7	10,2	35,0	20,3	42,88
GNSS 06	111,4	1,7**	36,8	17,2	42,45
GNSS 07	103,6	5,6	36,2	24,2	42,78
GNSS 08	127,4	16,6	44,9	31,4	51,67
GNSS 09	168,0	21,4	65,2	43,1	73,99
GNSS 10	98,9	14,8	35,4	26,8	40,62
GNSS 11	148,8	21,5	49,6	37,2	50,06
GNSS 12	98,4	11,1	32,6	19,5	32,29
GNSS 13	36,9	-1,7	12,1	10,2	13,88
GNSS 14	77,4	19,6	27,8	23,6	27,56
GNSS 15	5,0*	-9,9	11,9	8,2	11,62

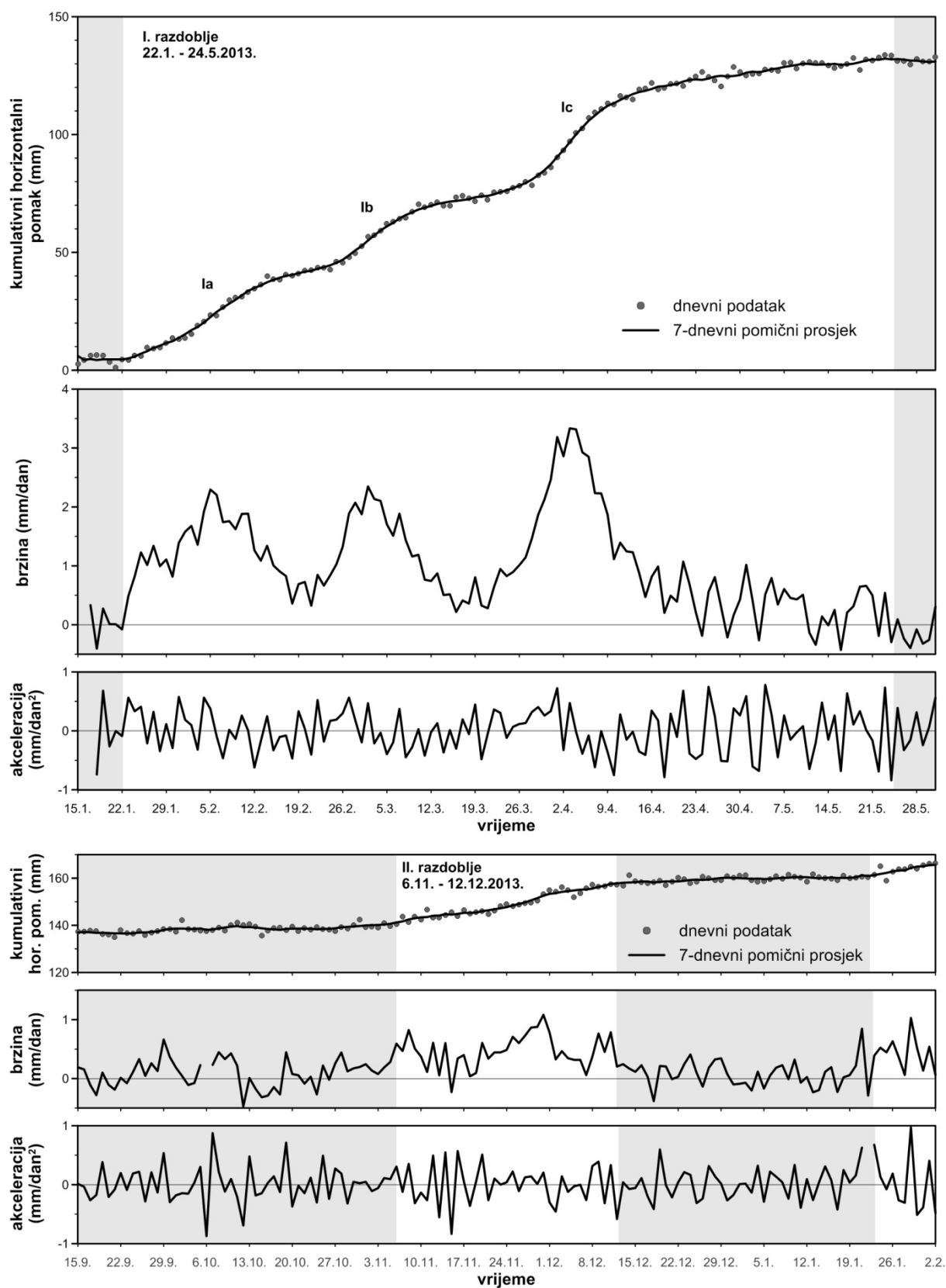
*mjerenja GNSS stanicom ne obuhvaćaju čitavo razdoblje bržeg gibanja.

**pomak nije statistički značajan jer je manji od pogreške mjerenja.

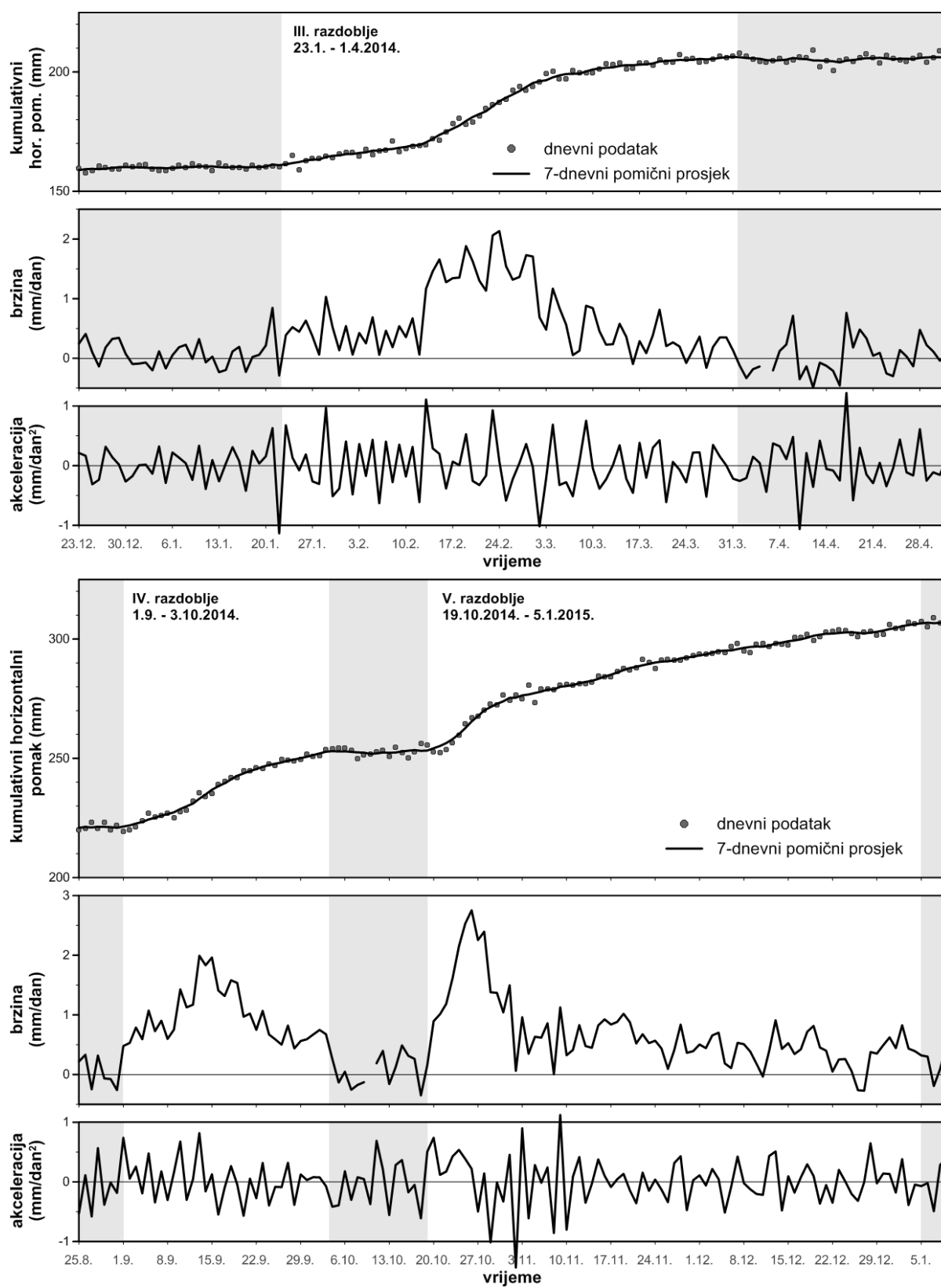
Tablica 5.10. Maksimalne brzine gibanja tijekom razdoblja bržeg gibanja.

oznaka GNSS stanice	maksimalne brzine gibanja tijekom razdoblja bržeg gibanja (mm/dan)				
	I	II	III	IV	V
GNSS 01	1,2*	-	-	-	-
GNSS 02	1,8	-	1,5	1,1	1,4
GNSS 03	2,6	1,5	1,8	1,4	1,9
GNSS 04	3,2	2,0	2,0	2,8	3,3
GNSS 05	2,7	1,6	1,7	2,5	2,6
GNSS 06	2,7	-	1,9	1,3	1,7
GNSS 07	2,9	0,8	1,9	1,6	2,1
GNSS 08	3,3	1,1	2,1	2,0	2,8
GNSS 09	4,8	2,3	3,0	2,9	4,1
GNSS 10	2,8	0,9	2,1	1,9	2,2
GNSS 11	4,2	1,4	2,4	2,5	2,9
GNSS 12	2,6	0,8	1,7	1,2	2,1
GNSS 13	2,1	0,6	1,2	1,0	1,4
GNSS 14	3,6	1,9	1,7	2,3	2,3
GNSS 15	1,1*	0,8	1,2	0,9	1,3

*mjerjenja GNSS stanicom ne obuhvaćaju čitavo razdoblje bržeg gibanja.



Slika 5.14. Vremenski nizovi kumulativnih horizontalnih pomaka, brzina i akceleracija gibanja, izmjenjenih stanicom GNSS 08, u I. i II. razdoblju bržeg gibanja. Sivo su osjenčana razdoblja sporijeg gibanja.

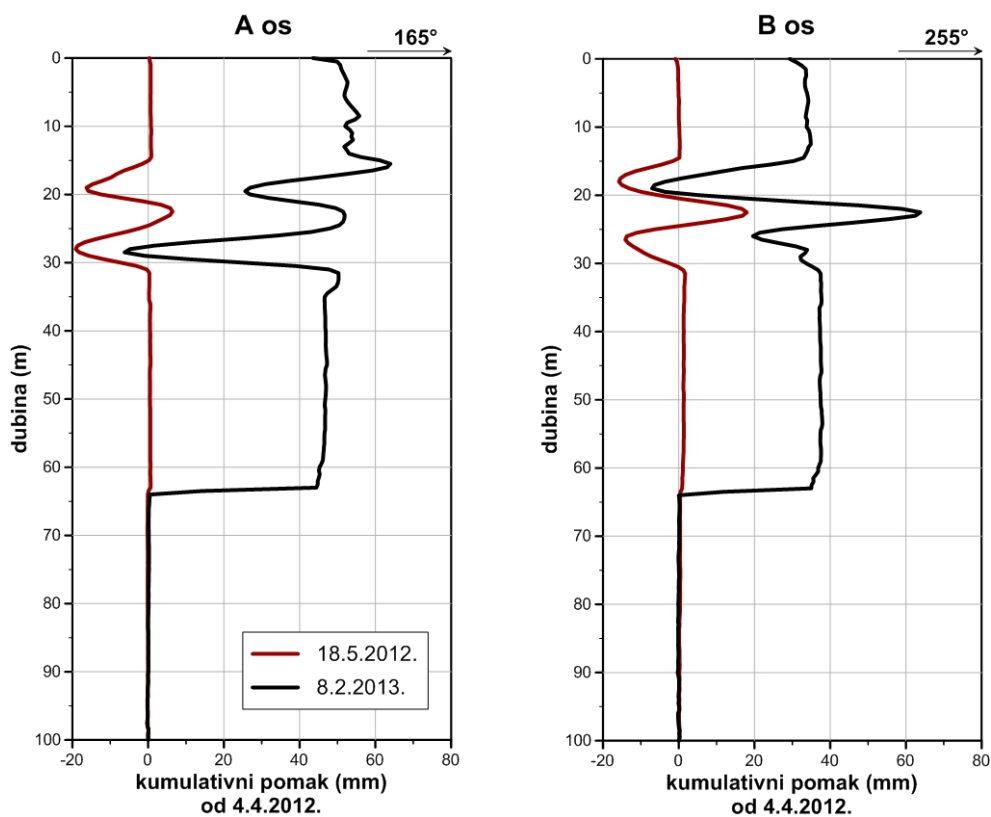


Slika 5.15. Vremenski nizovi kumulativnih horizontalnih pomaka, brzina i akceleracija gibanja, izmjenjenih stanicom GNSS 08, u III., IV. i V. razdoblju bržeg gibanja. Sivo su osjenčana razdoblja sporijeg gibanja.

5.1.2. Podzemni pomaci

Na temelju četiri inklinometarska mjerenja (nulto i tri mjerenja) određena je dubina klizne plohe u središnjem dijelu klizišta. Mjerenja su provedena u bušotini B-1 dubine 100 m, u koju je 20.3.2012. ugrađena inklinometarska cijev. Inklinometarski profili (slika 5.16) mjerenja od 18.5.2012. i 8.2.2013. ukazuju da kliznu plohu predstavlja relativno tanka zona smicanja na dubini između 62 i 63 metra. Ova zona smicanja nalazi se u gornjem dijelu sarmatskih naslaga, odnosno unutar glinovitih i tanko laminiranih lapora (varvita). Zona smicanja uočena je i na jezgri bušotine kao tanki proslojak gline visoke plastičnosti u intervalu između 62 i 63 metra (slika 5.17).

Ukupan pomak izmjeren inklinometrom između travnja 2012. i veljače 2013. godine iznosi 60 mm. Deformacije iznad klizne plohe mogu se smatrati zanemarivima što ukazuje da se središnji dio klizišta ponaša kao relativno kruti blok koji klizi po relativno tankoj zoni smicanja, odnosno kliznoj plohi. Deformacije u zoni između 15 i 30 metara vjerojatno su nastale kao posljedica deformacije inklinometarske cijevi zbog šupljina prisutnih u prostoru između inklinometarske cijevi i okolnog tla/stijene. Slične deformacije inklinometarske cijevi opisali su Stark i Choi (2008). Posljednje mjerenje inklinometrom provedeno je 19.3.2013. pri čemu inklinometar nije mogao proći kroz inklinometarsku cijev zbog prevelike deformacije na dubini od 62 m.



Slika 5.16. Pomaci izmjereni inklinometrom u bušotini B-1. Nulto mjerenje provedeno je 4.4.2012.

Azimut smjera pomaka u razini klizne plohe, ali i na površini terena, određen je kao rezultanta vektora kumulativnih pomaka po osi A i osi B inklinometarske cijevi i iznosi 203° . Azimut smjera pomaka u inklinometru sličan je azimutu smjera pomaka određenom na temelju GNSS mjerenja stanicom 08, a koji iznosi $189,7^\circ$. S obzirom da je udaljenost između ušća inklinometarske cijevi i GNSS stanice 08 svega dva metara, proizlazi da pomaci GNSS mjerenja na površini mogu aproksimirati pomake na kliznoj plohi na dubini između 62 do 63 metra.



Slika 5.17. Interval jezgre bušotine B-1 od 60 do 65 m s označenom zonom klizne plohe.

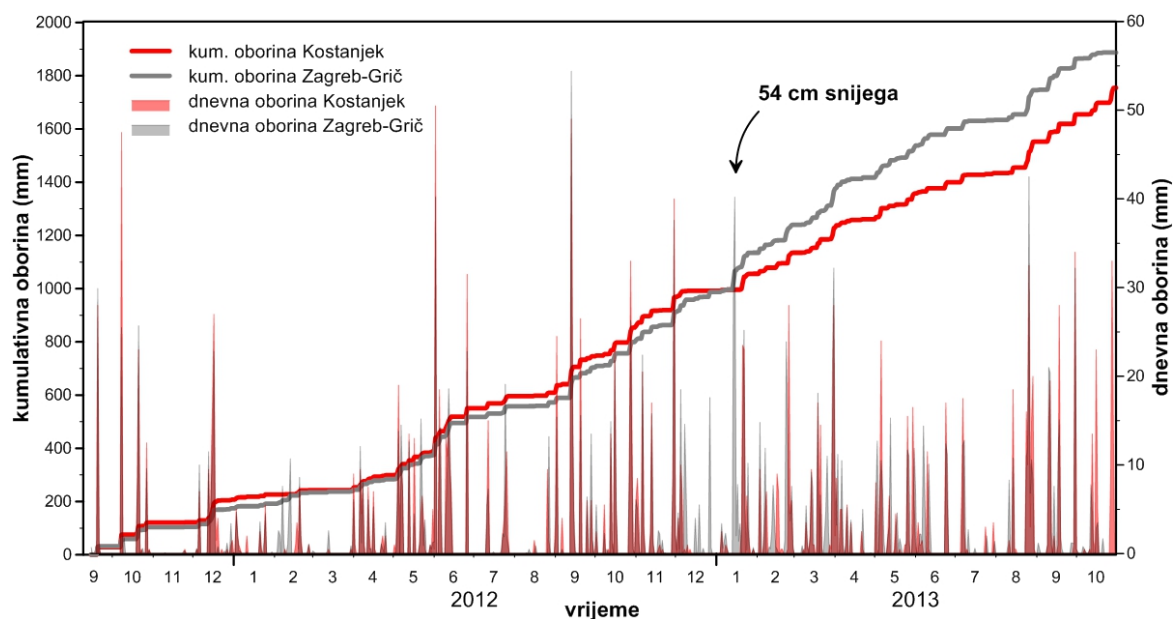
5.2. Uzroci klizanja

Uzroci klizanja koji se prate na klizištu Kostanjek su oborine i promjene razine podzemne vode, a ujedno predstavljaju i najčešće uzroke nastanka i gibanja klizišta u Gradu Zagrebu, što je osobito došlo do izražaja tijekom proljeća 2013. godine (Bernat i dr., 2014a; Bernat i dr., 2014b). Kontinuirano praćenje kiše na klizištu Kostanjek provodi se jednim ombrografom postavljenim u središnjem dijelu klizišta u rujnu 2011. godine, a kontinuirano praćenje razina podzemne vode i pornih tlakova provodi se mrežom senzora za mjerenje hidrostatskog tlaka raspoređenim u različitim dijelovima klizišta, kao što je opisano u poglavlju 4.1.2. Kontinuirana praćenja podzemne vode upotpunjena su povremenim praćenjem razina podzemne vode u kopanim zdencima na 11 lokacija u razdoblju od 2011. do 2014. godine. Rezultati praćenja hidroloških parametara, odnosno oborina, i podzemne vode na klizištu Kostanjek zasebno su opisani u sljedećim poglavljima.

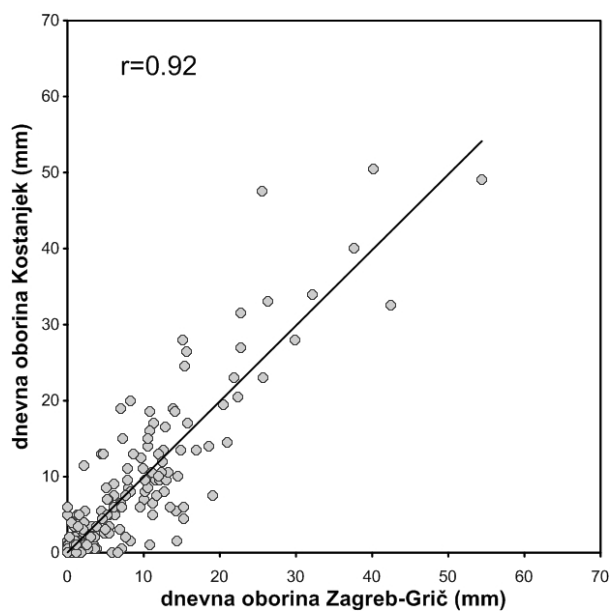
5.2.1. Oborine

Kao što je prethodno navedeno, podaci o količini kiše na području klizišta Kostanjek kontinuirano se mjere se od rujna 2011. ombrografom instaliranim u središnjem dijelu klizišta. U svrhu provjere kvalitete podataka, podaci s ombrografa uspoređeni su s podacima meteorološke postaje Zagreb-Grič. Meteorološka postaja Zagreb-Grič smještena je oko 9 km istočno, u sličnim geomorfološkim uvjetima kao i područje klizišta Kostanjek, na donjem dijelu obronaka planine Medvednica, neposredno uz Savsku ravnicu te na sličnoj nadmorskoj visini (157 m n.m.) kao i mjerna postaja na klizištu Kostanjek (200 m n.m.). Ukupna izmjerena količina oborine zabilježena na Kostanjeku od početka mjerenja do listopada 2013. godine iznosi 1.754 mm, dok je na postaji Zagreb-Grič, za isto razdoblje izmjereno 1.887 mm. Usporedba kumulativne oborine na klizištu Kostanjek i oborine s postaje Zagreb-Grič, za razdoblje od rujna 2011. do listopada 2013. prikazana je na slici 5.18. Listopad 2013. je uzet kao krajnji datum usporedbe podataka o oborinama na Kostanjeku i Griču, budući da je u studenom 2013. godine došlo do kvara ombrografa na Kostanjeku te su mjerenja nakon tog razdoblja tek djelomično točna, odnosno dio podataka mjerenja nedostaje. Razlika u kumulativnoj oborini između dvije mjerne postaje od gotovo 10%, za razdoblje od rujna 2011. do listopada 2013. godine, nastala je iz dva razloga (Krkač i dr., 2014d): (1) ombrograf ne može mjeriti kišu za vrijeme postojanja snježnog pokrivača, budući da snijeg onemogućuje dotjecanje kiše u lijevak ombrografa; (2) ombrograf može mjeriti količinu vode koja je nastala otapanjem snijega, međutim debljina snijega na lijevku ombrografa je u većini slučajeva manja od reprezentativne debljine snježnog pokrivača. Navedeni razlozi ukazuju na to da ombrograf ima ograničenu upotrebu tijekom razdoblja snježnih oborina te da je za bolje razumijevanje procesa koji se odvijaju na klizištu Kostanjek nužno koristiti podatke meteorološke s postaje Zagreb-Grič.

Provjera reprezentativnosti meteoroloških uvjeta na postaji Zagreb-Grič, za područje klizišta Kostanjek, napravljena je na temelju korelacije oborina s ove dvije lokacije, za razdoblje od rujna 2011. do siječnja 2015. godine (slika 5.19). Pri uspostavljanju korelacije izuzeti su podaci iz razdoblja sa snježnim pokrivačem (veljača i studeni 2012., siječanj, veljača i ožujak 2013.). Koeficijent korelacije za uspoređene podatke iznosi 0,92, što prema Šošić i Serdar (1992) ukazuje na čvrstu povezanost količina oborina na Kostanjeku i Griču.

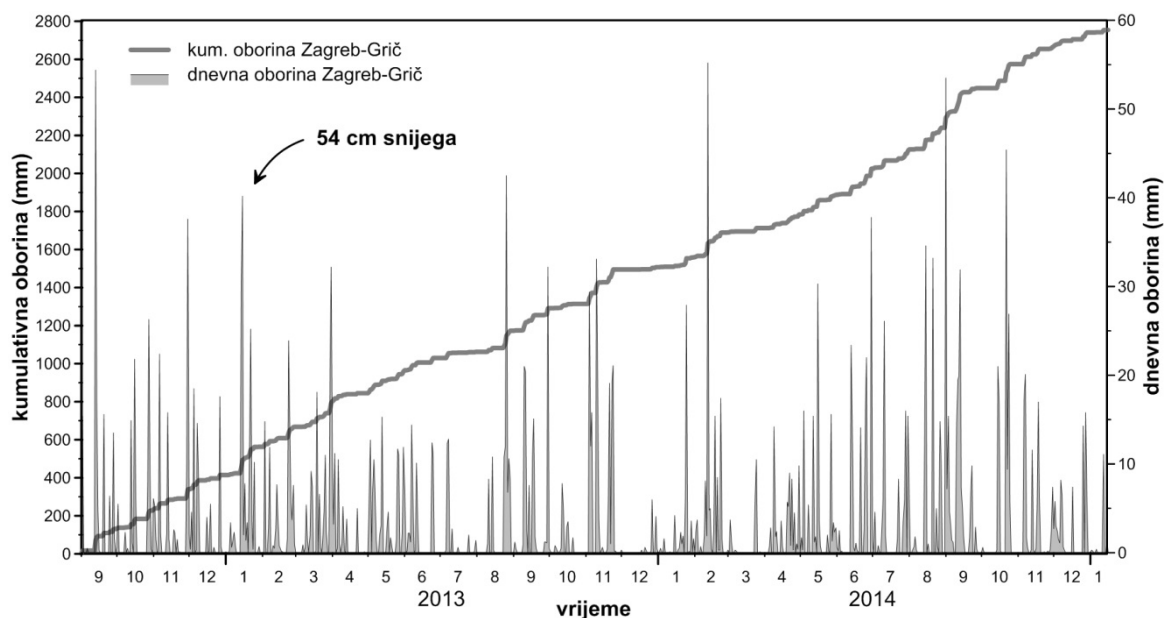


Slika 5.18. Kumulativne i dnevne oborine zabilježene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič i na ombrografu instaliranom na klizištu Kostanjek za razdoblje od rujna 2011. do listopada 2013. godine.



Slika 5.19. Korelacija dnevnih oborina s meteorološke postaje Zagreb-Grič i ombrograфа na klizištu Kostanjek za razdoblje od rujna 2011. do listopada 2013. godine.

Rezultati opažanja oborina s meteorološke postaje Zagreb-Grič opisani su za razdoblje od rujna 2012. do siječnja 2015., zbog toga što su za ovo razdoblje dostupni i rezultati GNSS praćenja (opisani u prethodnom poglavlju). Osim toga, u rujnu 2012. započeo je i novi hidrološki ciklus, nakon izrazito sušnog ljeta, kada je od sredine lipnja do kraja kolovoza palo 77,3 mm kiše (slika 5.18). Na slici 5.20 prikazane su dnevne i kumulativne oborine zabilježene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič od rujna 2012. do siječnja 2015. Ukupne i maksimalne oborine za isto razdoblje prikazane su u tablici 5.11. Najveća dnevna oborina u razdoblju praćenja GNSS prijemnicima na klizištu Kostanjek zabilježena na postaji Zagreb-Grič iznosila je 55,2 mm, a dogodila se 12.2.2014. Najduži oborinski događaj trajao je 7 dana, započeo je 10.9.2014. i tijekom tog tjedna palo je ukupno 100 mm kiše. Oborinski događaj predstavlja neprekidnu oborinu, odnosno oborinu tijekom koje nije bilo prekida duljih od 24 sata. Maksimalna mjesečna oborina zabilježena je u rujnu 2014., kada je palo 207,7 mm kiše. Tijekom zime 2012./2013. izmjereno je ukupno 156,5 cm snježnih oborina, a tijekom zime 2013./2014. ukupno 39,9 cm snježnih oborina.



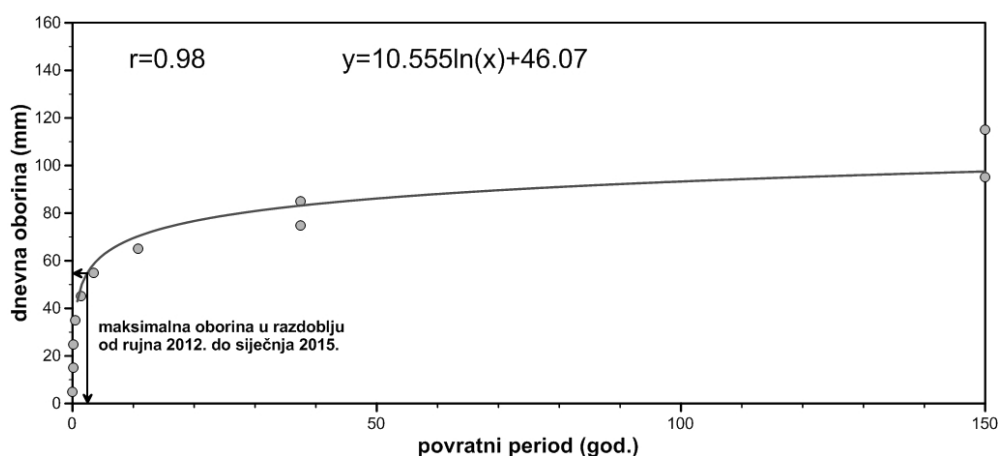
Slika 5.20. Dnevne i kumulativne oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič za razdoblje od rujna 2012. do siječnja 2015.

Tablica 5.11. Ukupne i maksimalne oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič za razdoblje od 1862. do 2015. te tijekom razdoblja praćenja klizišta Kostanjek (rujan 2012. - siječanj 2015.) i razdoblja od nastanka klizišta (1963. - 2012.).

razdoblje	kumulativna oborina (mm)	maksimalna dnevna oborina (mm) / datum	maksimalna mjesečna oborina (mm) / mjesec	maksimalni oborinski događaj (mm) / datum početka / trajanje (dani)
2012*	415	54,4 / 13.9.2012.	131,1 / rujan	76,4 / 13.9.2012. / 4
2013	1.092	42,5 / 26.8.2013.	180,5 / studeni	91,0 / 24.8.2013. / 6
2014	1.234	55,2 / 12.2.2013.	207,7 / rujan	100,0 / 10.9.2014. / 7
1963 - 2012	870 (prosjeak)	95,8 / 4.7.1989.	259,35 / rujan 1989.	166,8 / 30.9.1974. / 15
1862 - 2012	887 (prosjeak)	118,8 / 9.8.1926.	267,4 / listopad 1895.	166,8 / 30.9.1974. / 15

*razdoblje od rujna do prosinca.

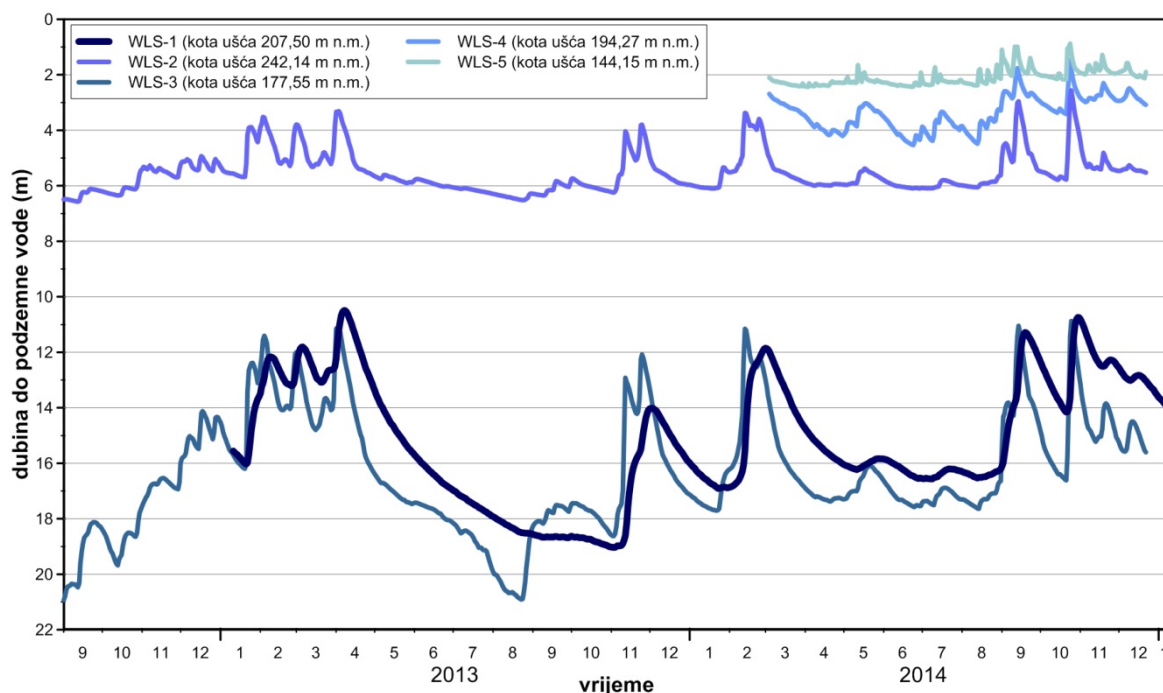
Podaci mjerenja od rujna 2012. do siječnja 2015. godine s ombrografa na klizištu Kostanjek uspoređeni su s podacima mjerne postaje Zagreb-Grič, za razdoblje od 1862. do 2012. godine, odnosno za razdoblje od 1963. godine (kada je aktivirano klizište Kostanjek) do 2012. godine (tablica 5.11). S obzirom da prosječna godišnja oborina na području grada Zagreba u razdoblju od 1862. do 2014. godine iznosi 887 mm. godine, proizlazi da su 2013. i 2014. godina iznadprosječno vlažne godine s 1.092 mm, odnosno 1.234 mm ukupnih godišnjih oborina. U razdoblju od 152 godine, 2013. godine izmjerena je petnaesta najveća godišnja oborina tijekom koje je palo 23,1% više oborina nego što je godišnji prosjek, dok je 2014. godine izmjerena treća najveća godišnja oborina tijekom koje je palo 37,9% više oborina od godišnjeg prosjeka. Na iznadprosječne meteorološke događaje ukazuje i to da su u razdoblju od dvije godine i četiri mjeseca (2,33 godine), tijekom kojih je klizište Kostanjek praćeno GNSS stanicama, zabilježene tri dnevne oborine više od 50 mm: (1) 55,2 mm (12.2.2014.); (2) 54,4 mm (13.9.2012.); te (3) 53.5 mm (1.9.2014.). Ove oborine s obzirom na cijeli niz podataka mjerenja s postaje Zagreb-Grič imaju povratna razdoblja od 2,3 godine (slika 5.21). Također, tijekom 13. i 14.1.2013. palo je 54 cm snijega, što predstavlja treću najveću snježnu oborinu izmjerenu na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič (Mokorić, 2013).



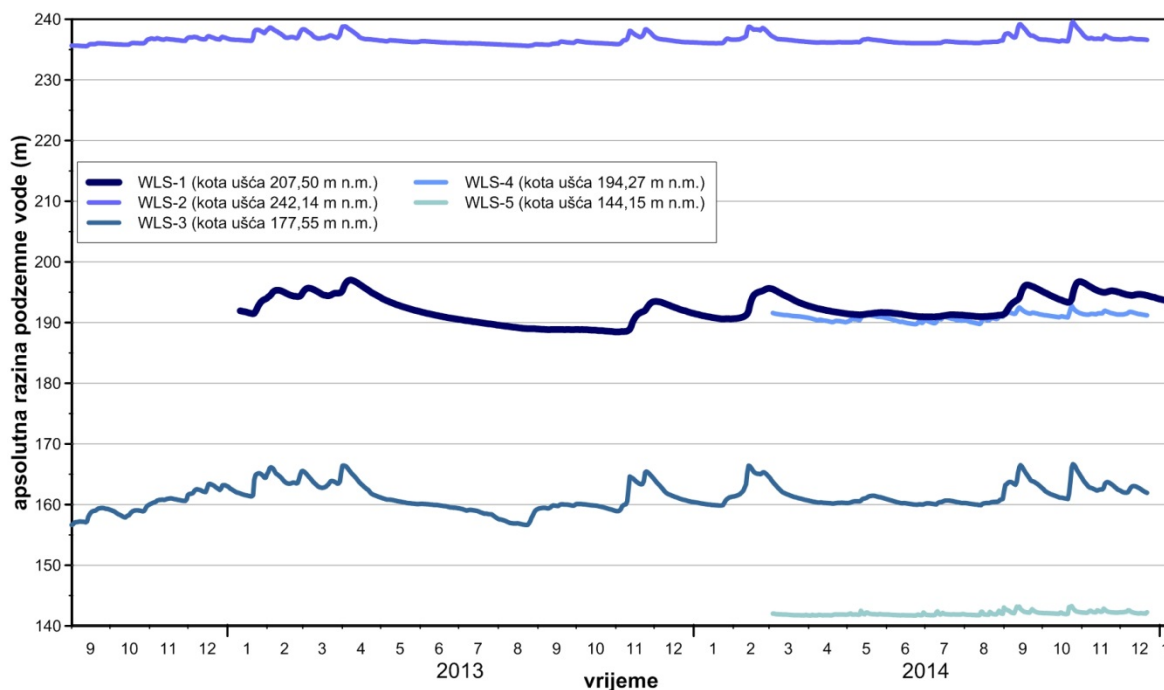
Slika 5.21. Povratna razdoblja za dnevne oborine u razdoblju od 1862. do 2012. godine, za meteorološku postaju Zagreb-Grič.

5.2.2. Razina podzemne vode

Razine podzemne vode na klizištu Kostanjek kontinuirano se mjere na pet lokacija te povremeno još na 11 lokacija, kao što je opisano u poglavlju 4.1.2.1. Kontinuirana mjerenja u kopanim zdencima u ulici Vodopijin breg (WLS-3) i Bizek II (WLS-2) započela su 27.6.2012., odnosno 4.7.2012. Na središnjoj mjernoj lokaciji (oznake 08L), na kojoj se nalazi i GNSS 08, mjerenje razine vode u piezometru (WLS-1) započelo je 11.1.2013. Mjerenja razine podzemne vode u kopanim zdencima u ulici Bukošćak (WLS-4) i Skoki (WLS-5) započela su 4.3.2014. Uređaji kontinuirano mjere razine podzemne vode svakih sat vremena, ali su pri prikazu podataka te u daljnjim analizama korištene dnevne vrijednosti, odnosno 24-satne prosječne vrijednosti. Vremenski nizovi izmjenjenih dubina do podzemne vode prikazani su na slici 5.22, a vremenski nizovi izračunatih apsolutnih razina podzemne vode na slici 5.23. U tablici 5.12 prikazane su maksimalne i minimalne dubine do podzemne vode u svim piezometrima i zdencima s kontinuiranim praćenjem.



Slika 5.22. Vremenski nizovi dubina do podzemne vode izmjenjenih u piezometru na središnjoj mjernoj lokaciji 08L (WLS-1) te u četiri kopana zdenca (WLS-2, WLS-3, WLS-4 i WLS-5).



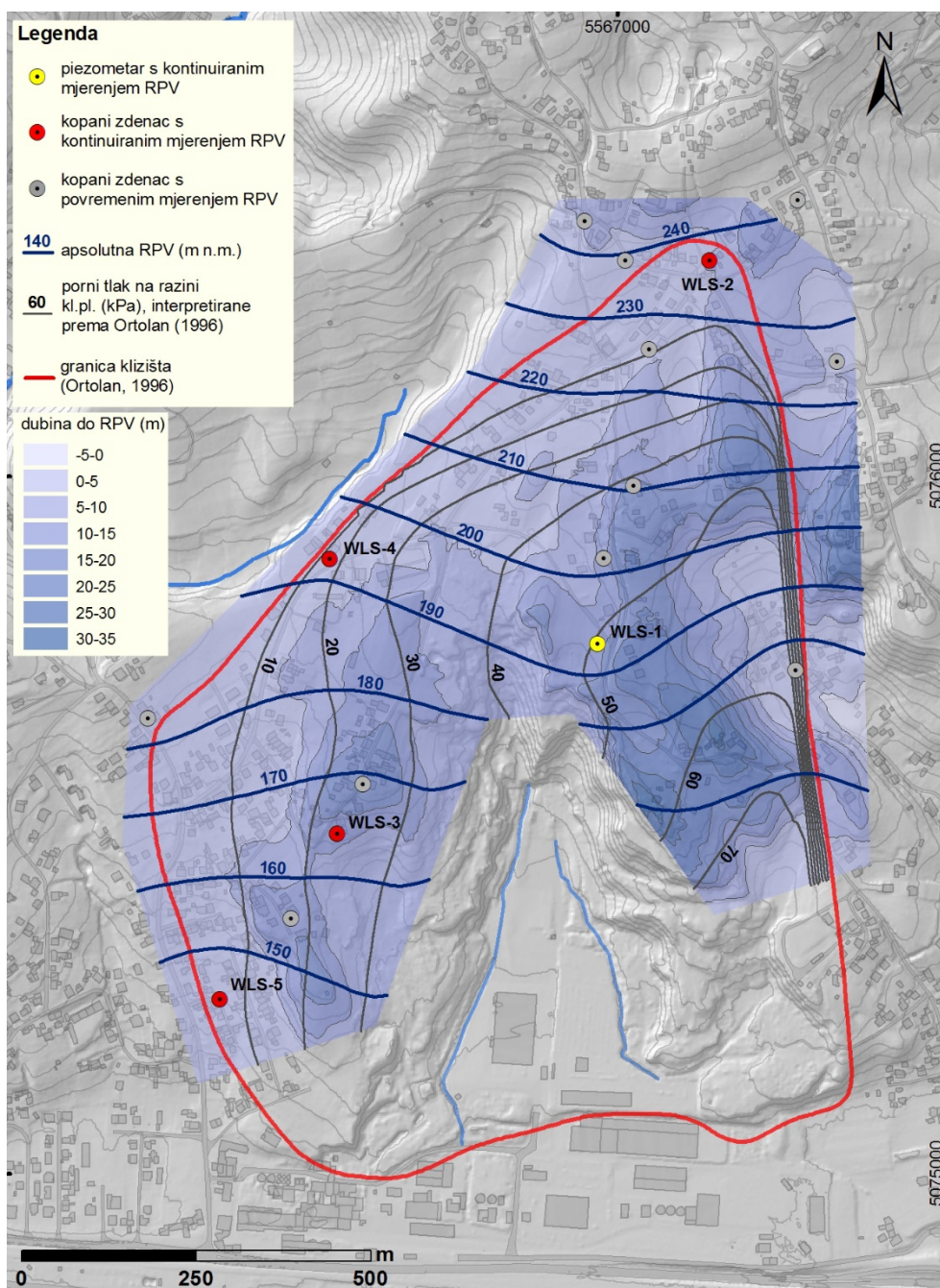
Slika 5.23. Vremenski nizovi apsolutnih razina podzemne vode izmjerenih u piezometru (WLS-1) na središnjoj mjernoj lokaciji te u četiri kopana zdenca (WLS-2, WLS-3, WLS-4 i WLS-5).

Dubina do podzemne vode izmjerena senzorom WLS-1 u piezometru na središnjem dijelu klizišta, na lokaciji (08L), relativno je slična dubini do podzemne vode izmjerenoj u zdencu (senzor WLS-3) u ulici Vodopijin breg, koja se također nalazi u središnjem dijelu klizišta. Dubina do podzemne vode u piezometru, u razdoblju od siječnja 2013. do siječnja 2015. godine se kretala od 10,5 do 19,03 m, dok je u istom razdoblju dubina do podzemne vode u ulici Vodopijin breg iznosila od 10,87 do 20,93 m (tablica 5.12). U piezometru i zdencu u ulici Vodopijin breg izražena je izmjena razdoblja porasta i visokih razina podzemne vode tijekom jesenskih i zimskih mjeseci, te razdoblja snižavanja i niskih razina tijekom proljetnih i ljetnih mjeseci.

Tablica 5.12. Maksimalne i minimalne dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjev.

lokacija (senzor) / kota ušća	početak mjerjenja	maksimalna dubina do podzemne vode (m) / datum	minimalna dubina do podzemne vode (m) / datum	razlika između maksimalne i minimalne dubine (m)
08L (WLS-1) / 207,50 m n.m.	11.1.2013.	19,03 / 2. - 4.11.2013.	10,50 / 7. - 8.4.2013.	8,53
Bizek II (WLS-2) / 242,14 m n.m.	4.7.2012.	6,58 / 12.9.2012.	2,56 / 25.10.2014.	4,02
Vodopijin breg (WLS-3) / 177,55 m n.m.	27.6.2012.	20,93 / 21.8. - 1.9.2012.	10,87 / 25.10.2014.	10,06
Bukoščak (WLS-4) / 194,27 m n.m.	4.3.2014.	4,53 / 24.6.2014.	1,47 / 24.10.2014.	3,06
Skoki (WLS-5) / 144,15 m n.m.	4.3.2014.	2,44 / 3.4.2014.	0,87 / 24.10.2014.	1,57

Uz rubne dijelove klizišta najveća dubina do podzemne vode izmjerena je senzorom WLS-4, u zdencu uz sjevernu granicu klizišta (ulica Bukošćak), a iznosi 6,58 m. Najmanja dubina do podzemne vode izmjerena je senzorom WLS-5 u zdencu u ulici Skoki, uz zapadnu granicu klizišta, a iznosi 0,87 m. U ostalim zdencima na rubnim dijelovima klizišta manje je izražena izmjena razdoblja niskih i visokih razina podzemne vode.



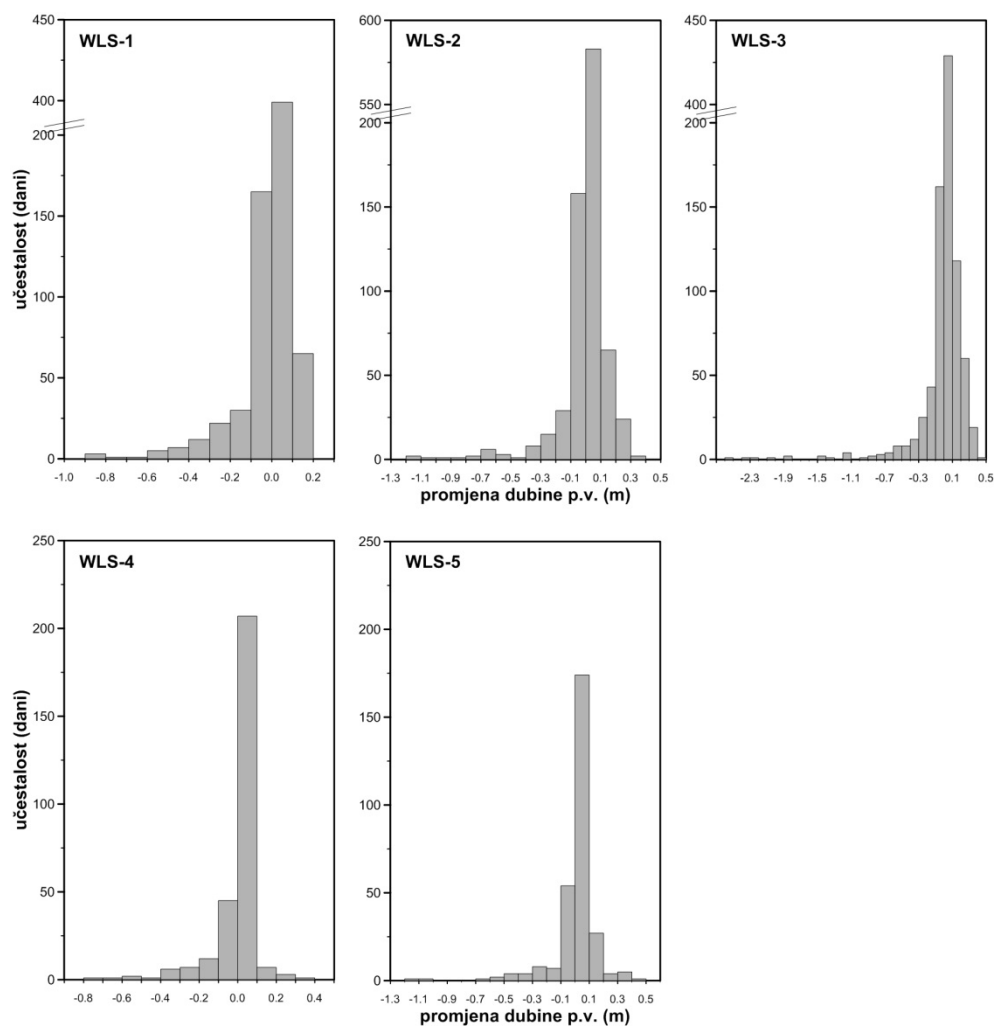
Slika 5.24. Karta dubina do podzemne vode, apsolutnih razina podzemne vode (RPV) te pornih tlakova na kliznoj plohi koju je interpretirao Ortolan (1996).

Podaci o dubinama do razine podzemne vode izmjereni 4.3.2013. u piezometru i u četiri kopana zdenaca s kontinuiranim mjerenjima te jednokratno u 11 kopanih zdenaca poslužili su za izradu karte dubina do podzemne vode, apsolutnih razina podzemne vode te pornih tlakova na kliznoj plohi (slika 5.24) koju je interpretirao Ortolan (1996). Osim podataka o razinama podzemne vode i pornim tlakovima na karti su prikazane i lokacije svih mjerenja. Interpretirane izolinije apsolutnih razina podzemne vode pružaju se u smjeru I-Z, ukazujući na tok podzemne vode generalno u smjeru juga s nagibom vodnog lica od 4° do 6°. Najveći porni tlakovi na kliznoj plohi, preko 70 kPa, interpretirani su na jugoistočnom dijelu klizišta, gdje je klizna ploha prema Ortolanu (1996) i najdublja, dok uz zapadnu, sjeverozapadnu i sjevernu granicu klizišta porni tlakovi na kliznoj plohi iznose manje od 20 kPa.

Prosječne brzine podizanja razina podzemne vode izmjerene senzorima WLS-1, WLS-2, WLS-4 i WLS-5 iznose od 0,14 m/dan do 0,16 m/dan, dok je prosječna brzina podizanja razine izmjerena senzorom WLS-3 (ulica Vodopijin breg) nešto viša i iznosi 0,25 m/dan (tablica 5.13). Maksimalne brzine podizanja razine podzemne vode izmjerene su i u zdencu u ulici Vodopijin breg i iznose do 2,52 m/dan, dok u piezometru (WLS-1) maksimalna zabilježena brzina iznosi 0,87 m/dan. Iz histograma raspodjele učestalosti brzina promjene razina (slici 5.25) vidi se da je raspon brzina promjene razine podzemne vode vrlo velik te da se brzine podizanja razine podzemne vode veće od prosjeka pojavljuju u kratkim vremenskim razdobljima, a ukupnog trajanja od 27 dana (zdenac u ulici Bukošćak) do 31 dan godišnje (piezometar). Podizanje razina podzemne vode posljedica je intenzivnih oborina i otapanja snježnog pokrivača te infiltracije vode u tlo, a vremenski se podudaraju s razdobljima bržeg gibanja što je detaljno opisano u poglavlju 6.2.

Tablica 5.13. Brzine promjene dubine do razine podzemne vode (RPV) na klizištu Kostanjev.

lokacija (senzor) / kota ušća	prosječna brzina podizanja RPV (m/dan)	prosječna brzina sniženja RPV (m/dan)	maksimalna izmjerena brzina podizanja RPV (m/dan) / datum
08L (WLS-1) / 207,50 m n.m.	0,14	0,05	0,87 / 14.2. i 25. - 26.10.2014.
Bizek II (WLS-2) / 242,14 m n.m.	0,14	0,04	1,17 / 24.10.2014.
Vodopijin breg (WLS-3) / 177,55 m n.m.	0,25	0,09	2,52 / 22.1.2013.
Bukoščak (WLS-4) / 194,27 m n.m.	0,15	0,05	0,76 / 23.10.2014.
Skoki (WLS-5) / 144,15 m n.m.	0,16	0,05	1,11 / 22.10.2014.

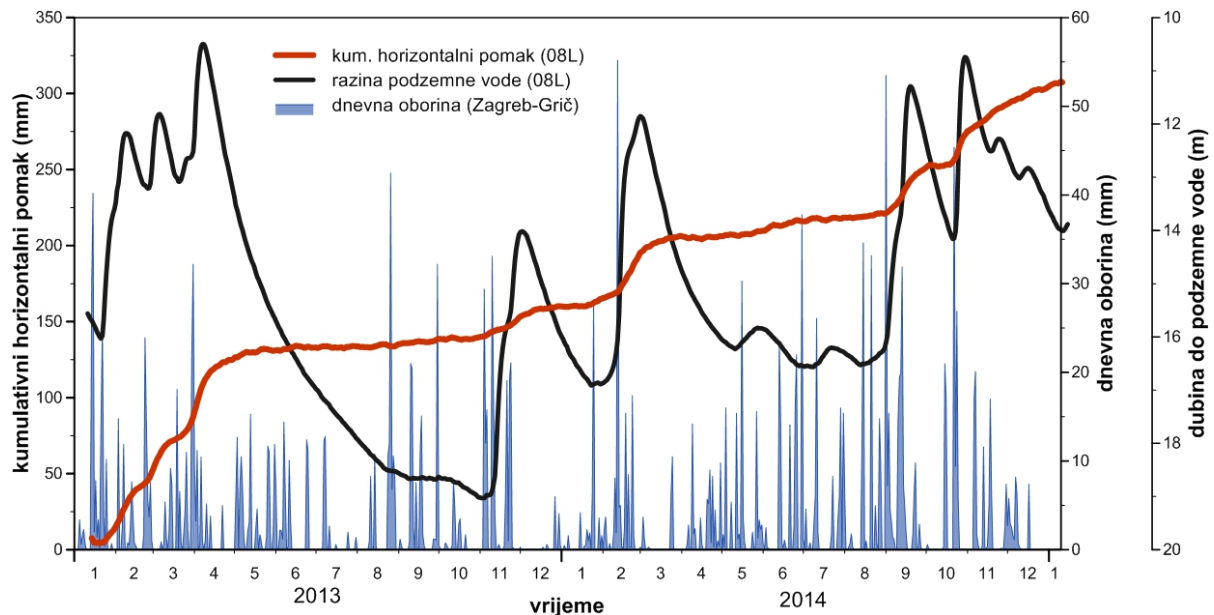


Slika 5.25. Histogrami učestalosti brzina promjene dubine do razine podzemne vode na klizištu Kostanjek. Negativne vrijednosti brzine promjene dubine ukazuju na podizanje razine podzemne vode.

6. FENOMENOLOŠKI MODEL KLIZIŠTA KOSTANJEK

U ovom poglavlju se opisuje razvoj fenomenološkog modela klizišta Kostanjek na temelju analiza kontinuiranih nizova podataka o gibanju klizišta i uzrocima gibanja, a koje se temelje na empirijskim, odnosno statističkim metodama analize podataka. Svrha statističkih analiza je određivanje odnosa između brzine gibanja klizišta i uzroka gibanja. Prvo je uspostavljen odnos između oborina, kao čimbenika koji neizravno djeluje na stabilnost klizišta, i rezultirajućih promjena razine podzemne vode, kao čimbenika koji izravno djeluje na stabilnost klizišta. Nakon određivanja odnosa između oborina i razina podzemne vode uspostavljen je odnos između razine podzemne vode i gibanja klizišta. U posljednjem dijelu poglavlja opisan je odnos izravnog utjecaja oborina na gibanje klizišta.

Nizovi podataka koji su korišteni u analizama su podaci mjerenja opisani u poglavlju 6., a odnose se na podatke praćenja gibanja klizišta stanicom GNSS 08 i dubine do podzemne vode senzorom WLS-1 koji se nalaze na središnjoj mornoj postaji (lokacija 08L) „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek“ (opisanog u poglavlju 4.1). Podaci o oborinama dobiveni su s meteorološke postaje Zagreb-Grič. Grafički prikaz podataka kumulativnog horizontalnog pomaka, dubine do razine podzemne vode te oborina izmjerenih na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič prikazani su na slici 6.1. Sa slike je moguće uočiti postojanje određene povezanosti između oborina, promjene razine podzemne vode i gibanja klizišta Kostanjek.

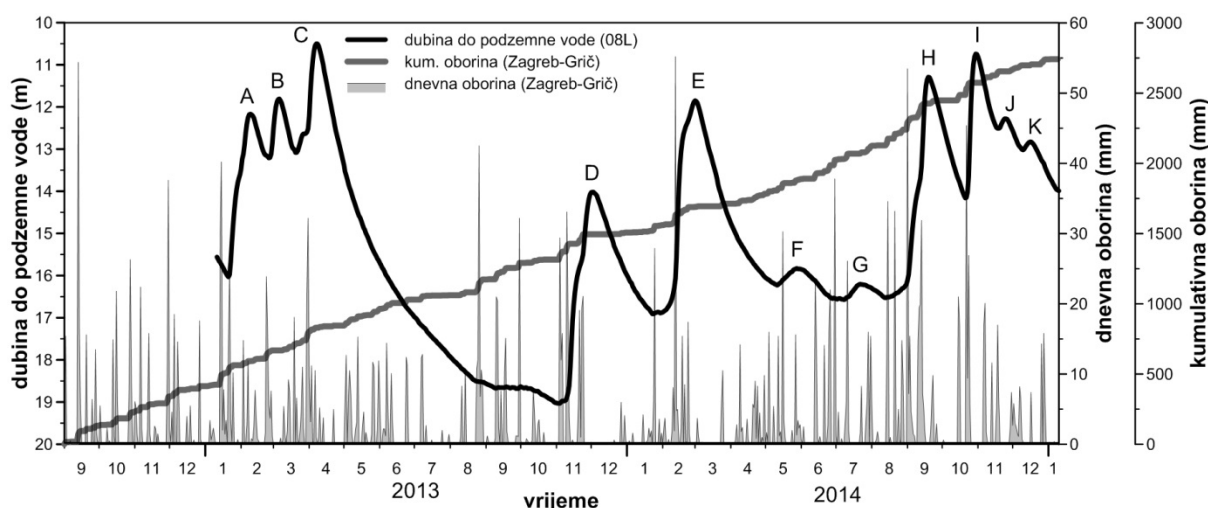


Slika 6.1. Kumulativni horizontalni pomaci, dubine do podzemne vode i dnevne oborine u razdoblju od siječnja 2013. do siječnja 2015. godine.

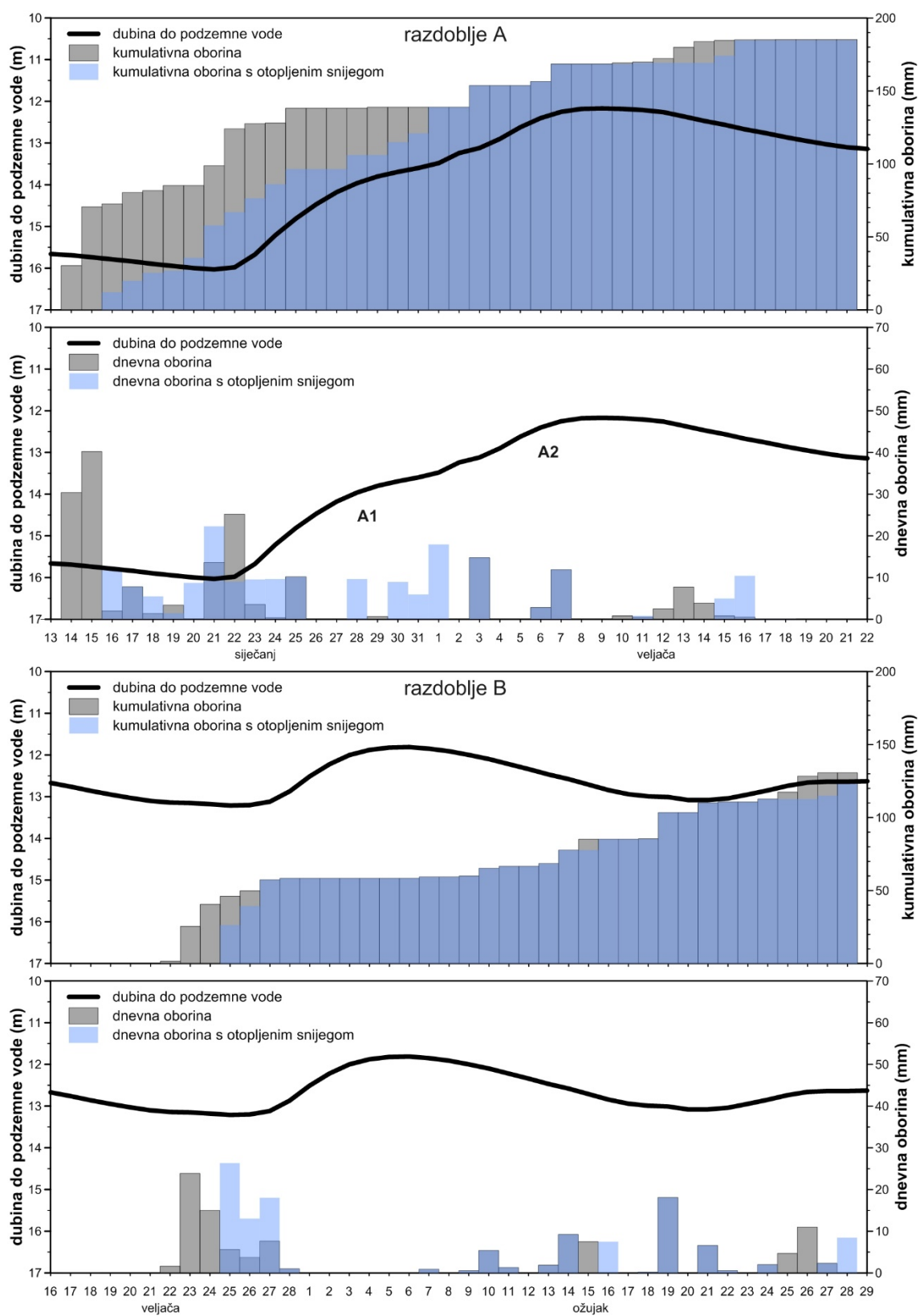
6.1. Oborine i promjene razine podzemne vode

Razdoblja bržeg gibanja na klizištu Kostanjek posljedica su promjena stanja naprezanja na kliznoj plohi uslijed podizanja razine podzemne vode uzrokovano napajanjem vodonosnika oborinskim vodama, prvenstveno kišom, a zatim i otapanjem snijega. Dubine do razine podzemne vode izmjerene na središnjoj mjernoj lokaciji (08L) tijekom razdoblja praćenja te dnevne i kumulativne oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič prikazane su na slici 6.2. Praćenjem je zabilježeno ukupno 11 razdoblja podizanja razine podzemne vode, koja su detaljnije prikazana na slikama 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 i 6.7. Ovih 11 razdoblja u daljnjem tekstu nazivaju se glavna razdoblja podizanja razina podzemne vode, a označena su oznakama A, B, C, D, E, F, G, H, I, J i K. Iz slika 6.3 - 6.7 je vidljivo da razdoblja A, C, D, E, i H predstavljaju dvostruke vodne valove nastale kao posljedica dvaju oborinskih događaja te su iz tog razloga dodatno podijeljena na razdoblja A1, A2, C1, C2, D1, D2, E1, E2, H1 i H2. Razdoblja A1, A2, B, C1, C2, D1, D2, E1, E2, F, G, H1, H2, I, J i K se u daljnjem tekstu nazivaju razdobljima podizanja razine podzemne vode.

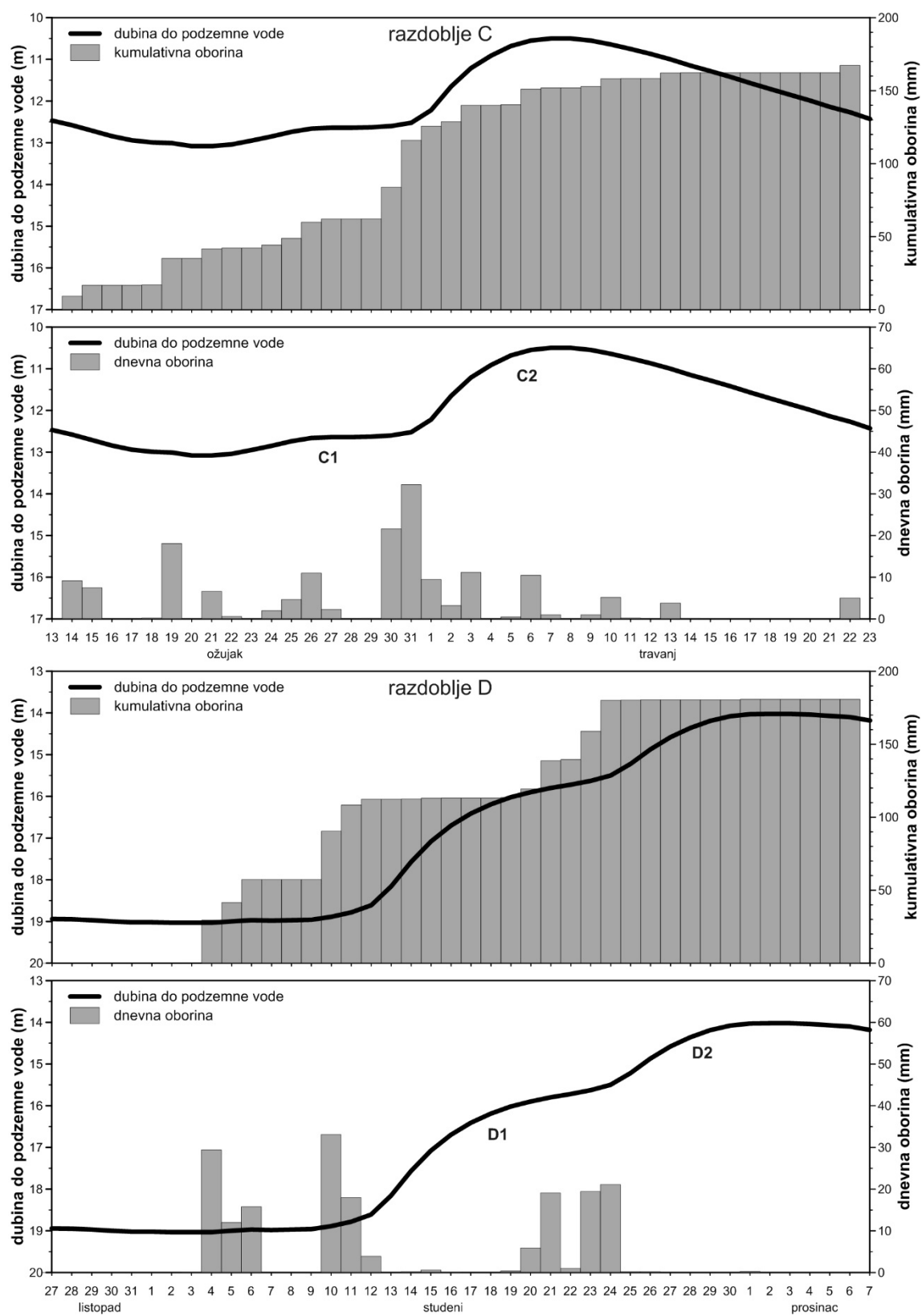
Osim promjena razine podzemne vode na slikama 6.3 - 6.7 prikazane su i dnevne oborine i kumulativne oborine te dnevne oborine s otopljenim snijegom i kumulativne oborine s otopljenim snijegom. Način određivanja dnevnih oborina s otopljenim snijegom temeljio se na pretpostavci da oborina koja je pala u obliku snijega prihranjuje vodonosnik tek u trenutku otapanja snijega, odnosno da je do otapanja snijega došlo tek u trenutku kada je visina snijega za određeni dan bila manja nego visina snijega za prethodni dan. U tu svrhu korišteni su podaci s meteorološke postaje Zagreb-Grič o dnevnim oborinama, odnosno kiši, snijegu, susnježici i dnevnim visinama snijega. Pri računanju otapanja snijega pretpostavljeno je da je količina otopljenog snijega jednaka omjeru promjene visine snijega, za dan za koji se određuje otapanje, i visine snježnog pokrivača za prethodni dan, pomnoženim s količinom oborine koja se nalazila u snježnom pokrivaču od prethodnog dana. Detaljna shema izračuna dnevnih oborina s otopljenim snijegom prikazana je na slici 6.8.



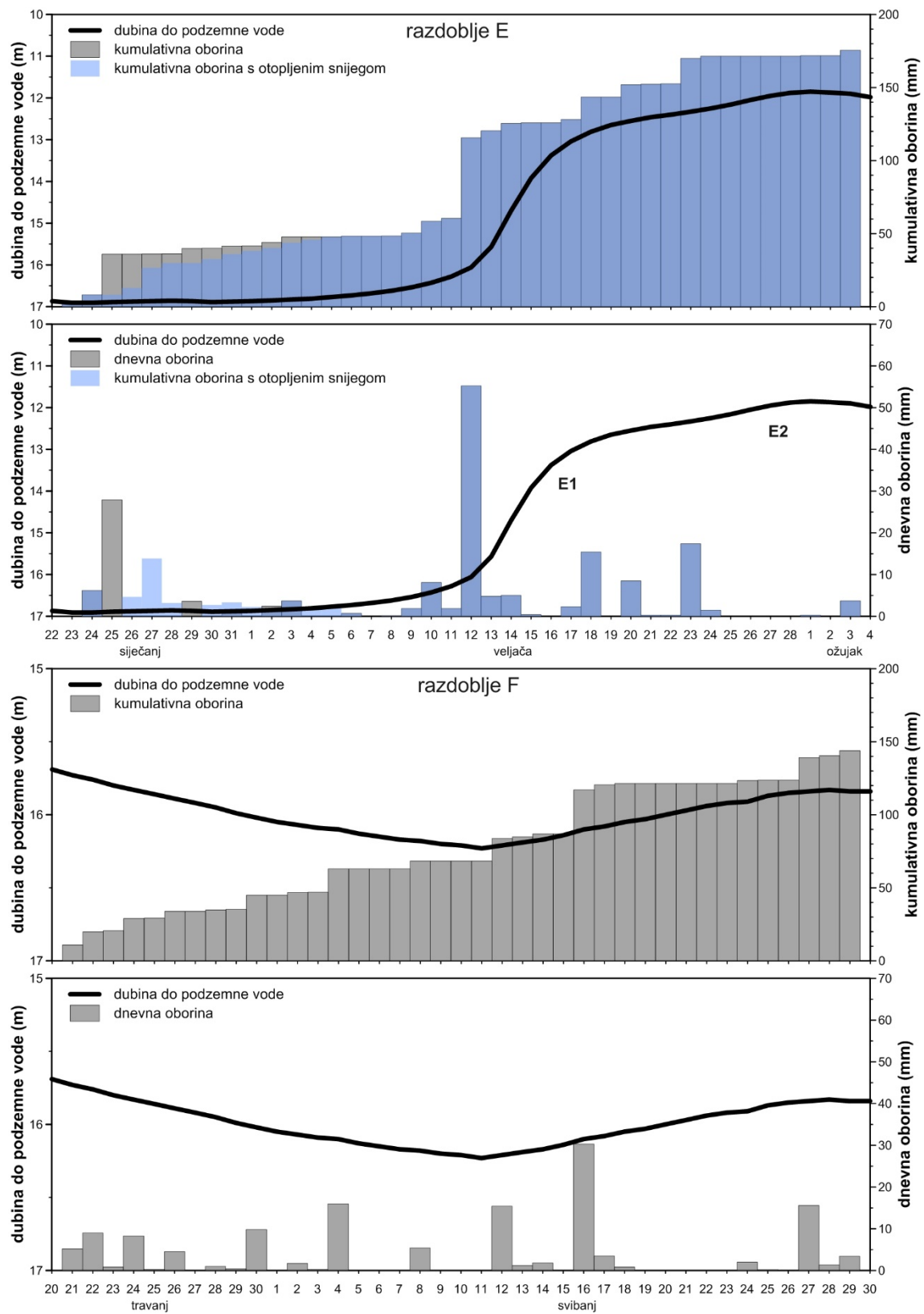
Slika 6.2. Dnevne i kumulativne oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode izmjerene na klizištu Kostanjek, za razdoblje od rujna 2012. do siječnja 2015. godine.



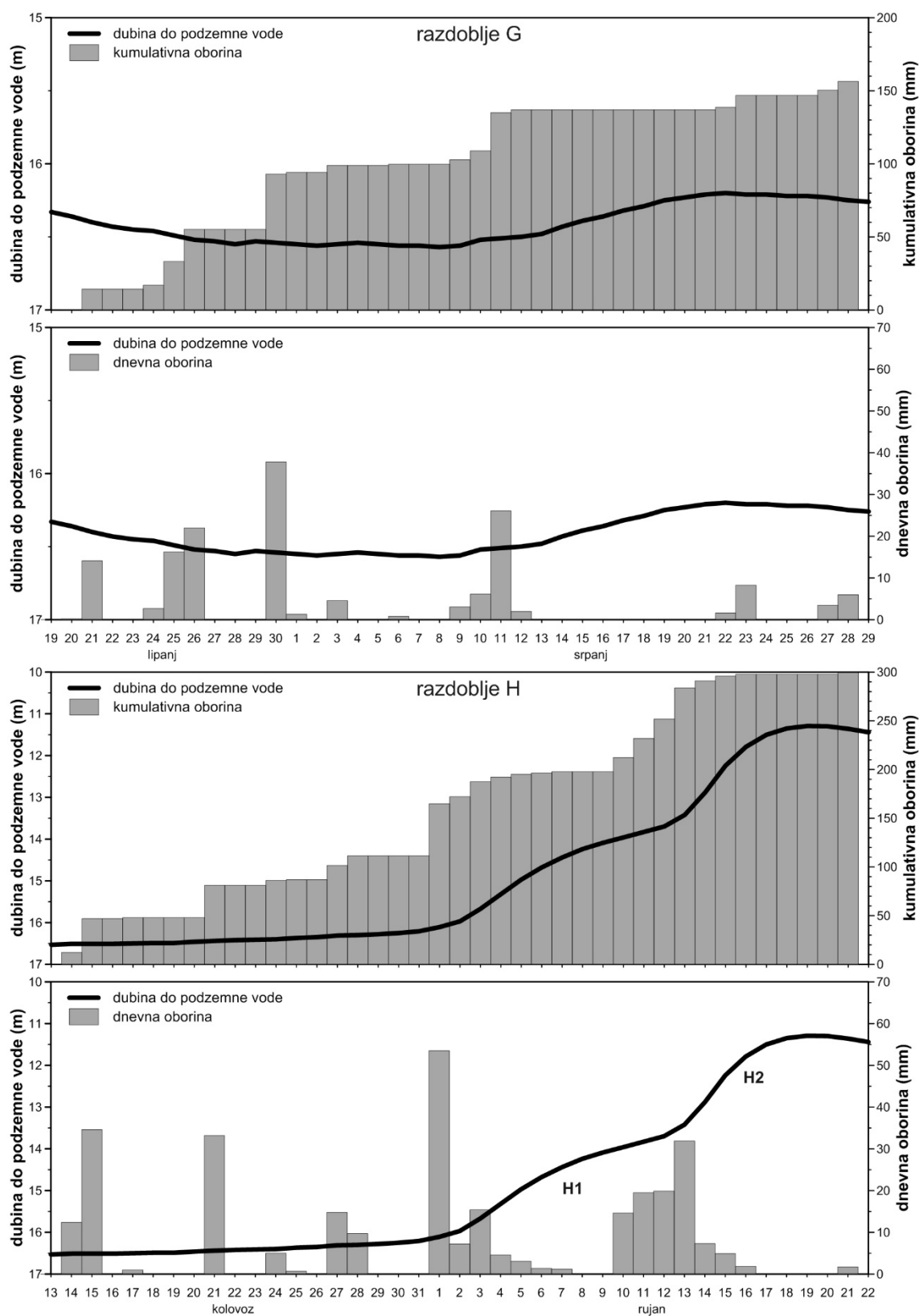
Slika 6.3. Oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjevica za razdoblja podizanja razine podzemne vode A i B.



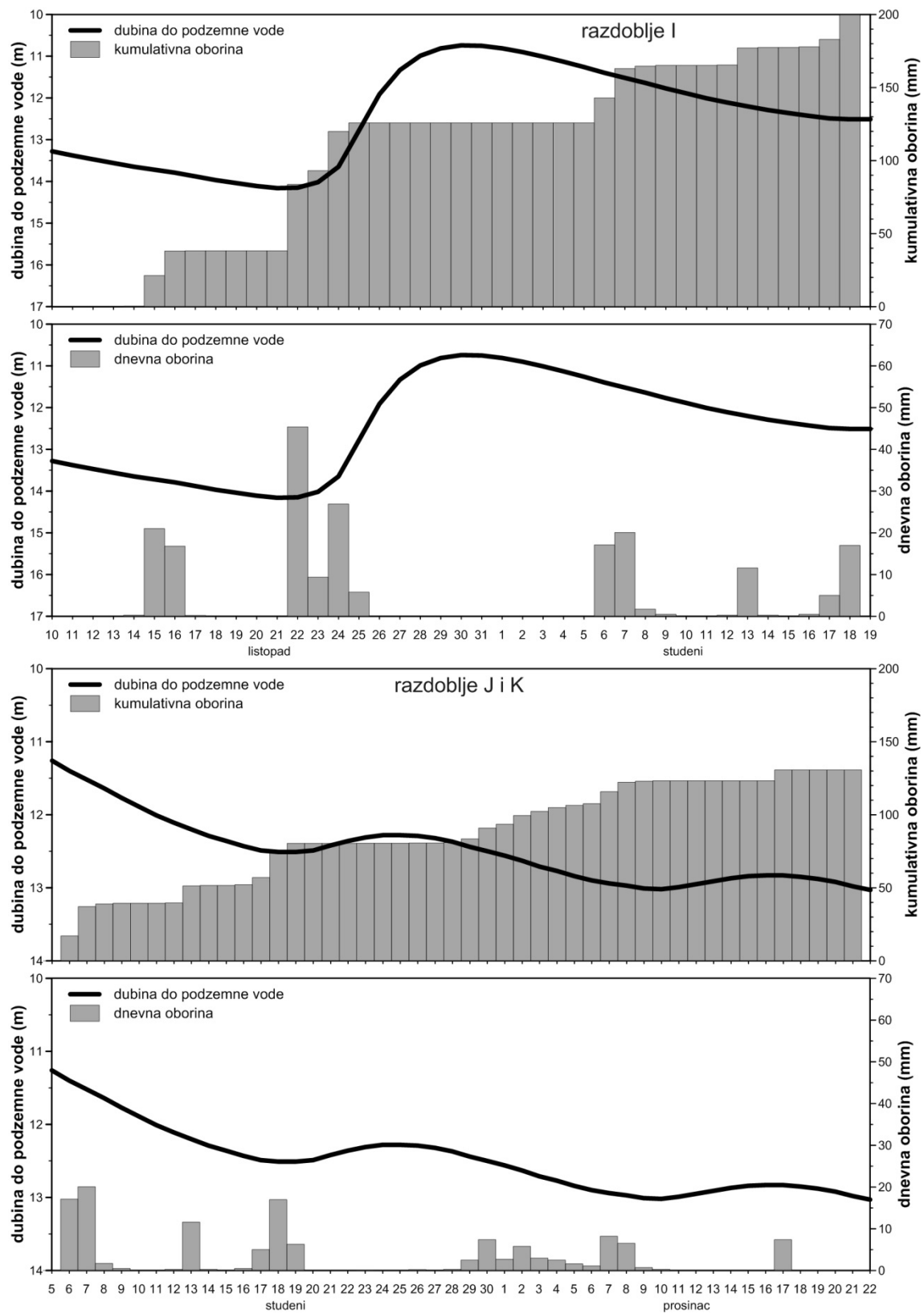
Slika 6.4. Oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjek za razdoblja podizanja razine podzemne vode C i D.



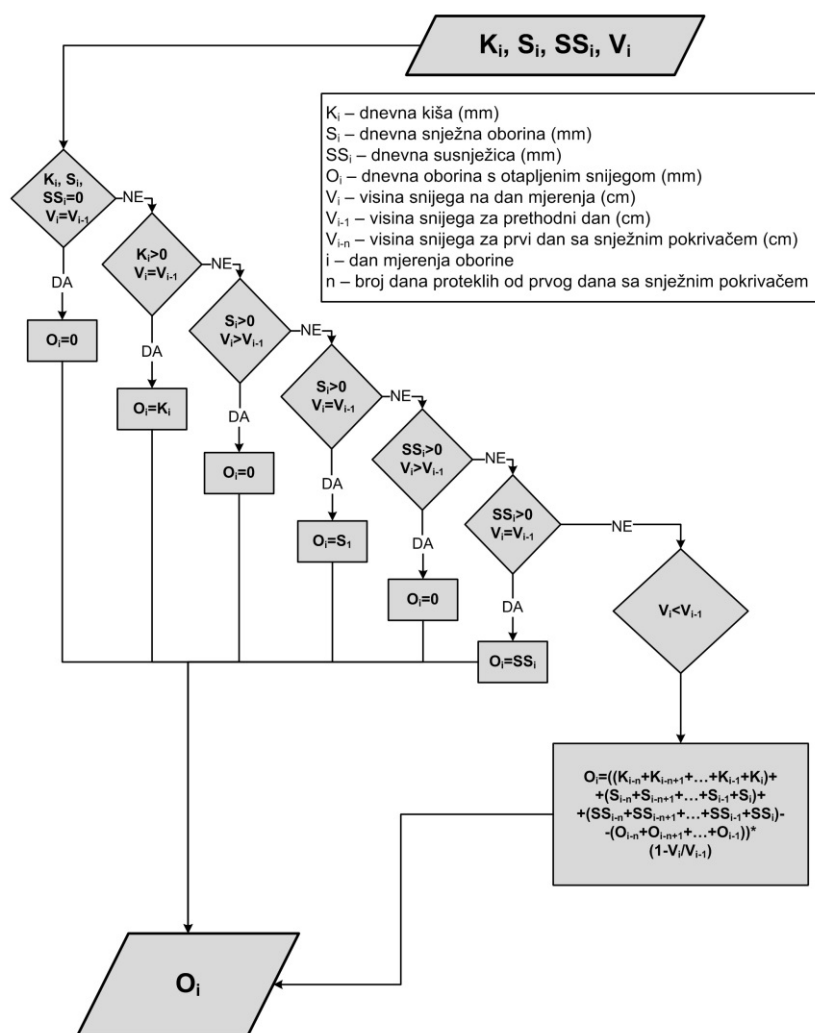
Slika 6.5. Oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjev za razdoblja podizanja razine podzemne vode E i F.



Slika 6.6. Oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjek za razdoblja podizanja razine podzemne vode G i H.



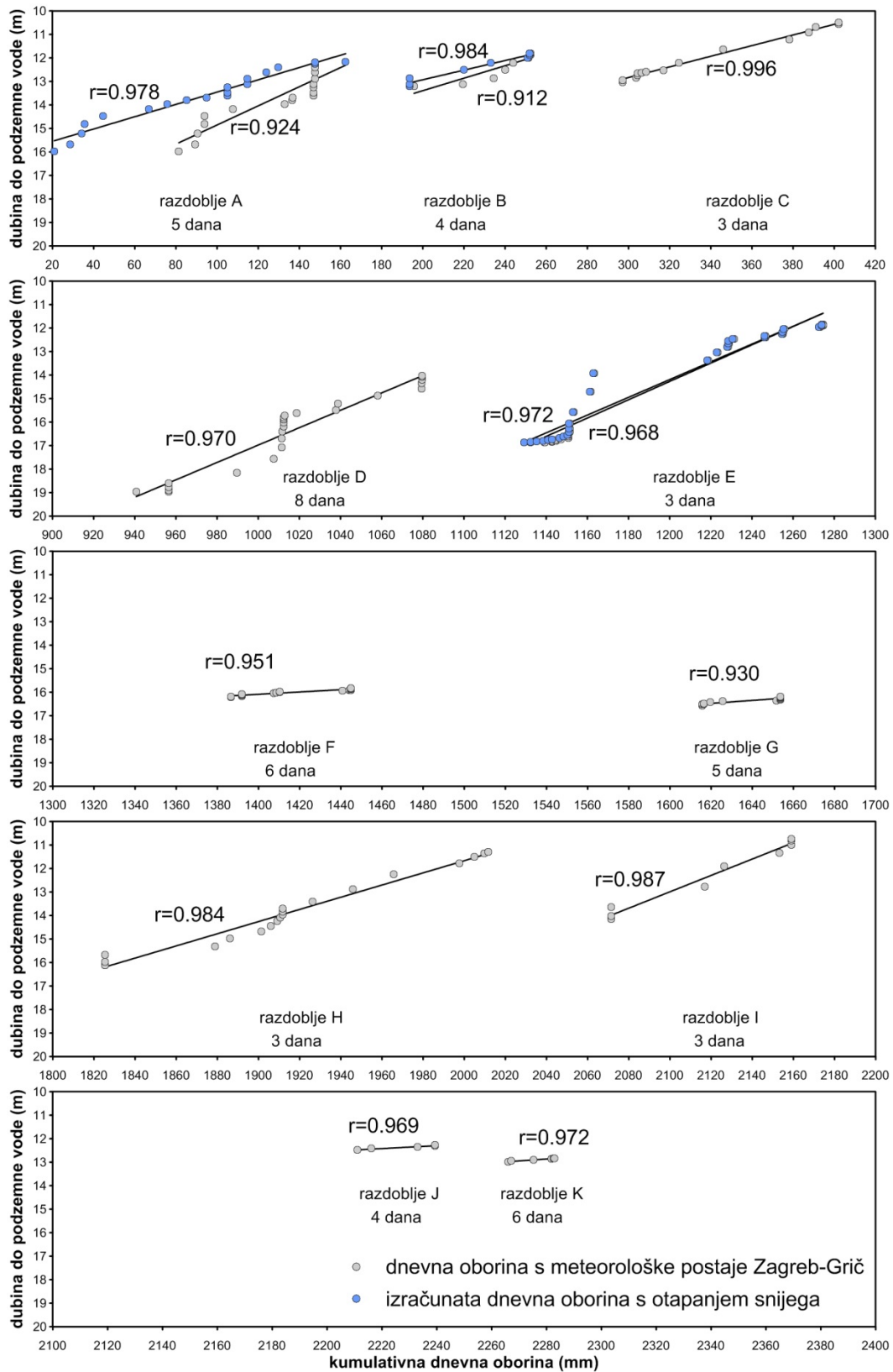
Slika 6.7. Oborine izmjerene na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič te dubine do podzemne vode na klizištu Kostanjevica za razdoblja podizanja razine podzemne vode I, J i K.



Slika 6.8. Dijagram toka određivanja dnevnih oborina s otopljenim snijegom.

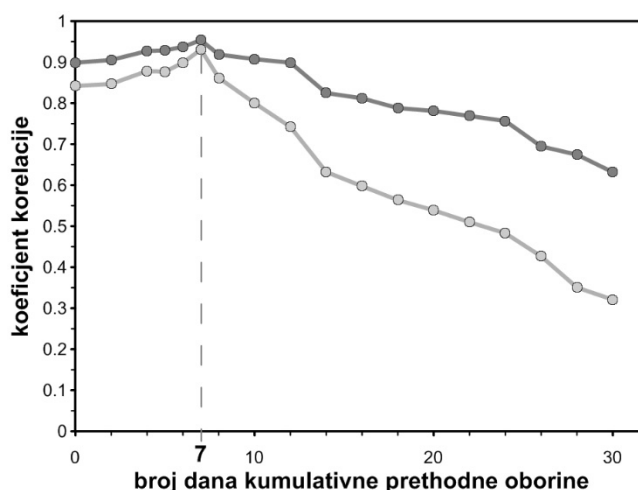
6.1.1. Korelacija količine oborina i promjena razina podzemne vode

Na slici 6.9 prikazana je unakrsna korelacija između kumulativnih oborina i dubine do razine podzemne vode za svako od glavnih razdoblja podizanja razine podzemne vode te kumulativnih oborina s otopljenim snijegom i dubine do razine podzemne vode za glavna razdoblja podizanja razina A, B i E kada je u napajanju vodonosnika sudjelovala i voda nastala otapanjem snijega. Unakrsna korelacija provedena je tako da je za svako razdoblje podizanja razine podzemne vode određeno razdoblje oborina koje, uz vremenski pomak, daje najveći koeficijent korelacije. Vremenski pomak između oborina i promjena razina podzemne vode kreće se u razdoblju se od tri do osam dana. Na slici 6.9 je vidljivo da je u razdobljima sa snježnim oborinama viša korelacija s kumulativnim oborinama s otopljenim snijegom nego s kumulativnim oborinama. Iz tog razloga su u daljnjim analizama korištene oborine s otopljenim snijegom, koje se u daljnjem tekstu nazivaju samo oborine.



Slika 6.9. Unakrsna korelacija razine podzemne vode i kumulativne oborine za svih 11 glavnih razdoblja podizanja razine podzemne vode. Na slici je označen i vremenski pomak u danima između razdoblja oborina koje su prouzročile podizanje razine podzemne vode i razdoblja podizanja razine podzemne vode.

Koeficijenti linearne korelacije između promjene razine podzemne vode i kumulativnih oborina za 11 glavnih razdoblja te za svih 16 razdoblja podizanja razine podzemne vode prikazani su na slici 6.10. Kumulativne oborine na dijagramu predstavljaju oborine koje su se dogodile tijekom razdoblja podizanja razine vode (prethodna oborina 0 dana) te oborine tijekom razdoblja porasta razine podzemne vode uvećane za prethodne oborine u razdoblju od 2 do 30 dana (prethodna oborina od 2 do 30 dana). Najviši koeficijent korelacije između promjene razine podzemne vode i kumulativne oborine za 11 glavnih razdoblja, odnosno svih 16 razdoblja podizanja razine podzemne vode dobiven je za prethodnu oborinu od sedam dana. Najviši koeficijent korelacije za 11 glavnih razdoblja podizanja podzemne vode iznosi 0,953, a za svih 16 razdoblja podizanja razina podzemne vode iznosi 0,930. Iz prethodno navedenog proizlazi da promjena razine podzemne vode na središnjem dijelu klizišta Kostanjek ovisi o količini oborine koja je pala u razdoblju od prosječno sedam dana prije početka podizanja razine podzemne vode. Međutim, općenito se može zaključiti da vodonosnik reagira različito na oborine različitog intenziteta i trajanja. Tako primjerice u razdoblju C2, naglo podizanje razine podzemne vode započinje dva dana nakon početka intenzivne oborine, dok primjerice u razdoblju K podizanje razne podzemne vode započinje 11 dana nakon početka oborine slabog intenziteta (slike 6.4 i 6.7).



Slika 6.10. Koeficijenti korelacije između kumulativnih prethodnih oborina i promjene razine podzemne vode tijekom 11 glavnih (tamno siva boja), odnosno svih 16 razdoblja (svijetlo siva boja) podizanja razina podzemne vode.

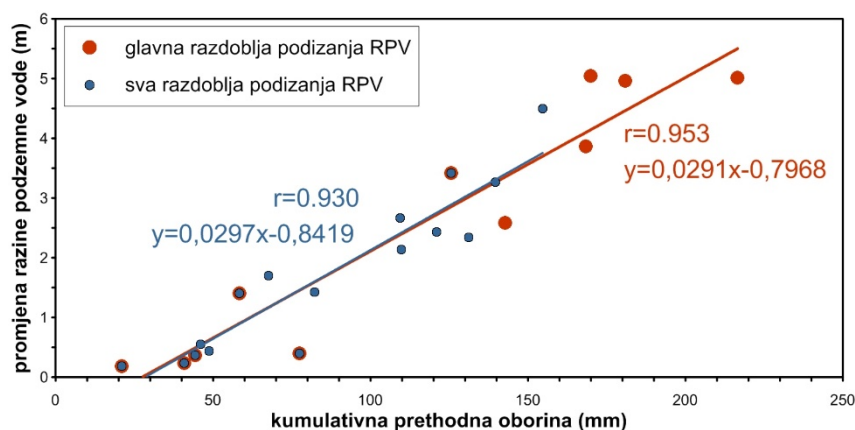
U tablici 6.1 prikazane su oborine koje su uzrokovale podizanje razine podzemne vode u piezometru na središnjoj mjernoj postaji klizišta Kostanjek. Oborine prikazane u tablici određene su na temelju pretpostavke da na podizanje razine podzemne vode utječe oborinski događaj koji traje za vrijeme podizanja razine podzemne vode i eventualnih oborina u razdoblju od sedam dana prije oborinskog događaja, odnosno prije početka podizanja razine podzemne vode. Ovako određena oborina predstavlja prethodnu oborinu od sedam dana korištenu za izračun koeficijenta korelacije na slici 6.10. Budući da se u razdobljima A, C, E, D i H pojavljuju dvostruka podizanja razine podzemne vode, određene oborine se međusobno preklapaju, odnosno utječu na oba vodna vala, te je iz tog razloga zbroj oborina u

razdobljima A1, A2, C1, C2, D1, D2, E1, E2, H1 i H2 veći nego za glavna razdoblja A, C, D, E i H. Generalni odnos između količine oborine i podizanja razina podzemne vode, određen na temelju podataka iz tablice 6.1, može se definirati pravicima prikazanim na slici 6.11. Pretpostavljeno je da je odnos između kumulativne oborine i promjene razine podzemne vode linearan, iako se može opisati i polinomom drugog stupnja. S obzirom na već spomenuti koeficijent korelacije od 0,953, odnosno 0,930, može se zaključiti da postoji čvrsta povezanost između količine oborine i promjene razine podzemne vode.

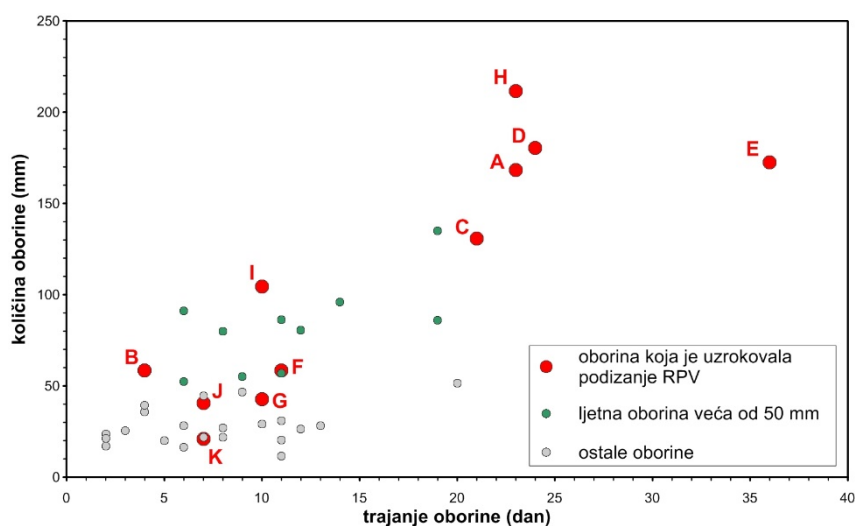
Tablica 6.1. Podizanje razine podzemne vode i oborine tijekom 11 glavnih, odnosno tijekom svih 16 razdoblja podizanja razine podzemne vode.

razdoblje podizanja razine podzemne vode	dubina RPV (m) / početak razdoblja	dubina RPV (m) / kraj razdoblja	ukupna promjena RPV (m)	količina oborine (mm)	razdoblje oborina (dani)
A	16,03 / 21.1.2013.	12,17 / 9.2.2013.	3,86	168,4	23
A1	16,03 / 21.1.2013.	13,60 / 31.1.2013.*	2,43	121,0	16
A2	13,60 / 31.1.2013.*	12,17 / 9.2.2013.	1,43	82,2	14
B	13,21 / 25.2.2013.	11,81 / 6.3.2013.	1,40	58,4	4
C	13,08 / 21.3.2013.	10,50 / 7.4.2013.	2,58	142,8	23
C1	13,08 / 21.3.2013.	12,64 / 28.3.2013.*	0,44	48,8	13
C2	12,64 / 28.3.2013.*	10,50 / 7.4.2013.	2,14	109,8	17
D	18,98 / 7.11.2013.	14,02 / 2.12.2013.	4,96	180,8	24
D1	18,98 / 7.11.2013.	15,72 / 22.11.2013.*	3,26	139,6	20
D2	15,72 / 22.11.2013.*	14,02 / 2.12.2013.	1,7	67,6	8
E	16,89 / 30.1.2014.	11,85 / 1.3.2014.	5,04	169,9	32
E1	16,89 / 30.1.2014.	12,40 / 22.2.2014.*	4,49	154,7	30
E2	12,40 / 22.2.2014.*	11,85 / 1.3.2014.	0,55	46,0	8
F	16,23 / 11.5.2014.	15,83 / 28.5.2014.	0,40	77,5	21
G	16,57 / 8.7.2014.	16,20 / 22.7.2014.	0,37	44,3	10
H	16,30 / 28.8.2014.	11,29 / 19.9.2014.	5,01	216,6	24
H1	16,30 / 28.8.2014.	13,96 / 10.9.2014.*	2,34	109,3	15
H2	13,96 / 10.9.2014.*	11,29 / 19.9.2014.	2,67	125,5	13
I	14,16 / 21.10.2014.	10,74 / 30.10.2014.	3,42	125,5	11
J	12,51 / 19.11.2014.	12,28 / 24.11.2014.	0,23	40,8	7
K	13,02 / 10.12.2014.	12,83 / 16.12.2014.	0,19	20,9	7

*datum/dubina do podzemne vode na kraju, odnosno početku novog vodnog vala, tijekom glavnog razdoblja podizanja razine podzemne vode.



Slika 6.11. Odnos između kumulativne prethodne oborine i podizanja razine podzemne vode na klizištu Kostanjek.



Slika 6.12. Dijagram trajanja i količine oborina.

Na slici 6.12 prikazan je odnos između trajanja i količine oborina koje su utjecale na podizanje razine podzemne vode i oborina koje nisu utjecale na podizanje razine podzemne vode. Količina oborine na dijagramu iz slike 6.12 predstavlja zbroj oborine jednog oborinskog događaja i eventualne oborine u razdoblju od sedam dana prije početka spomenutog oborinskog događaja. U određivanju količine oborine oborinski događaj predstavlja oborinu tijekom koje nije bilo prekida duljih od tri dana. Na primjer, ukoliko je prekid između dvije dnevne oborine tri ili manje dana, one predstavljaju jedan oborinski događaj, a ukoliko je prekid veći od tri dana one predstavljaju dva oborinska događaja. Budući da na klizištu Kostanjek oborina utječe na razinu podzemne vode u razdoblju od prosječno sedam dana, pri određivanju količine oborine uzeta je u obzir i prethodna oborina od sedam dana (u odnosu na oborinski događaj). Iz ovoga proizlazi da ukoliko je određeni oborinski događaj uzrokovao podizanje razine podzemne vode, na promjenu razine je utjecala i eventualna oborina u razdoblju od prethodnih sedam dana.

Iz slike 6.12 je vidljivo da je tijekom praćenja klizišta Kostanjek zabilježeno i nekoliko velikih oborina koje nisu utjecale na promjenu razine vode što ukazuje na složen odnos između oborina i promjene razine podzemne vode. Velike oborine koje nisu uzrokovale podizanje razine podzemne vode uglavnom su oborine koje su se dogodile u razdoblju od svibnja do rujna 2013. godine (slika 6.2). Primjerice, krajem kolovoza 2013. godine, u razdoblju od šest dana palo je 91 mm kiše, a samo u jednom danu (26.8.2013.) je palo 42,5 mm. Navedena oborina, kao i kumulativna oborina iz rujna 2013. godine (80,1 mm u 11 dana), uzrokovala je napajanje vodonosnika, ali tek neznatno veće od podzemnog otjecanja te tijekom tog razdoblja nije došlo do podizanja razine podzemne vode, već samo njenog stabiliziranja na konstantnoj dubini. Jedan od mogućih razloga zbog čega nije došlo do podizanja razine podzemne vode je evapotranspiracija, koja je tijekom ljetnih mjeseci, prema podacima s meteorološke postaje Zagreb-Maksimir (Zaninović i dr., 2008), tri do šest puta veća nego tijekom zimskih mjeseci. Drugi mogući razlog je to što za prihranjivanje vodonosnika u ljetnim mjesecima oborina najprije mora nadoknaditi veći deficit vlažnost tla (do kapaciteta tla) nego što je u ostalim razdobljima godine, osim toga taj deficit mora biti nadoknađen u debljem stupcu tla zbog općenito veće dubine do podzemne vode.

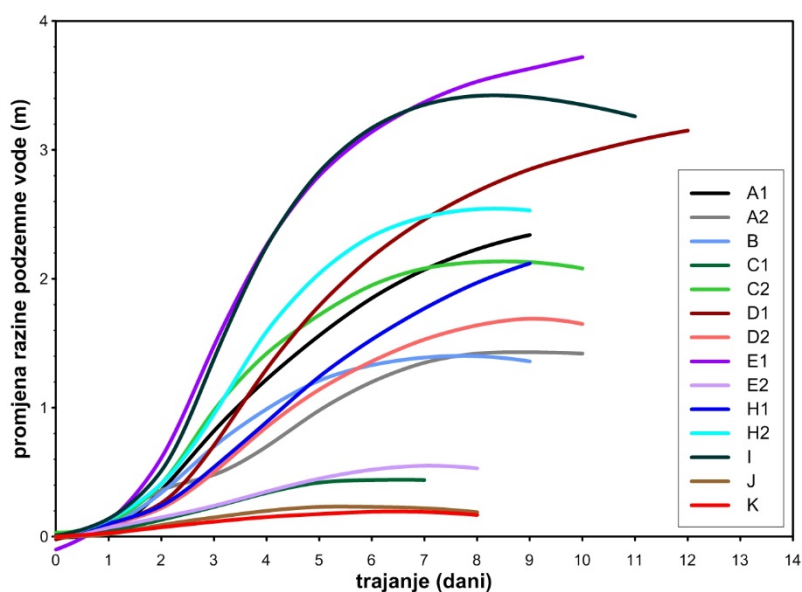
Iz dijagrama na slici 6.12 vidljivo je da određene oborine, iako male količine, također uzrokuju podizanje razine podzemne vode. Količinski male oborine koje podižu razinu podzemne vode obično se pojavljuju tijekom razdoblja kada su razine podzemne vode relativno visoko, odnosno kada je vlažnost tla vrlo blizu kapaciteta tla. Primjer takvih oborina su oborine od 40,8 mm, odnosno 20,9 mm, koje su uzrokovale podizanje razine podzemne vode u razdobljima J i K, a koje su se pojavile nedugo nakon razdoblja I kojega je uzrokovala oborina od 125,5 mm.

Teoretski nivogrami podizanja razine podzemne vode određeni su na temelju podataka o podizanju razine podzemne vode tijekom razdoblja A1, A2, B, C1, C2, D1, D2, E1, E2, H1, H2, I, J, K, prikazanih na slikama 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 i 6.7. Pri definiranju teoretskih nivograma vodnih valova nisu uzeta u obzir razdoblja podizanja razine podzemne vode F i G, koja nisu karakteristična za razdoblje praćenja klizišta Kostanjek, budući da je tijekom ovih razdoblja podizanje razine podzemne vode bilo vrlo malo (0,40 i 0,37 m), a trajalo je gotovo dvostruko dulje (17 i 14 dana) nego u ostalim razdobljima podizanja razine podzemne vode.

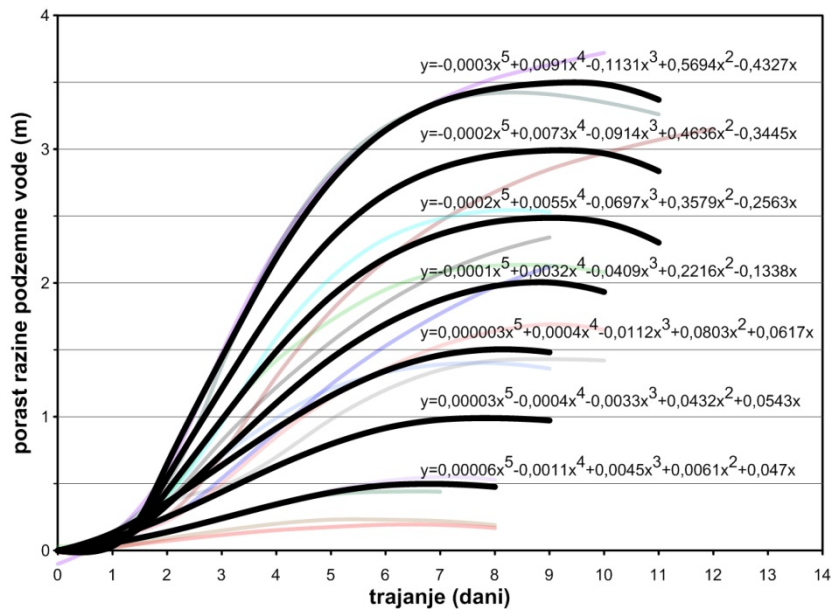
Nivogrami podizanja razina podzemne vode za 14 vodnih valova prikazani su dijagramom na slici 6.13. Iz dijagrama je vidljivo da su oblici nivograma sa sličnim iznosom podizanja razine podzemne vode međusobno vrlo slični na početku i tijekom razdoblja podizanja. Nešto veća razlika u obliku nivograma, na kraju razdoblja podizanja, posljedica je toga što pri kraju razdoblja A1, D1, E1 i H1 nije došlo do sniženja razine podzemne vode, već do njenog ponovnog podizanja (razdoblja A2, D2, E2 i H2) uzrokovanog novim oborinama. Iz navedenog razloga te zbog toga što je prijelaz iz jednog vala u drugi postupao, nije bilo moguće jednoznačno odrediti kraj razdoblja podizanja razine podzemne vode uzrokovanog određenom oborinom i početak slijedećeg razdoblja podizanja razine podzemne vode uzrokovanog novom oborinom. Razdoblja trajanja podizanja razina podzemne vode iznose od šest do sedam dana za promjene razina manje od jednog metra te sedam do devet dana za veće promjene razine podzemne vode. Oblik svakog od prikazanih nivograma, za razdoblje od početka podizanja pa do

razdoblja maksimalne razine, može se opisati polinomom petoga stupnja pri čemu je koeficijent determinacije veći od 0,99.

Na temelju postojećih nivograma, određeni su oblici teoretskih nivograma za podizanje razine podzemne vode od 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3 i 3,5 m. Kao reprezentativni uzeti su nivogrami: (1) C1 i E2 za podizanje razine podzemne vode od 0,5 m; (2) A2 i B za podizanje razine podzemne vode od 1,5 m; (3) A1, C2 i H1 za podizanje razine podzemne vode od 2,0 m; (4) C2 za podizanje razine podzemne vode od 2,5 m; te (5) E1 i I za podizanje razine podzemne vode od 3,5 m. Za spomenute grupe nivograma određeni su polinomi petog reda, koji ih opisuju s koeficijentom determinacije kako slijedi: (1) 0,97; (2) 0,98; (3) 0,97; (4) 0,99; te (5) 0,99. Dobivenim polinomima po potrebi je korigiran (povećan ili umanjen) posljednji koeficijent, kako bi najviše točke teoretskih nivograma odgovarale podizanju razina podzemne vode od točno 0,5, 1,5, 2, 2,5 i 3,5 m. Promjenom posljednjih koeficijenta u polinomu nije se značajno promijenio oblik nivograma, već samo njegova visina. Koeficijenti funkcija koje opisuju teoretski nivogram podizanja razine podzemne vode za koje nema reprezentativnih podizanja razina podzemne vode, kao što je primjerice promjena razine od 3 m, određeni su na način da su koeficijentima polinoma petog reda koji opisuju poraste od 2,5 i 3,5 m određene srednje vrijednosti. Dobiveni teoretski nivogrami zajedno s realnim nivogramima prikazani su na slici 6.14.



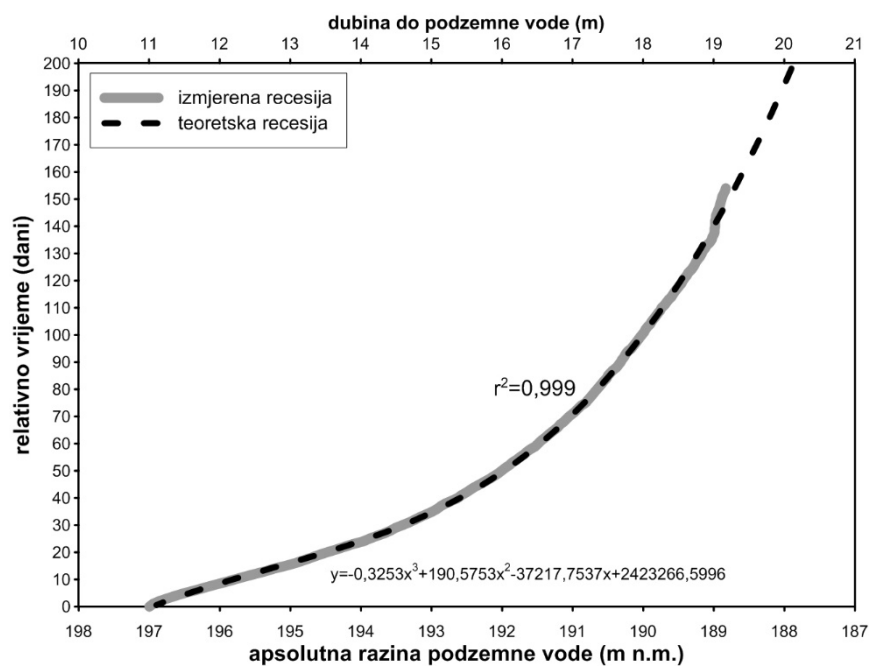
Slika 6.13. Nivogrami podizanja razina podzemne vode na klizištu Kostanjek za razdoblja podizanja od A do K.



Slika 6.14. Teoretski nivogrami podizanja razina podzemne vode na klizištu Kostanjek za promjene od 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3 i 3,5 m.

Snižanje razine podzemne vode, odnosno teoretska recesija razine podzemne vode za središnji dio klizišta Kostanjek definirana je na temelju krivulje najduljeg razdoblja recesije, koje je trajalo od 8.4.2013. do 9.9.2013., odnosno 158 dana. Razdoblje recesije na kojem je provedena analiza jasno je vidljivo slici 6.2, a dogodilo se je između razdoblja podizanja razina podzemne vode C i razdoblja podizanja razine podzemne vode D. Početak razdoblja recesije (8.4.2013.) određen je kao prvi dan kada je došlo do snižavanja razine podzemne vode nakon razdoblja podizanje razine podzemne vode C. Posljednji dan recesije predstavlja posljednji dan (9.9.2013.) snižavanja razine podzemne vode, nakon kojega je započelo razdoblje stagnacije razine podzemne vode koje je trajalo od 10.9. do 10.10.2013., a koje je uzrokovano oborinama u rujnu 2013. godine (80,1 mm u 11 dana). Snižanje razine podzemne vode tijekom najduljeg razdoblja recesije iznosilo je 8,17 m, pri čemu je dubina do podzemne vode promijenjena od 10,50 do 18,67 m. Tijekom ovog razdoblja recesije palo je ukupno 252,5 mm oborina, koje nisu uzrokovale podizanje razine podzemne vode. Teoretska krivulja recesije, određena na temelju krivulje snižavanja razine podzemne vode tijekom najduljeg razdoblja recesije, prikazana je na slici 6.15, a može se opisati polinomom trećeg stupnja, pri čemu koeficijent determinacije iznosi 0,999.

Generalno se može zaključiti da razdoblja recesije pokazuju slično ponašanje te da brzina snižavanja razine podzemne vode ovisi o razini podzemne vode. Tako su najveće brzine snižavanja zabilježene nakon što su razine podzemne vode dosegle maksimume tijekom razdoblja C, E i I, a najmanje brzine nakon razdoblja F i G kada su se podizanja razine podzemne vode dogodila na relativno velikim dubinama, oko 16 m. Kao primjer se može navesti i to da je brzina snižavanja razine podzemne vode 10 dana nakon završetka razdoblja D (u kojem je maksimum bio na dubini od 14,03 m) iznosila 0,08 m/dan pri dubini od 14,58 m. Ista brzina snižavanja od 0,08 m/dan dogodila se je 40-tak dana nakon kraja razdoblja C (u kojemu je maksimum bio na dubini od 10,50 m) pri dubini od 14,79 m.



Slika 6.15. Najdulja recesija razine podzemne vode izmjerena na središnjem dijelu klizištu Kostanjek i njena teoretska krivulja.

6.1.2. Statističke analize odnosa oborina i promjena razina podzemne vode

Statistički odnosi između razine podzemne vode i oborina na klizištu Kostanjev odrediđivani su metodom višestruke linearne regresije i metodom slučajnih šuma, čije su teorijske osnove prikazane u poglavlju 4.2. Statističke analize provedene su za razdoblje od 12.1.2013. do 11.1.2015. korištenjem kontinuiranih podataka o dubini do razine podzemne vode, izmjerenih senzorom WLS-1 u piezometru ugrađenom u bušotini B-2 na središnjem dijelu klizišta (opisanom u poglavlju 4.1.2) i oborinama s meteorološke postaje Zagreb-Grič.

6.1.2.1. Višestruka linearna regresija

Pri analizi višestruke linearne regresije korištene su dvije zavisne varijable. Najprije je provedena analiza u kojoj je kao zavisna varijabla korištena dubina do podzemne vode, a zatim analiza u kojoj je kao zavisna varijabla korištena brzina promjene razine podzemne vode. U oba slučaja (kada je zavisna varijabla dubina do podzemne vode i kada je zavisna varijabla brzina promjene razine podzemne vode) u analizi je korišteno 75 nezavisnih varijabli, odnosno prediktora prikazanih u tablicama 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, i 6.6. Nezavisne varijable u provedenim analizama predstavljaju podatke o prethodnim oborinama tijekom različitih vremenskih razdoblja (tablica 6.2), oborinama tijekom različito definiranih oborinskih događaja (tablica 6.3), oborinama umanjenim za vrijednosti dnevne evapotranspiracije (tablica 6.4) i tzv. modificiranim oborinama (tablica 6.5). Prethodne oborine tijekom različitih vremenskih razdoblja predstavljaju oborinu koja se dogodila na određeni dan, uvećanu za kumulativnu oborinu koja se dogodila tijekom određenog broja prethodnih dana. Tako primjerice 10-dnevna oborina predstavlja oborinu koja je pala određeni dan, uvećanu za kumulativnu oborinu koja se dogodila u prethodnih devet dana. Oborinski događaji predstavljaju ukupnu količinu oborine pale u nekom vremenskom razdoblju pri čemu je početak i kraj, odnosno trajanje tog razdoblja, definirano određenim brojem dana bez oborine. Primjerice ako je broj dana bez oborine definiran kao dva, oborinski događaj predstavlja razdoblje oborina koje započinje dnevnom oborinom prije koje najmanje tri dana nije bilo druge dnevne oborine, a završava dnevnom oborinom nakon koje najmanje tri dana nije bilo nove dnevne oborine. Kao prediktor su također korištene oborine umanjene za iznose dnevnih evapotranspiracija, na način da su prethodne oborine za neko vremensko razdoblje umanjenje za zbroj dnevnih evapotranspiracija tijekom istog razdoblja. Ovako izračunate oborine korištene su da bi se utvrdio stvarni utjecaj oborina na promjenu razine podzemne vode tijekom ljetnih mjeseci i u ovom radu se nazivaju efektivnim oborinama. Dnevne evapotranspiracije određene su na temelju prosječnih mjesečnih evapotranspiracija, određenih na meteorološkoj postaji Zagreb-Maksimir (Zaninović i dr., 2008) za razdoblje od 1999. do 2011. godine, tako što su prosječne mjesečne vrijednosti evapotranspiracije podijeljene s brojem dana u mjesecu. Budući da su dnevne vrijednosti evapotranspiracije oduzimane od dnevne oborine svakog dana tijekom određenog razdoblja (razdoblja za koje se računa prethodna oborina), u dužim razdobljima bez oborina efektivna oborina može biti i negativna. Osim toga, za naglašavanje utjecaja sušnih i vlažnih razdoblja, korištene su i modificirane oborine različitog vremenskog trajanja. Prethodne oborine različitog trajanja modificirane su indeksima koji predstavljaju omjer mjesečnih oborina u mjesecu u kojem se oborina dogodila i prosječne mjesečne oborine za taj mjesec određene prema podacima

meteorološke postaje Zagreb-Grič za razdoblje od 1862. do 2012. godine. Na isti način oborine su modificirane i indeksima za tromjesečna razdoblja.

Utjecaj sušnih razdoblja i razdoblja recesije na razinu podzemne vode opisan je vremenskim podatkom, odnosno brojem dana od određenog oborinskog događaja (tablica 6.6), pri čemu veći broj dana od oborinskog događaja ukazuje na nižu razinu podzemne vode. Također, za određivanje utjecaja sušnih i vlažnih razdoblja, korišteni su i podaci o godišnjim dobima, gdje je proljeće označeno indeksom 1, a zima indeksom 4.

Tablica 6.2. Dnevna oborina i prethodne oborine korištene kao prediktori dubine do podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode s prikazom statističke značajnosti (p-vrijednost) i regresijskih koeficijenata (koeficijent) dobivenih analizom višestruke linearne regresije.

oznaka oborine	opis	razina podzemne vode		promjena brzine razine podzemne vode	
		p-vrijednost	koeficijent	p-vrijednost	koeficijent
1 PO	dnevna oborina	-	-	-	-
2 PO	oborina tijekom protekla dva dana	-	-	-	-
3 PO	oborina tijekom protekla tri dana	-	-	-	-
4 PO	oborina tijekom protekla četiri dana	-	-	-	-
5 PO	oborina tijekom proteklih pet dana	-	-	-	-
6 PO	oborina tijekom proteklih šest dana	-	-	-	-
7 PO	oborina tijekom proteklih sedam dana	-	-	-	-
8 PO	oborina tijekom proteklih osam dana	-	-	-	-
9 PO	oborina tijekom proteklih devet dana	-	-	-	-
10 PO	oborina tijekom proteklih 10 dana	-	-	-	-
15 PO	oborina tijekom proteklih 15 dana	-	-	-	-
20 PO	oborina tijekom proteklih 20 dana	$3,83 \cdot 10^{-3}$	0,1332	$3,65 \cdot 10^{-4}$	-0,0184
30 PO	oborina tijekom proteklih 30 dana	$4,25 \cdot 10^{-2}$	0,0418	-	-
50 PO	oborina tijekom proteklih 50 dana	$2,30 \cdot 10^{-10}$	-0,1262	$1,28 \cdot 10^{-3}$	0,0071
100 PO	oborina tijekom proteklih 100 dana	$4,67 \cdot 10^{-10}$	0,0238	$2,13 \cdot 10^{-3}$	-0,0013

Tablica 6.3. Oborinski događaji korišteni kao prediktori dubine do podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode s prikazom statističke značajnosti (p-vrijednost) i regresijskih koeficijenata (koeficijent) dobivenih analizom višestruke linearne regresije.

oznaka oborinskog događaja	opis	razina podzemne vode		promjena brzine razine podzemne vode	
		p-vrijednost	koeficijent	p-vrijednost	koeficijent
1 OD	oborina za razdoblja tijekom kojih nije bilo prekida oborine duljih od jednog dana	-	-	-	-
2 OD	oborina za razdoblja tijekom kojih nije bilo prekida oborine duljih od dva dana	-	-	-	-
3 OD	oborina za razdoblja tijekom kojih nije bilo prekida oborine duljih od tri dana	$5,85 \cdot 10^{-3}$	-0,0039	-	-
4 OD	oborina za razdoblja tijekom kojih nije bilo prekida oborine duljih od četiri dana	$4,65 \cdot 10^{-4}$	0,0031	-	-
5 OD	oborina za razdoblja tijekom kojih nije bilo prekida oborine duljih od pet dana	-	-	$1,29 \cdot 10^{-2}$	0,00018

Tablica 6.4. Efektivne oborine korištene kao prediktori dubine do podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode s prikazom statističke značajnosti (p-vrijednost) i regresijskih koeficijenata (koeficijent) dobivenih analizom višestruke linearne regresije.

oznaka efektivne oborine	opis	razina podzemne vode		promjena brzine razine podzemne vode	
		p-vrijednost	regresijski	p-vrijednost	regresijski
1 EF	1 PO umanjena za dnevnu evapotranspiraciju	-	-	-	-
2 EF	2 PO umanjena za dvodnevnu evapotranspiraciju	-	-	-	-
3 EF	3 PO umanjena za trodnevnu evapotranspiraciju	-	-	-	-
4 EF	4 PO umanjena za četverodnevnu evapotranspiraciju	-	-	-	-
5 EF	5 PO umanjena za petodnevnu evapotranspiraciju	-	-	-	-
6 EF	6 PO umanjena za šestodnevnu evapotranspiraciju	-	-	-	-
7 EF	7 PO umanjena za sedmodnevnu evapotranspiraciju	-	-	-	-
8 EF	8 PO umanjena za osmodnevnu evapotranspiraciju	-	-	-	-
9 EF	9 PO umanjena za devetodnevnu evapotranspiraciju	-	-	-	-
10 EF	10 PO umanjena za 10-dnevnu evapotranspiraciju	-	-	-	-
15 EF	15 PO umanjena za 15-dnevnu evapotranspiraciju	-	-	-	-
20 EF	20 PO umanjena za 20-dnevnu evapotranspiraciju	$6,66 \cdot 10^{-3}$	-0,1269	$1,19 \cdot 10^{-3}$	0,0170
30 EF	30 PO umanjena za 30-dnevnu evapotranspiraciju	$9,99 \cdot 10^{-3}$	-0,0535	-	-
50 EF	50 PO umanjena za 50-dnevnu evapotranspiraciju	$2,57 \cdot 10^{-10}$	0,1273	$1,03 \cdot 10^{-3}$	-0,0073
100 EF	100 PO umanjena za 100-dnevnu evapotranspiraciju	$9,93 \cdot 10^{-16}$	-0,0347	$1,13 \cdot 10^{-3}$	0,0015

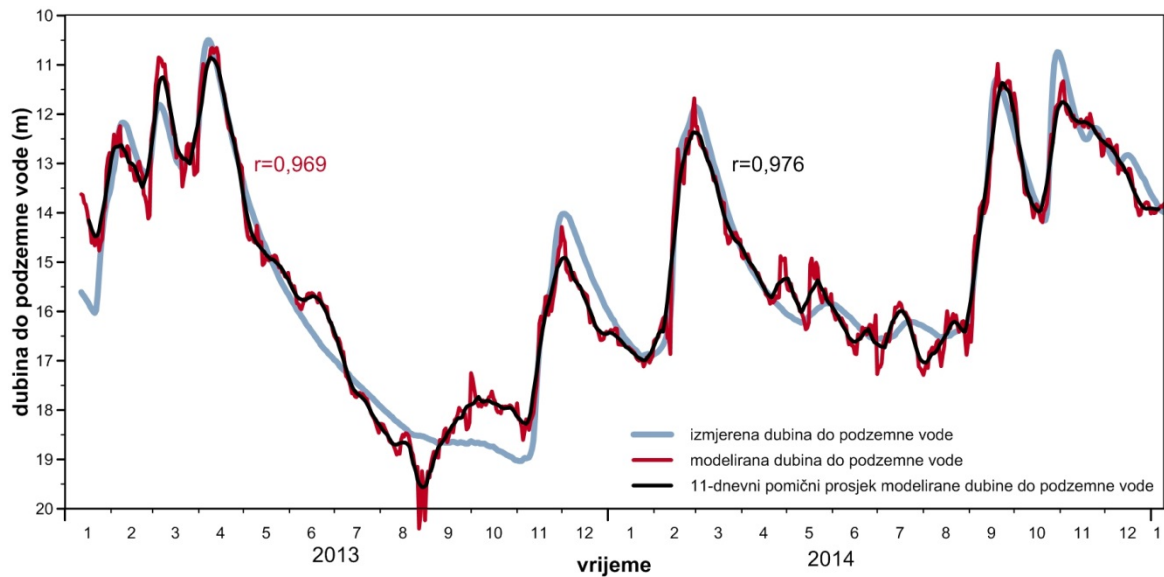
Tablica 6.5. Modificirane oborine različitih trajanja korištene kao prediktori dubine do podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode s prikazom statističke značajnosti (p-vrijednost) i regresijskih koeficijenata dobivenih analizom višestruke linearne regresije.

oznaka modificirane oborine	opis	razina podzemne vode		promjena brzine razine podzemne vode	
		p-vrijednost	koeficijent	p-vrijednost	koeficijent
1 PO_M	1 PO pomnožena s mjesečnim indeksom	-	-	-	-
2 PO_M	2 PO pomnožena s mjesečnim indeksom	-	-	$3,28 \cdot 10^{-2}$	0,0016
3 PO_M	3 PO pomnožena s mjesečnim indeksom	-	-	-	-
4 PO_M	4 PO pomnožena s mjesečnim indeksom	-	-	-	-
5 PO_M	5 PO pomnožena s mjesečnim indeksom	-	-	-	-
10 PO_M	10 PO pomnožena s mjesečnim indeksom	-	-	$3,80 \cdot 10^{-2}$	-0,0005
15 PO_M	15 PO pomnožena s mjesečnim indeksom	-	-	-	-
20 PO_M	20 PO pomnožena s mjesečnim indeksom	-	-	$3,43 \cdot 10^{-5}$	-0,0005
30 PO_M	30 PO pomnožena s mjesečnim indeksom	-	-	-	-
1 PO_3 M	1 PO pomnožena s tromjesečnim indeksom	-	-	-	-
2 PO_3 M	2 PO pomnožena s tromjesečnim indeksom	-	-	-	-
3 PO_3 M	3 PO pomnožena s tromjesečnim indeksom	-	-	-	-
4 PO_3 M	4 PO pomnožena s tromjesečnim indeksom	-	-	-	-
5 PO_3 M	5 PO pomnožena s tromjesečnim indeksom	-	-	$4,30 \cdot 10^{-2}$	-0,0028
10 PO_3 M	10 PO pomnožena s tromjesečnim indeksom	-	-	-	-
15 PO_3 M	15 PO pomnožena s tromjesečnim indeksom	$4,72 \cdot 10^{-2}$	-0,0121	$3,51 \cdot 10^{-2}$	-0,0045
20 PO_3 M	20 PO pomnožena s tromjesečnim indeksom	-	-	-	-
30 PO_3 M	30 PO pomnožena s tromjesečnim indeksom	$1,63 \cdot 10^{-3}$	0,0123	$2,01 \cdot 10^{-2}$	0,0010
1 PO_3 M_PR	sedmodnevni prosjek 1 PO_3 M	-	-	-	-
2 PO_3 M_PR	sedmodnevni prosjek 2 PO_3 M	-	-	-	-
3 PO_3 M_PR	sedmodnevni prosjek 3 PO_3 M	-	-	-	-
4 PO_3 M_PR	sedmodnevni prosjek 4 PO_3 M	-	-	-	-
5 PO_3 M_PR	sedmodnevni prosjek 5 PO_3 M	-	-	-	-
10 PO_3 M_PR	sedmodnevni prosjek 10 PO_3 M	-	-	$8,02 \cdot 10^{-3}$	-0,0015
15 PO_3 M_PR	sedmodnevni prosjek 15 PO_3 M	-	-	-	-
20 PO_3 M_PR	sedmodnevni prosjek 20 PO_3 M	-	-	-	-
30 PO_3 M_PR	sedmodnevni prosjek 30 PO_3 M	$3,14 \cdot 10^{-2}$	-0,0066	-	-

Tablica 6.6. Vremenske varijable koje opisuju sezonske utjecaje na dubinu do podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode s prikazom statističke značajnosti (p-vrijednost) i regresijskih koeficijenata (koeficijent) dobivenih analizom višestruke linearne regresije.

oznaka vremenske varijable	opis	razina podzemne vode		promjena brzine razine podzemne vode	
		p-vrijednost	koeficijent	p-vrijednost	koeficijent
1 D_20	broj dana od posljednje 1D oborine veće od 20 mm	-	-	-	-
1 D_30	broj dana od posljednje 1D oborine veće od 30 mm	$1,84 \cdot 10^{-4}$	0,0070	$2,95 \cdot 10^{-7}$	0,0011
1 D_40	broj dana od posljednje 1D oborine veće od 40 mm	$2,12 \cdot 10^{-15}$	-0,0071	-	-
1 D_50	broj dana od posljednje 1D oborine veće od 50 mm	$<2,0 \cdot 10^{-16}$	0,0073	$7,52 \cdot 10^{-3}$	-0,0001
3 D_20	broj dana od posljednje 3D oborine veće od 20 mm	-	-	-	-
3 D_30	broj dana od posljednje 3D oborine veće od 30 mm	-	-	-	-
3D_40	broj dana od posljednje 3D oborine veće od 40 mm	-	-	-	-
3 D_50	broj dana od posljednje 3D oborine veće od 50 mm	$<2,0 \cdot 10^{-16}$	0,0092	$2,46 \cdot 10^{-2}$	-0,0002
5 D_20	broj dana od posljednje 5D oborine veće od 20 mm	$2,94 \cdot 10^{-6}$	0,0127	-	-
5 D_30	broj dana od posljednje 5D oborine veće od 30 mm	-	-	$5,35 \cdot 10^{-3}$	-0,0008
5D_40	broj dana od posljednje 5D oborine veće od 40 mm	-	-	$1,68 \cdot 10^{-5}$	-0,0013
5 D_50	broj dana od posljednje 5D oborine veće od 50 mm	$1,31 \cdot 10^{-7}$	-0,0103	$4,99 \cdot 10^{-2}$	0,0004
GOD. DOB.	godišnje doba	$6,06 \cdot 10^{-7}$	-0,1968	-	-

Rezultat modeliranja razine podzemne vode višestrukom linearnom regresijom na temelju svih 75 nezavisnih varijabli prikazan je na slici 6.16. Kvaliteta modela određena je na temelju koeficijenta korelacije između modeliranih i izmjerenih dubina do podzemne vode, koji iznosi 0,969, pod pretpostavkom da je odnos između ovih veličina linearan. Budući da razine vode dobivene višestrukom regresijom pokazuje veliku varijabilnost, odnosno izraženi „cik-cak“ obrazac, podaci su izgladeni pomičnim prosjekom od 3, 5, 7, 9, 11 i 13 dana. Podaci određeni pomičnim prosjekom od 11 dana imaju najveći koeficijent korelacije (0,976) s izmjerenim podacima dubina do podzemne vode. Maksimalna razlika u dubinama, između modeliranih i izmjerenih podataka, iznosi 2,02 m, a odnosi se na sami početak razdoblja praćenja (siječanj 2013. godine), a prosječna razlika između modeliranih i izmjerenih podataka iznosi 0,42 m. Maksimalna razlika u dubinama između 11-dnevnog pomičnog prosjeka i izmjerenih podataka iznosi 1,88 m i također se odnosi na početak razdoblja mjerenja, a prosječna razlika između modeliranih i izmjerenih podataka iznosi 0,39 m. Radi usporedbe rezultata s rezultatima modela u idućim poglavljima, izračunata je i srednja kvadratna pogreška, koja za model višestruke regresije iznosi $0,30 \text{ m}^2$.



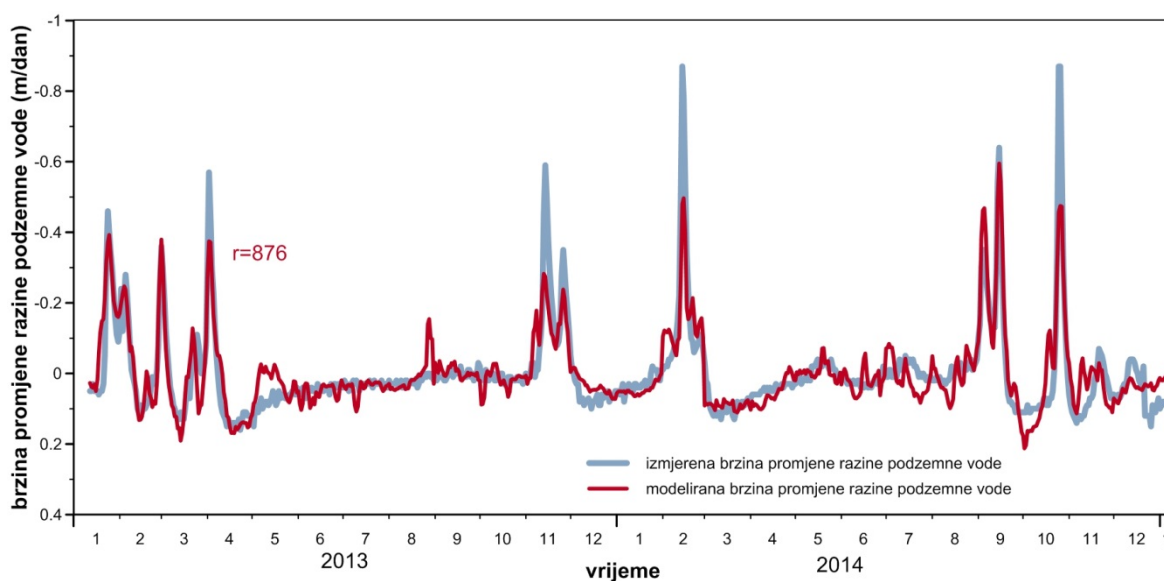
Slika 6.16. Prikaz izmjerene razine podzemne vode i razina podzemne vode određenih višestrukom linearnom regresijom.

Tijekom analize višestruke linearne regresije, u kojoj je kao zavisna varijabla korištena dubina do podzemne vode, određeno je 20 statistički značajnih prediktora s obzirom na usvojenu statističku značajnost (p -vrijednost) od 0,05. Statistički značajni prediktori za analizu razine dubine do podzemne vode prikazani su u tablicama 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, i 6.6. Iz tablica je vidljivo da su statistički značajni prediktori slijedeći: (1) oborine za prethodno razdoblje od 20 do 100 dana; (2) oborinski događaji 3 OD i 4 OD; (3) efektivne oborine za prethodno razdoblje od 20 do 100 dana; (4) duljine vremenskih razdoblja od određenih oborina; te (5) godišnja doba. S druge strane, među oborinama kratkog trajanja te među odabranim modificiranim oborinama većina ne predstavlja statistički značajne varijable.

Razlog zbog čega su oborine tijekom dugotrajnih prethodnih razdoblja (20 do 100 dana) statistički značajne je to što njihove vrijednosti bolje opisuju vrijednosti razina podzemne vode, na način da se razdoblja velikih oborina tijekom dugih prethodnih razdoblja podudaraju s razdobljima visokih razina podzemne vode, a razdoblja relativno malih oborina tijekom dugih prethodnih razdoblja s razdobljima niskih razina podzemne vode. Iako je u prethodnom poglavlju (6.1.1) određeno da najveći utjecaj na razinu podzemne vode imaju oborine tijekom proteklih sedam dana, ove oborine u analizi višestruke linearne regresije nisu statistički značajne. Naime, vrijednosti oborina tijekom proteklih sedam dana, kao i kod ostalih kratkotrajnih oborina, predstavljaju mnogobrojna razdoblja relativno kratkotrajnih pikova, od kojih većina (osobito u ljetnim mjesecima) nije u podudarnosti s razdobljima visokih razina podzemne vode te zbog toga u modelu višestruke linearne regresije nisu značajni za predviđanje.

Najveće regresijske koeficijente, što znači i najveći utjecaj na zavisnu varijablu (dubina do podzemne vode), imaju prethodne oborine i prethodne efektivne oborine za prethodnih 20 i 50 dana te utjecaj godišnjih doba. Vrijednost konstante višestruke linearne regresije iznosi 14,38, što znači da u slučaju kada bi vrijednosti svih nezavisnih varijabli bile nula, dubina do podzemne vode određena višestrukom linearnom regresijom iznosila bi 14,38 m.

Rezultat modeliranja brzine promjene razine podzemne vode višestrukom linearnom regresijom na temelju svih 75 nezavisnih varijabli prikazan je na slici 6.17. Koeficijent korelacije između modeliranih i izmjerenih brzina promjena razine podzemne vode, pod pretpostavkom linearnog odnosa između ovih veličina, iznosi 0,876. Maksimalna razlika u brzinama promjene razine podzemne vode, između modeliranih i izmjerenih podataka, iznosi 0,41 m/dan za razdoblje porasta razine podzemne vode I u listopadu 2014. godine, a prosječna razlika između modeliranih i izmjerenih podataka iznosi 0,04 m/dan. Srednja kvadratna pogreška modela višestruke linearne regresije za procjenu brzine promjene razine podzemne vode iznosi $0,004 \text{ m}^2/\text{dan}^2$.



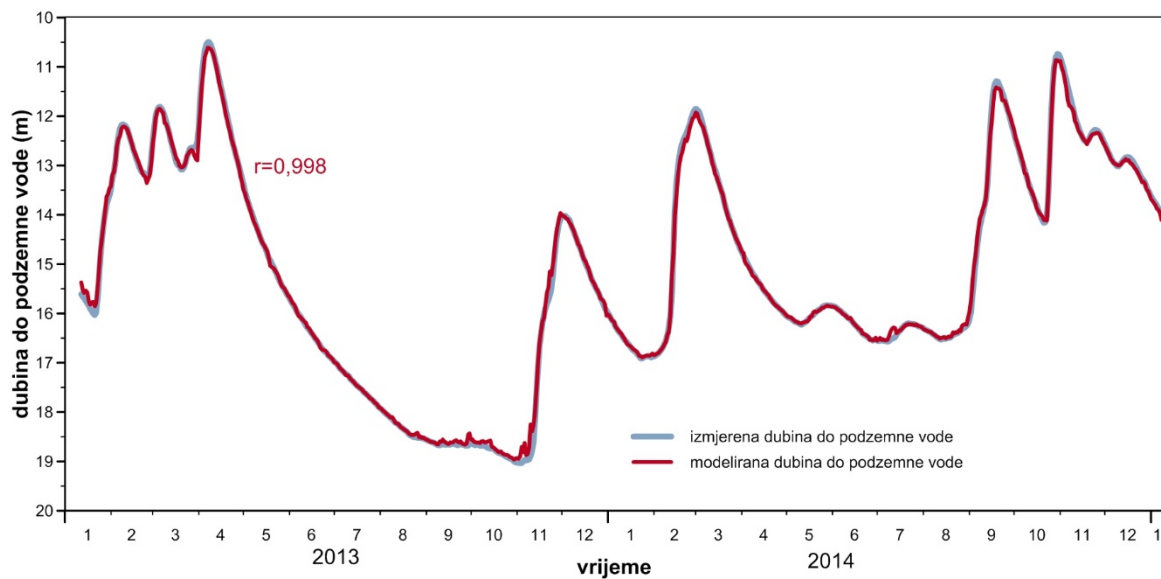
Slika 6.17. Prikaz izmjerene brzine promjene razine podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode određene višestrukom linearnom regresijom.

Tijekom analize višestruke linearne regresije, u kojoj je kao zavisna varijabla korištena brzina promjene razine podzemne vode, određeni su statistički značajni prediktori (tablice 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, i 6.6), kojih kao i za slučaju kada je nezavisna varijabla dubina do podzemne vode, ima 20. Općenito se može reći da su statistički značajni prediktori slični kao za slučaj kada je zavisna varijabla razina podzemne vode. Najveće regresijske koeficijente imaju oborine i efektivne oborine za prethodnih 20 dana, a vrijednost konstante višestruke linearne regresije iznosi 0,168.

6.1.2.2. Metoda slučajnih šuma

Analiza metodom slučajnih šuma obavljena je na sličan način kao i analiza metodom višestruke linearne regresije, tako što je najprije provedena analiza u kojoj je zavisna varijabla dubina do podzemne vode, a zatim analiza u kojoj je zavisna varijabla brzina promjene razine podzemne vode. Također, u analizama je korišteno svih 75 nezavisnih varijabli, opisanih u tablicama 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 i 6.6.

Rezultat modeliranja razine podzemne vode metodom slučajnih šuma prikazan je na slici 6.18. Prilikom provođenja analize slučajnih šuma u programu R broj nasumičnih varijabli uzetih u obzir prilikom svakog grananja u regresijskom stablu (*mtry*) iznosio je 15, dok je broj izgrađenih stabala prilikom svake analize (*ntree*) iznosio 1.000. Koeficijent korelacije između podataka dobivenih metodom slučajnih šuma i izmjerene dubine do podzemne vode iznosi 0,998. Maksimalna razlika u dubinama između modeliranih i izmjerenih podataka iznosi 0,64 m (za mjerenja u studenom 2013. godine), a prosječna razlika između modeliranih i izmjerenih podataka iznosi 0,051 m. Srednja kvadratna pogreška modela dobivenog metodom slučajnih šuma iznosi 0,013 m². Usporedba rezultata modela slučajnih šuma i modela višestruke linearne regresije na temelju navedenih statističkih pokazatelja (tablica 6.7) ukazuje na to da model slučajnih šuma bolje simulira dubine do podzemne vode.

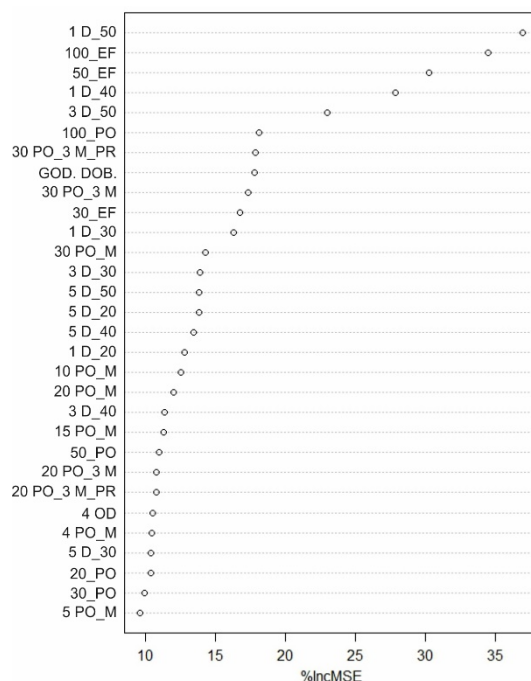


Slika 6.18. Prikaz izmjerene dubine i dubine do podzemne vode određene metodom slučajnih šuma.

Tablica 6.7. Statistički pokazatelji dobiveni usporedbom izmjerenih podataka i podataka dobivenih modelima višestruke linearne regresije i slučajnih šuma.

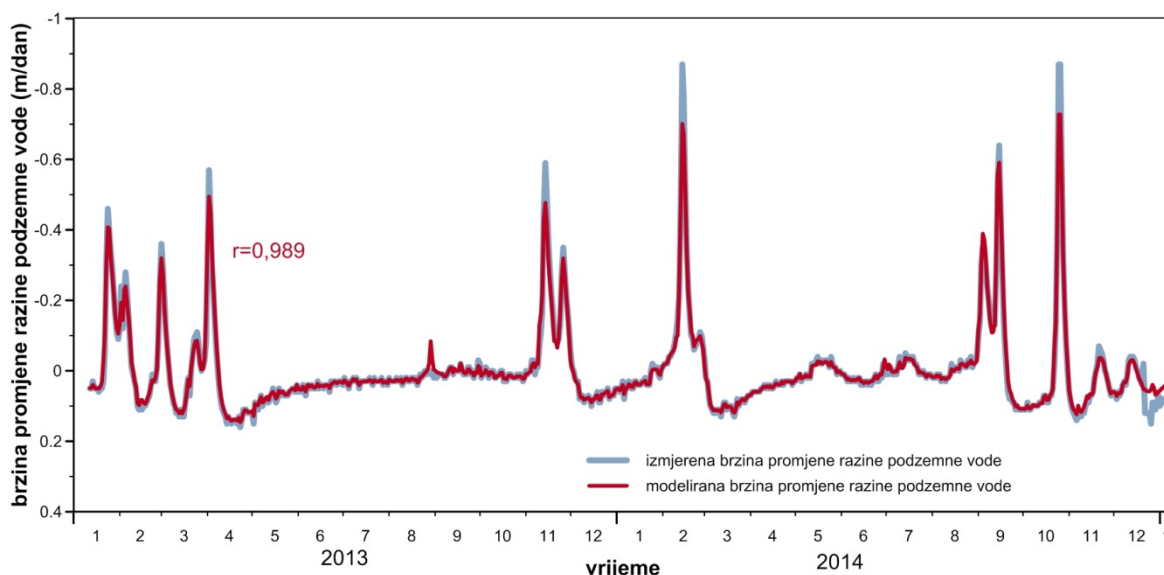
statistički pokazatelj	višestruka linearna regresija	slučajne šume
koeficijent korelacije	0,969	0,998
maksimalna razlika između modeliranih i izmjerenih podataka	2,02 m	0,64 m
prosječna razlika između modeliranih i izmjerenih podataka	0,42 m	0,051 m
srednja kvadratna pogreška	0,30 m ²	0,013 m ²

Na dijagramu na slici 6.19 prikazano je 30 najvažnijih prediktora dobivenih analizom slučajnih šuma. Važnost prediktora određena je na temelju parametra *%IncMSE*, koji ukazuje na prosječno smanjenje točnosti predviđanja (povećanje srednje kvadratne pogreške), u slučaju kada se određena nezavisna varijabla isključi iz modela. Iz dijagrama na slici 6.19 se vidi da najveću važnost za model imaju sljedeće zavisne varijable: (1) broj dana od posljednje oborine čija količina iznosi 40 i 50 mm; (2) dugotrajne efektivne oborine trajanja 50 i 100 dana; (3) prethodne oborine za razdoblje od 100 dana; (4) 3-dnevne modificirane oborine; i (5) godišnja doba. Među važnim prediktorima, kao i u slučaju višestruke linearne regresije, nema kratkotrajnih oborina.



Slika 6.19. Značajnost prediktorskih varijabli u predviđanju razine podzemne vode metodom slučajnih šuma.

Rezultat modeliranja brzine promjene razine podzemne vode metodom slučajnih šuma prikazan je na slici 6.20. Prilikom provođenja analize slučajnih šuma u programu R za broj nasumičnih varijabli uzetih u obzir prilikom svakog grananja u regresijskom stablu (*mtry*) postavljeno je 15, a za broj izgrađenih stabla prilikom svake analize (*ntree*) 1.000. Koeficijent korelacije između podataka dobivenih metodom slučajnih šuma i izmjerene dubine do podzemne vode iznosi 0,989. Maksimalna razlika u brzinama promjene razine podzemne vode, između modeliranih i izmjerenih podataka, iznosi 0,17 m/dan, dok prosječna razlika između modeliranih i izmjerenih podataka iznosi 0,01 m/dan. Srednja kvadratna pogreška modela dobivenog metodom slučajnih šuma iznosi 0,0004 mm²/dan². Usporedba rezultata modela slučajnih šuma i modela višestruke linearne regresije na temelju navedenih statističkih pokazatelja (tablica 6.8.) ukazuje na to da model slučajnih šuma, na temelju zadanih prediktora, bolje simulira brzine promjene razine podzemne vode.

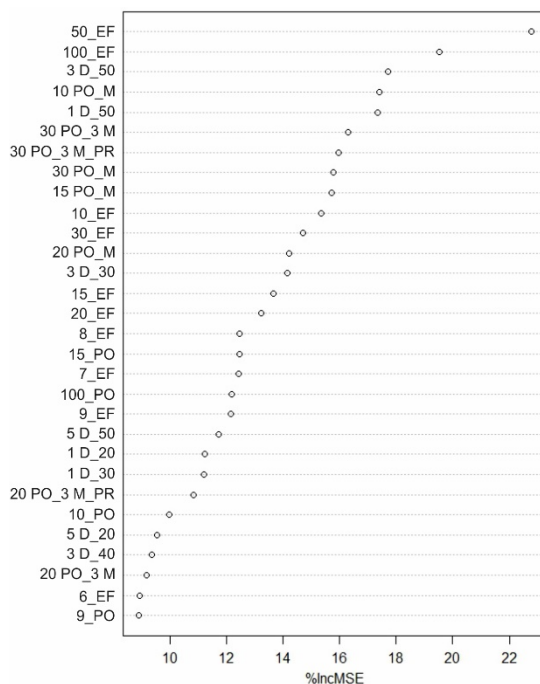


Slika 6.20. Prikaz izmjerene brzine promjene razine podzemne vode i brzine promjene razine podzemne vode određene metodom slučajnih šuma.

Tablica 6.8. Statistički pokazatelji dobiveni usporedbom izmjerenih podataka o brzini promjene razine podzemne vode i podataka dobivenih modelima višestruke linearne regresije i slučajnih šuma.

statistički pokazatelj	višestruka linearna regresija	slučajne šume
koeficijent korelacije	0,876	0,989
maksimalna razlika između modeliranih i izmjerenih podataka	0,41 mm/dan	0,17 mm/dan
prosječna razlika između modeliranih i izmjerenih podataka	0,04 mm/dan	0,01 mm/dan
srednja kvadratna pogreška	0,004 mm ² /dan ²	0,0004 mm ² /dan ²

Na dijagramu na slici 6.21 prikazano je 30 najvažnijih prediktora za predviđanje brzine promjene razine podzemne vode metodom slučajnih šuma. Iz slike se vidi da najveću važnost za model imaju: (1) prethodne oborine trajanja 50 i 100 dana; (2) efektivne oborine trajanja 50 i 100 dana; (3) broj dana od posljednje 50 mm oborine, slično kao i model slučajnih šuma kojim se predviđaju dubine do podzemne vode; te (4) 15 i 30-dnevne modificirane oborine. Unutar 30 najvažnijih prediktora, za razliku od modela koji predviđa dubinu do podzemne vode, nalaze se i prethodne i efektivne oborine za razdoblja kraćeg trajanja, kao što su primjerice EF 6, EF 7, EF 8, EF 9 i EF 10.



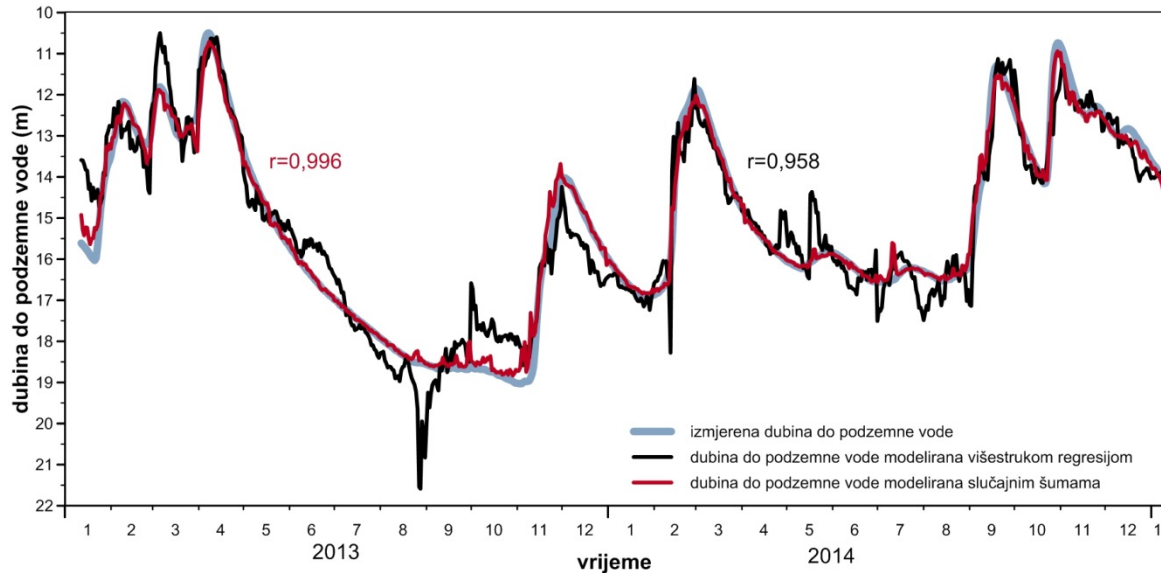
Slika 6.21. Značajnost prediktorskih varijabli u predviđanju razine podzemne vode metodom slučajnih šuma.

6.1.2.3. Usporedba rezultata višestruke linearne regresije i slučajnih šuma

Osim u tablicama 6.7. i 6.8., prikazanim u prethodnom poglavlju, modeli višestruke linearne regresije i slučajnih šuma međusobno su uspoređeni i metodom unakrsne validacije, čije su teorijske osnove opisane u poglavlju 4.2.4. Ova analiza služi za procjenu testne pogreške određenog statističkog modela u svrhu procjene njegove učinkovitosti te odabira najboljeg modela (James i dr., 2014).

Na modelima višestruke linearne regresije i slučajnih šuma koji predviđaju razine podzemne vode prvo je obavljena k -struka unakrsna validacija. Niz od 730 podataka o razini podzemne vode i pripadajućih prediktora u isto toliko dana mjerenja nasumično su podijeljeni u 10 skupova po 73 podatka. Unakrsna validacija provedena je na način da je određen model za $k-1$ skupova podataka, koji je zatim primijenjen, odnosno testiran, na preostalom k skupu podataka. Opisana analiza provedena je za svaki od 10 skupova. Kao ocjena modela korištena je srednja kvadratna pogreška, dobivena kao prosjek srednjih kvadratnih

pogrešaka svakog testiranog skupa. Srednja kvadratna pogreška modela višestruke linearne regresije iznosi $0,42 \text{ m}^2$, dok srednja kvadratna pogreška modela slučajnih šuma iznosi $0,05 \text{ m}^2$, što ukazuje da model slučajnih šuma ima bolja predikcijska svojstva nego model višestruke regresijske analize. Rezultati dobiveni k -strukom unakrsnom validacijom prikazani su na slici 6.22.

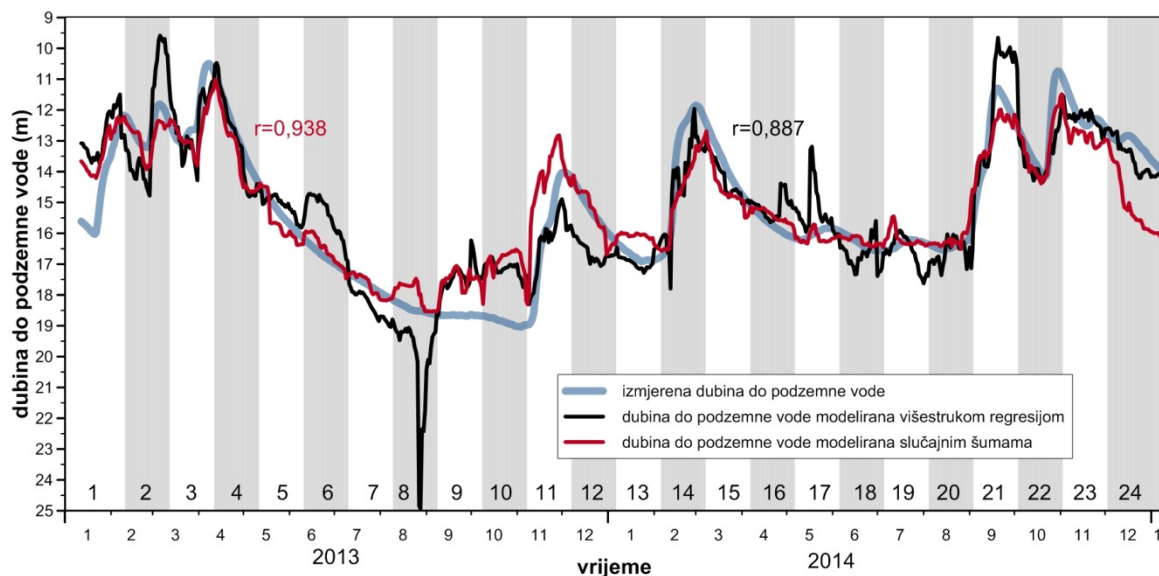


Slika 6.22. Razine podzemne vode dobivene k -strukom unakrsnom validacijom modela višestruke linearne regresije i modela slučajnih šuma.

Nakon k -struke unakrsne validacije, po sličnom principu je provedena i validacija modela. U ovom slučaju podaci su podijeljeni na 24 skupa od 30 podataka, s iznimkom posljednjeg skupa koji sadrži 40 podataka. Svrha ove analize je usporedba mjesečnih podataka, dobivenih modelom koji je treniran na preostala 23 mjeseca, i izmjerenih podataka. Za svaki od 24 skupa određena je srednja kvadratna pogreška te na temelju njih i srednja kvadratna pogreška za cijeli niz podataka. Srednja kvadratna pogreška modela višestruke linearne regresije dobivena validacijom iznosi $1,17 \text{ m}^2$, a srednja kvadratna pogreška modela dobivena metodom slučajnim šumama iznosi $0,78 \text{ m}^2$. Niža vrijednost srednje kvadratne pogreške, kao i u slučaju k -struke unakrsne validacije, ukazuje na bolja predikcijska svojstva modela slučajnih šuma.

Rezultati dobiveni validacijom prikazani su na slici 6.23 i u tablici 6.9. Iz slike 6.23 i tablice 6.9 vidljivo je da oba modela imaju najveće pogreške na podacima na početku razdoblja mjerenja, vjerojatno zbog toga što se tijekom ostalih razdoblja nije dogodio sličan događaj te je model krivo predvidio dubinu do podzemne vode, te tijekom kolovoza i rujna 2013. godine kada je palo preko 170 mm kiše, a nije zabilježen porast razine podzemne vode. Prije razdoblja oborina u ljetu 2013. godine (skup 8) predviđanje višestrukom regresijom značajno podcjenjuje razinu podzemne vode, dok se značajno precjenjivanje pojavljuje pred kraj razdoblja mjerenja (skup 21). Značajno podcjenjivanje razine podzemne vode dobivene predviđanjem slučajnim šumama može se uočiti u posljednjem skupu

podataka (skup 24), a razlog krive procjene je vjerojatno isti kao i za pogrešku na početku razdoblja mjerenja.



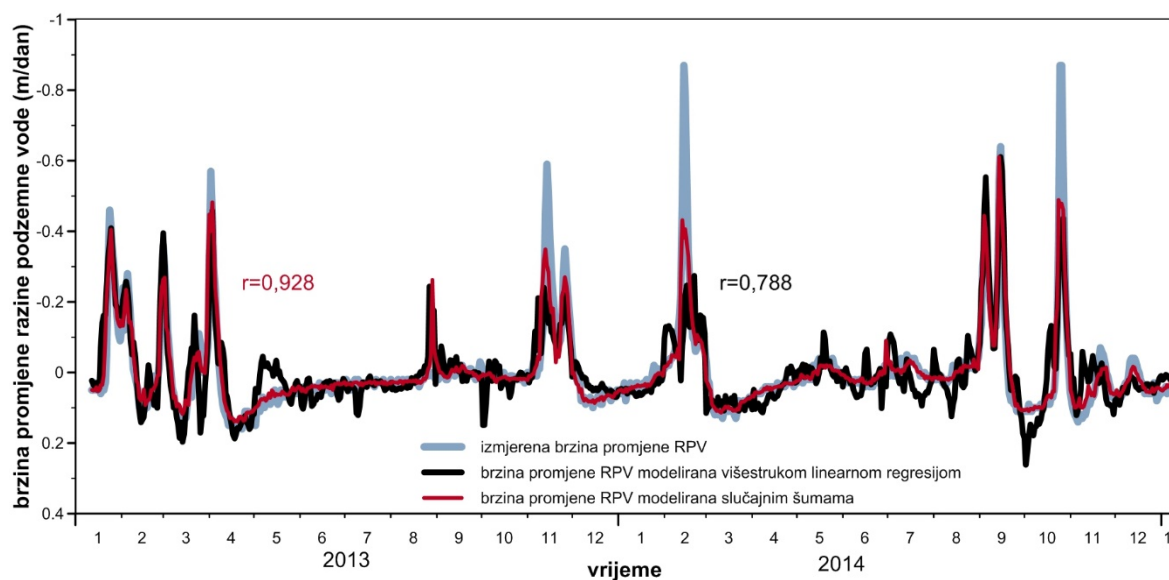
Slika 6.23. Dubine do podzemne vode dobivene validacijom modela višestruke linearne regresije i modela slučajnih šuma. Siva i bijela područja na dijagramu predstavljaju skupove od 30 dana, odnosno 40 dana za skup 24.

K -struka unakrsna validacija te validacija provedene su po istom principu i na modelima koji predviđaju brzinu promjene razine podzemne vode. K -struka unakrsna validacija provedena je na nizu od 730 podataka koji su nasumično podijeljeni na 10 skupova po 73 podatka. Srednja kvadratna pogreška modela višestruke linearne regresije iznosi $0,0063 \text{ m}^2/\text{dan}^2$, dok srednja kvadratna pogreška modela slučajnih šuma iznosi $0,0023 \text{ m}^2/\text{dan}^2$, što ukazuje da model slučajnih šuma i u slučaju predviđanja brzine promjene razine podzemne vode ima bolja predikcijska svojstva nego model višestruke linearne regresije. Rezultati dobiveni k -strukom unakrsnom validacijom prikazani su na slici 6.24.

U postupku validacije podaci o brzinama promjene razine podzemne vode podijeljeni su na 24 skupa, kao i kod validacije modela koji predviđaju dubinu do podzemne vode. Srednja kvadratna pogreška modela višestruke linearne regresije dobivena validacijom iznosi $0,011 \text{ m}^2/\text{dan}^2$, a srednja kvadratna pogreška modela dobivena metodom slučajnih šuma iznosi $0,005 \text{ m}^2/\text{dan}^2$. Niža vrijednost srednje kvadratne pogreške, kao i u slučaju k -struke unakrsne validacije, ukazuje na bolja predikcijska svojstva modela slučajnih šuma.

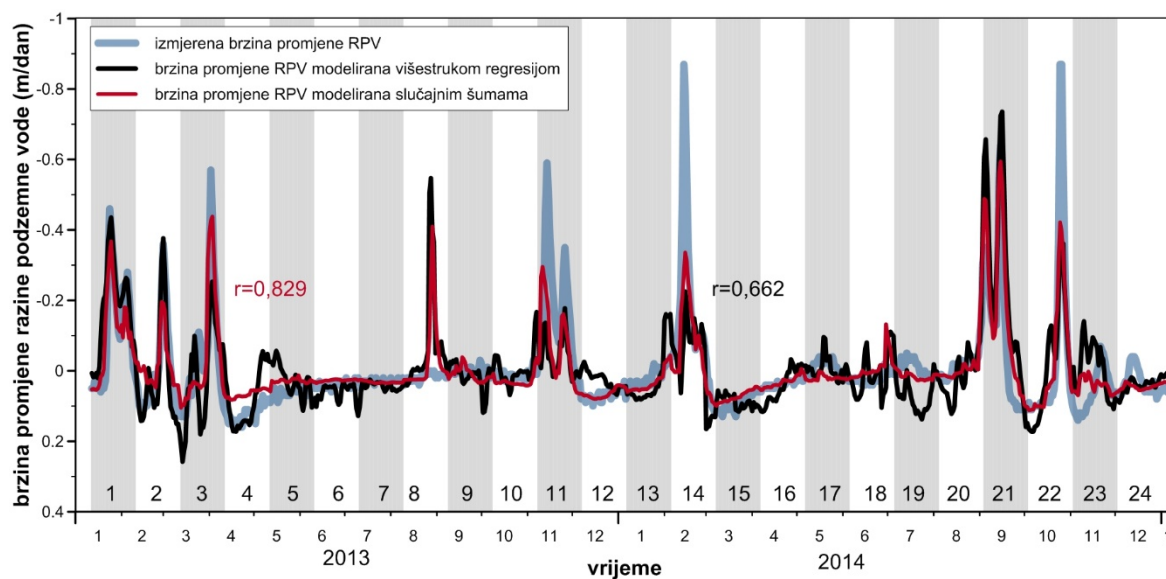
Tablica 6.9. Srednja kvadratna pogreška za razdoblja testiranja modela razine podzemne vode metodama višestruke linearne regresije i slučajnih šuma.

razdoblje	srednja kvadratna pogreška (m ²)	
	višestruka linearna regresija	slučajne šume
1	3,13	1,68
2	2,13	0,20
3	0,53	0,68
4	0,22	0,37
5	0,14	0,16
6	1,95	0,08
7	0,43	0,02
8	4,94	0,31
9	1,71	1,39
10	2,96	3,93
11	0,86	3,77
12	1,79	0,06
13	0,08	0,39
14	1,39	1,77
15	0,22	0,49
16	0,57	0,10
17	1,09	0,07
18	0,39	0,02
19	0,38	0,16
20	0,24	0,13
21	1,62	0,45
22	0,87	0,29
23	0,18	0,63
24	0,26	4,27
prosječna greška skupa	1,17	0,89



Slika 6.24. Brzine promjene razine podzemne vode dobivene k -strukom unakrsnom validacijom modela višestruke linearne regresije i modela slučajnih šuma.

Rezultati dobiveni validacijom prikazani su na slici 6.25 i u tablici 6.10. Iz slike 6.25 i tablice 6.10 vidljivo je da oba modela imaju najveće pogreške na podacima tijekom razdoblja 8 (kolovoz i rujan 2013.) kada je palo preko 170 mm kiše, a nije zabilježen porast razine podzemne vode. Također je vidljivo da u razdoblju 11 (razdoblja podizanja razine podzemne vode D1 i D2), razdoblju 14 (razdoblje podizanja razine podzemne vode D1) i razdoblju 22 (razdoblje podizanja razine podzemne vode I) modeli višestruke linearne regresije i modeli slučajnih šuma značajno podcjenjuju brzinu promjene razine podzemne vode.



Slika 6.25. Brzine promjene razine podzemne vode dobivene validacijom modela višestruke linearne regresije i modela slučajnih šuma. Siva i bijela područja na dijagramu predstavljaju skupove od 30 dana, odnosno 40 dana za skup 24.

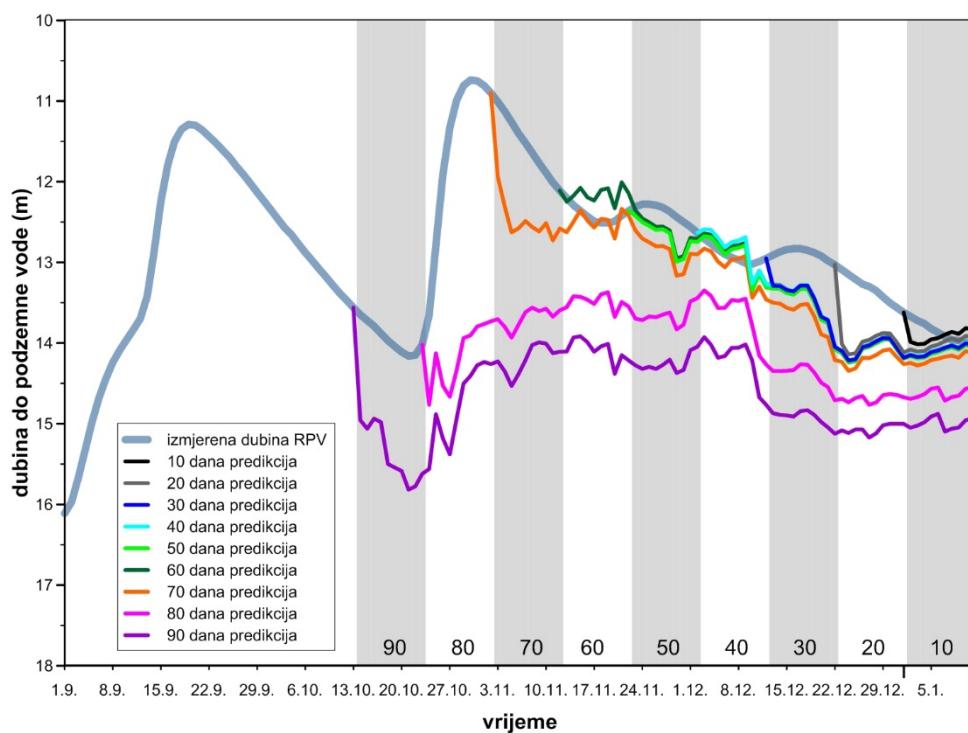
Posljednji skup analiza koji je proveden na podacima o oborinama, razinama podzemne vode i brzinama promjene razine podzemne vode odnosi se na predviđanje razine podzemne vode za posljednjih 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 i 90 dana mjerenja (od ukupno 730 dana). Za svako od predviđanja obavljeno je i treniranje modela višestruke linearne regresije i slučajnih šuma na prvih 640, 650, 660, 670, 680, 690, 700, 710 i 720 dana. Ukupno je provedeno četiri vrste analiza, od čega se dvije analize odnose na izravno određivanje dubine do razine podzemne vode metodama višestruke linearne regresije i slučajnih šuma, a dvije analize na određivanje brzine promjene razine podzemne vode metodama višestruke linearne regresije i slučajnih šuma. Nakon određivanja brzina promjene razine podzemne vode, one su kumulativno zbrojene na vrijednost dubine do razine podzemne vode posljednjeg podatka u nizu na kojemu je provođeno treniranje modela.

Tablica 6.10. Srednja kvadratna pogreška za razdoblja testiranja modela brzine promjene razine podzemne vode metodama višestruke regresije i slučajnih šuma.

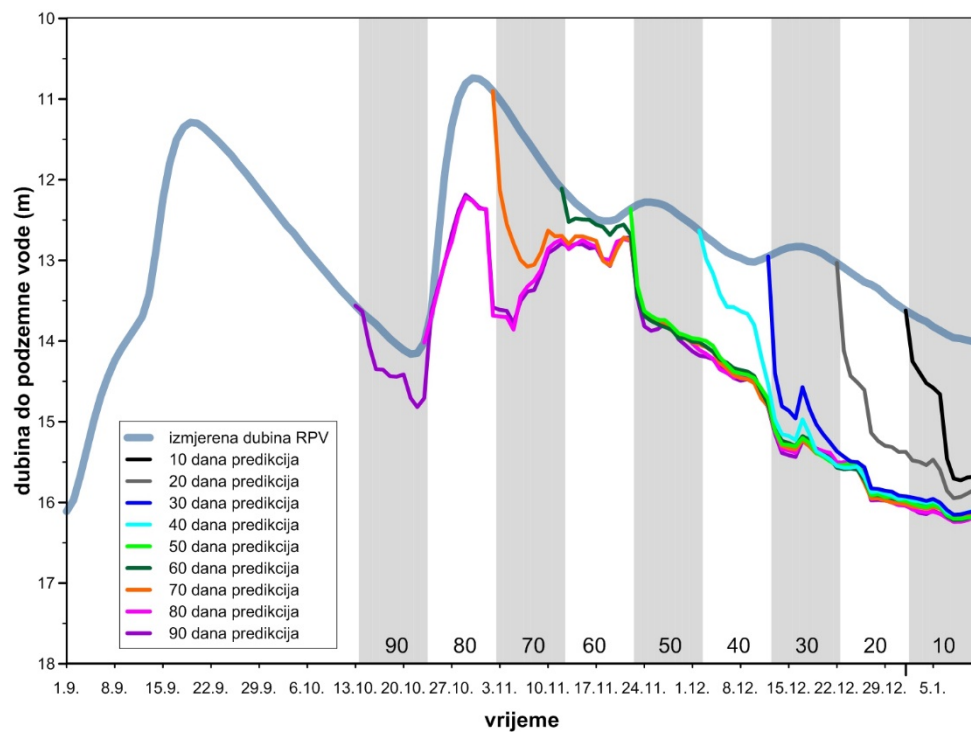
razdoblje	srednja kvadratna pogreška (m^2/dan^2)	
	višestruka linearna regresija	slučajne šume
1	0,010	0,005
2	0,004	0,006
3	0,018	0,007
4	0,005	0,003
5	0,004	0,001
6	0,001	0,0002
7	0,0004	0,0001
8	0,030	0,013
9	0,002	0,001
10	0,002	0,001
11	0,034	0,026
12	0,003	0,0002
13	0,004	0,001
14	0,050	0,026
15	0,001	0,001
16	0,002	0,0001
17	0,001	0,001
18	0,004	0,002
19	0,008	0,001
20	0,003	0,001
21	0,027	0,008
22	0,030	0,018
23	0,013	0,005
24	0,001	0,001
prosječna greška skupa	0,011	0,005

Rezultati izravnog predviđanja dubine do razine podzemne vode metodama višestruke linearne regresije i slučajnih šuma prikazani su na slikama 6.26 i 6.27, a rezultati određivanja dubine do razine podzemne vode na temelju predviđene brzine promjene razine podzemne vode metodama višestruke linearne regresije i slučajnih šuma na slikama 6.28 i 6.29. Srednje kvadratne pogreške svih predviđanja prikazane su na dijagramu na slici 6.30. Iz slike 6.30 je vidljivo da su najveće pogreške u predviđanju dobivene modelom slučajnih šuma koji izravno predviđa razine podzemne vode. Uzrok tome je da se slična kombinacija oborina i razine podzemne vode koji su se dogodili posljednjih 90 dana mjerenja nije dogodila u prvih 640 dana mjerenja. Velika pogreška za posljednjih 70 dana mjerenja, modelom slučajnih šuma koji izravno predviđa razine podzemne vode, vidljiva je i iz rezultata validacije (slika 6.23 i tablica 6.9), gdje je za razdoblje validacije 23 srednja kvadratna pogreška 3,5 puta veća, a za razdoblje validacije 24 čak 16 puta veća nego srednja kvadratna pogreška modela višestruke linearne regresije. Srednje kvadratne pogreške modela višestruke linearne regresije koji izravno predviđa razine podzemne vode relativno su niske za razdoblje od 10 do 70 dana, a za dulja razdoblja se značajno povećavaju budući da model nije predvidio podizanje razine podzemne vode tijekom razdoblja I. Pogreške predviđanja razina podzemne vode dobivenih na temelju brzine promjene razine podzemne određene metodom višestruke linearne regresije su veće od pogreške modela višestruke linearne regresije koji izravno određuje razine podzemne vode i to za razdoblje predviđanja od 50, 60 i 70 dana. Ove pogreške se na slici 6.28 uočavaju

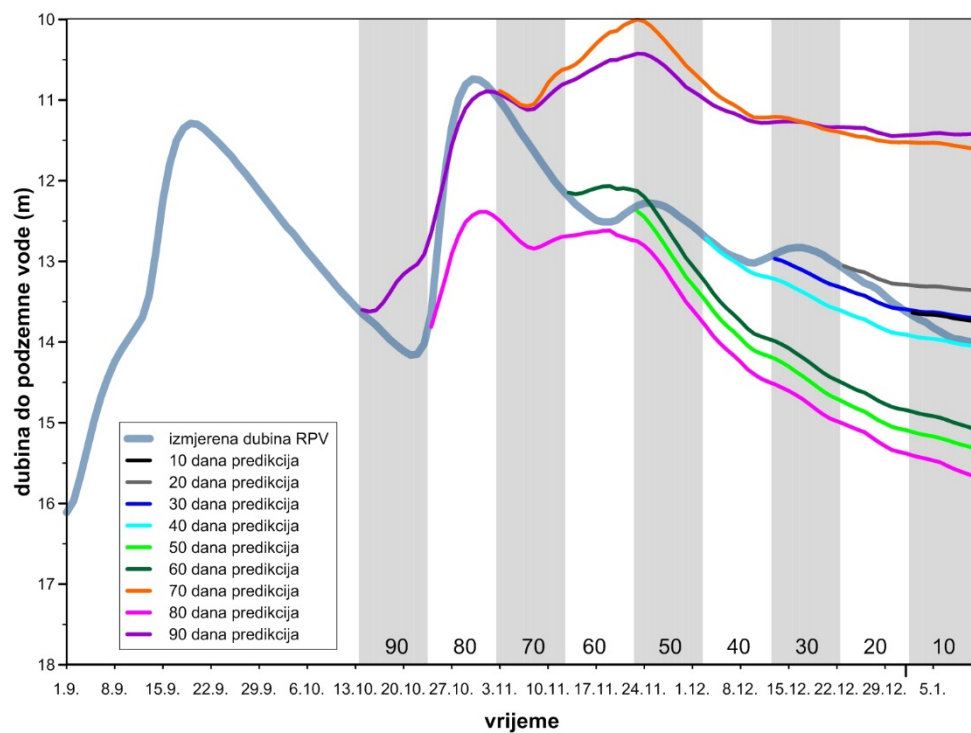
kao značajno podcjenjivanje dubine do podzemne vode. Općenito, najmanju pogrešku pokazuju razine podzemne vode dobivene na temelju brzine promjene razine podzemne određene metodom slučajnih šuma. Samo za razdoblje od 60 dana pogreška je nešto veća od pogreške modela višestruke linearne regresije koji izravno predviđa razinu podzemne vode. Velika razlika u predviđanju dubine do razine podzemne vode između modela slučajnih šuma posljedica je toga što je raspon vrijednosti dubine do podzemne vode znatno veći nego raspon vrijednosti brzine promjene razine podzemne vode pa krivo procijenjena vrijednost brzine ne utječe značajno na promjenu razine za razliku od krivo izravno procijenjene dubine do podzemne vode. S obzirom na prethodno opisano, ali i na srednje kvadratne pogreške modela, kao najbolji model je prihvaćen model slučajnih šuma za određivanje brzine promjene razine podzemne vode, na temelju kojih se određuju dubina do podzemne vode. Unatoč tome što je kao najbolji model prihvaćen model slučajnih šuma za određivanje brzine promjene razine podzemne vode, iz slike 6.29 je vidljivo da njime nisu predviđena razdoblja tijekom kojih su se dogodila manja podizanja razine podzemne vode. Sukladno tome se može zaključiti da ovaj model vrijedi samo za predviđanje velikih promjena razina podzemne vode, odnosno onih promjena razine podzemne vode koje imaju najveći utjecaj na gibanje klizišta Kostanjek, što je prikazano u sljedećem poglavlju.



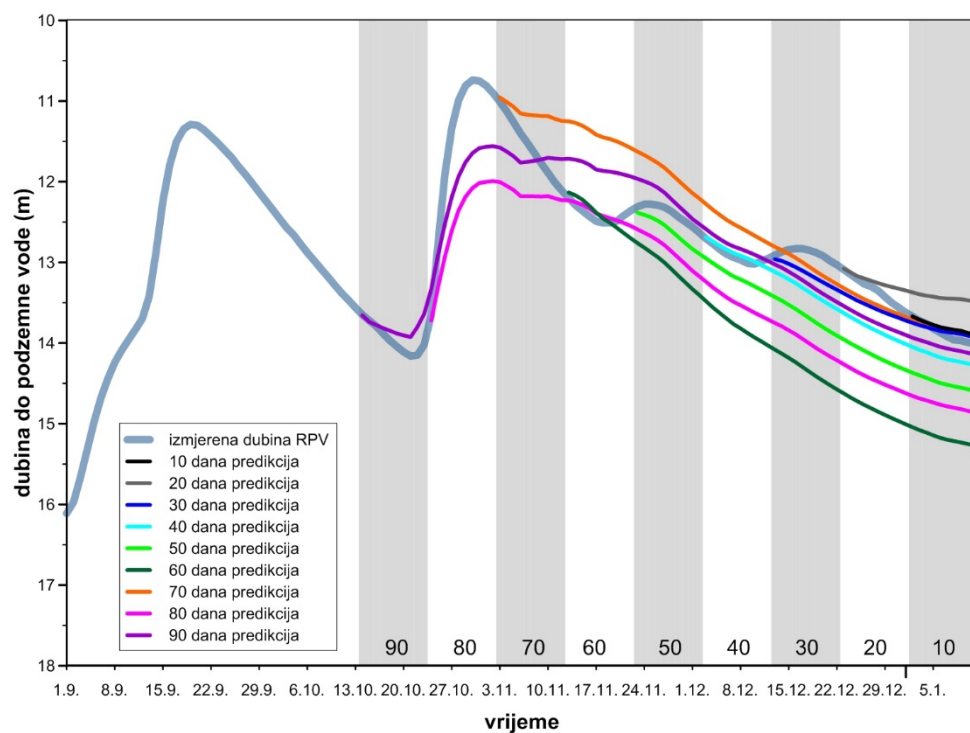
Slika 6.26. Predviđanje dubine do razine podzemne vode metodom višestruke linearne regresije.



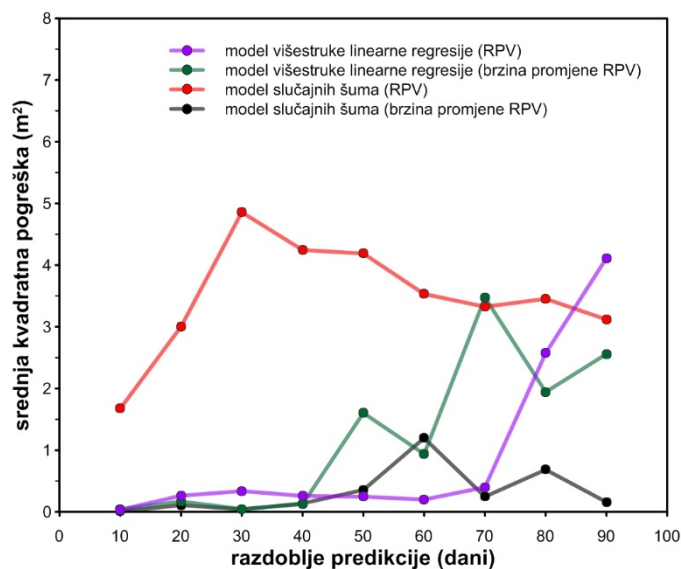
Slika 6.27. Predviđanje dubine do razine podzemne vode metodom slučajnih šuma.



Slika 6.28. Dubine do razine podzemne vode za različita razdoblja, određene na temelju predviđanja brzine promjene razine podzemne vode metodom višestruke linearne regresije.



Slika 6.29. Dubine do razine podzemne vode za različita razdoblja, određene na temelju predviđanja brzine promjene razine podzemne vode metodom slučajnih šuma.

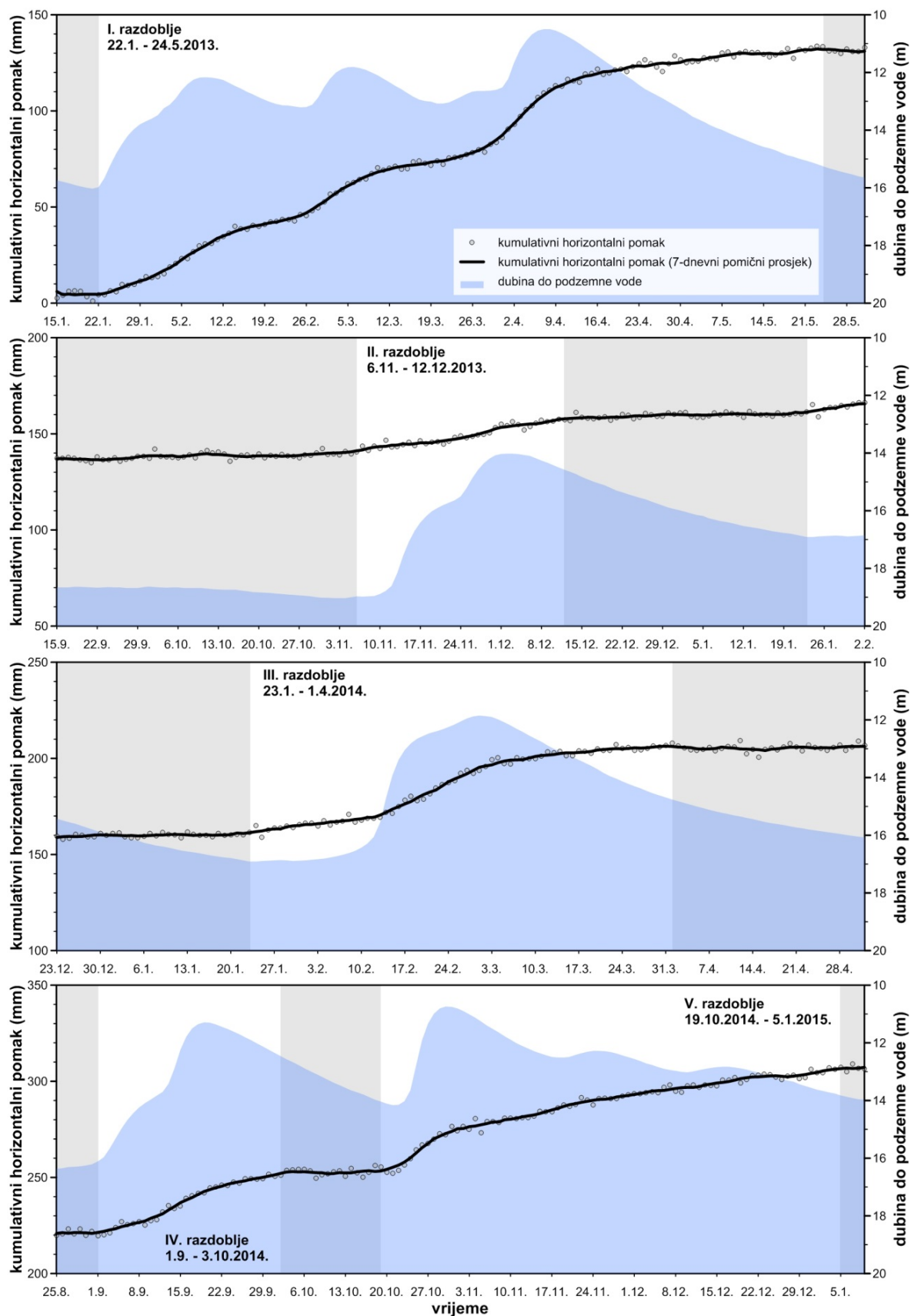


Slika 6.30. Srednje kvadratne pogreške predviđanja za različita razdoblja određene na temelju modela višestruke linearne regresije i modela slučajnih šuma.

6.2. Promjene razina podzemne vode i gibanje klizišta

Na središnjoj mjernoj postaji „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek“ (opisanog u poglavlju 4.1) 97% zabilježenih pomaka je posljedica pet statistički značajnih razdoblja bržeg gibanja, određenih u poglavlju 5.1.1.2. Na slici 6.31 je vidljivo da se razdoblja bržeg gibanja podudaraju s razdobljima podizanja razine podzemne vode. Slične obrasce gibanja u odnosu na promjene razine podzemne vode zabilježili su Matsuura i dr. (2008) te Massey (2010). Prvo razdoblje bržeg gibanja (razdoblje I) podudara se s razdobljima podizanja razine podzemne vode A, B i C, razdoblje II s razdobljem D, razdoblje III s razdobljem E, razdoblje IV s razdobljem H te razdoblje V s razdobljima I, J i K (slika 6.31.). Male promjene razine podzemne vode, koje su se dogodile u razdobljima F i G (0,4 i 0,37 m), nisu statistički značajno utjecale na gibanje klizišta Kostanjek. Razdoblje II i III započinje u trenutku kada se razina podzemne vode prestaje snižavati, a razlog zbog čega razdoblje IV započinje u vrijeme dok razina podzemne vode još uvijek pada, vjerojatno je posljedica pogreške mjerenja i uprosječivanja podataka o pomacima. Iz tog razloga su na slici 6.31, osim krivulje koja spaja 7-dnevne pomične prosjeke, prikazane i dnevne vrijednosti kumulativnih pomaka.

Iz tablice 6.11 i slike 6.31 vidljivo je da su na početku razdoblja bržeg gibanja dubine do podzemne vode veće nego na kraju razdoblja bržeg gibanja. Dubine do razine podzemne vode pri kojima je započelo svih pet razdoblja ubrzanog gibanja razlikuju se i do pet metara, dok su na kraju razdoblja razlike nešto manje, do tri metra. Ovi podaci o različitim dubinama ukazuju na to da ne postoji jedinstvena granična vrijednost dubine do podzemne vode, odnosno pornog tlaka, pri kojoj dolazi do povećanja i smanjenja brzine gibanja klizišta. Slično ponašanje na dubokom translacijskom klizištu Utiku navodi Massey (2010).



Slika 6.31. Kumulativni horizontalni pomaci i dubine do razine podzemne vode u razdobljima bržeg gibanja. Sivo osjenčana područja na dijagramu predstavljaju razdoblja sporijeg gibanja.

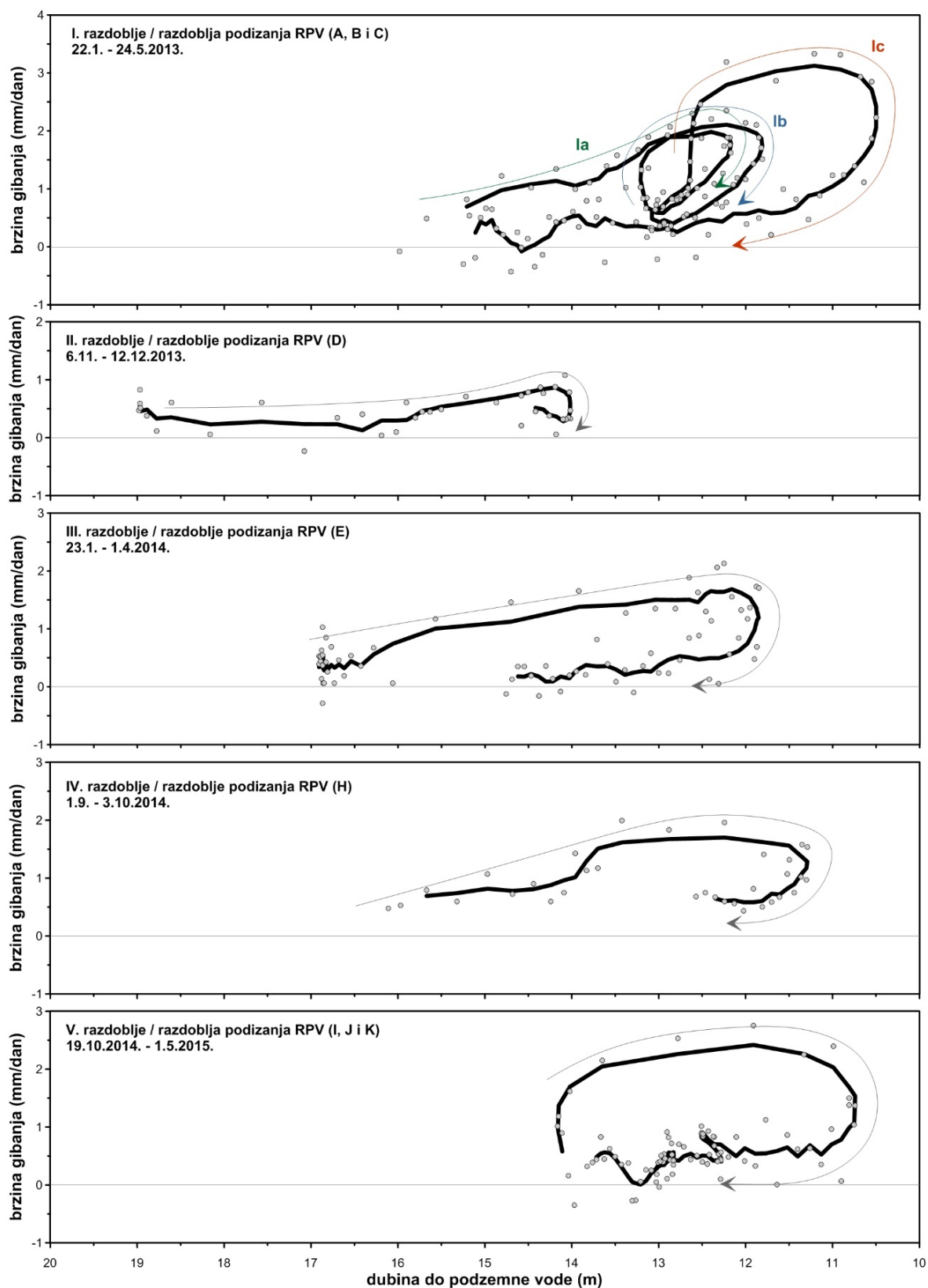
Tablica 6.11. Dubine do podzemne vode tijekom razdoblja bržeg gibanja.

razdoblje		dubina do podzemne vode(m)			podizanje RPV	gibanje klizišta	
bržeg gibanja	podizanja RPV	na početku razdoblja	minimalna dubina	na kraju razdoblja		ukupni pomak (mm)	maksimalna brzina (mm/dan)
I	A	16,03	12,17	13,18*	3,86	39,9	2,3
	B	13,21*	11,81	13,08*	1,40	28,2	2,4
	C	13,08*	10,50	15,25	2,58	57,9	3,3
II	D	18,98	14,02	14,58	4,96	16,6	1,1
III	E	16,89	11,85	14,76	5,04	44,9	2,1
IV	H	16,30	11,29	12,57	5,01	31,4	2,0
V	I	14,16	10,74	12,51*	3,42	30,7	2,8
	J	12,51*	12,28	13,02*	0,23	10,9	1,0
	K	13,02*	12,83	13,83	0,19	10,0	0,9

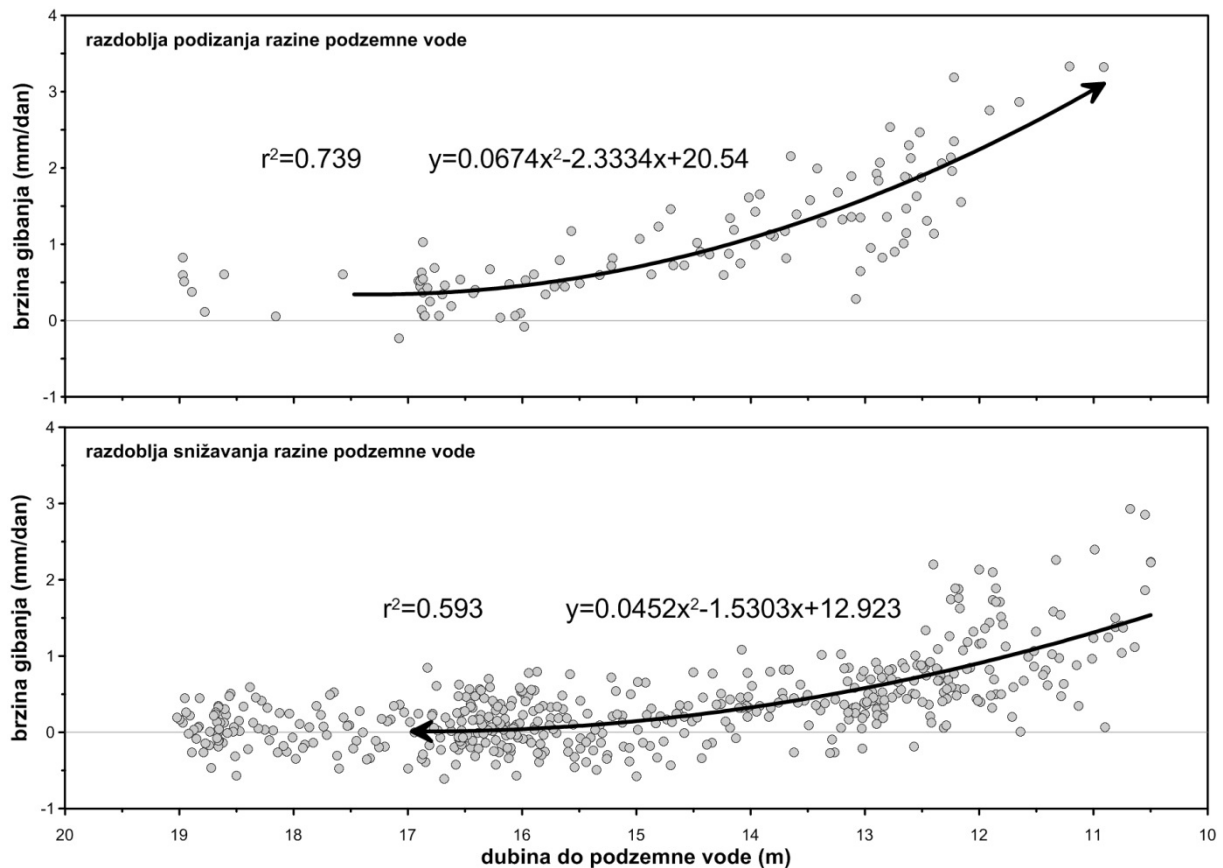
*razina na kraju, odnosno na početku novog vodnog vala, tijekom razdoblja bržeg gibanja.

Odnos između razine podzemne vode i brzine gibanja klizišta za svako pojedino razdoblje bržeg gibanja dodatno je pojašnjeno dijagramima na slici 6.32. Odnos brzine gibanja i dubine do podzemne vode na lokaciji 08L ima karakteristike histereze, slično kao što su na istraživanim klizištima zamijetili Bertini (1984), Van Asch i dr. (2007), Gonzalez i dr. (2008), Matsuura i dr. (2008) te Massey (2010). Na klizištu Kostanjevica brzine su veće za vrijeme podizanja razine podzemne vode nego za vrijeme snižavanja razine, kao i na klizištu Utiku (Massey, 2010). Usporedbom podataka za sva razdoblja vidljivo je da se najveće brzine događaju tijekom podizanja razine podzemne vode, pri manjim dubinama (višim razinama) podzemne vode. S porastom razine podzemne vode, dolazi i do porasta brzine gibanja sve dok one ne postanu približno jednolike, kao što je i opisano u poglavlju 5.1.1.1. Razdoblje smanjenja brzina započinje približno 4 do 5 dana prije nego što razina podzemne vode dosegne svoju najvišu vrijednost, odnosno u trenutku kada se brzine podizanja razine podzemne vode počinju smanjivati. Nakon što razina podzemne vode dosegne maksimalnu razinu, brzina gibanja se najprije naglo smanjuje, a zatim s vremenom sve sporije.

Za prvo razdoblje bržeg gibanja (slika 6.32), koje je trajalo od 22.1. do 24.5.2013., vidljiva je trostruka histereza (razdoblja Ia, Ib i Ic), budući da je u tom razdoblju u tri navrata došlo do naglog podizanja razine podzemne vode (A, B i C). Iako su se i u razdoblju V dogodila tri razdoblja porasta razine podzemne vode (I, J i K), nije vidljiva histereza, budući da je promjena razine u razdobljima J i K vrlo mala (0,23 i 0,19 m). Na početku razdoblja Ib i Ic, te na početku V. razdoblja bržeg gibanja, koja su sva započela pri relativno visokim razinama podzemne vode (dubine od 12,61 do 14,04 m) može se primijeti naglo povećanje brzine, za razliku od ostalih razdoblja bržeg gibanja gdje su promjene brzina bile postupne. Također, u razdobljima bržeg gibanja koja su trajala dulje i u kojima su zabilježene veće brzine gibanja, kao što su razdoblja I, III i V, prijelaz iz obrasca bržeg u obrazac sporijeg gibanja dogodio se je pri nižim razinama nego što je to u ostalim razdobljima bržeg gibanja (II i IV). Ovisnost brzine gibanja o razini podzemne vode za sva razdoblja podizanja i sva razdoblja snižavanja razine podzemne vode prikazana je na slici 6.33.



Slika 6.32. Odnos brzine gibanja klizišta i razine podzemne vode u razdobljima bržeg gibanja. Na dijagramima je točkama prikazan odnos između 7-dnevnih pomičnih prosjeka brzine i dnevnih dubina do podzemne vode, a linije sa strelicama prikazuju vremenski slijed događaja. Crna linija predstavlja uprosječene vrijednosti točkaka na dijagramu (5-dnevni pomični prosjek) radi jasnijeg prikaza.



Slika 6.33. Brzine gibanja klizišta i razine podzemne vode za sva razdoblja podizanja i sva razdoblja snižavanja razine podzemne vode.

6.2.1. Višestruka linearna regresija

Statistički odnosi između razine podzemne vode i gibanja klizišta Kostanjevki određeni su na temelju podataka kontinuiranog mjerenja dubine do razine podzemne vode u piezometru (WLS-1) te brzine gibanja i kumulativnih horizontalnih pomaka izmjerenih stanicom GNSS 08, za razdoblje od 15.1.2013. do 11.1.2015. (vremenski niz od 727 podataka) Pri analizi višestruke linearne regresije, zavisnu varijablu predstavlja brzina gibanja, a nezavisne varijable predstavljaju dubine do razine podzemne vode te parametri izvedeni iz podataka o dubini podzemne vode. Nezavisne varijable, odnosno prediktori korišteni u modelima višestruke linearne regresije, ali i slučajnih šuma (poglavlje 6.2.2), prikazani su u tablici 6.12. Parametri izvedeni iz dubine podzemne vode su brzine promjene razine podzemne vode za razdoblja od jednog do sedam dana te jednodnevno ubrzanje promjene razine podzemne vode. Kao prediktori su poslužili i podaci o jednodnevnim brzinama promjene razine podzemne vode za dan prije ili dan kasnije od dana za koji se predviđa brzina gibanja i koji bi trebali ukazivati na trendove smanjenja, odnosno povećavanja brzine promjene razine podzemne vode za određeno razdoblje.

Tablica 6.12. Nezavisne varijable korištene u predviđanju brzina gibanja te p-vrijednosti i regresijski koeficijenti statistički značajnih varijabli u analizama višestruke linearne regresije.

oznaka	nezavisna varijabla	p-vrijednost / regresijski koeficijent (statistički značajnih varijabli)		
		cijeli skup podataka*	analiza za razdoblja podizanja i spuštanja RPV	
			podizanje RPV**	Snižavanje RPV**
RPV	dubina do podzemne vode	$2,0 \cdot 10^{-16} / -0,153675$	$4,71 \cdot 10^{-13} / -0,09002$	$2,0 \cdot 10^{-16} / -0,231638$
RPV_V1	dnevna promjena razine podzemne vode	-	-	-
RPV_V2	2-dnevna promjena razine podzemne vode	-	-	-
RPV_V3	3-dnevna promjena razine podzemne vode	-	-	-
RPV_V5	5-dnevna promjena razine podzemne vode	-	$4,54 \cdot 10^{-2} / 2,58934$	-
RPV_V7	7-dnevna promjena razine podzemne vode	$2,0 \cdot 10^{-16} / -0,256100$	$1,95 \cdot 10^{-4} / -1,11080$	-
RPV_V1_DR	dnevna promjena razine dan ranije	-	-	-
RPV_V1_DK	dnevna promjena razine dan kasnije	$2,0 \cdot 10^{-16} / -1,339957$	-	$4,61 \cdot 10^{-2} / -0,96415$
RPV_A	ubrzanje promjene razine podzemne vode	-	-	-
GOD. DOB.	godišnje doba	-	$1,78 \cdot 10^{-13} / -0,03260$	-

*vrijednost konstante višestruke linearne regresije iznosi 2,739816.

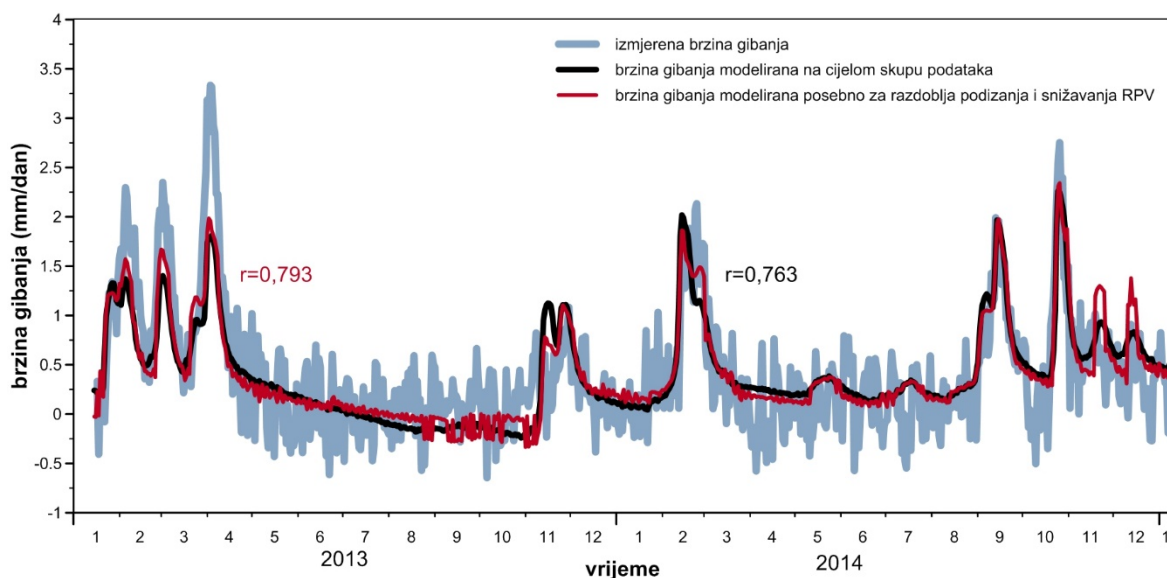
**vrijednost konstante višestruke linearne regresije iznosi 1,57054 za razdoblja rasta, a 3,974279 za razdoblja pada razine podzemne vode.

Metodom višestruke linearne regresije najprije je analiziran ukupni skup podataka (727 podataka o brzini gibanja klizišta te o razini podzemne vode i iz nje izvedenim veličinama), a rezultat je prikazan na slici 6.34. Iz dijagrama je vidljivo da su modelom, koji je primijenjen na cijeli skup podataka, podcijenjene brzine klizanja u prvom razdoblju bržeg gibanja, a da su tijekom sušnog razdoblja (ljeta) 2013. godine predviđene negativne vrijednosti brzina. Ove negativne vrijednosti brzina ustvari predstavljaju brzinu gibanja klizišta, ali u suprotnom smjeru od nagiba padine, što se na klizištu Kostanjek nije dogodilo i što teoretski nije moguće, osim u posebnim slučajevima kao što je primjerice gibanje uzrokovano sezonskim promjenama nastalim kao posljedica bubrenja i stezanja uslijed promjene vlažnosti tla (Massey i dr., 2013). Pri analizi višestruke linearne regresije određene su i statistički značajne ($p < 0,05$) nezavisne varijable: (1) dubina do podzemne vode; (2) 7-dnevna promjene razine podzemne vode; te (3) jednodnevna promjena razine podzemne vode za dan kasnije u odnosu na dan za koji se predviđa brzina gibanja. P-vrijednosti prediktora dobivenih analizom te njihovi regresijski koeficijenti prikazani su u tablici 6.12. Radi usporedbe s drugim modelima određen je i koeficijent korelacije između brzina određenih modelom i izmjerenih brzina. Pod pretpostavkom linearnog odnosa koeficijent korelacije iznosi 0,76. Srednja kvadratna pogreška modela iznosi $0,16 \text{ mm}^2/\text{dan}^2$.

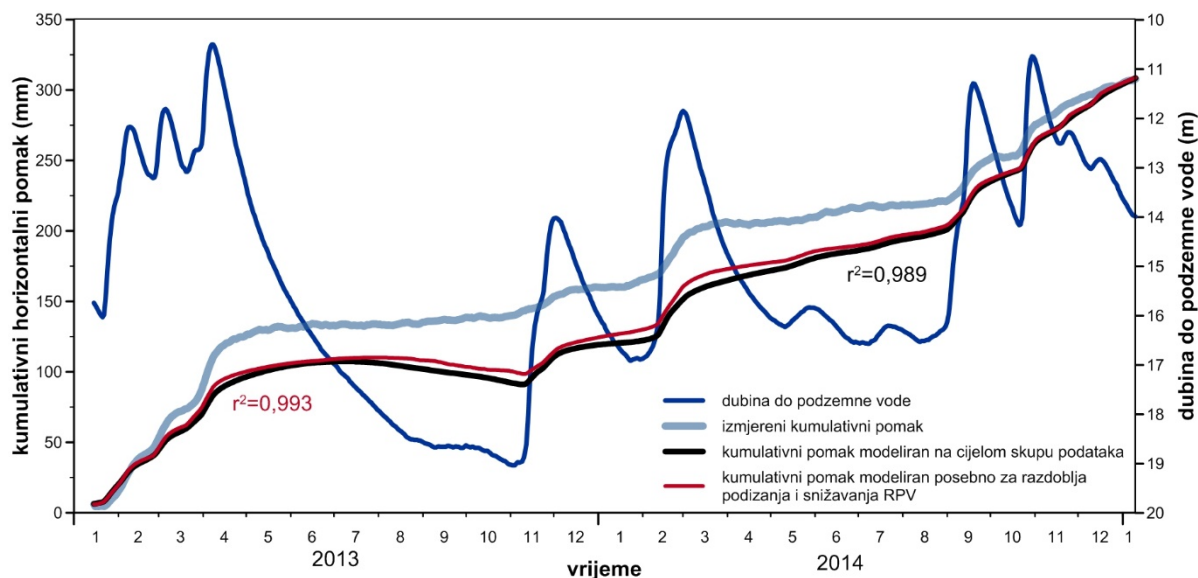
U svrhu dodatne provjere kvalitete modela, iz podataka modeliranih dnevnih brzina gibanja, izračunati su i kumulativni pomaci, što je prikazano na slici 6.35. Srednja kvadratna pogreška ovako određenih kumulativnih pomaka je vrlo velika i iznosi $914,07 \text{ mm}^2$, a prosječna odstupanja od izmjerenih vrijednosti (reziduali) iznose 27,24 mm. Zbog velike pogreške i velikih odstupanja te zbog toga što su modeliranjem dobivene i negativne vrijednosti brzina, odnosno smanjenje kumulativnog pomaka tijekom sušnog razdoblja 2013. godine, višestruka linearna regresija primijenjena je zasebno i na dva ograničena skupa podataka. Ograničeni skupovi podataka odnose se na razdoblja tijekom podizanja razine podzemne vode i razdoblja tijekom snižavanja razine podzemne vode. Princip ovakvog modela je da se dio modela trenira i testira samo tijekom razdoblja podizanja razine podzemne vode, a da se drugi dio modela trenira i testira samo tijekom razdoblja snižavanja razine podzemne vode. Rezultat ponovljene višestruke linearne regresije prikazan je na slici 6.34. Vizualno, ali i iz podataka o koeficijentu korelacije i srednjoj kvadratnoj

pogrešci modela, vidljivo je da je rezultat ponovljene analize neznatno poboljšani u odnosu na višestruku linearnu regresiju za ukupan skup podataka, pri čemu koeficijent korelacije između modeliranih i izmjerenih podataka iznosi 0,79, a srednja kvadratna pogreška modela 0,14 mm²/dan². Na temelju modeliranih brzina izračunati su i kumulativni pomaci prikazani na slici 6.35. Ovako određeni kumulativni pomaci također su samo neznatno poboljšani u odnosu na kumulativne pomake dobivene iz modela primijenjenog na cijelom skupu podataka, sa srednjom kvadratnom pogreškom od 666,06 mm² i prosječnim odstupanjem izračunatih od stvarnih vrijednosti od 23,3 mm.

Usporedba modela određenog na cijelom skupu podataka i modela određenih zasebno za razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode određena je i na temelju maksimalnih razlika između izmjerenih i modeliranih pomaka. Maksimalna razlika između modeliranih brzina (za oba modela) i izmjerenih brzina odnosi se na prvo razdoblje bržeg gibanja, odnosno na razdoblja bržeg gibanja Ia, Ib i Ic. Maksimalne razlike za model na cijelom skupu podataka iznose 0,98 mm/dan (Ia), 0,95 mm/dan (Ib) i 1,51 mm/dan (Ic). Maksimalne razlike za podatke modelirane zasebno za razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode iznose 0,96 mm/dan (Ia), 0,83 mm/dan (Ib) i 1,46 mm/dan (Ic). Maksimalna razlika kumulativnih pomaka određenih na temelju modela za cijeli skup podataka i izmjerenih kumulativnih pomaka iznosi 52,34 mm. Maksimalna razlika kumulativnih pomaka određenih na temelju modela primijenjenog zasebno za razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode i izmjerenih kumulativnih pomaka iznosi 45,38 mm. Navedene razlike zabilježene su za razdoblje u studenom 2013. godine, neposredno prije drugog razdoblja bržeg gibanja. Ova razlika je posljedica brzina gibanja predviđenih tijekom dugog razdoblja snižavanja razine podzemne vode koje su u suprotnom smjeru od smjera gibanja klizišta, odnosno smjera nagiba padine.



Slika 6.34. Odnos između izmjerenih brzina gibanja klizišta i brzina gibanja klizišta modeliranih višestrukom linearnom regresijom.



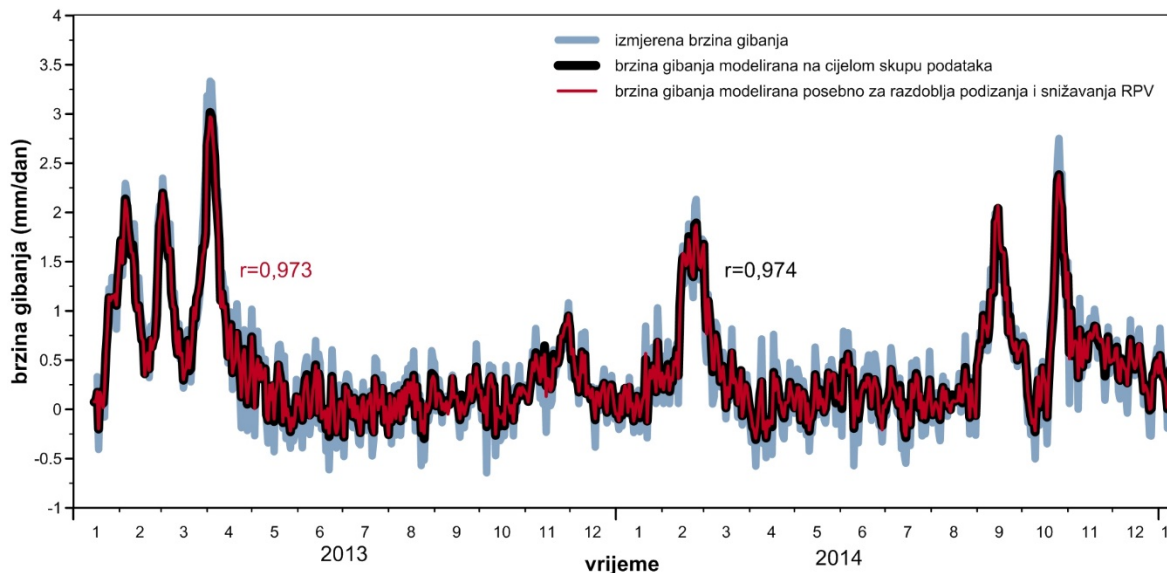
Slika 6.35. Odnos između izmjerene kumulativne brzine horizontalnog pomaka klizišta i brzine pomaka klizišta određenih na temelju brzina modeliranih višestrukom linearnom regresijom.

6.2.2. Metoda slučajnih šuma

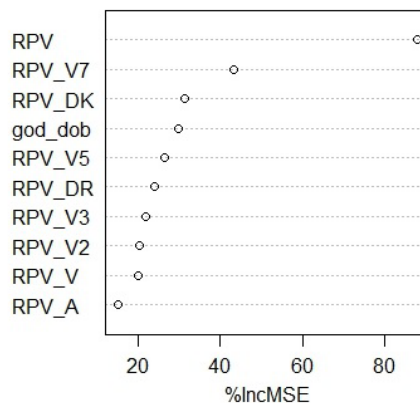
Odnos između razine podzemne vode i brzine gibanja klizišta metodom slučajnih šuma određen je na temelju svih prediktora prikazanih u tablici 6.12. Analiza je prvo provedena na cijelom skupu podataka, kao i u slučaju analize modelom višestruke linearne regresije, a zatim zasebno za podatke koji se odnose na razdoblja podizanja razine podzemne vode i razdoblja snižavanja razine podzemne vode. Prilikom provođenja analize slučajnih šuma u programu R broj slučajnih varijabli uzetih u obzir prilikom svakog grananja (*mtry*) postavljen je na 4, a broj izgrađenih stabala prilikom analize (*ntree*) na 1.000.

Rezultati obje analize slučajnih šuma, na cijelom nizu podataka i zasebno za razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode, su gotovo identični (slika 6.36). Na dijagramu (slika 6.36) je vidljivo da je primjena oba modela slučajnih šuma uzrokovala značajno poboljšanje u odnosu na modele višestruke linearne regresije (slika 6.34). Također, koeficijent korelacije između modeliranih i izmjerenih podataka, za model slučajnih šuma primijenjen na cijelom skupu podataka iznosi 0,974, a za model primijenjen na dva skupa podataka iznosi 0,973. Srednja kvadratna pogreška modela primijenjenog na cijeli skup podataka iznosi 0,023 mm²/dan², prosječno odstupanje modeliranih podataka od izmjerenih podataka iznosi 0,12 mm/dan, a maksimalna razlika između izmjerenih i modeliranih podataka je značajno umanjena u odnosu na modele višestruke linearne regresije i iznosi 0,68 mm/dan (za razdoblje ubrzanog gibanja I_c). Najvažniji parametri u opisanom modelu su sljedeći: (1) razina podzemne vode; (2) 7-dnevne promjena razine podzemne vode; te (3) podaci o promjeni razine podzemne vode dan nakon dana za koji se predviđa brzina gibanja (slika 6.37).

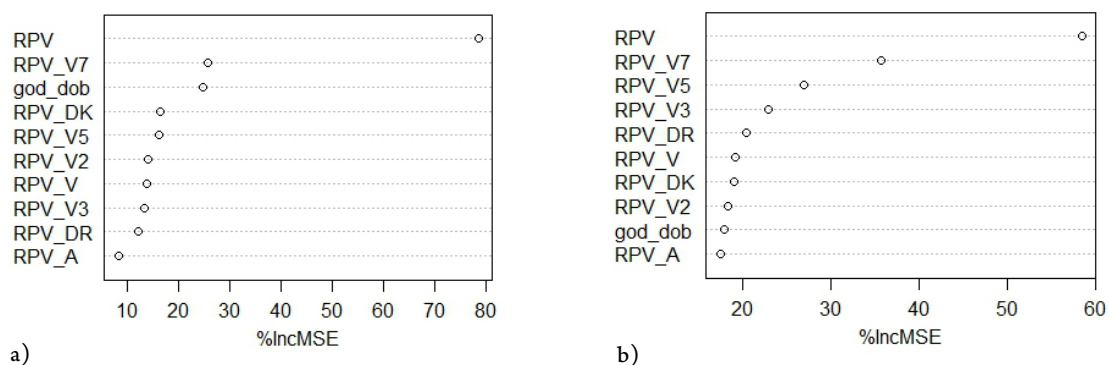
Gotovo identično modelu primijenjenom na cijeli skup podataka, srednja kvadratna pogreška modela primijenjenog zasebno na skupove podatka koji se odnose na podizanje i snižavanje razine podzemne iznosi $0,024 \text{ mm}^2/\text{dan}^2$, prosječno odstupanje izračunatih podataka od izmjerenih podataka iznosi $0,12 \text{ mm}/\text{dan}$, a maksimalna razlika između izmjerenih i modeliranih podataka iznosi $0,64 \text{ mm}/\text{dan}$ (za razdoblje ubrzanog gibanja Ic). Najvažniji parametri za dio modela koji se odnosi na razdoblja podizanja razine podzemne tek su nešto drugačiji od modela primijenjenog na cijeli skup podataka, a najvažnija tri su: (1) razina podzemne vode; (2) 7-dnevna brzina promjene razine podzemne vode; te (3) godišnja doba koje indirektno ukazuju na vjerojatnost bržeg ili sporijeg gibanja klizišta (slika 6.38a). Najvažniji parametri za dio modela koji se odnosi na razdoblja spuštanja razine podzemne su: (1) razina podzemne vode; (2) 7-dnevna brzina promjene razine podzemne vode; te (3) 5-dnevna brzina promjene razine podzemne vode (slika 6.38b).



Slika 6.36. Odnos između izmjerenih brzina gibanja klizišta i brzina modeliranih metodom slučajnih šuma.

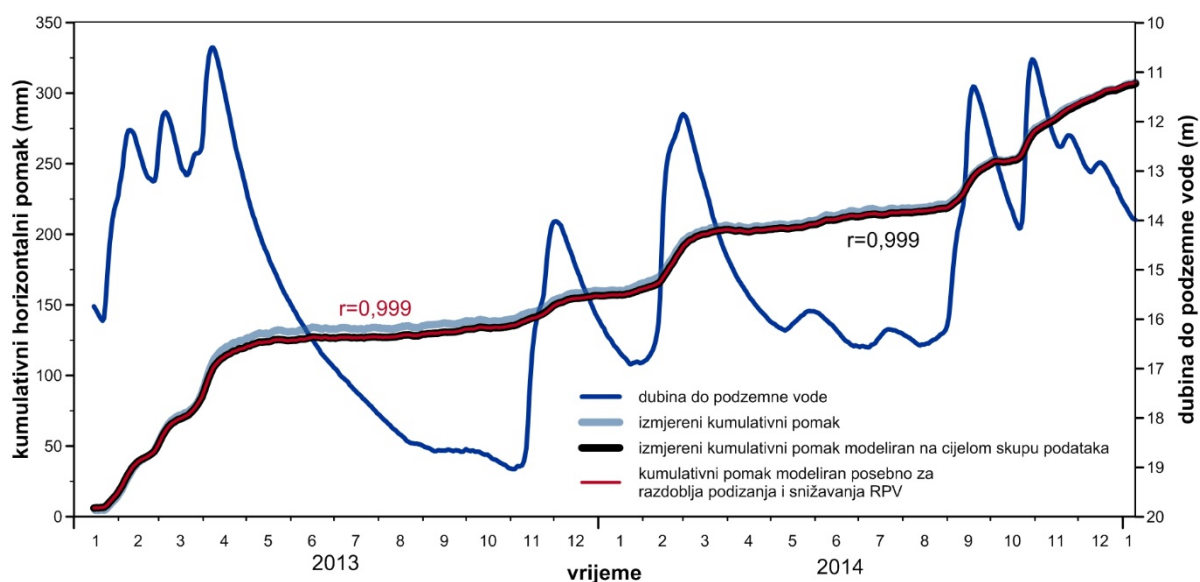


Slika 6.37. Značajnost parametara u modelu slučajnih šuma primijenjenom na cijeli skup podataka.



Slika 6.38. Značajnost parametara u predviđanju brzine gibanja metodom slučajnih šuma: a) za razdoblja podizanja razine podzemne vode; b) razdoblja snižavanja razine podzemne vode.

Na temelju modeliranih brzina izračunati su i kumulativni pomaci, što je prikazano na slici 6.39. Iz dijagrama se može uočiti da su modeli dobiveni analizom slučajnih šuma „naučili“ da brzine ne mogu biti negativne, već da su njihove vrijednosti tijekom razdoblja većih dubina do podzemne vode približno jednake nuli. Iz tog razloga u dijagramima kumulativnih pomaka (slika 6.39) nema smanjena kumulativnog pomaka tijekom vremena, za razliku od modela višestruke linearne regresije koji predviđaju smanjenje kumulativnog pomaka. Budući da su modelima slučajnih šuma dobivene znatno manje srednje kvadratne pogreške, prosječno odstupanje izračunatih od stvarnih podataka i maksimalne razlike između izmjerenih i modeliranih kumulativnih pomaka nego što je dobiveno modelima višestruke linearne regresije (tablica 6.13), može se zaključiti da modeli slučajnih šuma imaju bolja predikcijska svojstva.



Slika 6.39. Odnos između izmjerenih kumulativnih pomaka i kumulativnih pomaka izračunatih iz brzina gibanja klizišta modeliranih metodom slučajnih šuma.

Tablica 6.13. Srednje kvadratne pogreške, prosječno odstupanje i maksimalne razlike između izmjerenih i modeliranih vrijednosti dobivene na temelju različitih modela odnosa razine podzemne vode i brzine gibanja klizišta.

model za predviđanje brzina	srednja kvadratna pogreška	prosječno odstupanje izračunatih od izmjerenih vrijednosti	maksimalna razlika između izračunatih i izmjerenih vrijednosti
predviđanje brzine gibanja klizišta			
višestruka linearna regresija na svim podacima	0,16 mm ² /dan ²	0,31 mm/dan	1,55 mm/dan
višestruka linearna regresija posebno na podacima za podizanje i spuštanje razine podzemne vode	0,14 mm ² /dan ²	0,30 mm/dan	1,46 mm/dan
slučajne šume na svim podacima	0,023 mm ² /dan ²	0,12 mm/dan	0,68 mm/dan
slučajne šume posebno na podacima za podizanje i spuštanje razine podzemne vode	0,024 mm ² /dan ²	0,12 mm/dan	0,64 mm/dan
kumulativni pomaci izračunati iz modelirane brzina gibanja klizišta			
višestruka linearna regresija na svim podacima	914,07 mm ²	27,24 mm	52,34 mm
višestruka linearna regresija posebno na podacima za podizanje i spuštanje razine podzemne vode	666,06 mm ²	23,30 mm	45,38 mm
slučajne šume na svim podacima	16,23 mm ²	3,63 mm	6,92 mm
slučajne šume posebno na podacima za podizanje i spuštanje razine podzemne vode	15,79 mm ²	3,48 mm	7,09 mm

S obzirom da su statistički pokazatelji kojima su međusobno uspoređeni modeli slučajnih šuma vrlo slični (tablica 6.13), eventualna razlika u kvaliteti modela koji procjenjuju brzinu gibanja nastojala se je odrediti primjenom metoda za procjenu statističkih modela, odnosno *k*-strukom unakrsnom validacijom i validacijom, čije su teorijske osnove opisane u poglavlju 4.2.4. *K*-struka unakrsna validacija provedena je tako da je niz od 727 podataka o brzini gibanja klizišta i pripadajućih prediktora nasumično podijeljen u devet skupova po 73 podatka i deseti skup od 70 podataka. Nakon ovoga je za svaki skup provedena unakrsna validacija na način da je određen model za *k-1* skupova podataka, koji je zatim primijenjen, odnosno testiran, na preostalom *k* skupu podataka. Validacija je provedena tako da su podaci mjerenja podijeljeni na 24 skupa od 30 podataka, od kojih se svaki skup približno odnosi na mjesečne podatke s iznimkom posljednjeg skupa koji sadrži 37 podataka. Svrha ove analize je usporedba podataka modeliranih za određeni mjesec (na temelju modela treniranog na preostalih 23 mjeseca) i izmjerenih podataka. Za svaki od 24 skupa određena je srednja kvadratna pogreška te na temelju njih i srednja kvadratna pogreška za cijeli niz podataka.

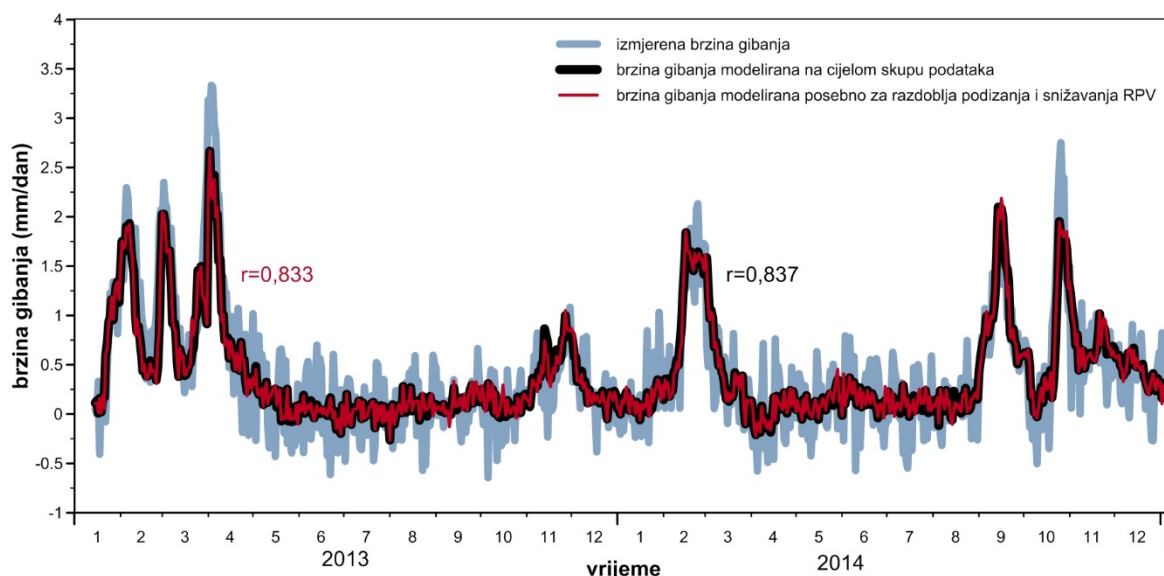
Rezultati *k*-struke unakrsne validacije i validacije, prikazani u tablici 6.14 i na slikama 6.40 i 6.41, također ukazuju da su model slučajnih šuma na cijelom skupu podataka i model slučajnih šuma primijenjen zasebno za razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode gotovo identični. Srednja kvadratna pogreška modela primijenjenog na cijeli skup podataka određena, *k*-strukom unakrsnom validacijom, iznosi 0,117 mm²/dan², a srednja kvadratna pogreška modela određena validacijom iznosi 0,165 mm²/dan². Gotovo ista srednja kvadratna pogreška određena je i na modelima primijenjenim zasebno na podacima podizanja i snižavanja razine podzemne vode, a iznosi 0,119 mm²/dan² za *k*-struku unakrsnu validaciju i 0,161 mm²/dan² za validaciju. Najveće srednje kvadratne pogreške određene su u trećem testiranom razdoblju (razdoblje podizanja razine podzemne vode C, odnosno razdoblje bržeg gibanja I_c) i iznosi 0,779, odnosno 0,784 mm²/dan² za oba modela slučajnih šuma (tablica 6.15). Vjerojatan razlog toj pogrešci je da su se tijekom trećeg testiranog razdoblja dogodili netipični uvjeti koji

se nisu dogodili tijekom preostalog razdoblja treniranja te ih zbog toga model nije uspio predvidjeti. Slijedeća najveća pogreška dogodila se je u 22. testiranom razdoblju, a razlog je vjerojatno isti kao i za pogrešku u trećem testiranom razdoblju.

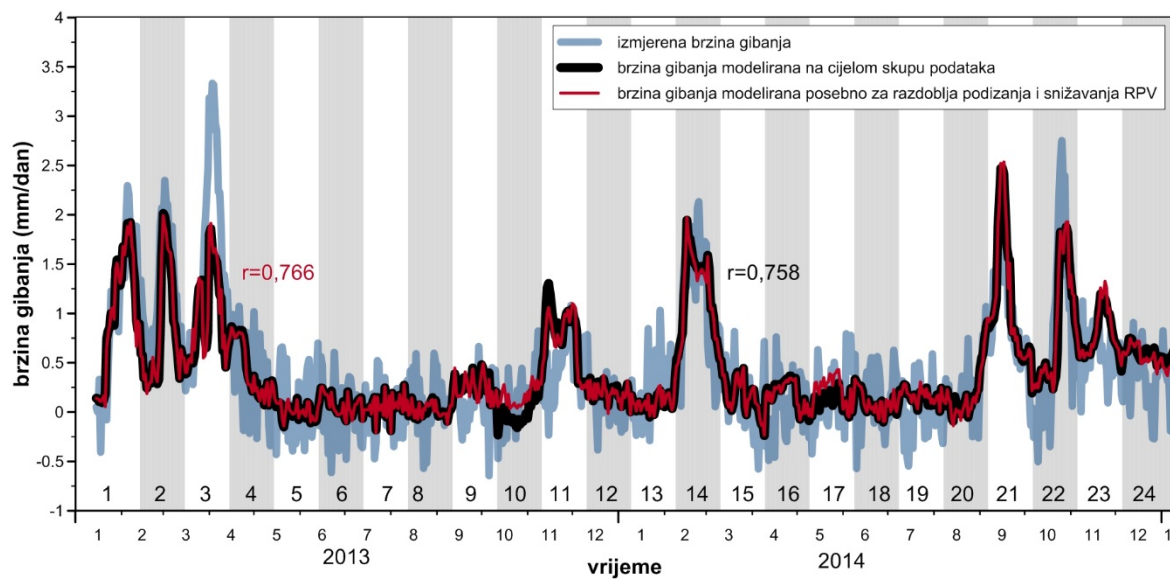
S obzirom da ni unakrsnom validacijom nije određen kvalitetniji model, kao odgovarajuća metoda za daljnje analize odabrana je metoda slučajnih šuma primijenjena na cijeli skup podataka. Jednostavan razlog zbog čega je odabran ovaj model je zato što je jednostavniji od modela koji se zasebno primjenjuju na različitim skupovima podataka.

Tablica 6.14. Usporedba kvalitete modela slučajnih šuma na temelju statističkih pokazatelja određenih k -strukom unakrsnom validacijom i validacijom.

model za predviđanje brzina	srednja kvadratna pogreška	prosječno odstupanje izračunatih od izmjerenih vrijed.	maksimalna razlika između izračunatih i izmjerenih vrijednosti	koefficient korelacije između modeliranih i izmjerenih vrijednosti
k-struka unakrsna validacija				
slučajne šume na svim podacima	0,117 mm ² /dan ²	0,26 mm/dan	1,55 mm/dan	0,837
slučajne šume posebno na podacima za podizanje i spuštanje razine podzemne vode	0,119 mm ² /dan ²	0,27 mm/dan	1,55 mm/dan	0,833
validacija				
slučajne šume na svim podacima	0,165 mm ² /dan ²	0,31 mm/dan	1,74 mm/dan	0,758
slučajne šume posebno na podacima za podizanje i spuštanje razine podzemne vode	0,161 mm ² /dan ²	0,31 mm/dan	1,70 mm/dan	0,766



Slika 6.40. Brzine gibanja klizišta dobivene k -strukom unakrsnom validacijom modela slučajnih šuma primijenjenog na cijelom skupu podataka i modela primijenjenog zasebno za razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode.



Slika 6.41. Brzine gibanja klizišta dobivene validacijom modela slučajnih šuma primijenjenog na cijelom skupu podataka i modela primijenjenog zasebno za razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode. Siva i bijela područja na dijagramu predstavljaju skupove od 30 dana, odnosno 37 dana za skup 24.

Tablica 6.15. Srednja kvadratna pogreška za razdoblja testiranja modela slučajnih šuma.

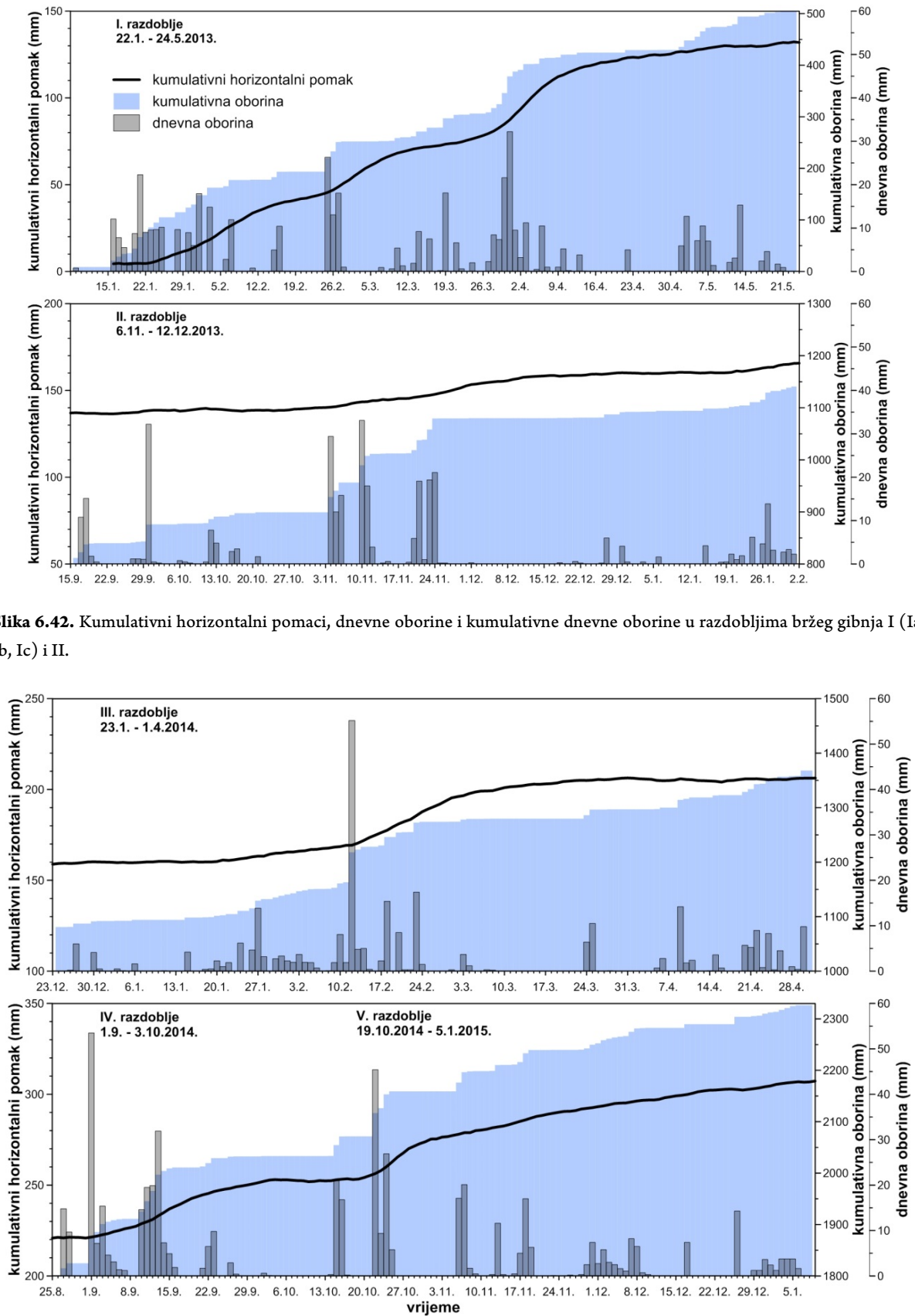
razdoblje	srednja kvadratna pogreška (mm ² /dan ²)	
	na cijelom skupu	zasebno na podacima za podizanje i spuštanje RPV
1	0.138	0.164
2	0.221	0.200
3	0.779	0.784
4	0.156	0.151
5	0.139	0.136
6	0.087	0.086
7	0.058	0.058
8	0.086	0.094
9	0.107	0.107
10	0.077	0.074
11	0.278	0.206
12	0.051	0.047
13	0.117	0.114
14	0.194	0.187
15	0.107	0.109
16	0.127	0.121
17	0.119	0.132
18	0.123	0.118
19	0.116	0.118
20	0.063	0.065
21	0.169	0.175
22	0.339	0.293
23	0.146	0.173
24	0.171	0.148
prosječna greška skupa	0,165	0,161

6.3. Oborine i gibanje klizišta

Kao što je dokazano u prethodnim poglavljima, oborine na klizištu Kostanjek utječu na podizanje razine podzemne vode, a podizanje razine podzemne vode utječe na brzinu gibanja klizišta. U ovom poglavlju opisuje se izravna veza između oborina i gibanja klizišta Kostanjek. Vremenski nizovi kumulativnih horizontalnih pomaka, dnevnih oborina i kumulativnih oborina prikazani su na slici 6.42 i 6.43. Iz ovih slika je vidljivo da razdoblja bržih pomaka započinju razdobljima intenzivnih oborina. Količine oborine potrebne za iniciranje bržeg gibanja kao i za značajno podizanje razine podzemne, izmjerene tijekom praćenja klizišta Kostanjek, iznosile su od 96,4 (I. razdoblje) do 125,8 mm (V. razdoblje). Najmanja izmjerena količina oborina koja je bila potrebna za ponovno povećanje brzine gibanja klizišta tijekom razdoblja bržeg gibanja, odnosno u fazi kada klizište usporava, iznosila je 58,4 mm, na početku razdoblja Ic.

Odnos između oborina koje su uzrokovale podizanje razine podzemne vode tijekom razdoblja A, B, C, D, E, H, I, J i K te pomaka klizišta uzrokovanog tim istim oborinama, odnosno razdobljima podizanja razine podzemne vode, prikazan je u tablici 6.16. Oborine prikazane u tablici određene su na način kako je prikazano u poglavlju 6.1.1. Korelacija oborina i kumulativnih pomaka iz tablice 6.16 je prikazana na slici 6.44. Koeficijent korelacije između oborina i kumulativnih pomaka iznosi 0,583, što prema Šošić i Serdar (1992) predstavlja korelaciju srednje jačine.

Razlozi zbog čega nema čvrste korelacije između oborina i pomaka klizišta uglavnom su posljedica složenog odnosa između oborina i razine podzemne vode. Naime, promjena razine podzemne vode ne ovisi samo o oborinama, već ovisi i o vlažnosti tla odnosno i o početnoj dubini podzemne vode. Tako određena oborina u vlažnim razdobljima kada je razina podzemne vode visoka može uzrokovati podizanje razine podzemne vode, a kao posljedicu podizanja razine podzemne vode i gibanje klizišta, dok u sušnim razdobljima ista oborina ne mora utjecati na promjenu razine podzemne vode. Drugi razlog je to što pomak klizišta, odnosno brzina gibanja klizišta ovisi i o početnoj razini podzemne vode. Tako će ista oborina uzrokovati veći pomak ako se dogodi za vrijeme visokih razina podzemne vode, za razliku od te iste oborine koja se dogodila pri nižim razinama podzemne vode. Treći razlog je evapotranspiracija koja u različitim godišnjim dobima ima različiti utjecaj na količinu vode koje prihranjuje vodonosnik, a samim time i uzrokuje pomak. Razlog zbog čega korelacija između oborina i razine podzemne vode nije čvršća su i podaci mjerenja. Naime, tijekom razdoblja praćenja dogodilo se ukupno pet razdoblja bržeg gibanja, od kojih se prvo razdoblje (razdoblje I) može podijeliti na tri podrazdoblja (Ia, Ib i Ic). Ova tri razdoblja međusobno se nastavljaju te pomaci u svakom od njih vjerojatno nisu jednaki pomacima koji bi se dogodili da su razdoblja Ia, Ib i Ic međusobno odijeljena razdobljima sporijeg gibanja. Pretpostavka je primjerice da bi pomaci tijekom razdoblja Ia trajali još određeno vrijeme da nisu prekinuti novim pomacima tijekom razdoblja Ib. S obzirom na navedene razloge proizlazi da je za određivanje odnosa između oborina i gibanja klizišta nužno poznavanje razine podzemne vode te zbog toga nisu detaljnije analizirani odnosi između oborina i gibanja klizišta.



Slika 6.42. Kumulativni horizontalni pomaci, dnevne oborine i kumulativne dnevne oborine u razdobljima bržeg gibnja I (Ia, Ib, Ic) i II.

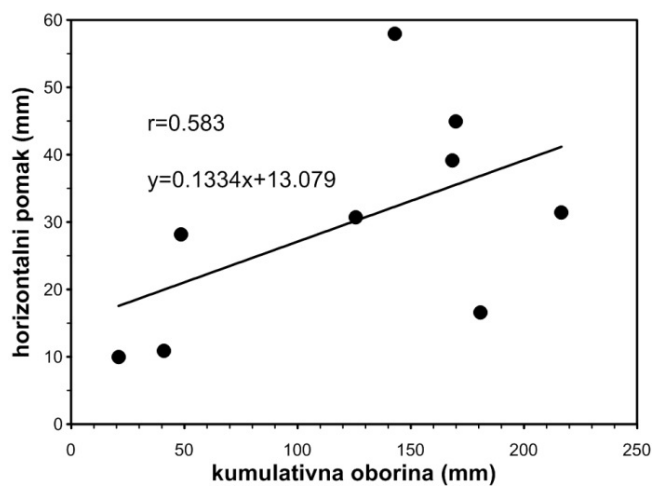
Slika 6.43. Kumulativni horizontalni pomaci, dnevne oborine i kumulativne dnevne oborine u razdobljima bržeg gibnja III, IV i V.

Tablica 6.16. Odnos oborina i kumulativnih pomaka klizišta Kostanjek.

razdoblje		oborina (mm)	kumulativni pomak (mm)
bržeg gibanja	podizanja RPV		
Ia	A	168,4	39,9*
Ib	B	58,4	28,2*
Ic	C	142,8	57,9
II	D	180,8	16,6
III	E	169,9	44,9
IV	H	216,6	31,4
V	I	125,5	30,7
	J	40,8	10,9**
	K	20,9	10,0**

*tijekom razdoblja bržeg gibanja došlo je do ponovnog podizanja razine podzemne vode i povećanja brzine gibanja.

**tijekom razdoblja bržeg gibanja došlo je do ponovnog podizanja razine podzemne vode, bez povećanja brzine gibanja.



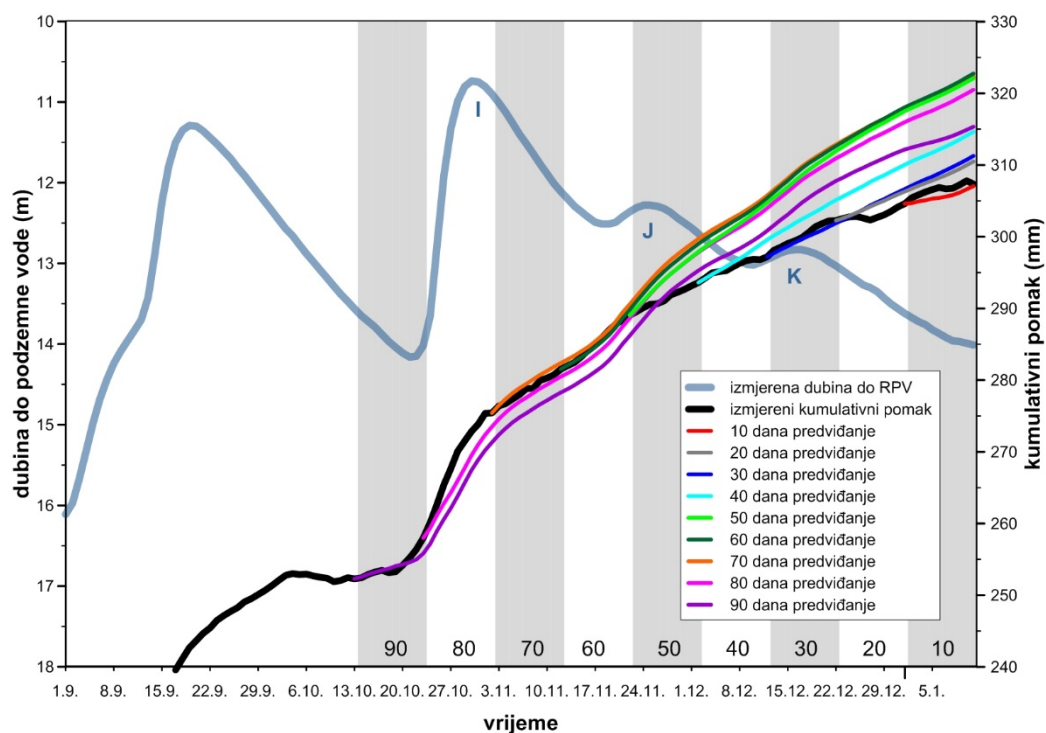
Slika 6.44. Odnos između kumulativne oborine i horizontalnog pomaka na klizištu Kostanjek.

6.4. Verifikacija fenomenološkog modela klizišta Kostanje

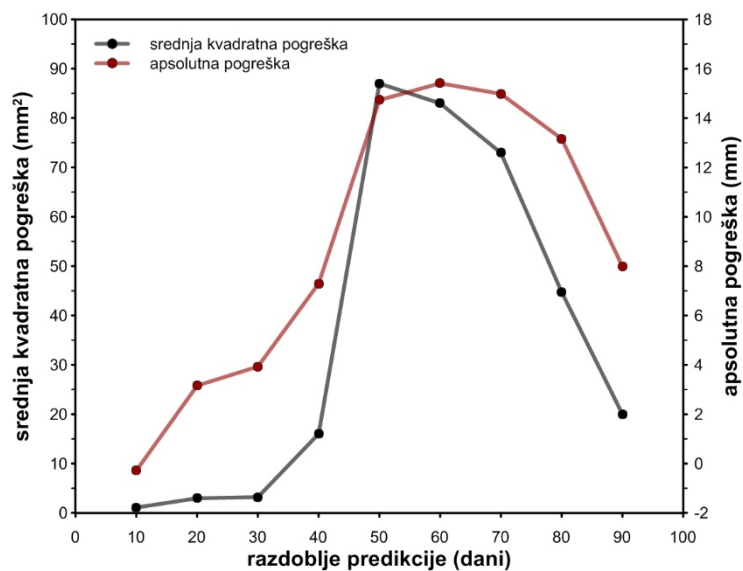
Nakon što su u poglavljima 6.1 i 6.2 usvojene prihvatljive metode za predviđanje razine podzemne vode, odnosno predviđanje brzina klizanja, u ovom poglavlju je provedena analiza koja se odnosi na predviđanje brzina gibanja, odnosno kumulativnih pomaka, za posljednjih 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 i 90 dana mjerenja (od ukupno 730 dana). Brzina gibanja je predviđena metodom slučajnih šuma za cijeli skup na temelju izmjerenih podataka o dubini do podzemne vode i izvedenih veličina (tablici 6.12). Za svako predviđanje obavljeno je i testiranje modela slučajnih šuma na podacima mjerenja za prethodnih 640, 650, 660, 670, 680, 690, 700, 710 i 720 dana. Rezultati analize metodom slučajnih šuma prikazani su na slici 6.45, a srednje kvadratne pogreške za svako predviđanje na slici 6.46. Iz grafičkog prikaza srednje kvadratne pogreške vidljivo je da su pogreške modela najmanje za razdoblje od 10 do 30 dana te da se naglo povećavaju (20 do 40 puta) za razdoblje do 50 do 70 dana. Za razdoblja predviđanja od 80 i 90 dana pogreške su ponovno manje, a njihov iznos je 10 do 20 puta veći od pogreške za razdoblje od 10 do 30 dana.

Razlog što je greška predviđanja za 80 i 90 dana manja od greške za 50, 60 i 70 dana posljedica je slučajnosti. Naime, predviđanjem za 50, 60 i 70 dana precijenjen kumulativni pomak, odnosno brzine nastale tijekom porasta vodnih valova J i K. Ovo precjenjivanje brzina uzrokovalo je veće vrijednosti reziduala, odnosno veće vrijednosti razlika između izmjerenih i izračunatih vrijednosti. Predviđanjem za 80 i 90 dana podcijenjen je pomak tijekom vodnog vala I, dok je tijekom razdoblja J i K pomak precijenjen. Kombinacija podcijenjivanja pomaka tijekom razdoblja I i precjenjivanja pomaka tijekom razdoblja J i K uzrokovalo je manje apsolutne vrijednosti reziduala, a samim time i manju srednju kvadratnu grešku nego za razdoblja predviđanja od 50 do 70 dana u kojima su brzine gibanja samo precijenjene. Iz slike 6.46 su vidljive i apsolutne razlike između stvarnih i izračunatih vrijednosti na kraju svakog razdoblja predviđanja. Obrazac apsolutnih razlika gotovo je identičan obrascu srednjih kvadratnih grešaka. Apsolutne razlike između stvarnih i izračunatih pomaka iznose do 4 mm za razdoblje do 30 dana te od 8 do 16 mm za preostala razdoblja predviđanja. Na temelju dobivenih grešaka (slika 6.46) može se zaključiti da su greške predviđanja za razdoblje od 30 i manje dana prihvatljive.

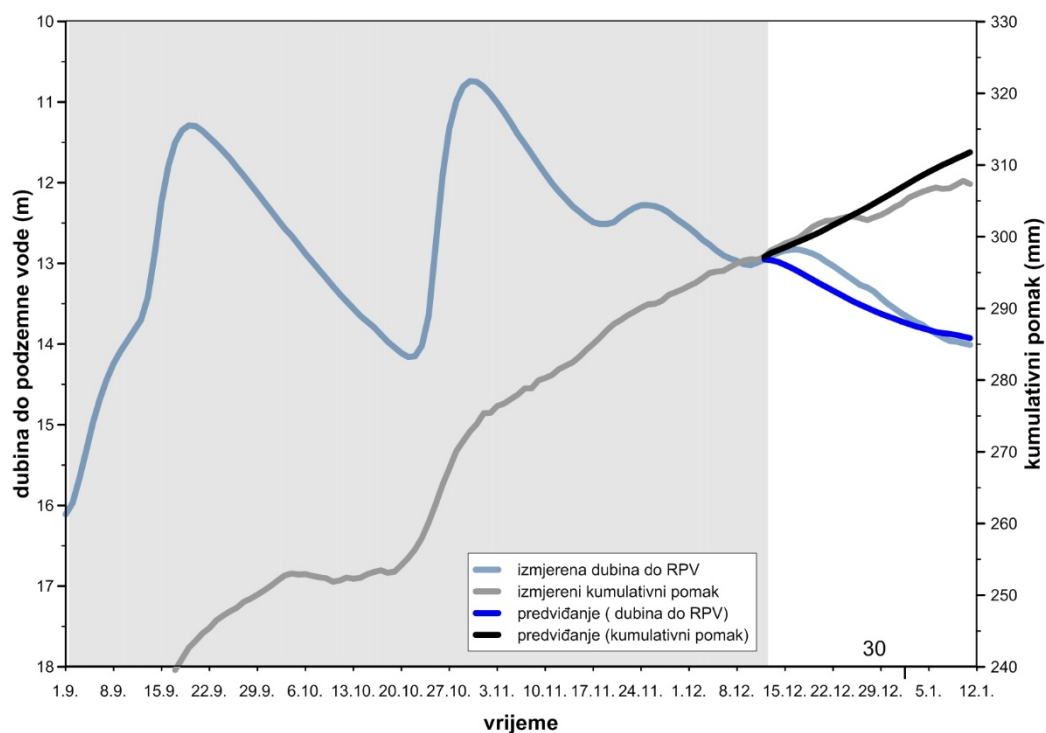
Posljednja provedena analiza je predviđanje brzine gibanja na temelju predviđenih podataka o razini podzemne vode. Razine podzemne vode u analizi predstavljaju razine određene na temelju predviđenih brzina promjene razine podzemne vode metodom slučajnih šuma (slika 6.29). Brzine gibanja iz kojih je određen kumulativan pomak, također su predviđene metodom slučajnih šuma. Analiza je provedena na podacima mjerenja za posljednjih 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 i 90 dana mjerenja, a rezultati predviđanja za 30, 60 i 90 dana prikazani su na slikama 6.47, 6.48 i 6.49.



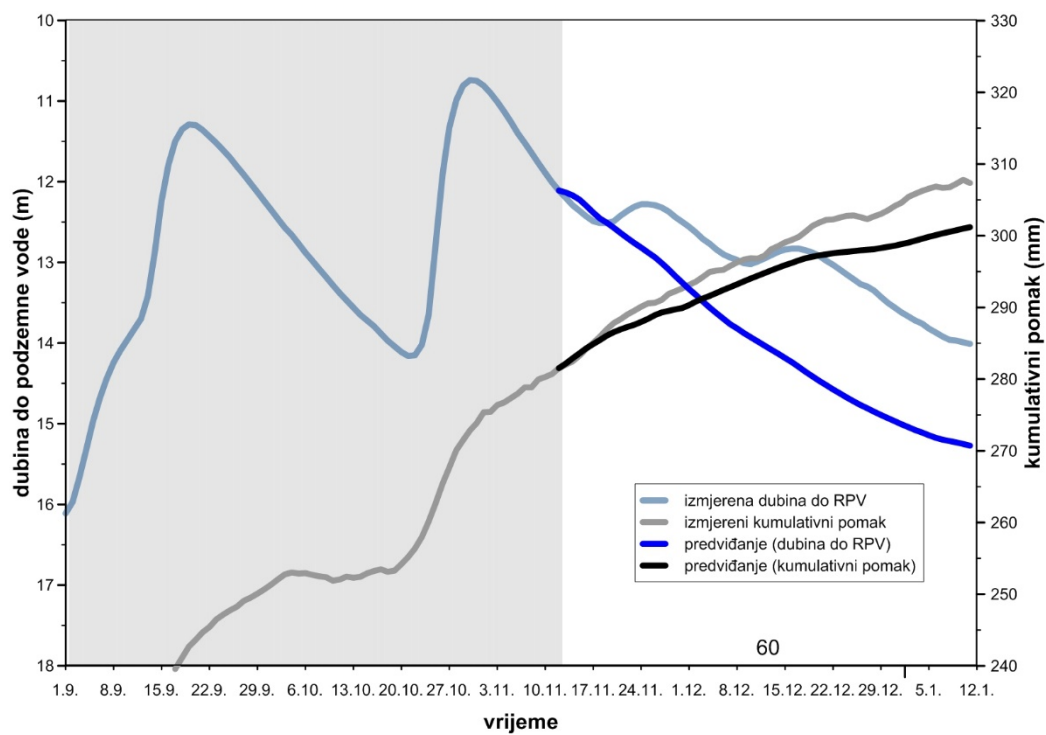
Slika 6.45. Predviđanje kumulativnih pomaka za različita vremenska razdoblja dobivena metodom slučajnih šuma.



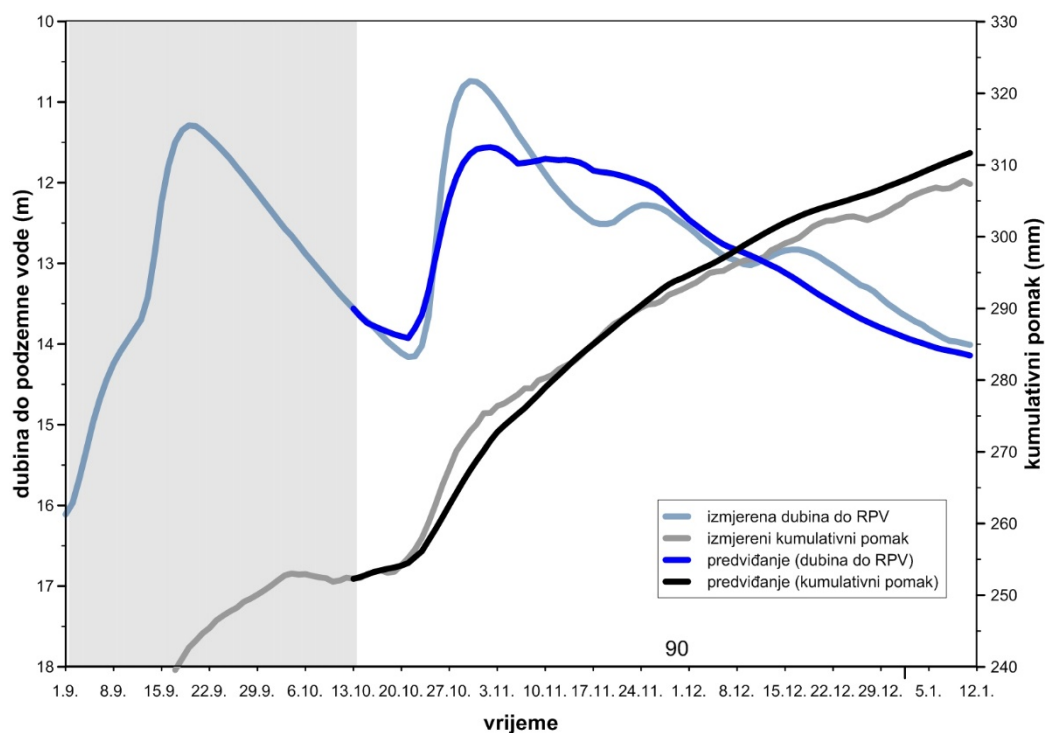
Slika 6.46. Srednja kvadratna pogreška za različita vremenska razdoblja predviđanja određena na temelju modela slučajnih šuma te apsolutne razlike izmjereneog kumulativnog pomaka i pomaka predviđenog modelom na kraju svakog razdoblja predviđanja.



Slika 6.47. Predviđanje kumulativnih pomaka na temelju predviđene razine podzemne vode za razdoblje od 30 dana.

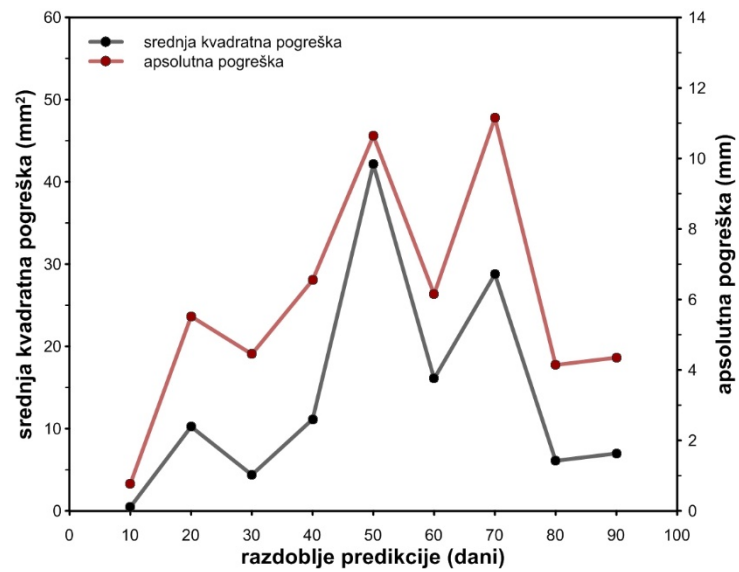


Slika 6.48. Predviđanje kumulativnih pomaka na temelju predviđene razine podzemne vode za razdoblje od 60 dana.

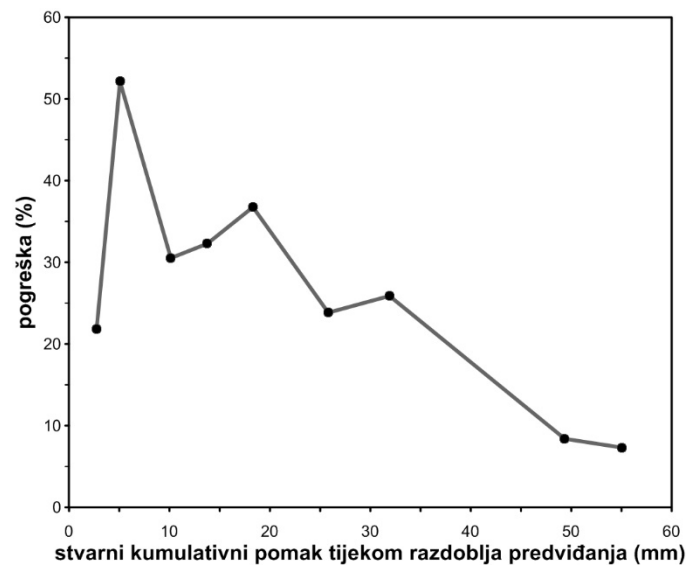


Slika 6.49. Predviđanje kumulativnih pomaka na temelju predviđene razine podzemne vode za razdoblje od 90 dana.

Srednje kvadratne pogreške i razlike između predviđenih i izmjerenih kumulativnih pomaka na kraju svih devet razdoblja predviđanja prikazane su na dijagramu na slici 6.50. Iz slike je vidljivo da su srednje kvadratne pogreške najveće za razdoblje od 50, 60 i 70 dana, kao i u slučaju predviđanja na temelju izmjerenih dubina do razine podzemne vode. Razlike između izmjerenog i predviđenog kumulativnog pomaka na kraju razdoblja predviđanja iznose od 0,76 mm, za razdoblje predviđanja od 10 dana, do 11,5 mm za razdoblje predviđanja od 70 dana, dok prosječna vrijednost razlika između predviđenih i izmjerenih pomaka iznosi 5,96 mm. S obzirom na prikazane rezultate (slike 6.47, 6.48, 6.49 i 6.50) može se zaključiti da je predviđanje na temelju predviđene razine podzemne vode prihvatljivo za razdoblja do 30 dana. Usporedbom izmjerenih i predviđenih kumulativnih pomaka može se odrediti pogreška kao omjer razlike izmjerenog i predviđenog kumulativnog pomaka u odnosu na izmjereni kumulativni pomak tijekom razdoblja predviđanja (slika 6.51), pa tako pogreška za razdoblje predviđanja od 10 dana iznosi 21,8% (izmjereni kumulativan pomak 2,75 mm), 52,1% za razdoblje predviđanja od 20 dana (kumulativan pomak 4,92 mm) te 7,3% za razdoblje predviđanja od 90 dana (kumulativan pomak 55,04 mm). Iz slike 6.51 je vidljivo da se ovako određena pogreška smanjuje kako se ukupni kumulativni pomaci za određena razdoblja predviđanja povećavaju, budući da je za sva razdoblja predviđanja razlika između izmjerenog i predviđenog kumulativnog pomaka relativno mala (prosječno 5,96 mm).



Slika 6.50. Srednja kvadratna pogreška za različita razdoblja predviđanja modelom slučajnih šuma na temelju predviđene razine podzemne vode te razlike između izmjereneog kumulativnog pomaka i predviđenog pomaka na kraju svakog razdoblja predviđanja.



Slika 6.51. Pogreška predviđanja modelom slučajnih šuma na temelju podataka predviđene razine podzemne vode, s obzirom na izmjerene kumulativni pomak u razdoblju predviđanja.

7. DISKUSIJA

Unatoč opsežnoj analizi i interpretaciji klizišta Kostanjek prikazanoj u Ortolan (1996), koja se temeljila na istraživanjima provedenim u razdoblju od 1966. do 1995. godine i kompilacijama svih do tada postojećih relevantnih podataka, još i danas nisu u dovoljnoj mjeri poznati mnogi važni elementi modela ovog velikog (1 km^2) i dubokog (90 m) aktivnog klizišta. U poglavlju 3.2 ove disertacije sažeto se navode povijesni podaci o istraživanjima, a u poglavlju 3.3 povijesni podaci o interpretaciji klizišta Kostanjek. Iz prethodnih istraživanja proizlazi da su za određivanje geometrije klizišta najkorisniji bili ukupni horizontalni pomaci na površini klizišta interpretirani analizom stereoparova avionskih snimaka iz razdoblja od 1963. do 1988. godine. Granice klizišta identificirane su terenski na temelju vidljivih deformacija na građevinama, pri čemu niti tada nisu uočene otvorene pukotine koje bi omogućile jednoznačnu interpretaciju položaja glavne pukotine, bočnih pukotina i nožice klizišta. Dubina klizišta također je indirektno određena budući da nije bilo opažanja inklinometrima, već su deformacije piezometarskih cijevi u razdoblju od siječnja 1991. do ožujka 1994. godine (bušotine KS 2', KS-3, KS-4 i KS-5 prikazane na slici 3.14) uzete u obzir kao pokazatelji pomaka po kliznoj plohi. Na temelju ovih mjerenja proizlazi da dubine klizne plohe u središnjem dijelu klizišta iznose 40,3 m, uz lijevu (istočnu) granicu klizišta 36,4 i 43 m te u nožičnom dijelu klizišta 28 m. Dubina klizne plohe interpretirana je i u bušotini KS-1 na osnovi tragova smicanja u materijalu jezgre bušotine, u intervalu od 56,2 do 58 m. Pomaci u podzemlju, na dubini od 4 do 21 m registrirani su i u 24 kopana zdenca uz sjevernu i zapadnu granicu klizišta. Razine podzemne vode periodički su opažane u tri piezometra unutar klizišta i u tri piezometra uz istočnu i jugoistočnu granicu klizišta u razdoblju od 1988. do 1994. godine, a jednokratno su mjerene i u 162 zdenca smještene uz zapadnu i sjevernu granicu klizišta. U okviru interpretacije modela klizišta (Ortolan, 1996) navode se ukupni horizontalni pomaci na tri klizne plohe u razdoblju od veljače 1963. do 1988. godine i u razdoblju od 1988. do 1994. godine (tablica 3.3), iz kojih je izračunato da za razdoblje od 1963. do 1994. godine pomak po najdubljij kliznoj plohi iznosi 3,67 m, a pomak na površini terena 6,54 m. U geotehničkom elaboratu za projekt sanacije klizišta (Ortolan, 2008) daje se interpretacija ukupnih pomaka po najdubljij kliznoj plohi u iznosu od maksimalno 3,935 m za razdoblje od 1963. do 2001. godine. Horizontalna komponenta pomaka uzeta je kao reprezentativna za prostorni pomak. Navede analize horizontalnih pomaka temelje se na pomacima izmjerenim u tunelu u razdoblju od 1988. do 1996. godine, na temelju tri mjerenja jedne stabilizirane geodetske točke u razdoblju od 1988. do 1998. godine (ukupni horizontalni pomak od 375,4 mm) i na dva mjerenja iste stabilizirane točke u prosincu 1999. i u travnju 2001. godine. Prema Ortolan (2008) proizlazi da ukupni pomak u razdoblju od 1988. do 1999. godine na ovoj stabiliziranoj točki iznosi 465,4 mm. Unatoč nedostatku kontinuiranih opažanja pomaka, Ortolan (1996) korelira brzine gibanja klizišta s količinama iskopa u kamenolomu (u razdoblju od 1963. do 1988. godine) te navodi slijedeće zaključke: (1) početak klizanja u veljači 1963. godine vremenski se podudara s početkom masovnih miniranja u kopu lapora; (2) sve do konačnog zatvaranja kopa 1988. godine veličina pomaka klizišta proporcionalna je količini iskopa; (3) prosječne godišnje vrijednosti brzina horizontalnih pomaka iznose od minimalno 0,025 m/god za 1985. godinu do maksimalno 0,44 m/god za razdoblje od 1973. do 1976. godine (izuzetak predstavlja razdoblje većih brzina gibanja od 1985. do 1988. godine, što nije u korelaciji s količinama iskopa). Na temelju analiza mjesečnih oborina i pomaka klizišta za razdoblje do 1988. godine, Ortolan (1996) navodi

da nije jasno vidljiv utjecaj oborina na brzinu klizanja. Na osnovi korelacija vertikalnog pomaka repera smještenog uz sjeverozapadni rub radionice u području stope klizišta i klimatskih parametara (mjesečna oborina, srednja mjesečna temperatura zraka, maksimalna dnevna visina snježnog pokrivača) s meteorološke postaje Podsused u razdoblju od 1961. do 1970. godine Ortolan (1996) navodi sljedeće zaključke koje smatra reprezentativnim za gibanje klizišta po najdubljoj kliznoj plohi u nožici klizišta: (1) brzine klizišta i količine mjesečnih oborina obrnuto su proporcionalne; (2) intenzitet pomaka povećava se u razdobljima od zime do proljeća, tj. od studenog do svibnja (u promatranom razdoblju iskop je bio zaustavljen), a uzrok povećanja brzine gibanja je povećanje vlažnosti tla uslijed topljenja snježnog pokrivača i podizanje razine podzemne vode zbog oborina. U Ortolanu (1996) se prikazuju i rezultati korelacija brzine prostornih pomaka klizišta po najdubljoj kliznoj plohi (KP1) u razdoblju od srpnja 1988. do listopada 1995. godine (mjerene na reperima u tunelu i na jednoj stabiliziranoj geodetskoj točki, kao što je prethodno navedeno), u odnosu na površinsko otjecanje i sadržaj vode u tlu, iz čega se zaključuje da je utjecaj sezonskih promjena vlažnosti tla vidljiv od 1989. godine. Smanjivanje iznosa izmjerenih pomaka interpretirano je (Ortolan, 1996) kao postupno smanjenje brzine gibanja klizišta, iako se navodi da su izmjereni pomaci od 26 cm veći od maksimalnih veličina pomaka (15 cm) nastalih uslijed sezonskih utjecaja.

Zbog daljnje aktivnosti klizišta Kostanjek proizašla je potreba za uspostavljanjem integriranog sustava praćenja parametara klizanja s kontinuiranim opažanjima pomaka na površini klizišta i ispod površine te razine podzemne vode i oborina (kiše i snijega). Istraživanja prikazana u ovom radu zasnivaju se na podacima prikupljenim integriranim i automatiziranim sustavom praćenja, koji je sažeto opisan u poglavlju 4.1, a u okviru ove diskusije navedeni su i nedostaci i ograničenja sustava. Rezultati praćenja klizišta Kostanjek u razdoblju od rujna 2012. do siječnja 2015. godine prikazani su u vidu analize pomaka klizišta na 14 GNSS stanica raspoređenih po cijeloj površini klizišta, na osnovi čega su identificirana dva glavna obrasca gibanja karakteristična za klizište Kostanjek. Analiza pomaka izmjerenih inklinometrom u središnjem dijelu klizišta omogućila je potvrdu translacijskog klizanja po kliznoj plohi na dubini između 62 i 63 m, a time i ekstrapolaciju rezultata praćenja pomaka s površine na kliznu plohu. Uzroci klizanja, oborine i promjene razine podzemne vode, međusobno su korelirani i statistički analizirani metodom višestruke linearne regresije i metodom slučajnih šuma sa svrhom određivanja odnosa između oborina, razine podzemne vode i pomaka klizišta. Ovako definirani modeli, određeni na temelju empirijskih, odnosno statističkih analiza kontinuiranih podataka o parametrima klizanja predstavljaju fenomenološki model klizišta Kostanjek. Pomoću ovih modela moguće je predviđanje gibanja klizišta Kostanjek na temelju podataka dobivenih praćenjem parametara uzroka klizanja, oborina i razina podzemne vode. Diskusija rezultata ovih analiza razmatra kvalitetu, pouzdanost, ali i ograničenja uspostavljenih modela. Dobiveni fenomenološki model gibanja klizišta moguće je praktično primijeniti za razvoj sustava ranog upozoravanja na klizištu Kostanjek, što je sažeto opisano u posljednjem dijelu ove diskusije.

7.1. Sustav praćenja na klizištu Kostanjek

Uspostavljanje sustava praćenja klizišta Kostanjek provedeno je u razdoblju od početka 2011. do početka 2013. godine. Osnovu sustava predstavlja 15 permanentnih GNSS stanica, koje omogućavaju kontinuirana praćenja pomaka na površini klizišta. Preciznost mjerenja prvenstveno ovisi o tome jesu li

podaci nefiltrirani ili su postporcesirani za različita vremenska razdoblja. Za dnevne podatke dobivene 24-satnim postporcesiranjem GNSS mjerenja izračunata je preciznost u iznosu od $\pm 3,13$ do $\pm 4,93$ mm u smjeru S-J i od $\pm 2,02$ do $\pm 3,84$ mm u smjeru I-Z. S obzirom na interval pouzdanosti od 95%, pogreška mjerenja u horizontalnoj ravnini je od $\pm 3,17$ do $\pm 4,55$ mm, a pogreška mjerenja u vertikalnoj ravnini veća je dva do tri puta u odnosu na horizontalnu ravninu i iznosi od $\pm 6,4$ do $\pm 10,47$ mm. Izračunata preciznost GNSS mjerenja na klizištu Kostanjek odgovara specifikacijama proizvođača GNSS prijemnika (Trimble, 2010), što ukazuje na to da se mjerenjima dobivaju pouzdani podaci položaja antena. Dnevno praćenje pomaka s visokom preciznošću omogućava mjerenje malih pomaka, što je osobito važno za analize gibanja sporih klizišta kao što je Kostanjek. Ove analize su nužne za uspostavu korelacija i modeliranje odnosa između parametara gibanja klizišta i parametara uzroka klizanja, pod uvjetom da se i uzroci klizišta kontinuirano prate. Uz veliku vremensku razlučivost podataka GNSS mjerenja na klizištu Kostanjek, također je osigurana i velika prostorna razlučivost podataka o gibanju klizišta, ravnomjernim rasporedom 15 GNSS stanica na površini klizišta približne veličine od 1 km². U usporedbi s drugim svjetskim klizištima na kojima se provode kontinuirana praćenja pomaka, gustoća mjernih stanica po jedinici površine klizišta Kostanjek je velika. Primjerice, na klizištu Utiku (Novi Zeland) površine 0,8 km² opaža se s pet GPS stanica (Massey, 2010), na izvorištu odrona veličine oko 0,3 km² na planini Turtle Mountain (Kanada) s 12 GPS stanica (Froese i Moreno, 2011), a na klizištu Gradenbach (Austrija) površine 1,7 km² sa šest GPS stanica (Brückl i dr., 2006).

Mreža GNSS stanica na klizištu Kostanjek radi stabilno, tako da gubitak podataka pojedine GNSS stanice tijekom razdoblja praćenja iznosi prosječno 3%, odnosno oko dvadesetak dnevnih mjerenja u razdoblju od 730 dana. Uzrok ovim gubicima u većini slučajeva nije funkcionalnost GNSS prijemnika, već je posljedica problema u prijenosu podataka te ljudskog faktora.

Osnovni nedostatak kontinuiranog praćenja mrežom permanentnih GNSS stanica je visoka cijena sustava u fazi njegovog razvoja te njegovo održavanje. Međutim, mreža GNSS stanica na klizištu Kostanjek je opravdana u odnosu na visoku razinu rizika od klizanja, jer se klizište nalazi u urbaniziranom području Grada Zagreba s približno 250 stambenih i gospodarskih zgrada te gustom mrežom infrastrukturnih građevina. Alternativno korištenje jeftinijih tehnologija kontinuiranog praćenja slične preciznosti, kao što je primjerice mjerenje položaja prizmi s jednom totalnom stanicom, na klizištu Kostanjek nije moguće. Naime, konfiguracija klizišta ne omogućava optičku vidljivost svih dijelova klizišta s jedne točke. Drugi nedostatak kontinuiranog praćenja mrežom permanentnih GNSS stanica na klizištu Kostanjek je to što nisu provedena geodetska mjerenja nagiba stupova na kojima su instalirane GNSS antene. Iz tog razloga je pri analizama pomaka pretpostavljeno da nije došlo do značajne promijene nagiba stupova na kojima su instalirane GNSS antene, odnosno da pomak antene uzrokovan eventualnim naginjanjem stupa čini tek neznatni udio u pomaku GNSS antene nastalom kako posljedica klizanja. Općeniti nedostatak praćenja permanentnom mrežom je i taj što GNSS prijemnici i prateća oprema (npr. routeri za prijenos podataka) imaju relativno veliku potrošnju električne energije. Međutim, na klizištu Kostanjek je moguće napajanje svih 15 GNSS stanica iz sustava javne električne mreže s obzirom da se klizište nalazi u urbaniziranom području s javnom električnom mrežom.

Osim na površini terena, gibanje klizišta Kostanjek prati se i u podzemlju, i to povremenim mjerenjima inklinometrom u inklinometarskoj cijevi te kontinuiranim mjerenjima vertikalnim žičanim ekstenzometrima. Inklinometarska cijev i vertikalni ekstenzometri instalirani su u dvije bušotine u središnjem dijelu klizišta, na međusobnoj udaljenosti od 8,5 metara. Mjerenje inklinometrom u razdoblju od travnja 2012. do veljače 2013. jasno je ukazalo na dubinu klizne plohe između 62 i 63 metra. Mjerenja pomaka po kliznoj plohi vertikalnim ekstenzometrima nisu korištena u ovom radu, prvenstveno zbog sporog klizanja i kratkog vremenskog razdoblja opažanja, od rujna 2013. do siječnja 2015. godine. Naime, da bi mjerenje vertikalnim ekstenzometrom bilo točno najprije se mora dogoditi određeni inicijalni pomak (Corominas i dr., 2000) tako da su prvi realni podaci izmjereni vertikalnim ekstenzometrima određeni tek u jesen 2014. godine. Osnovno ograničenje uspostavljenog sustava praćenja klizišta Kostanjek, a koji se odnosi na opažanja pomaka u podzemlju, je nedostatak opreme u bušotinama u svim dijelovima klizišta izuzev središnjeg dijela. Zbog toga je na osnovi GNSS mjerenja na površini terena moguće samo procijeniti pomake ispod površine, odnosno po kliznoj plohi, i to zahvaljujući translacijskom mehanizmu klizanja određenom u središnjem dijelu klizišta. Točnije analize gibanja u drugim dijelovima klizišta iziskuju izvedbu dodatnih bušotina za praćenje gibanja u kojima se mogu instalirati primjerice inklinometri, D.M.S. sustavi (eng. *Differential Monitoring of Stability*), vertikalni ekstenzometri te uređaji za mjerenje razine podzemne vode i pornog tlaka.

Praćenje uzroka klizišta Kostanjek provodi se kontinuiranim praćenjem razine podzemne vode i oborina. Razina podzemne vode mjeri se u bušotini u središnjem dijelu klizišta te u četiri kopana zdenca u S, SZ i Z dijelu klizišta (opisano u poglavlju 4.1). Budući da su kopani zdenci relativno plitki (maksimalna dubina 24 m) izmjerene razine podzemne vode reprezentativne su samo za najviši vodonosnik, a upitna je njihova reprezentativnost za određivanje pornih tlakova na kliznoj plohi.

Kontinuirano praćenje kišomjerom na klizištu Kostanjek započelo je u jesen 2011. godine, a tijekom jeseni 2013. godine zamijećene su nepravilnosti u radu. Iz tog razloga su u ovoj disertaciji korišteni podaci o oborinama s meteorološke postaje Zagreb-Grič, koja je udaljena oko 9 km od predmetnog klizišta. Drugi razlog zbog čega su korišteni podaci s meteorološke postaje Zagreb-Grič je to što instaliranim kišomjerom nije moguće pratiti količine snježnih oborina. Provjera reprezentativnosti podataka oborina s meteorološke postaje Zagreb-Grič za područje klizišta Kostanjek napravljena je na temelju podataka iz razdoblja od jeseni 2011. do jeseni 2013. godine, pri čemu koeficijent korelacije između oborina s postaje Zagreb-Grič i oborina izmjerenih kišomjerom na Kostanjeku iznosi 0,92. Tijekom jeseni 2014. na klizištu Kostanjek instalirana je nova meteorološka stanica Vantage Pro2™ Plus koja osim oborina mjeri i evapotranspiraciju. Na osnovi provedenih analiza rezultata praćenja proizlazi da je opažanje evapotranspiracije nužno za kvalitetniju interpretaciju uzroka klizanja. Međutim, kao i s kišomjerom, s novom meteorološkom stanicom nije moguće pratiti količine snježnih oborina.

7.2. Rezultati praćenja klizišta

Gibanje klizišta Kostanjek kontinuirano se prati sa 14 GNSS stanica, postavljenih unutar granice klizišta. Maksimalni kumulativni horizontalni pomak od 426,09 mm, izmjeren je stanicom GNSS 09 u razdoblju od rujna 2012. do siječnja 2015. godine. Ovaj pomak izmjeren je u području otvorenog kopa lapora, u južnom dijelu klizišta Kostanjek. Općenito, iznosi pomaka najveći su u središnjim dijelovima klizišta, a idući prema rubovima klizišta pomaci su sve manji do te mjere da se može uočiti približno koncentrično smanjivanje prosječne godišnje brzine gibanja klizišta (slika 5.5). Ovo je u skladu s povijesnim podacima o ukupnim horizontalnim pomacima za razdoblje od 1963. do 1988. godine koje su odredili Pleško (1988) te Ortolan i Pleško (1992) na temelju analiza stereoparova avionskih snimaka. Razliku u veličini pomaka na rubovima klizišta i u njegovom središnjem dijelu Ortolan (1996) interpretirao je kao posljedicu gibanja klizišta po tri klizne plohe različitih dubina (dubine 50, 65 i 90 m). Razliku u pomacima na središnjem dijelu i rubovima klizišta također su zabilježili Allison i Brunnsden (1990) na klizištu Wealden Beds (Engleska), Malet i dr. (2002) na klizištu Super-Sauze (Francuska) te Massy (2010) na klizištu Utiku (Novi Zeland). Allison i Brunnsden (1990) objašnjavaju manje brzine gibanja na rubnim dijelovima klizišta kao rezultat većeg otpora klizanju uslijed trenja na bočnim pukotinama, odnosno granicama klizišta. Na temelju inklinometarskih mjerenja provedenih u razdoblju od travnja 2012. do veljače 2013. godine na središnjem dijelu klizišta utvrđeni su pomaci po kliznoj plohi na dubini između 62 i 63 m, a dvije pliće klizne plohe interpretirane u Ortolan (1996) nisu ustanovljene. S obzirom na rezultate inklinometarskih mjerenja, proizlazi da se gibanje klizišta Kostanjek u središnjem dijelu klizišta odvija po jednoj dubokoj kliznoj plohi.

Kontinuirano praćenje pomaka GNSS stanicama omogućilo je interpretaciju dva obrasca gibanja klizišta Kostanjek, obrazac sporijeg i bržeg gibanja. Ove obrasce gibanja nije bilo moguće odrediti tijekom povijesnih istraživanja klizišta Kostanjek, budući da su mjerenja pomaka bila samo povremena i vrlo rijetka. Važno je napomenuti da je za brzinu gibanja točke GNSS antene registriranu GNSS prijemnikom pretpostavljeno da predstavlja brzinu klizanja u točki klizišta na kojoj je postavljena GNSS antena. Maksimalne brzine klizanja zabilježene tijekom razdoblja bržeg gibanja su 4,8 mm/dan, a tijekom razdoblja sporijeg gibanja brzine iznose do maksimalno 6,04 mm/mj, što je izmjereno stanicom GNSS 09 u području otvorenog kopa lapora. Ova dva obrasca gibanja prema Leroueil i dr. (1996) predstavljaju fazu povremenih reaktivacija i aktivnog klizanja, a prema Fell (2000) fazu reaktivacije klizanja u kojoj klizno tijelo klizi po potpuno razvijenoj kliznoj plohi. Slične obrasce gibanja zabilježio je Massey (2010) na klizištu Utiku, koje je po svojim karakteristikama slično klizištu Kostanjek: (1) oba klizišta su translacijska, duboka i spora; te (2) materijal u klizištu i njegovoj podlozi su čvrsta tla-meke stijene.

Kontinuirani vremenski nizovi podataka i jasno uočeni obrasci gibanja za razdoblje od rujna 2012. do siječnja 2015. godine omogućili su usporedbu i definiranje odnosa između gibanja klizišta i uzroka klizanja, odnosno oborina i razine podzemne vode. Tijekom 2013. i 2014. godine palo je ukupno 1092 i 1234 mm oborina godišnje, koje su za 23.1% odnosno za 37.9 % veće od godišnjeg prosjeka izračunatog za posljednjih 150 godina za grad Zagreb. Osim toga, tijekom 2013. i 2014. godine zabilježene su tri dnevne oborine više od 50 mm čiji povratni period iznosi 2,3 godine prema podacima s meteorološke postaje Zagreb-Grič. Također, tijekom 13. i 14.1.2013. palo je 54 cm snijega što predstavlja treću najveću

snježnu oborinu zabilježenu na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič (Mokorić, 2013). Svi navedeni podaci o oborinama ukazuju na to da je praćenje klizišta Kostanjek provedeno u izrazito vlažnom razdoblju. Zbog toga je nužno izmjerene podatke, rezultate analiza i njihovu eventualnu primjenu sagledati u kontekstu sličnih vlažnih razdoblja, koja mogu postati sve učestalija kao posljedica klimatskih promjena.

7.3. Odnos između uzroka i gibanja klizišta

Odnos između uzroka i gibanja klizišta Kostanjek određen je na temelju analize: (1) parametara gibanja izmjerenih stanicom GNSS 08 na središnjoj mjernoj postaji; (2) podataka o razinama podzemne vode izmjerenih senzorom WLS-1 u piezometru na središnjoj mjernoj postaji; te (3) oborina izmjerenih na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič. Oborine koje su se dogodile u razdoblju od početka 2013. do početka 2015. godine uzrokovale su 11 glavnih razdoblja podizanja razine podzemne vode. Količine oborina koje su uzrokovale ove promjene iznosile su od 20,6 do 211,6 mm, a podizanja razine podzemne vode su iznosila od 0,19 m do 5,17 m. Koeficijent korelacije između podizanja razine podzemne vode i količine oborina, uz pretpostavku linearnog odnosa, iznosi 0,953. Također najviši koeficijent korelacije između količine oborina i porasta razine podzemne vode određen je s vremenskim pomakom od sedam dana, iz čega proizlazi da vodonosnik na klizištu Kostanjek reagira na oborine u razdoblju od prosječno sedam dana. U slučaju dugotrajnijih oborina tijekom kojih nije bilo pojave intenzivnih oborina, nije došlo do promjena razina podzemne vode, kao što je primjerice razdoblje u lipnju 2014. godine kada je tijekom 19 dana palo 135 mm. Ovako brzo reagiranje vodonosnika olakšava uspostavu odnosa između promjene razine podzemne vode i količine oborina, budući da na vodonosnik veći utjecaj imaju kraća razdoblja visokih oborina. U slučaju klizišta nastalih u manje propusnim materijalima, odnos između porasta razina podzemne vode i oborine je složeniji. U materijalima manje propusnosti na promjene razina podzemne vode obično utječu dugotrajna razdoblja oborina manjeg intenziteta, kod kojih nije moguće jednoznačno odrediti utjecaj pojedine oborine na promjenu razine podzemne vode. Također, u materijalima manje propusnosti postoji i veći vremenski pomak između oborine i promjene razine podzemne vode. Primjerice na klizištu Utiku, promjene razine podzemne vode, odnosno porni tlakovi, reagiraju na oborine u razdoblju od 12 do 20 tjedana (Massey i dr., 2013). S obzirom da prema literaturi (Van Asch i dr., 1999; Corominas i Moya, 1999; Aleoti, 2004; Zêzere i dr., 2005) duboka klizišta obično nastaju ili se reaktiviraju nakon dugih kišnih razdoblja, klizište Kostanjek se može smatrati u tom smislu atipičnim, jer se reaktivira nakon relativno kratkih razdoblja s većim količinama oborina.

Iako je koeficijent korelacije između oborina koje su uzrokovale podizanje razine podzemne vode i samog podizanja razine podzemne vode visok (0,953), tijekom razdoblja praćenja bilo je mnogo oborinskih događaja koji nisu uzrokovali pomak, a koji su po količini oborina bili znatno veći nego minimalna zabilježena oborina koja je uzrokovala podizanje razine podzemne vode (20,9 mm). Primjerice, krajem kolovoza 2013. godine, u razdoblju od šest dana palo je 91 mm kiše, a ta oborina je veća od pet oborina koje su uzrokovale porast razine podzemne vode tijekom praćenja klizišta Kostanjek. Moguće objašnjenje zbog čega ova oborina nije uzrokovala porast razine podzemne vode je evapotranspiracija, koja je najveća u ljetnim mjesecima. Osim toga, dubina do podzemne vode tijekom ovog oborinskog događaja bila je relativno velika (18,5 m) te je oborina morala nadoknaditi vlažnost tla

u relativno debelom stupcu naslaga iznad razine podzemne vode. Suprotna situacija od ove je nastala kada su oborine od 40,7 i 20,9 mm, u studenom i prosincu 2014. godine, podigle razinu podzemne vode za 0,23 m, odnosno 0,19 m. Međutim, ove oborine dogodile su se u razdoblju s malom evapotranspiracijom i pri relativno maloj dubini do podzemne vode (između 12,5 m i 13 m), nedugo nakon razdoblja podizanja razine podzemne vode u listopadu, tako da je stupac tla iznad razine vode bio gotovo saturiran. Složeni odnosi između oborina i promjene razine vode (primjerice Leroueil, 2001; Cascini i dr., 2006) znatno otežavaju predviđanje promjene razine podzemne vode na temelju oborina. Utjecaj početne razine podzemne vode, u statističkim analizama (poglavlje 6.1.2.), simuliran je brojem dana proteklih od razdoblja kada je padala određena oborina, pri čemu veći broj dana od određene oborine ukazuje na nižu razinu podzemne vode i smanjenu vlažnost tla. Utjecaj evapotranspiracije opisan je pomoću efektivnih oborina, a utjecaji duljih vlažnih, ili sušnijih razdoblja uvođenjem modificiranih oborina. S obzirom na složeni odnos između oborina i razine podzemne vode, za pouzdanije predviđanje promjena razina podzemne vode nužno je na dnevnoj bazi ažurirati uspostavljene odnose (modele) najnovijim podacima o razinama podzemne vode.

Odnos između razine podzemne vode i gibanja klizišta Kostanjek jednostavniji je nego što je odnos između razine podzemne vode i oborina. Kontinuiranim mjerenjem razine podzemne vode i gibanja klizišta ustanovljeno je da se razdoblja bržeg gibanja klizišta događaju isključivo u razdobljima visokih razina podzemne vode, pri čemu krivulja odnosa između brzine gibanja klizišta i razine podzemne vode ima karakteristike histereze. Naime, na klizištu Kostanjek brzine klizanja veće su pri podizanju razine podzemne vode nego pri njezinom snižavanju pri istim razinama podzemne vode. Različitu brzinu gibanja pri istim razinama podzemne vode na drugim klizištima zamijetili su i Bertini (1984), Van Asch i dr. (2007), Gonzalez i dr. (2008), Matsuura i dr. (2008) te Massey (2010). Različiti autori tumače ovakav odnos ili kao posljedicu promjene posmične čvrstoće materijala tijekom smicanja (Lupini i dr., 1981; Skempton, 1985; Angeli i dr., 1996; Picarelli, 2007) ili kao konsolidaciju i povećanja čvrstoće tijekom razdoblja sporijeg gibanja (Nieuwenhuis, 1991; Angeli i dr., 2004). Smanjenje brzine gibanja na klizištu Kostanjek započinje dok se razina podzemne vode još uvijek podiže, četiri do pet dana prije maksimalne razine, odnosno od trenutka kada se brzina porasta razine podzemne vode počne smanjivati. S obzirom na prethodno opisane karakteristike gibanja, može se zaključiti da je odnos između brzine klizanja ne ovisi samo o razine podzemne vode, već i o brzini promjene razine podzemne vode. Razlog zbog kojega se klizište Kostanjek giba brže za vrijeme podizanja razine podzemne vode vjerojatno je posljedica toka podzemne vode. Naime, razina podzemne vode na središnjem dijelu klizišta naglo se podiže tijekom vrlo kratkog vremenskog razdoblja. Maksimalna izmjerena dnevna promjene razine podzemne vode na središnjoj mjernoj postaji iznosila je 0,87 m. Pretpostavlja se da pri naglom podizanju razine podzemne vode nastaju vrlo velike hidrodinamičke sile u smjeru subparalelnom površini terena, koje značajnu utječu na stabilnost padine. Također, dubine do podzemne vode pri kojima je započelo pet analiziranih razdoblja bržeg gibanja razlikuju se i do pet metara, a pri kraju analiziranog razdoblja razlike u dubini iznose nešto manje od tri metra. Ovi podaci ukazuju na to da ne postoji jedinstvena granična vrijednost dubine do podzemne vode, odnosno pornog tlaka, pri kojoj dolazi do početka, odnosno završetka gibanja.

7.4. Statističke analize uzroka i gibanja klizišta Kostanjek

Odnosi između oborina i razina podzemne vode te razina podzemne vode i gibanja klizišta, u okviru ovog rada, uspostavljeni su metodama višestruke linearne regresije i slučajnih šuma. Metoda višestruke linearne regresije predstavlja klasičnu statističku metodu predviđanja zavisne varijable na temelju više nezavisnih varijabli, pri čemu je međusobni odnos između zavisnih i nezavisnih varijabli linearan. Iako je metoda višestruke linearne regresije vrlo jednostavna, a njezini rezultati se lako interpretiraju, njezina upotreba pri predviđanju razina podzemne vode nije uobičajena, za razliku od predviđanja razina površinskih voda (Sahoo i Jha, 2013). Neki od primjera korištenja višestruke linearne regresije u predviđanju razina podzemne vode prikazani su u Hodgson (1978), Dogan i dr. (2008) te Jasmin i dr. (2010). S druge strane, metoda slučajnih šuma (Breiman, 2001) predstavlja relativno novu metodu strojnog učenja, koja se temelji na principu klasifikacijskih stabala i koja do sada nije korištena pri analizi promjena, odnosno predviđanja razine podzemne vode.

U ovom radu definirano je ukupno četiri modela između oborina i razina podzemne vode: (1) model višestruke linearne regresije za predviđanje razine podzemne vode; (2) model višestruke linearne regresije za predviđanje brzine promjene razine podzemne vode; (3) model slučajnih šuma za predviđanje razine podzemne vode; te (4) model slučajnih šuma za predviđanje brzine promjene razine podzemne vode. Međusobnom usporedbom modela na temelju statističkih pokazatelja te metodama *k*-struke unakrsne validacije i validacije određeno je da modeli slučajnih šuma bolje opisuju izmjerene podatke. Daljnjim analizama, odnosno predviđanjem razine podzemne vode za razdoblja od posljednjih 10 do 90 dana praćenja, najbolji rezultat je dobiven modelom slučajnih šuma za predviđanje brzine promjene razine podzemne vode. Ovim modelom predviđene su samo veće promjene razine podzemne. Razlog zbog kojega model slučajnih šuma koji predviđa relativnu promjenu određene veličine, odnosno brzinu promjene razine podzemne vode, je bolji od modela koji izravno predviđa razinu podzemne vode je to što je raspon vrijednosti dubine do podzemne vode (8,53 m) znatno veći nego raspon vrijednosti brzine promjene (dnevne promjene) razine podzemne vode (1,03 m). S obzirom na navedeno, krivo procijenjena vrijednost brzine ne utječe značajno na promjenu razine za razliku od krivo izravno procijenjene dubine do podzemne vode. Primjerice krivo procijenjena vrijednost dnevne promjene razine podzemne vode od 10% uzrokovati će pogrešku dubine do podzemne vode od 0,103 m, dok krivo procijenjena dubina do podzemne vode od 10% uzrokuje pogrešku od 0,853 m.

Daljnjim statističkim analizama obuhvaćen je odnos između razine podzemne vode i brzine gibanja klizišta. Ukupno je definirano četiri modela između razine podzemne vode i brzine gibanja klizišta: (1) model višestruke linearne regresije za predviđanje brzine gibanja određen na cijelom skupu podataka; (2) model višestruke linearne regresije za predviđanje brzine gibanja primijenjen zasebno na razdoblja podizanja i spuštanja razine podzemne vode; (3) model slučajnih šuma za predviđanje brzine gibanja određen na cijelom skupu podataka; te (4) model slučajnih šuma za predviđanje brzine gibanja primijenjen zasebno na razdoblja podizanja i spuštanja razina podzemne vode. Modeli za predviđanje brzina gibanja primijenjeni zasebno na razdoblja podizanja i spuštanja razina podzemne vode uvedeni su u analize zato što je primijećeno da je brzina gibanja pri određenoj razini podzemne vode različita tijekom razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode. Modeli višestruke linearne regresije

pokazali su veću pogrešku mjerenja od modela slučajnih šuma. Naime, tijekom razdoblja snižavanja razine podzemne vode, modelom višestruke regresije dobivene se negativne vrijednosti brzine gibanja klizišta, odnosno suprotan smjer pomaka klizišta, koji se na klizištu Kostanjek nije dogodio. Za razliku od modela višestruke regresije, modeli slučajnih šuma „naučili“ su da su vrijednosti brzine pomaka tijekom razdoblja snižavanja razine podzemne vode oko nule te zbog toga ne predviđaju negativne pomake. Međusobnom usporedbom statističkih pokazatelja, ali i k -strukom unakrsnom validacijom i validacijom određeno je da modeli slučajnih šuma primijenjeni na cijelom skupu podataka imaju iste karakteristike kao i modeli slučajnih šuma primijenjeni zasebno na skupovima podataka za razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode. S obzirom da su oba modela slučajnih šuma za predviđanje brzina gibanja gotovo identična, u daljnjim analizama je korišten model primijenjen na cijelom skupu podataka budući da je jednostavniji za analizu od modela koji se primjenjuje na zasebnim skupovima podataka.

Predviđanje gibanja metodom slučajnih šuma provedeno je na temelju podataka izmjerenih razina podzemne vode pri čemu su dobiveni zadovoljavajući rezultati, odnosno najmanje pogreške, za razdoblje predviđanja od 10 do 30 dana. U svrhu konačne verifikacije provedeno je predviđanje gibanja metodom slučajnih šuma na podacima predviđenih razina podzemne vode, određenih na temelju modela slučajnih šuma za predviđanje brzine promjene razine podzemne vode. Ovakvim predviđanjem, usprkos pogrešci u predviđenim razinama podzemne vode, također su dobiveni zadovoljavajući rezultati za razdoblja od 10 do 30 dana. S obzirom na navedeno model slučajnih šuma pokazuje određenu robusnost pri predviđanju brzine klizanja, odnosno kumulativnih pomaka, što znači da pri analizama modela slučajnih šuma manje promjene u ulaznim podacima ne utječu značajno na dobiveni rezultat.

Unatoč tome što je metoda slučajnih šuma relativno napredna statistička metode, u njenoj primjeni postoje određena ograničenja. Da bi rezultati predviđanja modelom slučajnih šuma bili zadovoljavajući, potreban je relativno dugi niz kontinuiranih podataka, na temelju kojega bi se mogao definirati odgovarajući model. Kratki nizovi podataka na kojima je definiran model, za posljedicu će vjerojatno imati slabe rezultate predviđanja. Niz podataka koji je korišten u analizama odnosa između oborina i razine podzemne vode na klizištu Kostanjek sadrži 730 dnevnih podataka o razini podzemne vode te o različitim oborinama, dok niz podataka koji je korišten u analizama odnosa između razine podzemne vode i gibanja klizišta sadrži 727 dnevnih podataka o brzini gibanja te o razini podzemne vode i iz nje izvedenih veličina. Nužan uvjet za kvalitetno predviđanje je i taj da prirodni i antropogeni uvjeti tijekom kojih su mjereni podaci za treniranje/definiranje modela moraju ostati nepromijenjeni u razdobljima predviđanja. Tako primjerice i mala promjena u režimu podzemnih voda uzrokovana ljudskom aktivnošću može učiniti model neupotrebljivim. Model slučajnih šuma, kao i ostale metode predviđanja, pokazivati će bolje rezultate predviđanja za sustave koji pokazuju determinističko ponašanje, za razliku od sustava gdje su određene veličine isključivo posljedica slučajnosti. Pri primjeni metode slučajnih šuma bitan je odabir reprezentativnih nezavisnih varijabli koje se koriste za predviđanje. Naime, ukoliko se pri definiranju modela odaberu krive varijable, odnosno varijable koje nemaju utjecaja na izlaznu veličinu, rezultati predviđanja neće biti zadovoljavajući. Jedno od glavnih ograničenja metode slučajnih šuma je to da ukoliko se tijekom razdoblja za koje se provodi predviđanje dogodi određena kombinacija događaja na kojoj model nije imao prilike trenirati, kao što je primjerice velika količina oborine u ljetnim

mjesecima koja nije uzrokovala porast razine podzemne vode, velika je vjerojatnost da će predviđanje biti netočno. Iz tog razloga model slučajnih šuma mora uvijek biti ažuriran novim podacima te kontroliran drugim modelima, odnosno metodama.

S obzirom na opisane odnose između oborina, razine podzemne vode i gibanja klizišta (poglavlje 7.3) te rezultate predviđanja razine podzemne vode i brzine klizanja može se očekivati da bi daljnjim praćenjem parametara klizanja, te daljnjim „učenjem“ modela slučajnih šuma, u slučaju nepromijenjenih prirodnih i antropogenih uvjeta, rezultati predviđanja trebali postati još pouzdaniji. Za poboljšanje modela nužno je obuhvatiti podatke praćenja više hidroloških godina koje bi sadržavale nekoliko ciklusa promjena razine podzemne vode te duža razdoblja suše i nižih razina podzemne vode. Također, modele promjene razine podzemne vode i gibanja klizišta Kostanjek trebalo bi provjeriti i drugim empirijskim metodama, kao što je primjerice metoda neuralnih mreža. Osim empirijskog (fenomenološkog) pristupa modeliranju koji je primijenjen u ovom istraživanju, potrebno je odnose promjene razine podzemne vode i gibanja klizišta Kostanjek provjeriti i modelima koji se temelje na fizičkim značajkama. Međutim za uspostavu takvih modela nužni su pouzdani podaci o geometriji klizišta, fizičko-mehanički parametri stijena i tala te izmjerene razine podzemne vode na cijelom području klizišta. Postojeći podaci o klizištu Kostanjek nisu dostatni za uspostavu pouzdanog modela koji se temelji na fizičkim značajkama, uslijed nedostatka istraživačkih radova u podzemlju na području većeg dijela klizišta. S obzirom na to, može se zaključiti da fenomenološki (empirijski) model gibanja klizišta Kostanjek, trenutno predstavlja jedini primjenjivi model za predviđanja u svrhu uspostave sustava ranog upozoravanja.

7.5. Primjena fenomenološkog modela gibanja klizišta Kostanjek

Identifikacija višestrukih reaktivacija klizišta Kostanjek i opetovana aktivna klizanja po potpuno razvijenoj kliznoj plohi tijekom razdoblja kontinuiranog praćenja gibanja klizišta Kostanjek u razdoblju od rujna 2012. siječnja 2015. godine ukazuju na visok stupanj opasnosti od klizanja (hazarda) izazvan oborinom koja uzrokuje podizanje razine podzemne vode. Analizama gibanja klizišta i uzorka klizanja određena je vremenska učestalost hazarda te je dokazan i visok stupanj rizika za sve ljude i građevine koji se nalaze unutar obuhvata granice klizišta

Na klizištima visokog stupnja rizika za ljude i građevine, na kojima je otežano ili odgođeno provođenje mjera sanacije i stabilizacije, preporučuje se uspostavljanje sustava ranog upozoravanja (engl. Early Warning System, EWS) kao glavna mjera smanjenja rizika. Svrha ranog upozoravanja je smanjenje broja ljudi izloženih opasnostima tijekom klizanja (primjerice otvaranju pukotina, rušenju građevina i sl.) provođenjem pravovremene evakuacije na osnovi znaka za uzbunjivanje. Ujedinjeni narodi (UN) definirali su EWS kao „skup mjera potrebnih za dobivanje smislenih informacija, vezanih za upozoravanje pojedinaca, zajednica ili organizacija pod utjecajem hazarda, da bi se omogućila priprema i pravovremeno djelovanje radi smanjenja štete ili gubitka“ (UNISDR, 2009). Preduvjet za učinkovitost EWS-a od klizanja su četiri elementa koje je nužno integrirati: (1) procjena rizika, (2) praćenje određene opasne pojave i njezino predviđanje, (3) prijenos upozorenja i diseminacija znaka za uzbunu, i (4)

spremnost za odaziv na lokalnoj razini (UNISDR, 2009). Sustavi ranog upozoravanja od klizanja u široj su upotrebi posljednjih godina (Anderson et al., 2011; Maskrey, 2011). Praćenje klizišta, koje podrazumijeva instalaciju senzora za praćenje, prijenos podataka i analize, je ključna aktivnost koja se mora provoditi u okviru EWS-a. Predviđanje je ključni element EWS-a jer uključuje definiranje graničnih vrijednosti parametara koji ukazuju na opasne pomake klizišta i svih ostalih aktivnosti koje omogućavaju upozoravanje. Predviđanje je također i najproblematičnije, kako zbog poteškoća predviđanja prirodnih događaja, tako i zbog ozbiljnih socioloških i zakonskih posljedica nepravovremenog ili lažnog uzbunjivanja.

Fenomenološki model klizišta Kostanjek obuhvaća model odnosa između razina podzemne vode i oborina i model odnosa između gibanja klizišta i razina podzemne vode. Predviđanje gibanja klizišta na temelju uspostavljenog fenomenološkog modela praktično se mogu primijeniti za razvoj sustava ranog upozoravanja klizišta Kostanjek, pri čemu postoje višestruke mogućnosti predviđanja s različitim ulaznim podacima.

Ulazni podaci za predviđanje gibanja klizišta Kostanjek su očekivane oborine što je moguće dobiti iz meteoroloških prognoza s meteorološke stanice Zagreb-Grič. Iz prognoziranih oborina može se predvidjeti razina podzemne vode na tri načina: (1) izravno, modelom slučajnih šuma na osnovi definiranog odnosa između razina podzemne vode i oborina; (2) neizravno, modelom slučajnih šuma na osnovi odnosa između dnevnih promjena razina podzemne vode i oborina; i (3) neizravno, pomoću dnevnih promjena razine podzemne vode očitanih iz teoretskih nivograma. Iz predviđenih razina podzemne vode moguće je predvidjeti pomake na površini klizišta neizravno, predviđanjem brzina gibanja klizišta pomoću modela koji definira odnos između veličina vezanih za razinu podzemne vode i gibanja klizišta.

Praktična primjena fenomenološkog modela za EWS klizišta Kostanjek iziskuje uspostavljanje graničnih vrijednosti rizičnih pomaka klizišta. Također, za pouzdanije predviđanje razina podzemne vode na osnovi oborina te brzine gibanja klizišta na osnovi razine podzemne vode, primjena fenomenološkog modela zahtijeva neprestano ažuriranje uspostavljenih odnosa (modela) najnovijim podacima o razinama podzemne vode i brzinama gibanja. Opisano ažuriranje modela na dnevnoj bazi iziskuje razvoj softverskih aplikacija na osnovi primijenjenih metoda i graničnih uvjeta.

8. ZAKLJUČAK

Integrirani sustav automatiziranog praćenja klizišta Kostanjek nazvan „Opservatorij za praćenje klizišta Kostanjek“, uspostavljen u okviru znanstvenog hrvatsko-japanskog SATREPS FY2008 projekta „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje rizika klizanja i bujica u Hrvatskoj“ u razdoblju od 2009. do 2014. godine, omogućio je analize gibanja klizišta i uzroka klizanja na osnovi kojih je razvijen fenomenološki model gibanja klizišta Kostanjek. Praćenje parametara klizanja na području ovog velikog, dubokog aktivnog klizišta provodi se pomoću 40-ak senzora. Na osnovi analize rezultata praćenja odabrana su reprezentativna mjerenja za razvoj fenomenološkog modela gibanja klizišta Kostanjek. Praćenje permanentnom mrežom koja se sastoji od 15 GNSS stanica, raspoređenih po cijeloj površini klizišta, omogućilo je interpretaciju parametara gibanja u različitim dijelovima klizišta. Opažanja piezometrom u središnjem dijelu klizišta, kao i senzorima za mjerenje razine vode u različitim dijelovima klizišta omogućila su interpretaciju hidrogeoloških parametara. Kontinuirani podaci o oborinama s meteorološke stanice Zagreb-Grič korišteni su za interpretaciju meteoroloških parametara. Reprezentativni set podataka za razvoj fenomenološkog modela gibanja klizišta Kostanjek obuhvaća kontinuirane podatke praćenja za razdoblje od 2 godine, od siječnja 2013. do siječnja 2015. godine.

Statističkim analizama podataka gibanja klizišta prikupljenih GNSS praćenje u razdoblju od 31.8.2012. do 15.1.2015., a koje su provedene u okviru ovog istraživanja, utvrđeno je da pokrivenost dnevnim podacima GNSS mjerenja iznosi od 89,7 do 99,9 %.. Izračunate pogreške GNSS mjerenja dobivenog 24-satnim postprocesiranjem najmanje su u horizontalnoj ravnini, u smjeru I-Z (od $\pm 2,02$ do $\pm 3,84$ mm), dok su u vertikalnom smjeru su dva do tri puta veće (od $\pm 6,4$ do $\pm 10,47$ mm), što je u skladu sa specifikacijama proizvođača GNSS uređaja. Zbog pogreške mjerenja, odnosno preciznosti podataka dobivenih 24-satnim postprocesiranjem, u daljnjim analizama podataka korišteni su 7-dnevni pomični prosjeci ovih podataka. U razdoblju od dvije godine iznos kumulativnih horizontalnih pomaka unutar granice klizišta iznosi od 37,94 mm uz rubove klizišta do 426,09 mm u središnjem dijelu klizišta, a azimuti smjerova pomaka GNSS stanica iznose od 154.5° do 199.8° . Horizontalna komponenta kumulativnih pomaka iznosi od 95,55% do 99,97% ukupnih prostornih pomaka zbog malog nagiba klizne plohe. S obzirom na prostornu distribuciju parametara gibanja na površini klizišta, općenito se može zaključiti da je kumulativni iznos pomaka GNSS stanica u središnjem dijelu klizišta 1,5 do 4 puta veći nego na zapadnim i sjevernim granicama klizišta. Prosječne godišnje brzine gibanja su u rasponu od 21,88 do 206,13 mm/god. U središnjem dijelu klizišta, odnosno na GNSS stanicama 08, 09 i 11, zabilježene su najveće prosječne brzine gibanja, a smanjenje prosječnih godišnjih brzina pomaka je približno koncentrično idući od središnjeg dijela klizišta prema rubnim dijelovima. S obzirom na vremensku distribuciju klizanja u analiziranom razdoblju, općenito se može zaključiti da postoje dva glavna obrasca gibanja: (1) obrazac bržeg gibanja; i (2) obrazac sporijeg gibanja. Početak, odnosno kraj razdoblja svakog određenog obrasca gibanja određen je na temelju statističke metode koja se naziva analiza točke promjene. Ova metoda je primijenjena na vremenski niz brzina izračunatih iz podataka kumulativnih horizontalnih pomaka, odnosno njihovih 7-dnevnih pomičnih prosjeka, određenih na temelju podataka praćenja 11 GNSS stanica koje pokazuju vrlo slične obrasce gibanja. Ukupno je određeno šest razdoblja sporijeg gibanja (s brzinama do 6 mm/mj) uobičajenog trajanja od nekoliko mjeseci te razdoblja bržeg gibanja (brzine do 4,8 mm/dan) trajanja od 33 do 123 dana. Tijekom pet razdoblja bržeg gibanja,

ukupnog trajanja 340 dana, dogodilo preko 90% ukupnog pomaka. Maksimalne brzine gibanja zabilježene su na kraju prvog razdoblja bržeg gibanja i iznosile su do 4,8 mm/dan.

Na temelju četiri inklinometarska mjerenja (nulto i tri mjerenja) provedena u razdoblju od 18.5.2012. do 8.2.2013. u bušotini B-1 dubine 100 m, određena je dubina klizne plohe u središnjem dijelu klizišta u intervalu između 62 i 63 metra. Zona smicanja registrirana je i na jezgri bušotine kao tanki proslojak gline visoke plastičnosti. Ukupan pomak izmjeren inklinometrom između travnja 2012. i veljače 2013. iznosio je 60 mm. S obzirom da se deformacije iznad klizne plohe mogu smatrati zanemarivima, zaključeno je da se središnji dio klizišta ponaša kao relativno kruti blok koji klizi po relativno tankoj zoni smicanja, odnosno kliznoj plohi. Azimut smjera pomaka u inklinometru (203°) sličan je azimutu smjera pomaka određenom na temelju GNSS mjerenja na stanici 08 ($189,7^\circ$). S obzirom da je udaljenost između ušća inklinometarske cijevi i GNSS stanice 08 svega dva metara, zaključeno da je klizanje translacijsko te da pomaci GNSS mjerenja na površini mogu aproksimirati pomake na kliznoj plohi u središnjem dijelu klizišta.

Na osnovi korelacije oborina s meteorološke postaje Zagreb-Grič s oborinama mjerenim ombrografom na klizištu Kostanjek za razdoblje od rujna 2011. do siječnja 2013. godine, zaključeno je da su podaci s meteorološke postaje Zagreb-Grič reprezentativni za identifikaciju meteoroloških parametara kao uzroka klizanja (koeficijent korelacije za uspoređene podatke iznosi 0,92). Podaci o oborinama u razdoblju od rujna 2012. do siječnja 2015. godine uspoređeni su s povijesnim podacima za razdoblje od 1862. do 2012. godine. S obzirom da prosječna godišnja oborina na području grada Zagreba iznosi 887 mm u razdoblju od 1862. do 2014. godine, proizlazi da su 2013. i 2014. iznadprosječno vlažne godine s 1.092 mm, odnosno 1.234 mm ukupne godišnje oborine. Od početka mjerenja na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič, 2013. godine je zabilježena petnaesta najveća godišnja oborina tijekom koje je palo 23,1% više oborina nego što je godišnji prosjek, dok je 2014. godine izmjerena treća najveća godišnja oborina tijekom koje je palo 37,9% više oborina od godišnjeg prosjeka. Na iznadprosječne meteorološke događaje ukazuje i to da su u razdoblju od dvije godine i četiri mjeseca (2,33 godine), tijekom praćenja klizišta Kostanjek, zabilježene tri dnevne veće od 50 mm, a koje prema cijelom nizu podataka mjerenja s meteorološke postaje Zagreb-Grič imaju povratna razdoblja od 2,3 godine. Također, tijekom 13. i 14.1.2013. palo je 54 cm snijega, što predstavlja treću najveću snježnu oborinu izmjerenu na meteorološkoj postaji Zagreb-Grič.

Interpolacijom podataka o razinama podzemne vode prikupljenim kontinuiranim praćenjem u četiri kopana zdenca i jednom piezometru u razdoblju od 27.6.2012. do 15.1.2015., te jednim mjerenjem u 11 kopanih zdenaca, a što je provedeno u okviru ovog istraživanja, utvrđeno je da se izolinije apsolutnih razina podzemne vode pružaju se u smjeru I-Z, ukazujući na tok vode u tlu generalno u smjeru juga, s nagibom vodnog lica od 4° do 6° . Iz histograma učestalosti brzina promjene razina podzemne vode, na pet lokacija na kojima postoje vremenski nizovi podataka opažanja, vidi se da je raspon brzina promjene razine podzemne vode vrlo velik te da se brizne podizanja razine podzemne vode veće od prosjeka pojavljuju u kratkim vremenskim razdobljima, ukupnog prosječnog trajanja od 27 dana do 31 dan godišnje. Podizanje razina podzemne vode posljedica je intenzivnih oborina i infiltracije vode u tlo, a vremenski se podudara s razdobljima bržeg gibanja.

Nizovi podataka koji su korišteni u analizama provedenim u svrhu uspostavljanja fenomenološkog modela klizišta Kostanjek, su podaci praćenja gibanja i razine podzemne vode s mjerene postaje u središnjem dijelu klizišta i podaci o oborinama dobiveni s meteorološke postaje Zagreb-Grič. Gibanja stanice GNSS 08 odabrana su kao reprezentativna iz više razloga, a jedan od njih je najviša preciznost GNSS mjerenja na ovoj poziciji, zbog najbolje otvorenosti prostora prema nebu, odnosno najmanjeg negativnog utjecaja okolnih objekata na satelitske signale. Povezanost između oborina, promjena razine podzemne vode i gibanja klizišta Kostanjek uočava se već i vizualno iz vremenskih nizova dnevnih oborina, razine podzemne vode i kumulativnih dnevnih horizontalnih pomaka.

Analizama podataka o razinama podzemne vode identificirano je 11 glavnih razdoblja podizanja razine podzemne vode, od kojih je za pet karakteristično da predstavljaju dvostruko podizanje razine podzemne vode, na temelju čega je izdvojeno 16 razdoblja podizanja razine podzemne vode. Svih 11 razdoblja podizanja razine podzemne vode pojedinačno je analizirano unakrsnom korelacijom s kumulativnim oborinama različitih trajanja i kumulativnim oborinama različitih trajanja s otapanjem snijega. Vremenski pomak u korelaciji, između podizanja razine podzemne vode i kumulativnih oborina iznosi od 3 do 8 dana. Također, analizom je dobivena bolja i korelacije između promjene razine podzemne vode i kumulativnih oborina s otopljenim snijegom. Analiza korelacije između promjena razina svih glavnih razdoblja podizanja razine podzemne vode i količine oborine za vrijeme podizanja razine podzemne vode, bez ili s prethodnim oborinama u razdoblju od 2 do 30 dana, rezultirala je najvišim koeficijentom korelacije za prethodnu oborinu od sedam dana. Iz ovih analiza je zaključeno da promjena razine podzemne vode na središnjem dijelu klizišta Kostanjek ovisi o količini oborine koja je pala u razdoblju od prosječno sedam dana prije početka podizanja razine podzemne vode na osnovi čega su definirane oborine koje su prouzročile gibanje klizišta. Na osnovi linearne korelacije ovako određenih količina oborina i promjena razina podzemne vode a zaključeno je da postoji čvrsta povezanost između količine oborine i promjene razine podzemne vode, čime je potvrđena prva hipoteza ovog istraživanja: „Postoji zavisnost između oborina i porasta razine podzemne vode na klizištu Kostanjek“. Iz analize odnosa između trajanja i količine oborina koje su utjecale na porast razine podzemne vode i oborina koje nisu utjecale na porast razina podzemne vode vidljivo je da postoji nekoliko velikih oborina koje nisu utjecale na promjene razine podzemne vode, te da je odnos između oborina i razina podzemne vode složen jer vodonosnik različito reagira na oborine različitog intenziteta i različitog trajanja. Iz teoretskih nivograma podizanja razine podzemne vode vidljivo je da trajanje podizanja razine podzemne vode iznosi od šest do sedam dana za poraste manje od jednog metra te sedam do devet dana za veće iznose podizanja razine podzemne vode. Oblik svakog od prikazanih nivograma, za razdoblje od početka podizanja pa do razdoblja maksimalne razine može se opisati polinomom petoga stupnja, pri čemu je koeficijent determinacije veći od 0,99. Teoretska krivulja recesije određena je na temelju najduljeg razdoblja recesije, koje je trajalo 158 dana, od 8.4.2013. do 9.9.2013. i tijekom kojeg je sniženje razine podzemne vode iznosilo 8,17 m. Ovo razdoblje recesije se najbolje može opisati polinomom trećeg stupnja, pri čemu koeficijent determinacije iznosi 0,99.

Složeni odnos između oborina i promjena razine podzemne vode na klizištu Kostanjek modeliran je klasičnom metodom višestruke linearne regresije te metodom slučajnih šuma, pri čemu su kao prediktori, odnosno nezavisne varijable korištene različite prethodne oborine, kumulativne oborine, efektivne

oborine, modificirane oborine i godišnja doba (ukupno 75 nezavisnih varijabli). Modeliranje je provedeno za dvije različite zavisne varijable, razine podzemne vode i dnevne promjene ili brzine promjene razine podzemne vode. Varijable koje najviše utječu na modele višestruke linearne regresije su količina oborine i efektivne oborine za prethodna razdoblja dulja od 20 dana, duljine vremenskih razdoblja od posljednje oborine od 30, 40 ili 50 mm te godišnja doba. Varijable koje najviše utječu na model slučajnih šuma koji direktno predviđa razinu podzemne vode su slične varijablama koje utječu na model višestruke linearne regresije, dok na model slučajnih šuma koji predviđa brzinu promjene razine podzemne vode utječu i prethodne oborine tijekom kraćih razdoblja, od 6 do 10 dana. Usporedbom modela *k*-strukom unakrsnom validacijom i validacijom zaključeno je da su modeli slučajnih šuma bolji za predviđanje razina podzemne vode od modela višestruke linearne regresije. Na modelima višestruke regresije i slučajnih šuma napravljeno je i predviđanje razina podzemne vode za razdoblje od posljednjih 10 do 90 dana praćenja klizišta Kostanjek, pri čemu je najmanju srednju kvadratnu pogrešku ima model slučajnih šuma kojim se predviđa brzina promjene razine podzemne vode.

Usporedbom razina podzemne vode i gibanja klizišta pokazano je da se 9 od 11 razdoblja podizanja razine podzemne vode podudara s razdobljima bržeg gibanja. Pri tome odnos između brzine gibanja i razine podzemne vode nije linearan, već se opisuje histerezom. Analizom brzine gibanja tijekom podizanja i snižavanja razine podzemne vode dokazano je da su se najveće brzine klizanja dogodile tijekom podizanja razine podzemne vode, ali uz uvjet visokih razina podzemne vode. Ovime je potvrđena druga hipoteza ovog istraživanja: „Postoji zavisnost između porasta razine podzemne vode i gibanja klizišta Kostanjek“.

Odnosi između razine podzemne vode i gibanja klizišta Kostanjek također su modelirani metodom višestruke linearne regresije i metodom slučajnih šuma, pri čemu su kao prediktori, odnosno nezavisne varijable korištene razine podzemne vode, promjene razine podzemne vode, ubrzanje promjene razine podzemne vode te godišnja doba. Modeliranje je provedeno na dva različita načina, tako da je model primijenjen na cijeli skup podataka te tako da je dio modela primijenjen na podatke tijekom razdoblja porasta razine podzemne vode, a dio modela na podatke tijekom razdoblja snižavanja razine podzemne vode. Razlog tako definiranih modela je što su na klizištu Kostanjek, pri istoj razini podzemne vode, brzine klizanja veće pri podizanju razine nego pri njezinom snižavanju. Usporedbom modela na temelju statističkih pokazatelja kao što su koeficijent korelacije ili srednja kvadratna pogreška određeno je da modeli slučajnih šuma bolje opisuju odnos između gibanja i razine podzemne vode nego modeli višestruke linearne regresije. Međusobnom usporedbom modela slučajnih šuma, primijenjenih na cijelom skupu podataka i primijenjenih zasebno na razdoblja podizanja i snižavanja razine podzemne vode, metodama *k*-struke unakrsne validacije i validacije, ustanovljeno je da su modeli identični. Zbog jednostavnosti primjene, model slučajnih šuma primijenjen na cijelom skupu podataka, odabran je kao odgovarajući model za predviđanje gibanja klizišta.

Predviđanje brzine gibanja metodom slučajnih šuma primijenjenom na cijeli skup podataka, na temelju izmjerene razine podzemne vode, provedeno je za razdoblje od posljednjih 10 do 90 dana praćenja klizišta Kostenjek. S obzirom na srednju kvadratnu pogrešku mjerenja te apsolutnu pogrešku od -0,28 do 3,93 mm, određeno je da predviđanje modelom slučajnih šuma zadovoljavajuće za razdoblje do 30

dana. Predviđanje gibanja metodom slučajnih šuma obavljeno je i na temelju rezultata predviđanja razine podzemne vode. Razlike između stvarnog i predviđenog kumulativnog pomaka, na kraju razdoblja predviđanja iznose od 0,76 mm za razdoblje od 10 dana, do 11,5 mm za razdoblje od 70 dana te do 4,3 mm za razdoblje od 90 dana, a prosječna vrijednost za razdoblja od 10 do 90 dana iznosi 5,96 mm. S obzirom na razlike između stvarnog i predviđenog kumulativnog pomaka te na srednje kvadratne pogreške zaključeno je da je predviđanje na temelju predviđene razine podzemne vode prihvatljivo za razdoblja do 30 dana, kao i u slučaju predviđanja na izmjerenim razinama podzemne vode. Ovim analizama je potvrđena treća hipoteza ovog istraživanja: „Na temelju uspostavljenih odnosa između oborina, razina podzemne vode i gibanja moguće je predvidjeti ponašanje klizišta Kostanjek u odnosu na glavni inicijator klizanja (oborine)“. S obzirom na opisane odnose između oborina, razine podzemne vode i gibanja klizišta, rezultate predviđanja razine podzemne vode i brzine klizanja, sposobnost „učenja“ te robusnost modela slučajnih šuma, fenomenološki (empirijski) model gibanja klizišta Kostanjek predstavlja primjenjivi model za predviđanja u svrhu uspostave sustava ranog upozoravanja.

LITERATURA

- ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I.A. (1964): *Handbook of Mathematical Functions*. National Bureau of Standards, Washington, D.C. 1044 p.
- ALEOTTI P (2004): *A warning system for rainfall-induced shallow failures*. *Engineering Geology*, 73. 247-265.
- ALLISON, R.J., BRUNSDEN, D. (1990): *Some mudslide movement patterns*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15/4. 297-311.
- ANDERSON, M.G., HOLCOMBE, E., BLAKE, J.R., GHESQUIRE, F., HOLM-NIELSEN, N., FISSEHA, T. (2011): *Reducing landslide risk in communities: Evidence from the Eastern Caribbean*. *Applied Geography*, 31. 590-599.
- ANGELI, M. G., GASPARETTO, P. MENOTTI, R. M., PASUTO, H., SILVANO, S. (1996): *A viscoplastic model for slope analysis applied to a mud slide in Cortina d'Ampezzo, Italy*. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29. 233-240.
- ANGELI, M.-G., PASUTO, A., SILVANO, S. (2000): *A critical review of landslide monitoring experiences*. *Engineering Geology*, 55. 133-147.
- ANGELI, M. G., GASPARETTO, P., BROMHEAD, E. (2004): *Strength-regain mechanisms in intermittently moving landslides*. *Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides*, Vol. 1. / Lacerda, W., Ehrlich, M., Fontoura, S.A.B., Sayao, A.S.F. (eds). Taylor & Francis, London. 689-696.
- 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.
- BACCHINI, M., ZANNONI, A. (2003): *Relations between rainfall and triggering of debris-flow: case study of Cancia (Dolomites, North-eastern Italy)*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3. 71-79.
- BAROŇ, I., SUPPER, R., OTTOWITZ, D. (eds.) (2012): *The Safeland Project, Deliverable 4.6, Report on evaluation of mass movement indicators*. 328 p.
- BASCH, O. (1995): *Geološka karta Medvednice. Geološki vodič Medvednice / Šikić, K. (ur.)*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb.
- BASSO, D., VRSALJKO, D., GRGASOVIĆ, T. (2008): *The coralline flora of a Miocene maërl: the Croatian "Litavac"*. *Geologia Croatica*, 61/2-3. 333-340.

BAUM, R.L., GODT, J.W. (2009): *Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. Landslides*, 7. 259-272.

BENKOVIĆ, B. (2013): *Izrada presjeka bušotina na području klizišta Kostanjek pomoću Log Plot softvera. Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.*

BERARDI, R., MERCURIO, G., BARTOLINI, P., CORDANO, E. (2005): *Dynamics of saturation phenomena and landslide triggering by rain infiltration in a slope. Proceedings of International Conference on Landslide Risk Management / Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (eds). Taylor & Francis, Vancouver. 212-219.*

BERNAT, S., MIHALIĆ ARBANAS, S., KRKAČ, M. (2014a): *Inventory of precipitation triggered landslides in the winter of 2013 in Zagreb (Croatia, Europe) / 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. 829-835.*

BERNAT, S., MIHALIĆ ARBANAS, S., KRKAČ, M. (2014b): *Landslides Triggered in the Continental Part of Croatia by Extreme Precipitation in 2013 / Proceedings of the XII IAEG Congress 'Engineering Geology for Society and Territory', Vol. 2 'Landslide Processes' / Lollino, G., Giordan, D., Battista Crosta, G., Corominas, J., Azzam, R., Wasowski, J., Sciarra, N. (eds). Springer, Heidelberg. 1599-1603.*

BERTINI, T., CUGUSI, F., D'ELIA, B., ROSSI-DORIA, M. (1984): *Climatic conditions and slow movements of colluvial covers in Central Italy. Proceedings of the IV International Symposium on landslides, Vol 1. Canadian Geotechnical Society, Toronto. 367-376.*

BJERRUM, L. (1967): *Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division of the ASCE*, 93. 1-49.

BLIKRA, L. H. (2008): *The Åknes rockslide; monitoring, threshold values and early-warning. Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes 'From the Past to the Future' / Chen, Z., Zhang, J.M., Ho, K., Wu, F.Q., Li, Z.K. (eds). Taylor & Francis, Xi'an, China. 1089-1094.*

BLIKRA, L.H. (2012): *The Åknes rockslide, Norway. Landslides - Types, Mechanisms and Modeling / Clague, J.J., Stead, D. (eds). Cambridge University Press, Cambridge. 323-334.*

BOŽIČEVIĆ, S. (1974): *Podzemni krški fenomeni planine Medvednice kraj Zagreba. Acta carsologica* 6/6. 79-109.

BOŽIČEVIĆ, S. (1976): *Hidrologija pećine Veternice kraj Zagreba na planini Medvednici. Zbornik 8. jugosl. geol. kongresa. Ljubljana. 5-12.*

BREIMAN, L. (2001): *Random Forests. Machine Learning*, 45. 5-32.

BRIŠEVAC, Z., ŠPOLJARIĆ, D., GULAM, V. (2014): *Procjena jednoosne tlačne čvrstoće pomoću modela baziranih na regresijskim stablima*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 29. 39-47.

BROMHEAD, E.N, IBSEN, M.-L. (2007): *Folkestone warren landslides and the impact of the past rainfall record. Proceedings of the international conference on landslides and climate change 'Landslides and climate change - Challenges and solutions' / McInnes, R., Jakeways, J., Fairbanks, J., Mathie, E. (eds). Taylor & Francis, Isle of Wight. 17-24.*

BRÜCKL, E., BRUNNER, F.K., KRAUS, K. (2006): *Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. Engineering Geology, 88. 149-159.*

BUSSLINGER M. (2009): *Landslide time-forecast methods - A literature review towards reliable prediction of time to failure. HSR University of Applied Sciences, Institut für Bau und Umwelt, Switzerland. 31 p.*

BUTTERWORTH, J.A., SCHULZE, R.E., SIMMOND, L.P., MORIARTY, P., MUGABE, F., (1999): *Hydrological processes and water resources management in a dryland environment IV: long-term groundwater level fluctuations due to variation in rainfall. Hydrology and Earth System Sciences, 3/3. 353-361.*

CARSON, M., KIRKBY, M. (1972): *Hillslope Form and Process. University Press, Cambridge. 475 p.*

CASCINI, E., CASCINI, L. (1994): *Forecasting spring flow time series. Journal of the Italian Statistical Society, 31. 1-23.*

CASCINI, L., GULLÀ, G., SORBINO, G. (2006): *Groundwater modelling of a weathered gneissic cover. Canadian Geotechnical Journal, 43/11. 1153-1166.*

CASCINI, L., CALVELLO, M., GRIMALDI, G. (2010): *Groundwater Modeling for the Analysis of Active Slow-Moving Landslides. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136/9. 1220-1230.*

CASTAGNETTI, C., BERTACCHINI, E., CORSINI, A., CAPRA, A. (2013): *Multi-sensors integrated system for landslide monitoring: critical issues in system setup and data management. European Journal of Remote Sensing, 46. 104-124.*

CHIGIRA, M., WU, X., INOKUCHI, T., WANG, G. (2010): *Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. Geomorphology, 118. 225-238.*

CORNFORTH, D. H. (2005): *Landslides in Practice: Investigation, Analysis and Remedial/Preventive Options in Soils. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 624 p.*

COROMINAS, J., MOYA, J., LEDESMA, A., LLORET, A., GILI, J. A. (1999): *Monitoring of the Vallcebre landslide, Eastern Pyrenees, Spain. Proceedings of the International symposium on Slope Stability Engineering, IS-Shikoku '99 / Yagi, N., Yamagami, T., Jiang, J.-C. (eds). Balkema, Rotterdam. 1239-1244.*

- COROMINAS, J., MOYA, J., LLORET, J., GILI, J.A., ANGELI, M.G., PASUTO, A., SILVANO, S. (2000): *Measurement of landslide displacements using a wire extensometer. Engineering Geology*, 55. 149-166.
- COROMINAS, J., MOYA, J., LEDESMA, A., LLORET, A., GILI, J. A. (2005): *Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). Landslides*, 2. 83-96.
- COROMINAS, J., VAN WESTEN, C., FRATTINI, P., CASCINI, L., MALET, J.-P., FOTOPOULOU, S., CATANI, F., VAN DEN EECKHAUT, M., MAVROULI, O., AGLIARDI, F., PITILAKIS, K., WINTER, M.G., PASTOR, M., FERLISI, S., TOFANI, V., HERVAS, J., SMITH, J.T. (2013): *Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73/2. 209-263.
- CORSINI, A., PASUTO, A., SOLDATI M., ZANNONI, A. (2005): *Field monitoring of the Corvara landslide (Dolomites, Italy) and its relevance for hazard assessment. Geomorphology*, 66. 149-165.
- COTECCHIA, V. (2006): *The Second Hans Cloos Lecture. Experience drawn from the great Ancona landslide of 1982. Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65. 1-41.
- CRAIG, R.F. (1997): *Soil Mechanics. Spon Press, London*. 485 p.
- CROSTA, G. (1998): *Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. Environmental Geology*, 35/2. 131-145.
- CROSTA, G., DI PRISCO, C. (1999): *On slope instability induced by seepage erosion. Canadian Geotechnical Journal*, 36. 1056-1073.
- CROSTA, G.B., AGLIARDI, F. (2002): *How to obtain alert velocity thresholds for large rockslides. Physics and Chemistry of the Earth*, 27. 1557-1565.
- CROSTA, G. B., AGLIARDI, F. (2003): *Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. Canadian Geotechnical Journal*, 40. 176-191.
- CROSTA, G.B., FRATTINI P. (2003): *Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3/1-2. 81-93
- CROZIER, M.J. (1999): *Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model. Earth Surface Processes and Landforms*, 24/9. 825-833.
- CRUDEN, D.M., VARNES, D.J. (1996): *Landslide types and processes. Landslides, Investigation and Mitigation, Special Report 247 / Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds). Transportation Research Board, Washington, DC*. 36-75.

DE LA CRUZ-REYNA, S., REYES-DAVILA, G.A. (2001): *A model to describe precursory material-failure phenomena: applications to short-term forecasting at Colima volcano, Mexico*. *Bulletin of Volcanology*, 63. 297-308.

DOGAN, A., DEMIRPENCE, H., COBANER, M. (2008): *Prediction of groundwater levels from lake levels and climate data using ANN approach*. *Water SA*, 34. 199-208.

EKANAYAKE, J.C., PHILLIPS, C.J. (1999): *A model for determining thresholds for initiation of shallow landslides under near-saturated conditions in the East Coast region, New Zealand*. *Journal of hydrology, New Zealand*, 38/1. 1-28.

FEDERICO, A., POPESCU, M., ELIA, G., FIDELIBUS, C., INTERNÒ, G., MURIANNI, A. (2012): *Prediction of time to slope failure: a general framework*. *Environmental Earth Sciences*, 66. 245-256.

FELL, R., HUNGR, O., LEROUÉIL, S., RIEMER, W. (2000): *Keynote lecture - geotechnical engineering of the stability of natural slopes, and cuts and fills*. *Proceedings of the Geotechnical and Geological Engineering Conference*, Vol. 1, Melbourne. Technomic Publishing, Lancaster. 21-120.

FURUYA, G., MIYAGI, T., HAMASAKI, E., KRKAČ, M. (2012): *Geomorphologic mapping and 3D modeling of the Kostanjek Landslide, Zagreb*. *Book of proceedings of the 2nd Project Workshop of the Croatia - Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia* / Ožanić, N., Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H., Dragičević, N. (eds). University of Rijeka, Rijeka. 21-23.

FROESE, C.R., MORENO, F. (2011): *Structure and components for the emergency response and warning system on Turtle Mountain, Alberta, Canada*. *Natural Hazards*, 70. 1689-1712.

FROESE, C.R., CHARRIÈRE, M., HUMAIR, F., JABOYEDOFF, M., PEDRAZZINI, A. (2012): *Characterization and management of rockslide hazard at Turtle Mountain, Alberta, Canada*. *Landslides - Types, Mechanisms and Modeling* / Clague, J.J., Stead, D. (eds). Cambridge University Press, Cambridge. 310-322.

FUKUZONO, T. (1985): *A new method for predicting the failure time of a slope*. *Proc. of 4th International Conference and Field Workshop on Landslides*. Tokyo University Press, Tokyo. 145-150.

GATTINONI, P. (2009): *Parametrical landslide modeling for the hydrogeological susceptibility assessment: from the Crati Valley to the Cavallerizzo landslide (Southern Italy)*. *Natural Hazards*, 50. 161-178.

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

GLASTONBURY, J., FELL, R. (2008): *Geotechnical characteristics of large slow, very slow, and extremely slow landslides*. *Canadian Geotechnical Journal*, 45/7. 984-1005.

GODT, J.W., BAUM, R.L., CHLEBORAD, A.F. (2006): *Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA. Earth Surface Processes and Landforms*, 31/1. 97-110.

GONZALEZ, D. A., LEDESMA, A., COROMINAS, J. (2008): *The viscous component in slow moving landslides: A practical case. Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes / Chen, Z., Zhang, J., Li, Z., Wu, F., Ho, K. (eds). Taylor and Francis, London. 237-242.*

GRIMALDI, G. M. (2008): *Modelling the displacements of slow moving landslides. PhD Thesis. University of Salerno, Fisciano, Italy.*

GRØNENG, G., NILSEN, B., BLIKRA, L.H., BRAATHEN, A. (2005): *The significance of climate on deformation in a rock-slope failure – the Åkerneset case study from Norway. Proc. of The International Conference on Landslide Risk Management / Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (eds). A.A. Balkema, Vancouver. 725-729.*

GUADAGNO, F.M., CELICO, P.B., ESPOSITO, L., PERRIELLO ZAMPELLI, S., PISCOPO, V., SCARASCIA-MUGNOZZA, G. (1999): *The debris flows of 5–6 May 1998 in Campania, Southern Italy. Landslide News*, 12. 5-7.

GUZZETTI, F., PERUCCACCI, S., ROSSI, M., STARK, C.P. (2007): *Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. Meteorology and Atmospheric Physics*, 98/3-4. 239-267.

HANCOX, G.T. (2008): *The 1979 Abbotsford Landslide, Dunedin, New Zealand: a retrospective look at its nature and causes. Landslides*, 5. 177-188.

HODGSON, F.D.I. (1978): *The Use of Multiple Linear Regression in Simulating Ground-Water Level Responses. Ground Water*, 16/4. 249-253.

HOLTZ, R. D., SCHUSTER, R. L. (1996): *Stabilization of soil slopes. Landslides, Investigations and Mitigations, Special Report 247 / Turner, A., Schuster, R. (eds). Transportation Research Board, Washington, DC. 439-473.*

HONG, Y., HIURA, H., SHINO, K., SASSA, K., SUEMINE, A., FUKUOKA, H., WANG, G. (2005): *The influence of intense rainfall on the activity of large-scale crystalline schist landslides in Shikoku Island, Japan. Landslides*, 2. 97-105.

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

HUTCHINSON, J.N. (1988): *General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Proceedings of the 5th International Symposium of Landslides / Bonnard, C. (ed.). Balkema, Rotterdam. 3-35.*

IVERSON, R.M. (1985): *Dynamics of slow landslides: a theory of time dependent behaviour. Hillslope processes* / Abrahams, A. D. (ed.). Allen and Unwin, Winchester, MA. 297-317.

IVERSON, R.M. (2000): *Landslide triggering by rain infiltration. Water Resources Research*, 36/7. 1897-1910.

JAKOB, M., WEATHERLY, H. (2003): *A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia. Geomorphology*, 54. 137-156.

JAMES, N.A., MATTESON, D.S. (2013): *ecp: An R Package for Nonparametric Multiple Change Point Analysis of Multivariate Data. arXiv:1309.3295*. 1-29.

JAMES, G., WITTEN, D., HASTIE, T., TIBSHIRANI, R. (2014): *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*. Springer, New York. 426 p.

JAN, C.-D., CHEN, T.-H., LO, W.-C. (2007): *Effect of rainfall intensity and distribution on groundwater level fluctuations. Journal of Hydrology*, 332. 348-360.

JASMIN, I., MURALI, T., MALLIKARJUNA, P. (2010): *Statistical Analysis of Groundwater Table Depths in Upper Swarnamukhi River Basin. Journal Of Indian Water Works Association*, 4/2. 553-561.

JEMEC, M., KOMAC, M. (2013): *Rainfall patterns for shallow landsliding in perialpine Slovenia. Natural Hazards*, 67. 1011-1023.

JENKINS, A., ASHWORTH, P.J., FERGUSON, R.I., GRIEVE, I.C., ROWLING, P., STOTT, T.A. (1988): *Slope failures in the Ochil hills, Scotland, November 1984. Earth Surface Processes and Landforms*, 13. 69-76.

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.

KILBURN, C. J., PETLEY, D. N. (2003): *Forecasting giant, catastrophic slope collapses: Lessons from Vajont, Northern Italy. Geomorphology*, 54/1-2. 21-32.

KOCHANSKY, V. (1944): *Fauna marinskog miocena južnog poboča Medvednice (Zagrebačke gore). Vjestnik Hrv. drž. geol. zav. i Hrv. drž. geol. muzeja*, 2-3. 171-280.

KOMAC, M. (2005): *Intenzivne padavine kot sprožilni dejavnik pri pojavljanju plazov v Sloveniji. Geologija*, 48/2. 263-279.

KRANJEC, V., HERNITZ, Z., PRELOGOVIĆ, E. (1973): *Prilog poznavanju mladih terciarnih naslaga Medvednice, sjeverozapadna Hrvatska. Geološki vjesnik*, 25. 65-100.

- 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' / Margttini, 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 Adriatic-Balkan 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.*
- LEE, L.J.E., LAWRENCE, D.S.L., PRICE, M. (2006): *Analysis of water-level response to rainfall and implications for recharge pathways in the Chalk aquifer, SE England. Journal of Hydrology, 330. 604-620.*
- LEROUEIL, S., LOCAT, J., VAUNAT, J., PICARELLI, L. FAURE, R. (1996): *Geotechnical characterisation of slope movements. Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides (Vol. 1.) / Senneset, K. (ed.). Balkema, Rotterdam. 53-74.*
- LEROUEIL, S. (2001): *Natural slopes and cuts: Movement and failure mechanisms. Geotechnique, 51. 195-243.*

LEROUEIL, S. (2004): *Geotechnics of slopes before failure. Proceedings of the ninth International Symposium on Landslides 'Landslides: evaluation and stabilization' / Lacerda, W., Ehrlich, M., Fontoura, S.A.B., Sayao, A.S. (eds). Balkema Publishers, Leiden. 863-884.*

LUPINI, J. F., SKINNER, A. E., VAUGHN, P. R. (1981): *The drained residual strength of cohesive soils. Geotechnique, 31/2. 181-213.*

MARTINČEVIĆ, J., MIHALIĆ ARBANAS, S., BERNAT, S., KRKAČ, M., MIKLIN, Ž., PODOLSZKI, L. (2014): *Mineralogical Composition of the Kostanjek Landslide Sediments and its Possible Influence on the Sliding and Swelling Processes. Proceedings of the 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region: Landslide and Flood Hazard Assessment / Mihalčić Arbanas, S., Arbanas, Ž. (eds). Croatian Landslide Group, Zagreb. 17-21.*

MALET, J.-P., MAQUAIRE, O., CALAIS, E. (2002): *The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). Geomorphology, 43. 33-54.*

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

MASKREY, A. (2011): *Revisiting community-based disaster risk management. Environmental Hazards, 10. 42-52.*

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

MASSEY, C.I., PETLEY, D.N., MCSAVENEY, M.J. (2013): *Patterns of movement in reactivated landslides. Engineering Geology, 159. 1-19.*

MATSUURA, S., ASANO, S., OKAMOTO, T. (2008): *Relationship between rain and/or meltwater, pore-water pressure and displacement of a reactivated landslide. Engineering Geology, 101. 49-59.*

MATSUSHI, Y., MATSUKURA, Y. (2007): *Rainfall thresholds for shallow landsliding derived from pressure-head monitoring: cases with permeable and impermeable bedrocks in Boso Peninsula, Japan. Earth Surface Processes and Landforms, 32/9. 1308-1322.*

MATTESON, D.S., JAMES, N.A. (2013): *A Nonparametric Approach for Multiple Change Point Analysis of Multivariate Data. arXiv:1306.4933v2. 1-29.*

MIHALIĆ, S., ARBANAS, Ž., KRKAČ, M., DUGONJIĆ, S., FERIĆ, P. (2010): *Karte hazarda klizanja i sustavi ranog upozoravanja u funkciji ublažavanja rizika klizanja. Zbornik II. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa / Trut, D. (ur.). Državna uprava za zaštitu i spašavanje, Zagreb. 18-22.*

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.

MOKORIĆ, M. (2013): *Sinoptička situacija. Meteorološki i hidrološki bilten*, 1/2013. 5-7.

MULLER, L. (1968): *New considerations on the Vajont slide. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 6. 1-91.

NIEUWENHUIS, J. D. 1991. *Variations in the stability and displacements of a shallow seasonal landslide in varved clays. Balkema, Rotterdam. 144 p.*

NG, K. Y. (2007): *Mechanisms of shallow rainfall-induced landslides in residual soils in humid tropical environments. PhD Thesis, Durham University, Durham, United Kingdom.*

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. (1996): *Formiranje prostornog inženjerskogeološkog modela dubokog klizišta s više kliznih ploha (Primjer klizište Kostanjek). Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.*

ORTOLAN, Ž., STANIĆ, B., NONVEILLER, E., PLEŠKO, J. (1987): *Posljedice rudarenja u laporolomu "Kostanjek" - Podsused. Zbornik simp. o hidrogeol. i inženjerskoj geol., Knjiga 2. Priština. 117-128.*

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

PALMER, C.W. (1965): *Meteorological drought. Research paper 45, The US Department of Commerce.*

PANDŽIĆ, K. (1989): *Ocjena vlažnosti (sušnosti) 1988. godine na području SR Hrvatske pomoću Palmerovog indeksa odstupanja vlažnosti. Izvanredne meteorološke i hidrološke prilike u SR Hrvatskoj*, 12. 22-32.

PANDŽIĆ, K. (1990): *Ocjena vlažnosti (sušnosti) 1989. godine na području SR Hrvatske pomoću Palmerovog indeksa. Izvanredne meteorološke i hidrološke prilike u SR Hrvatskoj*, 13. 19-23.

PEHNEC, V. (1967): *Oštećenje tvorničkih građevina uslijed bujanja lapora. Građevinar*, 19/6. 197-201.

PERSSON, H., ALÉN, C., LIND, B.B. (2007): *Development of a pore pressure prediction model. Proceedings of the international conference on landslides and climate change 'Landslides and climate change - Challenges and solutions' / McInnes, R., Jakeways, J., Fairbanks, J., Mathie, E. (eds). Taylor & Francis, Isle of Wight. 229-236.*

PETLEY, D. N., BULMER, M. H. K., MURPHY, W. (2002): *Patterns of movement in rotational and translational slides. Geology*, 30/8. 719-722.

PETLEY, D.N., MANTOVANI, F., BULMER, M.N., ZANNONI, A. (2005): *The use of surface monitoring data for the interpretation of landslide movement patterns. Geomorphology*, 66/1-4. 133-147.

PICARELLI, L. (2007): *Considerations about the mechanics of slow active landslides in clay. Progress in landslide science, Chapter 3 / Sassa, K., Fukuoka, H. Wang, F., Wang, G. (eds). Springer, Germany. 27-57.*

PIERSON, T.C. (1980): *Piezometric response to rainstorms on forested hillslope rainage depressions. Journal of hydrology, New Zealand*, 19/1. 1-10.

PIKIJA, M., ŠIKIĆ, K., TIŠLJAR, J., VRSALJKO, D., GLOVACKI-JERNEJ, Ž. (1995): *Badenski sedimenti kamenoloma Bizek. Geološki vodič Medvednice / Šikić, K. (ur.). Institut za geološka istraživanja, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb. 44-45.*

PILEAU, D. R., PECKOVER, F. L. (1978): *Engineering of Rock Slope. Landslides, Analysis and Control, Special Report 176 / Schuster, R. L., Krizek, R. J. (eds). Transportation Research Board, Washington, DC. 192-228.*

POPESCU, M.E. (1994): *A suggested method for reporting landslide causes. Bulletin of International Association of Engineering Geology*, 50. 71-74.

RANALLI, G. (1995): *Rheology of the Earth, 2nd edition. Chapman & Hall, London. 413 p.*

RANALLI, M., GOTTARDI, G., MEDINA-CETINA, Z., NADIM, F. (2009): *Uncertainty quantification in the calibration of a dynamic viscoplastic model of slow slope movements. Landslides*, 7. 31-41.

RAY, R.L., JACOBS, J.M. (2007): *Relationships among remotely sensed soil moisture, precipitation and landslide events. Natural Hazards*, 43. 211-222.

- READ, R.S., LANGENBERG, W., CRUDEN, D.M., FIELD, M., STEWART, R., BLAND, H., CHEN, Z., FROESE, C.R., CAVERNS, D.S., BIDWELL, A.K., MURRAY, C., ANDERSON, W.S., JONES, A., CHEN, J., MCINTYRE, D., KENWAY, D., BINGHAM, D.K., WEIR-JONES, I., SERAPHIM, J., SPRATT, D., LAMB, M., HERD, E., MARTIN, D., MCLELLAN, P., PANA, D. (2005). *Frank Slide a century later: the Turtle Mountain monitoring project. Proc. of The International Conference on Landslide Risk Management / Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (eds). A.A. Balkema, Vancouver. 713-723.*
- REICHENBACH, P., CARDINALI, M., DE VITA, P., GUZZETTI, F. (1998): *Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (central Italy). Environmental Geology, 35/2. 146-159.*
- ROSE, N.D., HUNGR, O. (2007): *Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 44. 308-320.*
- SAHOO, S., JHA, M.K. (2013): *Groundwater-level prediction using multiple linear regression and artificial neural network techniques: a comparative assessment. Hydrogeology Journal, 21. 1865-1887.*
- SAMMARCO O (2004): *A tragic disaster caused by the failure of tailing dams leads to the formation of the Stava 1985. Mine Water and the Environment, 23. 91-95.*
- SANGREY, D.A., HARROP-WILLIAMS, K.O., KLAIBER, J.A. (1984): *Predicting ground-water response to precipitation. Journal of the Geotechnical Engineering, 110/7. 957-975.*
- SCHÄFER, T. (ed.) (2008): *Slope Monitoring Methods A State of the Art Report. The ClimChAlp partnership, Munich. 165 p.*
- 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.*
- SELBY, M.J. (1993): *Hillslope Materials and Processes, 2nd ed. Oxford University Press, Oxford. 451 p.*
- SKEMPTON, A. W. (1985): *Residual strength of clays in landslide, folded strata and the laboratory. Geotechnique, 35/1. 3-18.*
- SKEMPTON, A. W., LEADBEATER, A. D., CHANDLER, R. J. (1989): *The Mam Tor Landslide, North Derbyshire. Philosophical Transactions of the Royal Society, 329. 503-547.*
- SLOPE INDICATOR (2005): *Digitilt inclinometer probe. Data sheet. Durham Geo Slope Indicator.*
- STANIĆ B., NONVEILLER, E. (1995): *Veliko klizište Kostanjek. Građevinar 47/4. 201-209.*
- STANIĆ B., NONVEILLER, E. (1996): *The Kostanjek landslide in Zagreb. Engineering Geology, 42. 269-283.*

- STARK, T.D., CHOI, H. (2008): *Slope inclinometers for landslides. Landslides*, 5/3. 339-350.
- 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.
- SZÉKELY, G.J., RIZZO, M.L. (2005): *Hierarchical Clustering Via Joint Between-Within Distances: Extending Ward's Minimum Variance Method. Journal of Classification*, 22/2. 151-183.
- ŠIKIĆ, K., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A. (1978): *Osnovna geološka karta, 1:100.000. List Zagreb, L 33-80. Institut za geološka istraživanja, Zagreb*.
- ŠIKIĆ, K., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A. (1979): *Osnovna geološka karta, 1:100.000. Tumač za list Zagreb L 33-80. Savezni geološki zavod, Beograd*.
- ŠOŠIĆ, I., SERDAR, V. (1992): *Uvod u statistiku. Školska knjiga, Zagreb*. 363 p.
- TERLIEN, M.T. (1998): *The determination of statistical and deterministic hydrological landslide triggering thresholds. Environmental Geology*, 35/2. 124-130.
- TER-STEPANIAN, G. (1980): *Creep on natural slopes and cuttings. Proceedings of the 3rd International Symposium on Landslides*. 95-108.
- TERZAGHI, K. (1950): *Mechanism of landslides. Application of geology to engineering practice / Paige, S. (ed.). Geological Society of America, New York*. 83-123.
- TIŠLJAR, J. (1994): *Sedimentne stijene. Školska knjiga, Zagreb*. 442 p.
- TOMLJENović, B. (2002): *Strukturne značajke Medvednice i Samoborskog gorja. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu*.
- TRIMBLE (2010): *Trimble NetR9 GNSS Reference receiver. User guide*.
- ULUSAY, R., AKSOY, H. (1994): *Assessment of the failure mechanism of a highwall slope under spoil pile loadings at a coal mine. Engineering Geology*, 38. 117-134.
- UNISDR (2009): *Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nation International Strategy for Disaster Reduction, Geneva*. 35 p.
- URCIUOLI, G., PICARELLI, L., LEROUÉIL, S. (2007): *Local slope failure before general slope failure. Geotechnical and Geological Engineering*, 25/1. 103-123.
- VAN ASCH, T.W. (1984): *Creep processes in landslides. Earth Surface Processes and Landforms*, 9. 573-583.

VAN ASCH, T.W.J., BUMA, J., VAN BEEK, L.P.H. (1999): A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology*, 30. 25-32.

VAN ASCH, T. W. J., VAN BEEK, L. P. H., BOGAARD, T.A. (2007): Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides. *Engineering Geology*, 91. 46-55.

VARNES, D. J. (1978): Slope movement types and processes. *Landslides Analysis and Control, Special report 176* / Schuster, R.L., Krizek, R. J. (eds). Transportation Research Board, Washington. 11-33.

VARNES, D.J. (1983): Time-deformation relations in creep to failure of earth materials. *Proceedings of the 7th Southeast Asian Geotechnical Conference* / McFeat-Smith, I., Lumb, P. (eds). Southeast Asian Geotechnical Society, Hong Kong. 107-1302.

VESELIĆ BRUVO, J. (2011): Statistički ljetopis Zagreba 2011. Gradski ured za strategijsko planiranje i razvoj grada, Grad Zagreb.

VOIGHT, B. (1988): Materials science law applies to time forecasts of slope failures. *5th Int. Symp. Landslides* / Bonnard, C. (ed.). A.A. Balkema, Rotterdam. 1471-1472.

VRŠALJKO, D. (1997): Stratigrafija naslaga panona jugozapadnog dijela Medvednice. Magistarski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

VRŠALJKO, D. (1999): The Pannonian Palaeoecology and Biostratigraphy of Molluscs from Kostanjek – Medvednica Mt., Croatia. *Geologia Croatica*, 52/1. 9-27.

VRŠALJKO, D. (2003): Biostratigrafija miocenskih naslaga Žumberačkog i Samoborskog gorja na temelju mekušaca. Doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

VRŠALJKO, D., PIKIJA, M., ŠIKIĆ, K., GLOVACKI JERNEJ, Ž. (1995): Sarmatske i panonske naslage u tupinolomu –Kostanjek. *Geološki vodič Medvednice* / Šikić, K. (ur.). Institut za geološka istraživanja, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb. 56-60.

VRŠALJKO, D., SREMAC, J. (1999): New Congerian Species and Their Similarity with *Congerina banatica* from the Pannonian Sediments in Northern Croatia. *Geologia Croatica*, 52/2. 99-108.

VRŠALJKO, D., PAVELIĆ, D., BAJRAKTAREVIĆ, Z. (2005): Stratigraphy and Palaeogeography of Miocene Deposits from the Marginal Area of Žumberak Mt. and the Samoborsko Gorje Mts. (Northwestern Croatia). *Geologia Croatica*, 58/2. 133-150.

VRŠALJKO, D., PAVELIĆ, D., MIKNIĆ, M., BRKIĆ, M., KOVAČIĆ, M., HEĆIMOVIC, I., HAJEK-TADESSE, V., AVANIĆ, R., KURTANJEK, N. (2006): Middle Miocene (Upper Badenian/Sarmatian) Palaeoecology and Evolution of the Environments in the Area of Medvednica Mt. (North Croatia). *Geologia Croatica*, 59/1. 51-63.

VRŠALJKO, D., HEĆIMOVIC, I., AVANIĆ, R. (2007): *Miocene Deposits of Northern Croatia*. 9th Int. Symp. Fossil Algae, Field Trip Guidebook and Abstracts / Grgasović, T., Vlahović, I. (eds). Hrvatski geološki institut, Zagreb. 143-153.

VRŠALJKO, D., MIHALIĆ, S., BOŠNJAK, M., KRKAČ, M. (2012): *Lithostratigraphical investigations of the Kostanjek landslide wider area: Review of existing data and planned activities*. Book of proceedings of the 2nd Project Workshop of the Croatia - Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia / Ožanić, N., Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H., Dragičević, N. (eds). University of Rijeka, Rijeka. 17-20.

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.

WILSON, R.C. (1989): *Rainstorms, pore pressures, and debris flows: A theoretical framework*. Publication of the Inland Geological Society 'Landslides in semi-arid environment' / Sadler, P.M., Morton, D.M. (eds). Riverside Press. 101-117.

WU, J., ZHANG, R., YANG, J. (1996): *Analysis of Precipitation-recharge relationships*. *Journal of Hydrology*, 177. 143-160.

WYLLIE, D.C., MAH, C.W. (2004): *Rock Slope Engineering, Civil and Mining*, 4th Edition. Taylor & Francis, London and New-York. 465 p.

YOON, H., JUN, S.-C., HYUN, Y., BAE, G.-O., LEE, K.-K. (2011): *A comparative study of artificial neural networks and support vector machines for predicting groundwater levels in a coastal aquifer*. *Journal of Hydrology*, 396. 128-138.

ZANINOVIĆ, K., GAJIĆ-ČAPKA, M., PERČEC TADIĆ, M., VUČETIĆ, M., MILKOVIĆ, J., BAJIĆ, A., CINDRIĆ, K., CVITAN, L., KATUŠIN, Z., KAUČIĆ, D., LIKSO, T., LONČAR, E., LONČAR, Ž., MIHAJLOVIĆ, D., PANDŽIĆ, K., PATARČIĆ, M., SRNEC, L., VUČETIĆ, V. (2008): *Klimatski atlas Hrvatske 1961-1990, 1971-2000*. Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb. 200 p.

ZÊZARE, J.L., TRIGO, R., TRIGO, I.F. (2005): *Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5. 331-344.

ŽUPANOVIĆ, LJ., OPATIĆ, K., BERNAT, S. (2012): *Određivanje pomaka klizišta Kostanjek relativnom statičkom metodom*. *Ekscentar*, 15. 46-53.

TEHNIČKA DOKUMENTACIJA

- ANDRIĆ, M. (1989): *Izveštaj o plitkim seizmičko refleksivnim mjerenjima, klizište T.C. "Sloboda" - Podsused. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.*
- BOŽIČEVIĆ, S., ČAKARUN, I., KOSTOVIĆ, K. (1967): *Hidrogeološki radovi na južnom pobočju Medvednice. Knjiga 1 i 2. Institut za geološka istraživanja, Zagreb.*
- BRUNDIĆ, M. (1969): *Izveštaj o radovima za sanaciju stupa žičare u krugu tvornice cementa "Sloboda" u Podsusedu kraj Zagreba. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.*
- ČUBRANIĆ, N. (1976): *Geodetska mjerenja položaja objekata T.C. "Sloboda". Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.*
- DUMANČIĆ, E. (1985): *Geotermička istraživanja u Podsusedu - prva faza. INA-Projekt, Zagreb.*
- DUMANČIĆ, E. (1989): *Geološko i geokemijsko praćenje bušotine PDS-2 u Podsusedu. INA-Projekt, Zagreb.*
- GJURETEK, D., MILJKOVIĆ, I. (2010): *Klizište Kostanjek. Opažanje mreže stalnih geodetskih točaka u svrhu praćenja pomaka. Epoha opažanja ožujak 2010. GEOPROJEKT d.o.o., Zagreb.*
- HERAK, M., KUK, V. (1989): *Seizmički parametri na lokaciji klizišta T.C. "Sloboda" - Podsused. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.*
- JANČIN, D., ORTOLAN, Ž. (1988): *Klizište T.C. "Sloboda" - Podsused. Katastar kopanih bunara. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.*
- KLASNIĆ, Z., ORTOLAN, Ž. (1988): *Klizište T.C. "Sloboda" - Podsused. Istražno bušenje i ugradnja piezometara. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.*
- KUKURUZOVIĆ, A., BAKARIĆ, D., RADOŠ, M. (1994): *Projekt praćenja- stanje klizišta „Kostanjek“ - 1994. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.*
- LASIĆ, Z., BIRIN, I. (1979): *Laporolom Kostanjek - izvještaj o geodetskim radovima. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.*
- LASIĆ, Z., BIRIN, I., KRIŽOVAN, Z. (1989): *Tehnički izvještaj o geodetskom snimanju terena u Podsusedu - klizište cementare "Sloboda". Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.*
- MAGDALENIĆ, A., ŠIKIĆ, D., LUKIĆ, M. (1979): *Geološki i inženjerskogeološki odnosi užeg i šireg područja pogona Kostanjek. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.*

MÜLLER, B., ŠTAJDUHAR, M., TESKEREDŽIĆ, F., ARANICKI, S., GOBAC, I. (1964): Izvještaj o geomehaničkim ispitivanjima tla za objekte proširenja tvornice cementa "Sloboda", Podsused. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.

NIKOLIĆ, R., FIAMENGO, N., MILINOVIĆ, M., PUDELKO, D. (1977): Tvornica cementa "Sloboda" Podsused, izvođački projekt za sanaciju tunela za dotur sirovina. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.

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

ORTOLAN, Ž. (2008): Projekt sanacije klizišta Kostanjek – Podsused, I. etapa: geološki istražni radovi. Inženjerskogeološki elaborat s prostornim modelom klizišta Kostanjek – Podsused. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

ORTOLAN, Ž., STANIĆ, B. (1985): Prijedlozi eksploatacijskih i završnih pokosa na površinskom kopu lapora "Kostanjek". Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

ORTOLAN, Ž., STANIĆ, B., MIHALINEC, Z., JANČIN, D. (1989): Klizište T.C. "Sloboda" - Podsused. Geotehnički elaborat s prijedlogom sanacije. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

ORTOLAN, Ž., VERIĆ, F. (1998): Geotehnički elaborat za skladišno-prodajni objekt "Strojoprometa" u Podsusedu. RNK-Geomod, Zagreb.

PEHNEC, V., HORVAT, K. (1970): Izvještaj o dopunskim geomehaničko-istražnim radovima na lokaciji nove tvornice cementa "Sloboda" u Podsusedu. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.

PEHNEC, V., HORVAT, K., BRUNDIĆ, M., RUNJE, Z. (1973): Izvještaj o geomehaničkim istražnim radovima za drobilanu lapora tvornice cementa "Sloboda" - Podsused. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.

PLEŠKO, J. (1988): Klizište T.C. "Sloboda" - Podsused, aerofotogrametrijski istražni radovi. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

PUST, I. (1977): Deformacije u tunelu za transport sirovine u tvornici cementa u Podsusedu. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.

ROBOZ, O., ZAMBELLI, A. (1965): Projekt sanacije i rekonstrukcije laporoloma u Kostanjeku. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.

SLIMAK, Š. (1963): Seizmološka ispitivanja, tvornica cementa "Sloboda" - Podsused. Geofizika, Zagreb.

SLOVENEK, D. (1989): Mineraloške karakteristike sedimenata s lokacije T.C. "Sloboda" u Podsusedu. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

SOKAČ, A. (1989): Mikropaleontološka obrada uzoraka u području Podsuseda. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

STANIĆ, B. (1989): Klizište T.C. "Sloboda" - Podsused, geomehanički laboratorijski istražni radovi. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

STANIĆ, B. (1999): Urbanistički plan uređenja područja nekadašnje tvornice cementa u Podsusedu. Ekspertno mišljenje mogućnosti stabilizacije klizišta Kostanjek.

STANIĆ, B. (2006): Klizište Kostanjek – Podsused, I. etapa: građevni projekt sanacije klizišta. Stručna podloga za lokacijsku dozvolu. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

STANIĆ, B., ORTOLAN, Ž., MIHALINEC, Z. (1989): Klizište T.C. "Sloboda" - Podsused. Ispitivanja vodopropusnosti. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

ŠIKIĆ, V. (1972): Izvještaj o inženjerskogeološkim karakteristikama tla na lokaciji trafostanice i rasklopnog postrojenja u Podsusedu. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.

URLI, M., SVIBEN, D. (1988): Klizište Podsused, izvještaj o karotažnim mjerenjima u bušotinama KS-2', KS-3, KS-4, KS-5, KS-6, KS-7 i KS-8. Geofizika, Zagreb.

VODOVOD-ZAGREB (1961 - 1989): Mjerena izdašnosti kaptiranih izvora na južnom pobočju Medvednice. Vodovod, Zagreb.

ZAGORAC, Ž. (1978/79): Izvještaj o geofizičkim istraživanjima i kartografskim radovima na području laporoloma "Kostanjek" kod Podsuseda. Tvornica cementa „Sloboda“, Zagreb.

ŽIVOTOPIS AUTORA

Martin Krkač rođen je 7.10.1979. godine u Zagrebu. Pohađao je osnovnu školu „Ksaver Šandor Gjalski“ u Zagrebu i srednju „Kemijsku i geološku tehničku školu Zagreb“. Godine 1998. upisuje dodiplomski studij Geologije na Rudarsko-geološko-naftnom fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Diplomom inženjera geologije, smjer inženjerska geologija i hidrogeologija, stječe u prosincu 2005. godine obranom diplomskog rada „Petrološke karakteristike magmatskih stijena Vratnika“ izrađenog pod mentorstvom doc.dr.sc. Vesnice Garašić.

Od siječnja 2008. godine zaposlen je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu kao znanstveni novak na Zavodu za rudarstvo i geotehniku, a od 2010. godine kao asistent na Zavodu za geologiju i geološko inženjerstvo. Poslijediplomski doktorski studij na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, smjer Geološko inženjerstvo, upisuje 2008. godine. Tijekom poslijediplomskog studija usavršavao se na međunarodnoj ljetnoj školi (International school on Landslide Risk Assessment and Mitigation) Sveučilišta u Salernu (Italija) te tijekom dva studijska boravaka na Sveučilištu u Niigati i Sveučilištu u Kyotu (Japan).

Do sada je sudjelovao na četiri znanstvena projekta: od 2007. do 2008. godine bio je član međunarodnog projekta „INTEREG CARDS/PHARE M.E.E.T.I.N.G. – Mitigation of the Earthquakes Effects in Towns and in Industrial Regional Districts“ financiranom od Europske unije; 2008. godine sudjelovao je na znanstvenom projektu „Razvoj sustava upravljanja geotehničkim podacima za procjenu prirodnih hazarda“ pri Ministarstvu znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske; 2010. godine surađivao je s kolegama s Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu na bilateralnom hrvatsko-srpskom projektu „GeohazardINFO: Virtualni centar podataka o geohazardima“; te je od 2010. do 2014. godine sudjelovao na međunarodnom bilateralnom hrvatsko-japanskom projektu „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj“ kao član Radne grupe 1 za klizišta. U sklopu hrvatsko-japanskog projekta sudjelovao je na uspostavljanju „Opservatorija za praćenje klizišta Kostanjek“ kojim je omogućeno prikupljanje podataka koje koristi prilikom izrade svog doktorskog rada pod nazivom „Fenomenološki model gibanja klizišta Kostanjek na osnovi praćenja parametara klizanja“.

U koautorstvu je objavio 41 znanstveni rad od kojih je većina na temu istraživanja i praćenja klizišta te kartiranja klizišta primjenom daljinskih metoda istraživanja. Sudjelovao je na brojnim domaćim i međunarodnim znanstvenim skupovima na kojima je imao ukupno osam izlaganja te u organizaciji međunarodnog znanstvenog skupa pod nazivom „1. regionalni simpozij o klizištima“ održanog u Zagrebu 2013. godine. Od 2008. godine je član Hrvatskog geološkog društva (HGD), Međunarodnog društva za inženjersku geologiju (IAEG), Hrvatskog geotehničkog društva (HGD), Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM) i Međunarodnog društva za mehaniku tla i geotehničko inženjerstvo (ISSMGE).

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

Poglavlja u knjizi

MIHALIĆ ARBANAS, S., ARBANAS, Ž., KRKAČ, M. (2013): *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.

Znanstveni radovi u drugim časopisima

MIHALIĆ, S., OŠTRIĆ, M., KRKAČ, M. (2011): *A review of principles and practice*. *Geofizika*, 28. 5-20.

Objavljena pozvana predavanja na skupovima

MIHALIĆ ARBANAS, S., ARBANAS, Ž., KRKAČ, M. (2013): *Monitoring klizišta u urbaniziranim sredinama na primjeru klizišta Kostanjek u Zagrebu, Hrvatska*. Zbornik radova naučno-stručnog simpozijuma GEO-EXPO 2013 / Zekan, S. (ur.). Društvo za geotehniku u Bosni i Hercegovini,. 1-12.

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

ABOLMASOV, B., MIHALIĆ, S., HADŽI-NIKOVIĆ, G., MARJANOVIĆ, M., KRKAČ, M. (2010): *Socioeconomic influence of Natural Disasters on the Western Balkan Countries*. *Proceedings of the XIX Congress of the Carpathian Balkan Geological Association* / Christofides, G., Kantiranis, N., Kostopoulos, D.S., Chatzipetros, A.A. (eds.). Charis Ltd., Thessaloniki. 1-5.

BAUČIĆ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., KRKAČ, M. (2014): *Geographic information system of landslide Kostanjek: integration of real-time GNSS monitoring data with other sensor data*. / *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. 33-37.

BERNAT, S., MIHALIĆ ARBANAS, S., KRKAČ, M. (2014): *Inventory of precipitation triggered landslides in the winter of 2013 in Zagreb (Croatia, Europe)* / *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. 829-835.

BERNAT, S., MIHALIĆ ARBANAS, S., KRKAČ, M. (2014): *Landslides Triggered in the Continental Part of Croatia by Extreme Precipitation in 2013* / *Proceedings of the XII IAEG Congress 'Engineering Geology for Society and Territory', Vol. 2 'Landslide Processes'* / Lollino, G., Giordan, D., Battista Crosta, G., Corominas, J., Azzam, R., Wasowski, J., Sciarra, N. (eds). Springer, Heidelberg. 1599-1603.

GRADIŠKI, K., SASSA, K., HE, B., KRKAČ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., ARBANAS, Ž., KVASNIČKA, P., OŠTRIĆ, M. (2014): *Application of integrated landslide simulation model using LS-Rapid software to*

the Kostanjek Landslide, Zagreb, Croatia. 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. 11-16.

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

KRKAČ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., ARBANAS, Ž., BERNAT, S., ŠPEHAR, K. (2014): *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. (2014): *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.*

KRKAČ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., NAGAI, O., ARBANAS, Ž., ŠPEHAR, K. (2014): *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., RUBINIĆ, J., KALAJŽIĆ, J. (2014): *Analysis of water fluctuation dynamics in the wider area of the Kostanjek landslide. 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. 23-26.*

MARTINČEVIĆ, J., MIHALIĆ ARBANAS, S., BERNAT, S., KRKAČ, M., MIKLIN, Ž., PODOLSKZI, L. (2014): *Mineralogical Composition of the Kostanjek Landslide Sediments and its Possible Influence on the Sliding and Swelling Processes. 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. 17-21.*

MIHALIĆ, S., ARBANAS, Ž., KRKAČ, M., DUGONJIĆ, S. (2011): *Analysis of sliding hazard in wider area of Brus landslide. Proc. of the XV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering / Anagnostopoulos, A., Pachakis, M., Tsatsanifos, Ch. (eds). IOS Press, Amsterdam. 1377-1382.*

MIHALIĆ ARBANAS, S., KRKAČ, M., BERNAT, S., ARBANAS, Ž. (2012): *Use of existing data in the City of Zagreb (Croatia, Europe) for the purpose of geo-planning. Advances in underground space development / Zhou, Y., Cai, J., Sterling, R. (eds.). Research Publishing, Singapore. 465-477.*

Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom

BAUČIĆ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., KRKAČ, M. (2013): *Geografski informacijski sustav klizišta Kostanjek: integracija podataka GNSS sustava praćenja pomaka u stvarnom vremenu s podacima drugih mjernih uređaja. Zbornik radova 3. CROPOS konferencije / Bašić, T., Marjanović, M. (ur.). Državna geodetska uprava, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska komora ovlaštenih inženjera geodezije, Zagreb. 111-117.*

KRKAČ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., ARBANAS, Ž., SMOLČAK, N., ŠPEHAR, K., BERNAT, S. (2013): *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.*

MIHALIĆ, S., SALKOVIĆ, I., KVASNIČKA, P., OŠTRIĆ, M., KRKAČ, M. (2009): *Procjena lokalnih uvjeta tla i mikrozoniranje. Izvori rizika u geotehničkim zahvatima, Publikacija sa sažecima. Hrvatsko Geotehničko Društvo, Osijek.*

MIHALIĆ, S., ARBANAS, Ž., KRKAČ, M., DUGONJIĆ, S., FERIĆ, P. (2010): *Karte hazarda klizanja i sustavi ranog upozoravanja u funkciji ublažavanja rizika klizanja. Zbornik II. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa / Trut, D. (ur.). Državna uprava za zaštitu i spašavanje, Zagreb. 18-22.*

SALKOVIĆ, I., KVASNIČKA, P., MIHALIĆ, S., KRKAČ, M. (2009): *Geotehnička istraživanja za određivanje lokalnih uvjeta tla na lokaciji Arene Zagreb. Izvori rizika u geotehničkim zahvatima, Publikacija sa sažecima. Hrvatsko Geotehničko Društvo, Osijek.*

Radovi u zbornicima skupova bez recenzije

FERIĆ, P., MIHALIĆ, S., KRKAČ, M. (2012): *Visual mapping of landslides from LiDAR imagery, Zagreb, Croatia. Book of proceedings of the 2nd Project Workshop of the Croatia - Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia* / Ožanić, N., Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H., Dragičević, N. (eds). University of Rijeka, Rijeka. 130-133.

FURUYA, G., MIYAGI, T., HAMASAKI, E., KRKAČ, M. (2012): *Geomorphologic mapping and 3D modeling of the Kostanjek Landslide, Zagreb. Book of proceedings of the 2nd Project Workshop of the Croatia - Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia* / Ožanić, N., Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H., Dragičević, N. (eds). University of Rijeka, Rijeka. 21-23.

KRKAČ, M., PLETIKOSIĆ, N., KLANFAR, M., BEDENICKI, N., MIHALIĆ, S. (2010): *Analiza osjetljivosti na klizanje u slivu Boljučice (Istra, Hrvatska). Zbornik IV. Regionalnog kongresa studenata geotehničkih fakulteta – GEOREKS 2010* / Rakić, D. (ur.) AMG knjiga, Beograd. 54-61.

KRKAČ, M., RUBINIĆ, J., MIHALIĆ, S. (2012): *Kostanjek landslide - Analyses of groundwater discharge as a basis for the new hydrological monitoring. Book of proceedings of the 2nd Project Workshop of the Croatia - Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia* / Ožanić, N., Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H., Dragičević, N. (eds). University of Rijeka, Rijeka. 17-20.

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

MIHALIĆ ARBANAS, S., KRKAČ, M., BERNAT, S., ARBANAS, Ž. (2014): *Landslide mapping and monitoring in the City of Zagreb (Croatia, Europe). Proceedings of the SATREPS Workshop on Landslide Risk Assessment Technology* / Sassa, K., Dang, K.Q. (eds.). International Consortium on Landslides, Kyoto. 214-226.

NAGAI, O., KRKAČ, M., MIHALIĆ, S. (2012): *Introduction of one of Methods to Predict Failure Time of a slope widely used in Japan and application to the Kostanjek Landslide. Book of proceedings of the 2nd Project Workshop of the Croatia - Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia* / Ožanić, N., Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H., Dragičević, N. (eds). University of Rijeka, Rijeka. 46-50

OSTRIĆ, M., LJUTIĆ, K., KRKAČ, M., SETIAWAN, H., HE, B., SASSA, K. (2012): *Undrained Ring Shear Tests Performed on Samples from Kostanjek and Grohovo Landslide. Proceedings of the IPL Symposium* / Sassa, K., Takara, K., He, B. (eds.). Kyoto. 47-52.

TOŠEVSKI, A., WANG, C., KRKAČ, M. (2012): *Geological, geomorphological and engineering geological conditions of the Dubracina River Basin, Croatia. Book of proceedings of the 2nd Project Workshop of the Croatia - Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia* / Ožanić, N., Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H., Dragičević, N. (eds). University of Rijeka, Rijeka. 118-121.

VRŠALJKO, D., MIHALIĆ, S., BOŠNJAK, M., KRKAČ, M. (2012): *Lithostratigraphical investigations of the Kostanjek landslide wider area: Review of existing data and planned activities. Book of proceedings of the 2nd Project Workshop of the Croatia - Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia* / Ožanić, N., Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H., Dragičević, N. (eds). University of Rijeka, Rijeka. 17-20.

WATANABE, N., KRKAČ, M., FURUYA, G., WANG, C., MIHALIĆ, S. (2012): *Hydrochemical characteristics of groundwater from the Kostanjek Landslide in Croatia. Book of proceedings of the 2nd Project Workshop of the Croatia - Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia* / Ožanić, N., Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H., Dragičević, N. (eds). University of Rijeka, Rijeka. 14-16.

Sažeci u zbornicima skupova

ARBANAS, Ž., VIVODA, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., PERANIĆ, J., SEČANJ, M., BERNAT, S., KRKAČ, M. (2015): *Analysis of a reservoir water level impact on landslide reactivation. 2nd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region, Abstract Proceedings* / Abolmasov, B. (ed). University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Belgrade. 15-17.

BERNAT, S., MIHALIĆ ARBANAS, S., KRKAČ, M. (2013): *Landslides Triggered in the City of Zagreb in the Winter of 2013. Book of abstract of the 4th workshop of the Japanese -Croatian project on Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia* / Vlastelica, G., Andrić, I., Salvezani, D. (eds.). University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy. 65-66.

FERIĆ, P., MIHALIĆ, S., ARBANAS, Ž., KRKAČ, M., PODOLSZKI, L. (2010): *Kostanjek landslide: current state and planned project activities. Abstract proceedings of the 1st Japanese-Croatian Project Workshop* / Arbanas, Ž., Mihalić, S., Ožanić, N., Marui, H., (eds.). JICA, Zagreb. 6.

GRADIŠKI, K., KRKAČ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S., BERNAT, S. (2013): *Slope stability analyses of the Kostanjek Landslide for extreme rainfalls in the winter of 2013. Book of abstract of the 4th workshop of the Japanese -Croatian project on Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia* / Vlastelica, G., Andrić, I., Salvezani, D. (eds.). University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy. 17-18.

MIHALIĆ, S., ABOLMASOV, B., KRKAČ, M., FERIĆ, P. (2010): *Regionalni prikaz prirodnih hazarda u dijelu jugoistočne Europe. Zbornik 4. Hrvatskog geološkog kongresa / Horvat, M. (ur.). Hrvatski geološki institut, Zagreb. 168-169.*

MIHALIĆ, S., ARBANAS, Ž., KRKAČ, M., DUGONJIĆ, S. (2010): *Japansko-hrvatski bilateralni projekt 'Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje rizika klizanja i bujica u Hrvatskoj' - pilot područja. Zbornik 4. Hrvatskog geološkog kongresa / Horvat, M. (ur.). Hrvatski geološki institut, Zagreb. 170-171.*

WATANABE, N., YAMAMOTO, S., KRKAČ, M., FURUYA, G., WANG, C., MIHALIĆ ARBANAS, S. (2013): *Groundwater behaviour in the Kostanjek landslide, western part of Zagreb, Croatia: geochemical constraints from water and rock samples. Book of abstract of the 4th workshop of the Japanese -Croatian project on Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia / Vlastelica, G., Andrić, I., Salvezani, D. (eds.). University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy. 40.*

YAMAMOTO, S., WATANABE, N., KRKAČ, M., FURUYA, G., WANG, C., MIHALIĆ ARBANAS, S., (2013): *Geochemical constraints on the origins of groundwaters from the Kostanjek landslide in the western part of Zagreb, Croatia. Book of abstract of the 4th workshop of the Japanese -Croatian project on Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia / Vlastelica, G., Andrić, I., Salvezani, D. (eds.). University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy. 9-10.*

YOSHIMATSU, H., HAMASAKI, E., MARUI, H., KATO, T., WANG, C., KRKAČ, M., MIHALIĆ ARBANAS, S. (2013): *Characteristics of sliding displacement of Kostanjek landslide in Croatia. Book of abstract of the 4th workshop of the Japanese -Croatian project on Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia / Vlastelica, G., Andrić, I., Salvezani, D. (eds.). University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy. 29-30.*