

# Prilog modeliranju potencijalnih poplavnih tokova i tokova krupnozrnatog materijala u slivu Rječine

---

Žic, Elvis

Doctoral thesis / Disertacija

2015

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:188:660705>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)





SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

POSLIJEDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
GRAĐEVINARSTVO

Elvis Žic

**PRILOG MODELIRANJU  
POTENCIJALNIH POPLAVNIH TOKOVA I  
TOKOVA KRUPNOZRNATOG  
MATERIJALA U SLIVU RJEČINE**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2015.

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

POSLIJEDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
GRAĐEVINARSTVO

Elvis Žic

**PRILOG MODELIRANJU  
POTENCIJALNIH POPLAVNIH TOKOVA I  
TOKOVA KRUPNOZRNATOG  
MATERIJALA U SLIVU RJEČINE**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Nevenka Ožanić

Komentor: prof.dr.sc. Nenad Bićanić

Rijeka, 2015.



UNIVERSITY OF RIJEKA  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

POSTGRADUATE DOCTORAL STUDY IN CIVIL  
ENGINEERING

Elvis Žic

**THE CONTRIBUTION TO THE  
MODELING OF THE POTENTIAL FLOOD  
FLOW AND DEBRIS FLOW  
PROPAGATION IN THE RJEČINA RIVER  
CATCHMENT AREA**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2015.

## ZAHVALA

Prije svega želim se zahvaliti svom mentoru, prof.dr.sc. Nevenki Ožanić i komentoru prof.dr.sc. Nenadu Bićaniću na svestranom trudu tijekom vođenja doktorskog rada i pomoći oko završnih korekcija i sugestija na radu. Zahvaljujem prof.dr.sc. Nenadu Bićaniću koji mi je omogućio usavršavanje i istraživanja u vezi mog doktorskog rada na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Glasgowu, te bio moj pravi domaćin i uvijek na visokoj usluzi, kako znanstvenoj tako i humanoj.

Veliko hvala prof.dr.sc. Nenadu Bićaniću, prof.dr.sc. Željku Arbanasu i prof.dr.sc. Nevenki Ožanić na mnogim hvalevrijednim sugestijama i komentarima tijekom pisanja rada u časopisima *Technical Gazette* i *Natural Hazards and Earth System Sciences (NH&ESS)*. Također se zahvaljujem mom dragom kolegi dr.sc. Josipu Rubiniću, uvijek dostupnom i voljnom pomoći, koji mi je kao vrsan hidrolog sugerirao na neke važne činjenice oko hidrološke analize koja je sprovedena za ispitivano područje unutar doktorskog rada.

Veliko hvala prof.dr.sc. Nevenki Ožanić kao glavnom voditelju hrvatsko-japanskog znanstveno-istraživačkog bilateralnog projekta „Risk Identification and Land – Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia“ koja mi je omogućila da kao znanstveni istraživač mogu sudjelovati na istom. Ujedno se zahvaljujem i Japanskoj agenciji za međunarodnu suradnju (Japan International Cooperation Agency, JICA) koja mi je omogućila boravak i istraživanja u sklopu doktorskog rada na Sveučilištu u Kyotu (Disaster Prevention Research Institute, DPRJ).

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Yosuke Yamashikiju, Shoti Kurokawi, i Shigeu Fujikiju na velikoj pomoći i trudu oko izrade fizikalnog modela za propagaciju tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala u Ujigawa hidrotehničkom laboratoriju.

Zahvaljujem se svojim dragim kolegama sa Sveučilišta u Salernu prof.dr.sc. Sabatinu Cuomu, prof.dr.sc. Leonardu Casciniu, prof.dr.sc. Michelleu Calvellu, mom dragom prijatelju doktorskome studentu Giuseppeu Claudiu Castorinu, te dr.sc. Olivii Areni i dr.sc. Dariu Pedutu na dugotrajnim diskusijama, sugestijama i pomoći oko SPH metode, TRIGRS hidrološkog modela i ArcGIS 10.1. programa. Zahvaljujem im se na njihovoj velikoj stručnosti i dobronamjernosti koja je ostala do danas kroz naše česte razgovore.

Jedno veliko nezaboravno „Hvala“ mojim kolegama Ivani Sušan, dipl.ing.građ. i dr.sc. Igoru Ružiću oko svestrane pomoći prilikom instaliranja mjerne meteorološke i hidrotehničke opreme na křizistu Grohovo i akumulaciji Valići, bez kojih ovaj doktorski rad ne bi ugledao svjetlo dana. Uvelike im hvala na pomoći i prijateljstvu.

Velika hvala mojoj dragoj obitelji, ocu Branku, majci Mirjani i sestri Gabrieli sa obitelji na velikom poticanju i željama da kroz život stanem na pravi put. Hvala im za sve uloženo vrijeme, trud, zalaganje i potporu tijekom mog cjelokupnog školovanja.

Do neba hvala mojoj dragoj voljenoj Ines koja je cijelo ovo vrijeme mog doktorskog istraživanja bila moja neizmijerna potpora, poticaj i najveći oslonac u teškim trenucima slabosti. Hvala joj na razumijevanju, brizi i navelikoj pomoći oko podizanja naše malene voljene Vanese, koja je tati bila najveća i nepresušna motivacija u radu. Njima od srca posvećujem svoj doktorski rad uz ispriku za svo izgubljeno dragocijeno vrijeme koje nisam na žalost proveo s njima.

Na kraju bih se zahvalio svim ljudima dobre volje, kolegama sa Građevinskog fakulteta u Rijeci, Splitu, Skoplju i Sarajevu, mojim dragim prijateljima i poznanicima koji su me bodrili tijekom doktorskog istraživanja.

Svima Vama hvala od srca. Pamtim svađo Vaše dobronamjerno dijelo i poticaj.

## SAŽETAK

Doktorski rad razmatra različite teorijske i praktične aspekte modeliranja poplavnih valova i tokova krupnozrnatog nekoherentnog (eng. *Debris flow*) i sitnozrnatog koherentnog materijala (eng. *Mud flow*, *Earth flow*) kao jednih od značajnijih mogućih prirodnih pojava na srednjem i donjem toku vodotoka Rječine.

Rad se temelji na prikupljenim meteorološkim, hidrološkim i geotehničkim podacima, te rezultatima matematičkih i fizikalnih modela za različite scenarije kretanja poplavnih vodnih valova, propagacije toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na srednjem i donjem toku Rječine, od akumulacije Valići do urbanog dijela grada Rijeke uključujući i moguće scenarije posljedica tih aktivnosti.

Metode istraživanja bazirane su većinom na ulaznim podacima sakupljenim terenskim mjerenjima na području istraživanja. Baza podataka sadrži osnovne informacije o postojećem stanju područja klizišta Grohovo i vodotoka Rječina, uključujući njihovu prirodu, veličinu, lokaciju i povijest, sve dostupne podatke o prethodnim istraživanjima (fotografije, povijesne spise, izvještaje, povratne analize područja i sl.), te podatke u realnom vremenu sa instaliranih mjernih uređaja (meteoroloških stanica, Mini i Baro Diver instrumenata, ombrografa, limnigrafa, ADCP mjerača protoka i sl.) za praćenje promjena na predmetnoj lokaciji.

Metode istraživanja uključuju površinska istraživanja, podzemna istraživanja (mjerenje razine podzemnih voda na području klizišta Grohovo), 2D numeričko modeliranje poplavnih valova i tokova krupnozrnatog materijala primjenom SPH 2D simulacijskog programa na bazi SPH (eng. *Smoothed Particle Hydrodynamics*) metode i SOLFEC (eng. *Solver for Finite Element Computation*) simulacijskog programa na bazi neglatke kontaktne mehanike (eng. *Non Smooth Contact Dynamics - NSCD*), te GIS (eng. *Geographic Information System*) tehnologije. Na osnovi ulaznih hidroloških i geoloških podataka kreirani su numerički modeli tečenja nevezanog krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Pri izradi numeričkih modela primijenjene su najčešće korištene empirijske metode erozijskih zakona (erozijski zakon po Egashiri, Voellmyu, Hungru), a predložen je i novi erozijski zakon. Na kraju rada su dane smjernice za analizu hazarda i rizika od djelovanja poplava te tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na ispitivanom području. Uz pomoć dobivenih simulacijskih prikaza toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala kvantificiran je vjerojatan volumen deponiranog

materijala, brzine toka, dubine deponiranog materijala, kao i doseg toka takvih tipova tečenja na analiziranom području za nekoliko mogućih scenarija katastrofalnih pojava. Neki od scenarija obrađenih i analiziranih u radu vezani su za posljedice kolapsa brane Valići uslijed unosa flišne klizne mase u akumulaciju, nastanak plimnog vala i njegova propagacija prema urbanom dijelu grada Rijeke, kao i mogućnost formiranja toka krupnozrnatog materijala na srednjem dijelu toka Rječine nastalog uslijed miješanja akumulacijske vode i klizne mase nestabilnih padina. Predmetne analize omogućuju kvantifikaciju pojedinih ulaznih parametara koji iniciraju nastanak tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Odnosi definiranih parametara omogućuju uspostavljanje korelacija između geomorfoloških i hidrogeoloških uvjeta, te specifičnosti terenskih uvjeta s parametrima tla karakterističnim za nastanak tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Definiranjem kritičnih geomorfoloških i hidrogeoloških parametara tla koji uvjetuju pojavu tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na flišnom području omogućena je procjena hazarda i mjere za ublažavanje hazarda. Pritom je provedena gruba analiza rizika na srednjem i donjem toku Rječine, pri čemu su definirani glavni elementi rizika. Dodatno su opisani uzroci mogućih nastanka analiziranih prirodnih hazarda, te smjernice za njihovu sanaciju i očuvanje od posljedica mogućih hazarda u budućnosti.

**Ključne riječi:** numeričko modeliranje, fizikalni model, metoda hidrodinamike glatkih čestica (SPH metoda), SOLFEC simulacijski program, poplave, tok krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, sliv vodotoka Rječine, klizište Grohovo, akumulacija Valići, hazard, rizik

## SUMMARY

The doctoral thesis discusses the different theoretical and practical aspects of flood waves modeling and propagation of coarse incoherent materials (debris flow modeling) and fine-grained cohesive material (mud flow modeling) as two potentially significant natural phenomena in the middle and lower part of the Rječina River.

This doctoral thesis was based on the collection of meteorological, hydrological and geotechnical data, and consequently the development of physical and mathematical models for different movement scenarios of flood water waves, debris and mudflow propagation on the Rječina River, from the position of Valići accumulation to the urban part of the Rijeka City, including possible result scenarios of these activities.

Research methods are based on the input data collected from terrain measurements in the defined area. The database contains basic information on the current state of Grohovo landslide area and Rječina River, including their nature, size, location and history, all available information on previous research (photographs, historical documents, reports, feedback analysis of areas, etc.), as well as real-time information from the built-measuring devices (meteorological stations, Mini and Baro Diver instruments, ombrografs, limnigrads, satellite, radar, ADCP flow meter, etc.) to track changes at the location.

Research methods include surface and underground research (measuring of groundwater levels in the area of the Grohovo landslide), 2D numerical modeling of flood waves and debris flows propagation (application of Smoothed Particle Hydrodynamics method (SPH) and SOLFEC (*Solver for Finite Element Computation*) simulation program based on *Non Smooth Contact Dynamics - NSCD*), and GIS (*Geographic Information System*) technology. Based on the input of hydrological and geological data, numerical models for debris flow and mudflow propagation were created. In developing numerical models, most commonly used empirical methods of the erosion law (Egashira, Hungr, and Voellmy erosion law) have been applied, as well as the implementation of the new erosion law. Based on that were given the guidelines for hazard and risk analysis of the flash-flood and debris flow effects on the investigated area. With the help of the debris and mudflow simulation display we quantified the volume of deposited materials, the flow velocity, the depth of the deposited materials, as well as run-out distance of debris and mudflow on the analyzed area for several

possible scenarios of catastrophic phenomena. Some of the scenarios processed and analyzed in this doctoral thesis are related to the consequences of the Valići dam collapse (due to input flysch sliding mass into the accumulation), the formation of a tidal wave and its propagation to the urban part of the Rijeka City, as well as the possibility of forming the debris flow propagation in the middle part of the Rječina River due to mixing of water from the accumulation and initiating the sliding mass on the unstable flysch slopes. This analysis enables the quantification of individual input parameters that initiate the formation of debris flow and mudflow. The relationships of defined parameters allow the establishment of correlations between geomorphological and hydrogeological conditions, as well as the specifics of terrain conditions with the parameters of the soil characteristic for the formation of debris flow and mudflow. The definition of critical geomorphological and hydrogeological parameters of soil that encourage the emergence of debris flow and mudflows in flysch area enabled the assessment of hazards and hazard mitigation measures for the investigated area. In this regard a rough risk analysis of possible consequences on the middle and lower part of the Rječina River was conducted, whereby the main elements of risk were defined. Additionally, the causes of possible occurrence of natural hazards were described, as well as guidelines for their rehabilitation and preservation of the possible hazard consequences in the future.

**Keywords:** numerical modeling, physical model, Smoothed Particle Hydrodynamics method, Solver for Finite Element Computation algorithm, flash floods, debris flow, mudflow, Rječina Catchment Area, Grohovo landslide, Valići accumulation, hazard, risk

# SADRŽAJ

ZAHVALA .....	v
SAŽETAK .....	vi
SUMMARY .....	viii
SADRŽAJ .....	x
<b>1. UVODNO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Problemski okvir istraživanja .....	1
1.2. Cilj i sadržaj rada .....	1
1.3. Primjene modelskih pristupa i istraživačkih metoda .....	5
1.4. Dosadašnje spoznaje hidroloških i geoloških značajki šireg područja klizišta Grohovo .....	5
1.5. Dosadašnji rezultati vlastitih istraživanja .....	7
<b>2. PREGLED DOSADAŠNJIH HIDROGEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA I ANALIZA STANJA SLIVA VODOTOKA RJEČINE .....</b>	<b>9</b>
2.1. Morfogeneza vodotoka Rječine .....	9
2.2. Geološka struktura i geomorfološke značajke sliva Rječine .....	10
2.3. Hidrološka i hidrogeološka analiza sliva Rječine .....	14
2.4. Hidrološke značajke klizišta Grohovo .....	25
2.4.1. Mini X-Band Dual polarimetrijski meteorološki radar .....	43
<b>3. PROCJENA NASTANKA TOKA KRUPNOZRNATOG I SITNOZRNATOG MATERIJALA NA SREDNJEM TOKU RJEČINE .....</b>	<b>47</b>
3.1. Opća klasifikacija tipova klizanja u praksi .....	47
3.2. Tokovi krupnozrnatog materijala i hiperkoncentrirani tokovi .....	50
3.3. Proces pokretanja tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala .....	52
3.4. Određivanje protoka, brzine, dosega, debljine deponiranog materijala i ukupnog volumena toka krupnozrnatog materijala .....	56
3.5. Tokovi sitnozrnatog materijala .....	60
3.6. Procjena nastanka toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na srednjem toku Rječine .....	62
3.6.1. Pojave klizanja i poplava u dolini Rječine u prošlosti .....	66

3.6.2. Monitoring na području klizišta Grohovo.....	69
<b>4. METODOLOGIJA.....</b>	<b>71</b>
4.1. Općenito o matematičkim i numeričkim modelima .....	71
4.2. Fizikalni model za opis toka krupnozrnatog materijala.....	72
4.2.1. Metodologija izrade fizikalnog modela .....	74
4.2.2. Fizikalni model toka krupnozrnatog materijala - obrada podataka.....	79
4.3. Numerički modeli za opis toka krupnozrnatog materijala.....	84
4.4. Opis numeričkih modela korištenih u doktorskom radu.....	91
4.4.1. SOLFEC simulacijski program .....	91
4.4.1.1. Kreiranje računalnog koda u SOLFEC simulacijskom programu.....	91
4.4.1.2. Jednadžbe problema .....	94
4.4.1.3. Prostorna i vremenska diskretizacija.....	97
4.4.2. Simulacijski prikazi korištenjem SOLFEC simulacijskog programa (bujični vodotok Slani potok).....	98
4.4.2.1. Verifikacija numeričkog modela .....	105
4.4.3. Primjena SPH simulacijskog programa .....	109
4.4.3.1. Matematički, reološki i numerički model u SPH 2D .....	113
4.4.3.1.1. Matematički model .....	113
4.4.3.1.2. Opći model.....	116
4.4.3.1.3. Propagacijsko-konsolidacijska aproksimacija.....	118
4.4.3.2. Integrirani model po dubini.....	119
4.4.3.3. Reološki zakon .....	121
4.4.3.3.1. Zakon trenja i Voellmyev zakon.....	122
4.4.3.4. Numerički model.....	123
<b>5. IMPLEMENTACIJA EROZIJSKIH ZAKONA U SPH 2D SIMULACIJSKI PROGRAM .....</b>	<b>125</b>
5.1. Značajke erozijskih zakona.....	125
5.2. Opis erozijskog zakona po Hungru.....	125
5.3. Opis erozijskog zakona po Egashiri.....	126
5.3.1. Primjena erozijskog zakona po Egashiri u SPH 2D modelu.....	128
5.4. Novi erozijski zakon implementiran u SPH 2D model.....	128
5.5. SPH 2D računalni kod i njegova struktura .....	130
5.5.1. Ulazni parametri u SPH 2D modelu .....	132



5.5.2. Verifikacija erozijskih zakona i SPH 2D modela .....	133
<b>6. SIMULACIJE TOKA KRUPNOZRNATOG I SITNOZRNATOG MATERIJALA NA SREDNJEM DIJELU TOKA RJEČINE (KLIZIŠTE GROHOVO).....</b>	<b>135</b>
6.1. Geomorfološki (geotehnički) i hidrogeološki parametri za definiranje toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo .....	135
6.1.1. Nestabilnost područja u okolini brane Valići .....	137
6.1.2. Geotehničke značajke uzoraka tla na klizištu Grohovo .....	137
6.1.3. Laboratorijska ispitivanja uzoraka s područja klizišta Grohovo.....	139
6.1.4. Hidrološke i hidrogeološke značajke uzoraka materijala na klizištu Grohovo	142
6.2. Simulacijski prikazi u SOLFEC simulacijskom programu (klizište Grohovo) .	144
6.2.1. Scenarij 1.....	144
6.2.2. Scenarij 1.1.....	145
6.2.3. Scenarij 1.2.....	146
6.2.4. Scenarij 1.3.....	147
6.2.5. Scenarij 2.....	149
6.2.6. Scenarij 3.....	150
6.2.7. Scenarij 4.....	151
6.3. SPH 2D simulacije na klizištu Grohovo .....	155
6.3.1. Numeričke simulacije i analiza rezultata .....	155
6.3.2. Konačna razmatranja.....	174
6.4. SPH 2D simulacije mogućih scenarija na području klizišta Grohovo.....	176
6.4.1. Scenarij 1.....	176
6.4.2. Scenarij 2.....	179
6.4.3. Scenarij 3.....	180
6.4.4. Scenarij 4.....	183
6.4.5. Scenarij 5.....	184
6.4.6. Scenarij 6.....	186
6.4.7. Scenarij 7.....	187
6.4.8. Scenarij 8.....	189
6.4.9. Scenarij 9.....	190
<b>7. ANALIZA ELEMENATA RIZIKA - DISKUSIJA I SMJERNICE ZA BUDUĆI RAD .....</b>	<b>193</b>
7.1. Kvantitativna analiza rizika .....	198

7.1.1. Upravljanje rizikom od posljedica klizišta.....	202
7.1.2. Ulazni podaci za analizu rizika klizišta.....	205
7.1.3. Procjena opasnosti od klizišta .....	209
7.1.4. Predložene metode za kvantitativnu analizu rizika od posljedica klizišta .....	210
7.1.5. Analiza rizika .....	210
7.2. Rizik od pojave toka krupnozrnatog materijala.....	211
7.2.1. Doseg toka krupnozrnatog materijala .....	212
7.2.2. Kriteriji mapiranja hazarda od posljedica toka krupnozrnatog materijala.....	213
7.3. O hazardu i riziku od klizišta i poplava na području srednjeg i donjeg toka Rječine .....	216
7.3.1. Upravljanje rizicima na srednjem i donjem dijelu sliva Rječine .....	218
7.3.2. Analiza mogućih elemenata pri riziku .....	221
7.3.3. Sustav za rano uzbunjivanje.....	225
7.4. Promatranje poplava i poplavnih zona.....	226
7.4.1. Karta upozorenja od poplava .....	226
7.4.2. Sustavni pristup problematici upravljanja rizicima od poplava.....	228
7.4.3. Upravljanje rizicima od poplava .....	229
7.4.4. Procjena rizika od poplava .....	231
7.4.5. Analiza rizika .....	233
7.4.6. Štetne posljedice od poplava.....	233
<b>8. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>235</b>
<b>9. LITERATURA .....</b>	<b>239</b>
9.1. Popis objavljenih radova.....	239
9.2. Ostala neobjavljena dokumentacija .....	252
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>255</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>258</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>264</b>
<b>POPIS OBJAVLJENIH RADOVA .....</b>	<b>265</b>

## **1. UVODNO**

### **1.1. Problemski okvir istraživanja**

U obalnom području Hrvatske klizanju tla su najviše podložne padine u Primorsko-goranskoj županiji. Klizište Grohovo, zajedno sa susjednim klizištima predstavlja opasnost od mogućih posljedica formiranja krupnozrnatih (debritnih) i sitnozrnatih (blatnih, muljevitih) tokova budući da takve katastrofalne prirodne pojave potencijalno mogu ugroziti srednji i donji tok Rječine, branu Valići i urbanizirani dio grada Rijeke - područje Delte i Školjića. Konceptijski model za istraživanje uspostavljen je prema općim zahtjevima za zoniranje hazarda (Carrara i sur., 1992.), koji uključuju: (1) kartiranje klizišta na području istraživanja, (2) identifikaciju i kartiranje skupa geoloških, morfoloških i antropogenih faktora (vrsta stijene, geološka građa, hidrogeološki uvjeti, geometrija padine i pokrov zemljišta) koji su neizravno povezani s nestabilnostima padina, (3) procjenu relativnog utjecaja ovih faktora na nastanak klizišta i (4) klasifikaciju područja na domene različitih stupnjeva hazarda.

Problemski okvir istraživanja u ovom radu temelji se na izradi 2D numeričkih modela za propagaciju tokova krupnozrnatog nekoherentnog i sitnozrnatog koherentnog materijala, te posljedično analiziranje utjecaja tih pojava na okoliš, ljude i materijalna dobra. Pritom je osnovno sagledavanje usmjereno prema mogućem formiranju toka krupnozrnatog materijala koji može nastati miješanjem klizne mase s formiranih klizišta u blizini sela Grohovo i velikih preljevnih količina vode uslijed jakih intenziteta oborina. Također je razmatrano moguće rušenje brane Valići i propagacija tako formiranog poplavnog vala. U slučaju takvog scenarija moguća je pojava formiranja toka sitnozrnatog materijala, točnije propagacija mješavine vode i suspendiranog sitnozrnatog materijala koji se nalazi u akumulaciji Valići ili dolazi u nju s okolnih padina i pritoke Sušice. U posljednjih nekoliko godina česte su pojave odrona i klizanja flišne mase u okolici akumulacije Valići. Stoga je unutar problemskog okvira istraživanja također razmatran scenarij mogućeg ulaska određene količine klizne mase koja bi tom prilikom unutar akumulacije formirala plimni val, koji bi se nakon preljevanja preko krune brane dalje propagirao prema urbanom dijelu grada Rijeke. Posljedice takvog scenarija bile bi katastrofalne, jer se takve pojave redovito javljaju pri intenzivnim oborina u zimskom periodu kada je akumulacija u potpunosti ispunjena vodom.

### **1.2. Cilj i sadržaj rada**

Cilj ovog doktorskog rada je analiza i utvrđivanje mogućih katastrofalnih scenarija povezanih s propagacijom poplavnog vala i formiranjem tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog

materijala na području srednjeg i donjeg toka Rječine, pri čemu su najosnovni parametri koji na to utječu geološka građa i stanje površinskih i podzemnih voda, te učestalost i jakost oborina koje su prethodile klizanju. Svi ti parametri mogu ukazati na uzroke i početak klizanja na kosinama izgrađenim u flišu i nastanak toka krupnozrnatog materijala (eng. *Debris flow, DF*) i sitnozrnatog materijala (eng. *Mud flow (MF), Earth flow (EF)*). Osnovni cilj doktorskog rada bila je izrada 2D numeričkih modela korištenjem meteoroloških, hidroloških i geoloških podataka s analiziranog područja klizišta Grohovo te provedba simulacija za različite scenarije propagacije poplavnih vodnih valova, kao i interakcija kretanja nevezanog krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala zajedno s vodom po koritu Rječine, sve do urbanog dijela grada Rijeke, uključujući i moguće scenarije posljedica tih aktivnosti. Paralelno s tim, svrha i cilj doktorskog rada je simuliranje propagacije velikih vodnih valova koritom Rječine. Iako su na širem ispitivanom području klizišta Grohovo u više navrata zabilježena klizanja s velikim količinama kliznog materijala, nikada u povijesti nije zabilježeno formiranje veće propagacije toka krupnozrnatog materijala.

Dodatni cilj rada predstavlja proširenje postojećeg simulacijskog okvira baziranog na SPH (eng. *Smooth Particle Hydrodynamics*) metodi implementiranjem erozijskih zakona po Egashiri, Hungru i Voellmyu, kao i primjena novog erozijskog zakona modificiranog na temelju prijedloga Thomasa Blanca. U radu je također dan osvrt na glavne karakteristike procesa tečenja krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala sa ciljem da se ukaže na relevantne parametre kojima se opisuju ti procesi.

Doktorski rad je vezan za istraživanja provedena u sklopu hrvatsko-japanskog bilateralnog znanstvenog projekta pod nazivom „*Risk Identification and Land – Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia*“ kao dio monitoringa i istraživanja na području sliva Rječine (Mihalić i Arbanas, 2012.).

Jedan od glavnih ciljeva tog projekta bila je analiza geohazarda i razvoj smjernica za primjenu rezultata projekta u sustavu prostornog uređenja. Projektne aktivnosti su se provodile na pilot područjima koja se nalaze u blizini grada Rijeke (sliv vodotoka Rječine s uključenim klizištem Grohovo, sliv vodotoka Dubračine s uključenom erozijskom bazom bujičnog vodotoka Slani potok, te područje sliva oko Mošćeničke Drage s bujicom koja formira plažu u centru grada). U okviru projekta provedeno je više grupa istraživanja i analiza: 1) identifikacija i kartiranje klizišta, 2) sustavni složeni monitoring klizišta, 3) ispitivanje fizičkih i mehaničkih svojstava tala i stijena, 4) modeliranje dinamike klizanja tla, 5) modeliranje propagacije poplavnih valova i blatnih tokova; 6) kontinuirani monitoring toka sedimenata, 7) zoniranje osjetljivosti i hazarda klizanja, 8) uspostavljanje sustava ranog

upozoravanja i 9) razvoj mjera ublažavanja rizika kroz sustav prostornog uređenja. Aktivnosti projekta organizirane su u četiri radne grupe (Mihalić i Arbanas, 2012.).

U okviru Radne grupe za klizišta (Working group 1, WG1) provedene su aktivnosti sustavnog složenog monitoringa (uspostava sustava za rano uzbunjivanje) na klizištu Grohovo u realnom vremenu, laboratorijske analize uzoraka tla te numeričke analize ponašanja klizišta u statičkim i dinamičkim uvjetima na odabranim klizištima. Rezultati mjerenja i analiza su korišteni kao ulazni podaci u numeričkim modelima za opis mogućih scenarija tečenja poplavnih valova i bujičnih tokova, te pojava mogućih hazarda na ljudske živote i materijalna dobra. Cilj radne grupe WG1 bila je uspostava metodologije sustavnog složenog monitoringa u realnom vremenu aktivnih značajnih klizišta u Hrvatskoj na osnovi postojećih rezultata istraživanja dopunjenih novim in situ i laboratorijskim istraživanjima i analizama ponašanja klizišta (Sassa i sur., 2004.).

U okviru Radne grupe za poplave i blatne tokove (WG2) provedene su aktivnosti sustavnog opažanja meteoroloških i hidroloških parametara na predviđenim slivnim područjima i koritima vodotoka (rijekama, bujicama i bujičnim područjima) u realnom vremenu, numeričke i hidrološke analize mjerenih parametara, te izrada simulacijskih modela poplava, tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na analiziranim područjima za potrebe izrade sustava ranog upozoravanja na spomenute pojave, a sve prilagođeno hidrološkim i geološkim uvjetima u Hrvatskoj. Neophodna mjerna i istraživačka oprema, numerički programi, te oprema za sustave meteoroloških i hidroloških opažanja osigurana je od strane Japanske Vlade u sklopu hrvatsko-japanskog znanstveno-istraživačkog bilateralnog projekta (Mihalić i Arbanas, 2012.; Mihalić i sur., 2012a; Arbanas i Mihalić, 2012a). Laboratorijski istražni radovi koji su provedeni u Japanu (Ujigawa Open Laboratory, Kyoto Sveučilište) obuhvatili su izradu fizikalnih modela i simulaciju tečenja za različite scenarije pojava poplava i tokova sitnozrnatog materijala. Za dio istraživačkih aktivnosti na klizištu Grohovo instaliran je složeni integrirani sustav geodetskog i geotehničkog monitoringa u realnom vremenu (Arbanas i sur., 2011.; 2012c). Osim prikupljenih terenskih podataka korišteni su i povijesni nizovi vremenskih serija meteoroloških, hidroloških, geoloških i drugih podataka.

Aktivnostima Radne grupe 3 (WG3) obuhvaćen je razvoj inventara klizišta pomoću tehnika daljinskih istraživanja (Harp i sur., 2010.), te razvoj metoda analize i zoniranja hazarda klizanja (Van Westen i sur., 2008.; Fell i sur., 2008a; Mihalić i Arbanas, 2012.).

Doktorski rad se sastoji od sažetka rada na hrvatskom i engleskom jeziku, sadržaja, devet poglavlja, popisa tablica i slika korištenih u radu, te životopisa i popisa objavljenih

znanstvenih i stručnih publikacija doktoranda. U prvom poglavlju, UVODNO, dan je opis problemskog okvira istraživanja, ciljevi i sadržaj rada, primjene modelskih pristupa i istraživačkih metoda, dosadašnje spoznaje hidroloških i geoloških značajki šireg područja klizišta Grohovo, te dosadašnji rezultati vlastitih istraživanja. Drugo poglavlje, PREGLED DOSADAŠNJIH HIDROGEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA I ANALIZA STANJA SLIVA VODOTOKA RJEČINE, daje detaljan opis trenutnog hidrološkog i geološkog stanja na srednjem toku vodotoka Rječine. U trećem dijelu rada, PROCJENA NASTANKA TOKA KRUPNOZRNATOG I SITNOZRNATOG MATERIJALA NA SREDNJEM TOKU RJEČINE, prikazana je teorijska osnova procesa i značajke toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, dok su u četvrtom poglavlju, METODOLOGIJA, dani prikazi numeričkih modela za opis toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, uz relevantne jednadžbe i ulazne modelske parametre. Dan je opis SPH metode i odgovarajućeg simulacijskog okvira SPH računalnog koda, te SOLFEC simulacijskog programa na temelju kojih je u šestom poglavlju, SIMULACIJE TOKA KRUPNOZRNATOG I SITNOZRNATOG MATERIJALA NA SREDNJEM DIJELU TOKA RJEČINE (KLIZIŠTE GROHOVO), prikazano i analizirano nekoliko numeričkih simulacija (mogućih katastrofalnih scenarija) propagacije tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na ispitivanom području. Prije samih prikaza mogućih potencijalnih scenarija na području srednjeg toka Rječine dana je kratka analiza geomorfoloških (geotehničkih) i hidrogeoloških parametara. U petom poglavlju, IMPLEMENTACIJA EROZIJSKIH ZAKONA U SPH 2D SIMULACIJSKI PROGRAM, opisani su najznačajniji erozijski zakoni korišteni u praksi za opis tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, te je ujedno predložen i novi erozijski zakon koji je implementiran u SPH 2D simulacijski program za opis propagacije toka krupnozrnatog materijala i erozijsko djelovanje uzduž korita Rječine. U sedmom poglavlju, ANALIZA ELEMENATA RIZIKA – DISKUSIJA I SMJERNICE ZA DALJNI RAD, predložena je metodologija i smjernice za procjenu hazarda i mjere za ublažavanje moguće pojave toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na području vodotoka Rječine na karakterističnoj dionici od akumulacije Valići do urbanog dijela grada Rijeke. U osmom poglavlju, ZAKLJUČAK, dan je osvrt na analizu dobivenih rezultata i zaključna razmatranja proizašla iz provedenih simulacijskih prikaza i implementiranja novog erozijskog zakona. Na kraju rada, u devetom poglavlju, LITERATURA, dan je popis korištene literature koja je bila potrebna u istraživanju doktorskog rada.

### **1.3. Primjene modelskih pristupa i istraživačkih metoda**

Istraživanje je temeljeno na mjerenim ulaznim podacima sakupljenim na širem području u okolici klizišta Grohovo. Baza podataka sadrži osnovne informacije o postojećem stanju područja klizišta Grohovo i vodotoka Rječine, uključujući njihovu veličinu, lokaciju i povijest, sve dostupne podatke o prethodnim istraživanjima (fotografije, povijesne spise, izvještaje, povratne analize područja i sl.), te podatke u realnom vremenu iz ugrađenih mjernih uređaja za praćenje promjena na predmetnim lokacijama. Metode istraživanja su temeljene na mjerenjima i analizama površinskih i podzemnih voda na području klizišta Grohovo, 2D numeričkom modeliranju (primjena simulacijskih okvira na bazi SPH metode i SOLFEC simulacijskog programa), te GIS tehnologiji i TRIGRS hidrološkom modelu (eng. *A Fortran program for Transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis*). Na osnovi ulaznih hidroloških i geoloških podataka kreirani su numerički modeli tečenja nevezanog krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Pri izradi numeričkih modela primijenjene su najčešće korištene empirijske metode erozijskih zakona (Hungar, Egashira, Voellmy), kao i implementacija novog erozijskog zakona (Hungar, 1990a, 1990b, 1995., 1997.; Blanc, 2008.). Uz pomoć dobivenih simulacijskih prikaza toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala analizirane (kvantificirane) su vrijednosti volumena deponiranog krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, brzine napredovanja toka, dubine deponiranog materijala, kao i doseg krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na analiziranom području. Odnosi modelskih parametara omogućuju uspostavljanje korelacija između geomorfoloških i hidrogeoloških uvjeta, te specifičnosti terenskih uvjeta s parametrima tla karakterističnim za nastanak toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Definiranjem kritičnih geomorfoloških i hidrogeoloških parametara tla koji uvjetuju gore navedena tečenja na flišnom području omogućena je procjena hazarda i mjere za njegovo ublažavanje.

### **1.4. Dosadašnje spoznaje hidroloških i geoloških značajki šireg područja klizišta**

#### **Grohovo**

Neotektonski pokreti, potaknuti od strane subdukcije Jadranske ploče, izazivaju nepravilna slijeganja dolinskog dna i nestabilnosti okolnog terena na širem području grada Rijeke (Blašković, 1997.). Ti su procesi dodatno potaknuti gravitacijskim klizanjima vapnenačkih blokova na živoj flišnoj stijeni. Vodotok Rječina, u čijem slivu je klizište Grohovo najznačajniji je vodotok na obali Kvarnerskog zaljeva. Brana i akumulacija Valići, koje se nalaze u srednjem dijelu sliva Rječine, nalaze se neposredno uzvodno od klizišta Grohovo. Područje doline između akumulacije Valići i ulaska u kanjonski dio vodotoka

Rječine predstavlja područje s najvećim rizikom od nestabilnosti u blizini grada Rijeke (Benac i sur., 2002., 2005a, 2005b, 2010., 2014.). Potencijalne posljedice uključuju zatrpavanje korita, rušenje prirodno formiranih brana, kao i formiranje poplavnog vala nakon proloma brane Valići i njegova propagacija do ušća Rječine u more (Oštrić i sur., 2011.; Vivoda i sur., 2012.; Žic i sur., 2013b, 2015.). Dolina vodotoka Rječine se nalazi u seizmotektnoskom aktivnom području, pa je stoga potrebno uzimati u obzir i posljedice seizmičkih aktivnosti (Prelogović i sur., 1995.; Herak i sur., 1996.).

Klizište Grohovo se nalazi na sjevernoj padini unutar doline vodotoka Rječine, sjeverno od grada Rijeke. Šire područje u blizini klizišta je geomehanički nestabilno. Ukupna veličina klizišta procjenjuje se na oko 18 ha. Flišna stijenska masa pokazuje slabu propusnost. Cijelo područje je obilježeno mrežom malih potoka koji ugrožavaju stabilnost padina i značajno povećavaju reprodukciju nanosa (sedimenata) u slivu vodotoka Rječine (Benac i sur., 2002.; 2005a).

Geotehnička istraživanja na području klizišta Grohovo pokrenuta su nakon pojave klizanja iz 1996. godine, a bila su podijeljena u dvije faze. Prva faza započela je 1998., a sastojala se od topografskih i geofizičkih istraživanja i inženjerskogeološkog mapiranja (Benac i sur., 1999.). Druga faza koja je započela 1998. bila je usmjerena na istraživanja samog tijela klizišta, a uključivala je pet novih plitkih seizmičkih profila i sedam istražnih bušotina. Inklinometričke cijevi za detektiranje deformacija tla bile su ugrađene u dvije glavne bušotine, dok su u preostale bušotine instalirani piezometri. U toj je fazi provedeno električno sondiranje u zoni kretanja mega-blokova kako bi se identificirali kontaktni položaji između vapnenačkih blokova na vrhu padine i flišne stjenke mase (Benac i sur., 2000.). Tom je prilikom uspostavljeno 23 mjernih točaka za geodetski monitoring.

U sklopu istraživanja na području klizišta Grohovo provedena je usporedba topografskih karata nagiba padina od 1981. do 1998. iz kojih su analizirane promjene u nagibu morfologije s vidljivim pomacima. Analiza provedena na geodetskim mjernim točkama u periodu od pet godina (od prosinca 1998. do siječnja 2004.) pokazala je pomake na dijelu klizišta i vapnenačkih mega-blokova. Na temelju mjerenja inklinometara, tijelo klizišta se može smatrati relativno stabilnim, iako su gornji dio tijela klizišta u deluvijalnom materijalu i izolirani vapnenački blokovi još uvijek vrlo aktivni i nestabilni.

Ispitivanja na području srednjeg toka Rječine ukazuju na složena klizišta i brojne pojedinačne pokrete koji se mogu identificirati kao početna (primarna) klizišta, klizišta u deluvijalnim materijalima, bočne odrone zemlje u materijalu tla, reaktivirana klizišta, klizanje odvojenih vapnenačkih blokova i odrone sa vapnenačkih stijena. Na temelju geoloških i



geofizičkih istraživanja, te mapiranja, procijenjena je debljina klizne mase. Geofizičkim istraživanjima se pokazalo da je kontakt vapnenca i fliša puno dublji nego što se prije pretpostavljalo (Benac i sur., 2000.). Za razliku od vapnenačkih stijena na vrhu padina, flišna stijenska masa je gotovo u potpunosti pokrivena siparišnim materijalom, a pod utjecajem djelovanja atmosferilija, vrlo trošna i nestabilna.

Na temelju rezultata hidrogeoloških ispitivanja koje su provedena od strane Instituta građevinarstva Hrvatske (IGH Rijeka) i Hrvatskih voda sredinom 80-tih godina prošlog stoljeća može se konstatirati da tok podzemne vode u stijenskoj masi na području klizišta Grohovo znatno varira, od vrlo brzog do sporog kretanja. U ovisnosti o intenzitetu oborina dolazi do promjene količina vode u flišnoj zoni, te se tek nakon određenog broja dana formira značajni podzemni tok. Ispitivanjima je utvrđeno da postoji protok vode na granici stijenske podloge stijene i poremećenog nestabilnog materijala uz liniju s paleo-reljefom (Benac i sur., 1999.). Također je utvrđeno da podzemne vode u proljetnom periodu izviru u podnožju samog klizišta nakon razdoblja intenzivne oborine. U periodu od studenog 1999. do listopada 2003. izvršena su mjerenja kolebanja razina podzemnih voda na klizištu Grohovo, da bi se mjerenja kontinuirano nastavila od lipnja 2011. u sklopu hrvatsko-japanskog znanstveno-bilateralnog projekta (Žic i sur., 2013a).

U sklopu istog projekta uspostavljen je monitoring ponašanja kliznog tijela, uzimani su uzorci i definirani potencijalni mogući pokretači novih klizanja i sagledavani su hazardi i rizici od potencijalnih klizišta. U sklopu hidroloških istraživanja kontinuirano su prikupljeni meteorološki i hidrološki podaci u svrhu izrade 2D numeričkih modela za simuliranje propagacija velikih vodnih valova i toka krupnozrnatog materijala za slučaj pojave klizanja i odrona velike količine krupnozrnatog materijala u korito Rječine.

### **1.5. Dosadašnji rezultati vlastitih istraživanja**

U sklopu istraživanja na doktorskom radu proizašlo je nekoliko znanstvenih radova koji puno detaljnije opisuju pojedine elemente dane u ovom radu. Tako su povijesni podaci o katastrofalnim klizištima i pojavama velikih poplavnih događaja koja su se u prošlosti pojavljivala na slivu Rječine detaljno opisani u radovima Žic i sur. (2012a; 2014.), gdje su dodatno analizirani uzroci i posljedice prirodnih pojava kojih je na području sliva Rječine bilo najviše sredinom 18. i krajem 19. stoljeća.

Monitoring, metode ispitivanja, obrada i analiza hidroloških podataka na području srednjeg toka Rječine provedena je u sklopu hrvatsko-japanskog znanstvenog projekta u periodu od 2011. do 2014. godine, a opisani su u radu Žic i sur. (2013a).

Za potrebe procjene nastanka tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala bilo je potrebno izraditi numeričke modele propagacije takvih tipova tečenja na dijelu vodotoka Rječine od akumulacije Valići do urbanog dijela grada Rijeke. Izrađeni su numerički modeli primjenom SOLFEC simulacijskog programa za područje bujičnog vodotoka Slani potok i SPH simulacijskim programom za srednji i donji tok Rječine, kao i konkretno za područje klizišta Grohovo. Opis matematičkog i numeričkog modela, te proizašli rezultati objavljeni su u radovima Žic i sur. (2012b, 2012c, 2014., 2015.). Opis SPH 2D numeričkog modela, njegova verifikacija, numeričke simulacije i izlazni rezultati za područje srednjeg i donjeg toka Rječine dani su u radovima Žic i sur. (2013b, 2015.). U radovima je dana diskusija o mogućnostima nastanka tokova krupnozrnatog materijala na istoimenom području kao i moguće katastrofalne posljedice uzrokovane tim prirodnim pojavama.

U sklopu hrvatsko-japanskog bilateralnog projekta, a za potrebe dobivanja ulaznih geoloških parametara za kreiranje numeričkih modela propagacije toka krupnozrnatog materijala i njihovu verifikaciju izrađen je fizikalni model propagacije toka krupnozrnatog materijala u Ujigawa hidrotehničkom laboratoriju početkom 2013. godine. Pritom je izrađeno nekoliko fizikalnih modela s različitim frakcijama krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala pri različitim kutevima nagiba hidrauličkog žlijeba kroz koji se propagira takav materijal. Ukupno je izrađeno 20-tak različitih fizikalnih modela, a rezultati provedenih eksperimenata su objavljeni u radovima Žic i sur. (2013c, 2013d).

## **2. PREGLED DOSADAŠNJIH HIDROGEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA I ANALIZA STANJA SLIVA VODOTOKA RJEČINE**

### **2.1. Morfogeneza vodotoka Rječine**

Prvi poznati povijesni zapis o vodotoku Rječine datira iz 2. stoljeća naše ere. Vodotok se u povijesti nazivao Tarsis (Tarsus), Pflaum, Fluvis (Fluvius), Reka (Recha) i Fiumara, a zabilježena su i imena Aeni (Oeni) i Tarsa (Palinić, 1999.). U dosadašnjim geološkim istraživanjima Rječina je prikazana kao pritok jezera koje je zauzimalo prostor današnjeg Grobničkog polja. Jezero je bila potopljena uvala u kršu bez površinskog otjecanja. Antecedentnu dolinu od jezera do ušća u more vodotok je formirao krajem Pleistocena (Lorenz, 1860.). Tadašnje ušće Rječine u more bilo je rijas (zaljev nastao potapanjem riječnog ušća) da bi njegovo oplićavanje i preobrazba u deltu počeli prije dva do tri tisućljeća (Šikić, 1975.). Utoka Rječine u more nalazi se u samom centru grada Rijeke i stoljećima se koristilo kao pristanište za brodove (Matejčić, 1988.; Dubravić, 2001.).

Korito Rječine ima bujični karakter, koji karakteriziraju kanjoni u stijeni i klizišta u flišu, naročito izražena u njegovu srednjem dijelu, kod mjesta Grohovo i Valići. Geološku građu slivnog područja vodotoka uglavnom čine vapnenci i dolomiti koji su vremenski nastali u razdoblju Jure, Krede i Eocena, dok samo uski pojas u zapadnom dijelu sliva (područje Orehovice) pripada Tercijaru (IGI, 1997.). Uski kanjonski dio Rječine (nizvodno od mosta Pašac) građen je pretežno od vapnenca, a na mjestima proširenja od eocenskih pješčenjaka (IGI, 1997.; Biondić i sur., 1978.). Prema mišljenju geologa Loczyja korito Rječine je nastalo propagacijom velikog vodnog vala nastalog pucanjem barijere na akumulaciji ledenjačkog tipa u zoni Grobničkog polja (Palinić, 1999.; Rubinić i Sarić, 2005.).

U slivu vodotoka Rječine nekoć je postojalo nekoliko značajnih mjernih stanica za utvrđivanje režima toka, te mjerenje protoka i vodostaja (Slika 2.1.). Međutim, s vremenom su se pojedine mjerne stanice ukidale što je dovelo do otežane mjerodavne hidrološke analize, (Knežević, 2001.). Na temelju hidroloških podataka u periodu od 1987.-1994. godine Rubinić (1997.) i Ožanić (1999.) su analizirali protoke na postojećim mjernim stanicama (taj period se smatra razdobljem najpovoljnijeg istovremenog praćenja). Prema tim istraživanjima srednji godišnji protok za postaju Izvor Rječine iznosi 5,73, Martinovo Selo 6,05, Grohovo 9,24, Zvir 4,39 i Sušak 13,3 m<sup>3</sup>/s. U sklopu ovog doktorskog rada značajna je mjerna postaja Grohovo kao mjerodavna postaja za promatranje dnevnih, mjesečnih i godišnjih protoka i razina vode u Rječini. Ona je započela sa svojim radom 1979. godine. Kota „0“ vodokaza se nalazi na

194,32 m n.m. Vodokaz (jednodjelan vertikalni raspon 0-400 cm) i limnigraf se nalaze na desnoj obali vodotoka, nedaleko pješačkog mosta u blizini sela Grohovo.



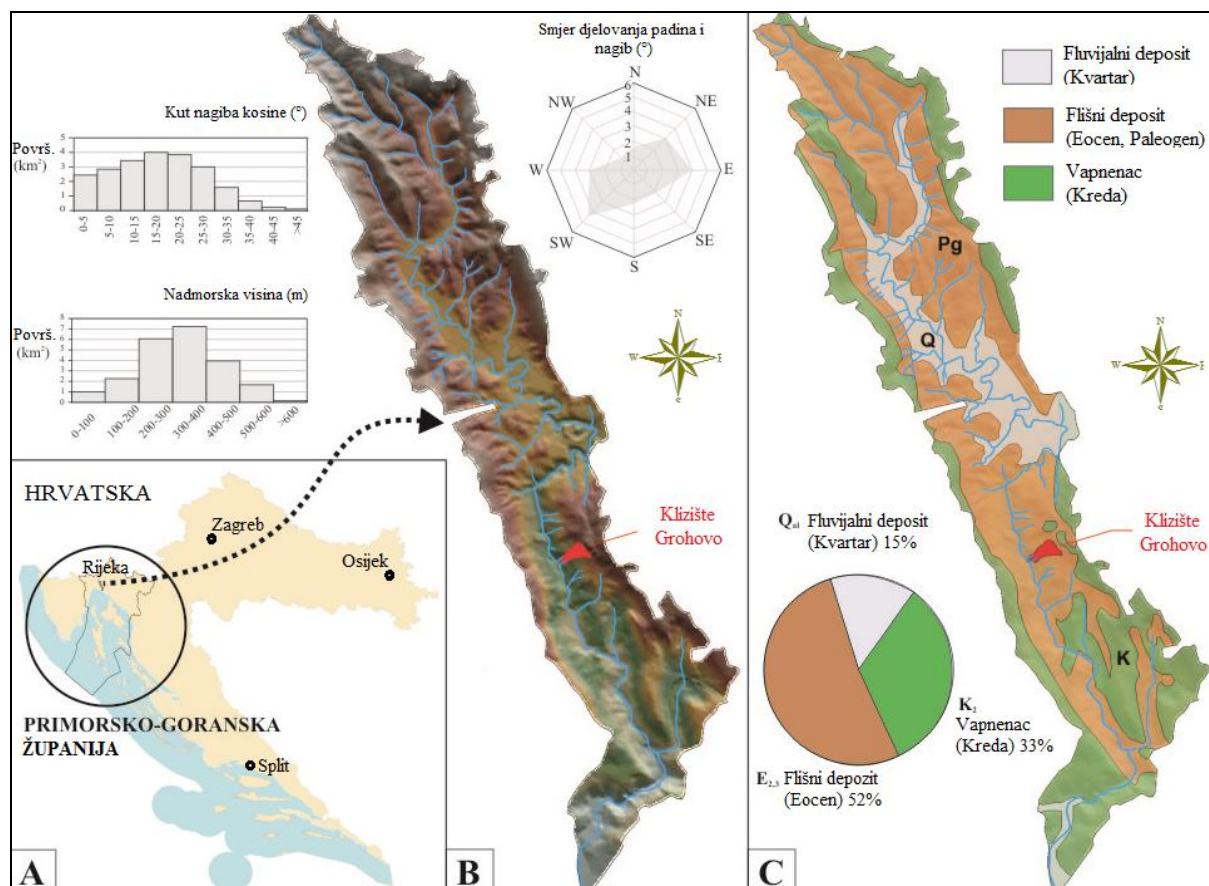
**Slika 2.1.** Situacijski prikaz sliva vodotoka Rječine sa naznačenim vodomjernim postajama u slivu (Knežević, 2001.)

Vodotok presušuje vrlo često i u svakom dijelu godine, jer HE Rijeka ( $Q_{instal.}=21 \text{ m}^3/\text{s}$ ) uzima većinu protoka. Hidrotehničke zahvate na vodotoku Rječina, koji su režimom otjecanja vode znatno izmjenjeni, mogu se podijeliti u dvije skupine. Prvu skupinu čine hidrotehnički objekti namijenjeni stabilizaciji protoka, a drugu hidrotehnički objekti namijenjeni stanovništvu i gospodarstvu. Hidrotehnički objekti prve skupine podignuti su kao brane za retenciju protoka (Zala, Sušica) ili kao akumulacije za održivost ekosustava vodotoka Rječine. Zbog problema zasipanja luke nanosima iz poplava prelocirano je 1852.-1855. godine i ušće Rječine u zonu Brajdice. Dotadašnji najdonji dio toka Rječine postao je mrtvi rukavac (tzv. Mrtvi kanal).

## 2.2. Geološka struktura i geomorfološke značajke sliva Rječine

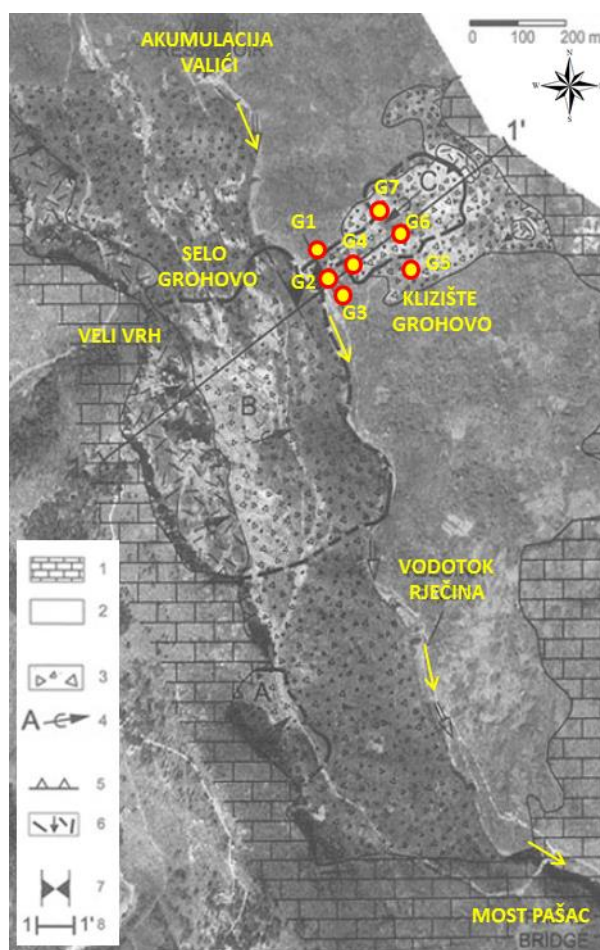
Vodotok Rječina svojim tokom prolazi područjem dviju različitih geomorfoloških jedinica koje imaju i različitu geološku građu. Izvor vodotoka Rječine je smješten na hipsometrijskoj visini od 325 m n.m., podno strme vapnenačke litice na SI kontaktu siliciklastičnih i karbonatnih stijena. Gornji i središnji dio doline Rječine, do ulaza u kanjonski dio (kod naselja Pašac), oblikovani su u relativno uskoj zoni paleogenskih

siliciklastičnih stijena, koja se sužava prema JI (Slika 2.2.). Ta je zona s JZ i SI strane uokvirena vapnenačkim stijenama paleogena i gornje krede (Šikić i sur., 1972.; Šikić i Pleničar, 1975.) i dio je dominantne morfostrukturne jedinice koja se proteže od SZ prema JI pravcem: Ilirska Bistrica - Klana - dolina Rječine - Sušačka Draga - Bakarski zaljev - Vinodolska dolina (Velić i Vlahović, 2009.).



**Slika 2.2.** Pregledna geološka karta sliva vodotoka Rječine (modificirano prema Mihalić i Arbanas, 2012.): A) geografski položaj; B) karta visina izvedena iz digitalnog elevacijskog modela terena, 25 m x 25 m. Histogram prikazuje distribuciju nadmorskih visina i kuteva nagiba izračunatih iz digitalnog elevacijskog modela terena. Ruža dijagram prikazuje distribuciju orijentacije padina (u km<sup>2</sup>); C) Geološka karta

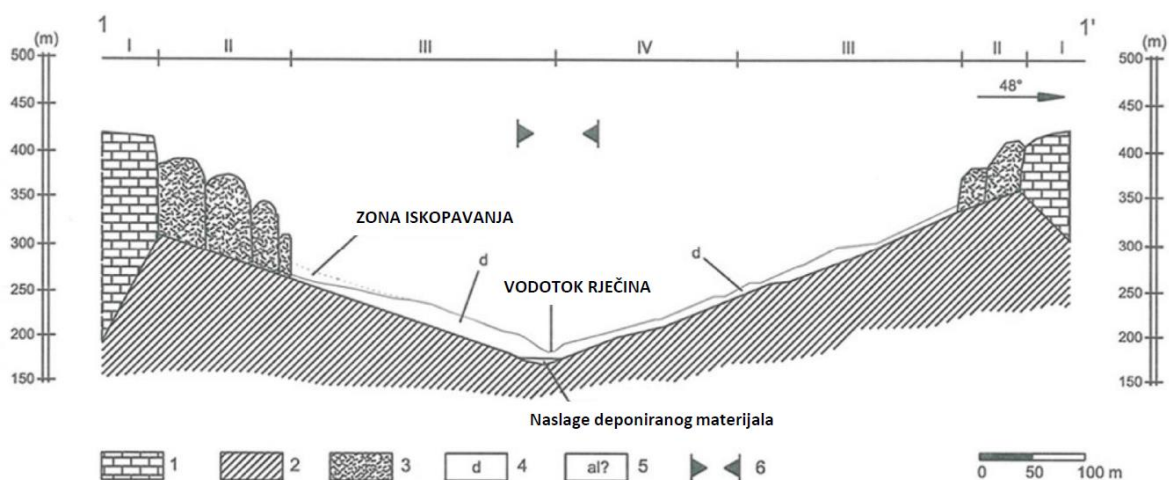
Kinematika strukturnih elemenata doline Rječine kao i cijele spomenute morfostrukturne jedinice svodi se, u osnovi, na odnos relativno krutih karbonatnih stijena i relativno duktilnih siliciklastičnih stijena tijekom istodobnog deformiranja. Na vrhu obje padine nalaze se kredni i paleogenski vapnenci, a paleogenske siliciklastične stijene ili fliš izgrađuju hipsometrijski niže dijelove padina, uključivši i dio doline (Slika 2.3.). Dolina Rječine dio je riječkog epicentralnog seizmičkog područja gdje su tijekom posljednja dva tisućljeća zabilježeni potresi magnitude do  $M=6$  prema Richterovoj ljesvici (Herak i sur., 1996.).



**Slika 2.3.** *Pojednostavljena inženjerskogeološka karta doline vodotoka Rječine: 1 - karbonatne stijene (vapnenci Krede i Paleogena); 2 - flišni depozit (Paleogeni muljeviti lapor, škriljac i pješčenjak) prekriveni sitnozrnatom depozitom sa padina; 3 - flišni depozit prekriven talusnim materijalom nastalim odronjavanjem velikih stijenskih blokova; 4 - pokreti stjenke mase u 20. stoljeću: A - 1979.; B - 1908.; C - 1893.; 5 - pukotinski rascjepi; 6 - izolirani stijenski blokovi na flišu; 7 - područje od visoke opasnosti; 8 - inženjerskogeološki presjek, G1, G3, G5, G7-piezometri*

Siliciklastična ili flišna osnovna stijena odlikuje se velikom litološkom heterogenošću zbog čestog vertikalnog i lateralnog izmjenjivanja raznovrsnih litoloških članova kao što su lapori, siltiti, šejlovi i sitnozrnati pješčenjaci (Benac i sur., 2005a). Flišna stijenska masa je slabe vodopropusnosti, podložna raspadanju i eroziji. Kao posljedica toga je stvorena, na osnovnoj stijeni-flišu, zona fizičko-kemijskog raspadanja sastavljena od mješavine gline, praha, pijeska i odlomaka do blokova pješčenjaka. S vremenom su krupnozrnati fragmenti podrijetlom iz sipara pomiješani s glinom iz zone raspadanja osnovne stijenske mase, pa su nastale potencijalno nestabilne padinske tvorevine višemetarske debljine (Slika 2.4.). Na terenu su takve geološke građe, upojnost i vodopropusnost male pa je oblikovana mreža povremenih vodotoka koji erodiraju padine i bitno pojačavaju produkciju nanosa u slivu Rječine.





**Slika 2.4.** Inženjerskogeološki presjek doline vodotoka Rječine: 1 - karbonatne stijene (vapnenci Krede i Paleogena); 2 - fliš (Paleogenski muljeviti lapor, škriljac i pješčenjak); 3 - izolirani stijenski blokovi; 4 - depozit sa padina; 5 - moguće aluvijalne naslage; 6 - područje visokog hazarda; I - raspadanje stijenske mase; II - pokreti izoliranih stijenskih blokova; III - pokreti depozita krupnozrnatog materijala; IV - početna klizanja (Benac i sur., 2005a, 2005b)

Tereni oblikovani u vapnenačkim stijenama imaju tipična krška obilježja. Zbog toga u njima gotovo da nema površinskih vodotoka. Međutim, podzemna cirkulacija vode u krškom vodonosniku je vrlo razvijena i složena. To utječe na promjenu hidrološkog režima Rječine u smislu dodatnog prihranjivanja i gubitaka vode uzduž njenog korita (Biondić i sur., 1978.).

Prosječna širina doline je oko 2 km, a vapnenačka uzvišenja s obje strane mjestimice prelaze visinu od 500 m n.m. Nizvodno od Martinovog Sela završava naplavna ravnica, a tok Rječine naglo mijenja smjerove sve do akumulacije kod naselja Valići. Uzvodno se od početka akumulacije u Rječinu ulijeva njezin najveći pritok, Sušica. Koritom Sušice dolaze periodične vode s prostrane krške depresije, Grobničkog polja, koje je pokriveno fluvioglacialnim sedimentima. Isti su prahovito-pjeskoviti u zapadnom i šljunkoviti u istočnom dijelu polja (Šikić i sur., 1972.; Šikić, 1975.).

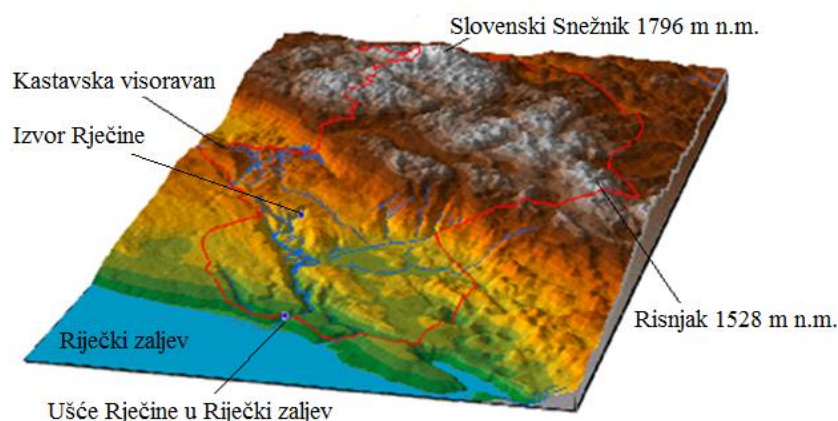
Između akumulacije Valići i kanjonskog dijela dolina Rječine se pruža u smjeru SZ-JI i širine je 0,8 do 1,5 km. Vrhovi dosežu visinu preko 400 m n.m. na obje strane doline (Slika 2.4.), a padine se spuštaju sve do korita. Ispod mosta kod naselja Pašac tok Rječine prolazi kanjonom duljine preko 3 km. U svom uzvodnom dijelu kanjon je vrlo uzak, mjestimične širine manje od 10 m i dubine preko 50 m. Kanjon je usječen u vapnenačke stijene gornjokredne i paleogenske starosti (Benac i sur., 2005a, 2009.). Uzvodni i središnji dio kanjona imaju pružanje SZ-JI, a nakon toga kanjon naglo mijenja smjer prema JZ.

Približno kod kaptiranog izvora Zvir počinje naplavna ravnica okružena vapnenačkim uzvišenjima (Slika 2.2.). To je ostatak nekadašnjeg estuarija koji je potpuno zatrpan sedimentima Rječine tijekom posljednjih nekoliko stoljeća (Benac i Arbanas, 1990.).

Podzemne vode u slivu vodotoka Rječine dio su šireg drenažnog područja s hidrogeološki definiranim slivnim područjem od oko 395 km<sup>2</sup>. Geološka građa slivnog područja je pretežno formirana od vapnenca i dolomita koji su uglavnom nastali u razdoblju Jure, Krede i Eocena, s iznimkom područja Orehovice koje pripada Tercijaru. Naprezanja i deformacije reljefa unutar doline vodotoka Rječine promijenjene su zbog neotektonskih kretanja, klimatskih promjena tijekom Kwartara i promjenama erozijskog djelovanja na lokalnoj razini. Intenzitet erozije se često mijenja. Morfogenetski razvoj vjerojatno nije bio kontinuiran u prošlosti, ali je uključio razdoblja većeg ili manjeg intenziteta akumuliranja deposita uslijed erozije na padinama (Benac i sur., 2000.).

### 2.3. Hidrološka i hidrogeološka analiza sliva Rječine

Sliv Rječine s istoimenim krškim priobalnim vodotokom spada u jedno od najvodnijih područja Republike Hrvatske s ukupnim godišnjim oborinama od gotovo 3000 mm (Rubinić i Sarić, 2005.). Vodotok Rječina (Ričina) započinje svoj tok na jakom krškom vrelu Izvoru Rječine (325 m n.m.,  $Q_{sr.god.}=7,38$  m<sup>3</sup>/s) koji tijekom godine presuši u prosjeku 1 do 4 puta (Rubinić i Sarić, 2005.) (Slika 2.5.). Izvor Rječine tip je uzlaznog krškog vrela preljevnog oblika (Stražičić, 1999.). Slivno područje vodotoka Rječine se sastoji od dobro vodopropusnih karbonatnih stijena, dok pojedini vodonepropusni kompleksi stvaraju barijere i mijenjaju tok podzemne vode (Hrvatske vode - VGO Rijeka, 2002.; Biondić i sur., 1978.).



**Slika 2.5.** Granica sliva (prihranjivanja) vodotoka Rječine (Ožanić i Rubinić, 1996.)

Područje se sastoji od nekoliko zona prihranjivanja i istjecanja površinskih i podzemnih voda koje sačinjavaju njegov glavni vodni bilanc. Podzemne vode u slivu Rječine prihranjuju se sa

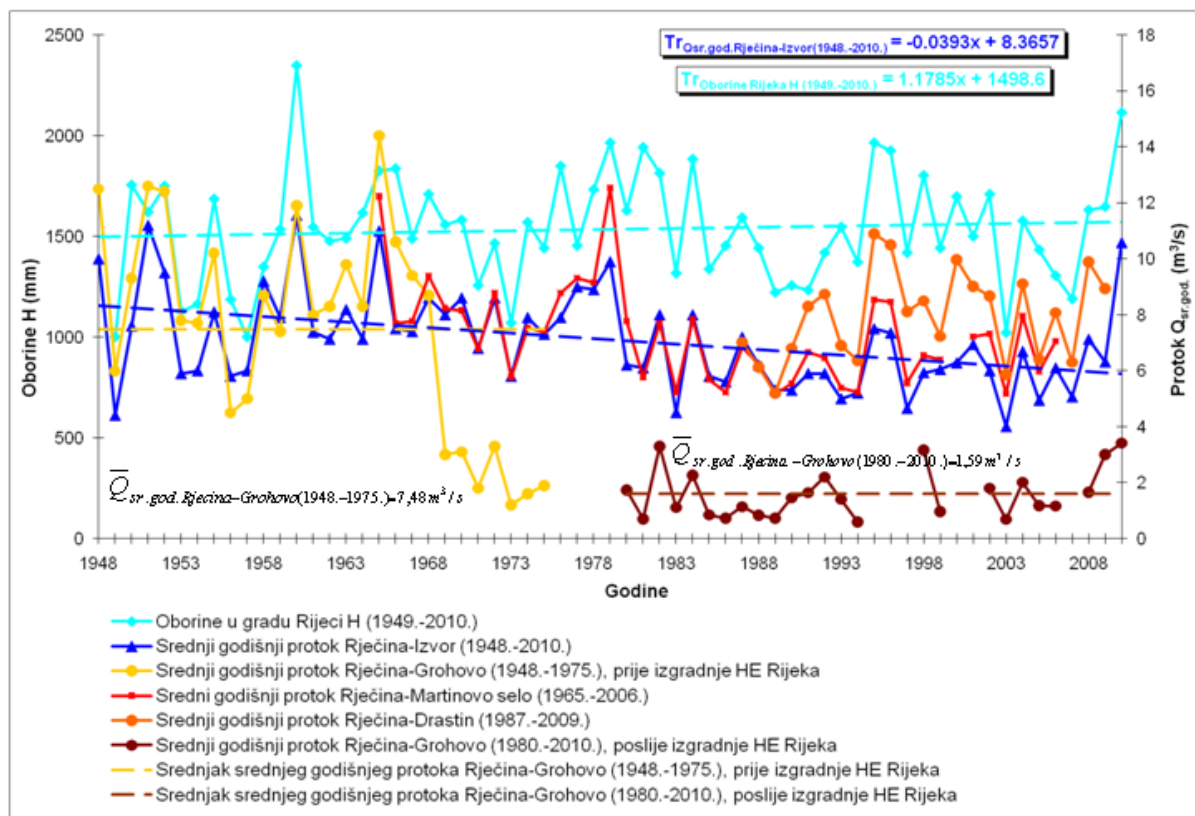


šireg drenažnog područja (tzv. istočnog dijela grada Rijeke) s površinom od oko 395 km<sup>2</sup> (IGI, 2004.). Glavno prihranjivanje podzemnih voda prema vodotoku Rječine vrši se iz područja sjeverno i sjeveroistočno od Izvora Rječine, kao i većim dijelom s Grobničkog polja, a postoje moguće sumnje i podzemnog prihranjivanja s jezera Cerknice u Sloveniji (Rubinić i Sarić, 2005.). Zbog vodonepropusnih stijena oko samog izvora Rječine gradijent opadanja razine podzemnih voda puno je blaži u odnosu na gradijente opadanja na području Grobničkog polja (izvori Lužac, Gonjuša, Rastinčica). Najznačajniji lijevi pritok Rječine je Sušica (Šušica) koja predstavlja površinski kolektor povremenih izvora na Grobničkom polju. Sušica ima duljinu oko 3 km, čiji je prosječni protok 0,72 m<sup>3</sup>/s, a maksimalni 43,8 m<sup>3</sup>/s. Veliki dio tih voda se ulijeva u Rječinu kod sela Lukeži (nešto uzvodnije od akumulacije Valići, oko 8,8 km od njezina ušća u Riječki zaljev), dok se preostali dio voda infiltrira u podzemlje i ne dolazi do same akumulacije (Rubinić i Sarić, 2005.). Sušica (duljine 6,3 km) prolazi kroz stjenoviti krški teren i za sobom nosi znatnu količinu nanosa koji se potom propagira do akumulacije Valići. Dio podzemnih voda zajedničkog slivnog područja Rječine ne drenira ka samom toku Rječine, već neposredno istječe u obližnjoj uvali Martinšćica. Zala (12,2 km) najveća je pritoka Sušice. Ona izvire ispod Plesišća na koti od 785 m n.m. U gornjem dijelu toka, koji se nalazi na flišnom terenu uočava se mjestimično jačanje erozije i pokretanje nanosa. Vode Zale koje se na zaravni Ravno gube poniranjem ponovo se kao izvorske pojavljuju u Potkilavcu na izvoru Gonjuša (Knežević, 2001.) (Slika 2.1.).

Na slici 2.6. dan je prikaz hoda oborina i srednjih godišnjih protoka na odabranim postajama u slivu Rječine. Sa slike se može jasno uvidjeti značajno sniženje srednjih godišnjih protoka na postaji Grohovo prije i nakon izgradnje akumulacije Valići. Također je vidljivo blago opadanje srednjih godišnjih protoka na izvoru Rječine što velikim dijelom utječe na punjenje same akumulacije Valići. Prema najnovijim hidrološkim analizama provedenim za slivno područje Rječine uočava se blago smanjenje godišnjih količina oborina, te ujedno i smanjenje srednjih godišnjih protoka. Prosječne godišnje oborine iznose oko 1500 mm (1948.-2010.).

U proljeće (od ožujka do svibnja) i u jesen (od rujna do prosinca) Rječina često poplavljuje, dok u ljetnom razdoblju presušuje. Rječina je karakterističan krški vodotok kod kojeg se ogromne vodene mase naglo gube i iz maksimuma prelaze u minimum. Protok joj izrazito varira tijekom godine u rasponu od 0 m<sup>3</sup>/s, u profilu neposrednog izvorišta (tijekom ljetnih mjeseci u trajanju oko 30 dana), do maksimalnih 120 m<sup>3</sup>/s u profilu ušća u more (Rubinić i Sarić, 2005.). Na ušću vodotoka u more zabilježen je i ekstremno veliki protok (poplavni val) od 439 m<sup>3</sup>/s koji se dogodio 19. rujna 1898. tijekom katastrofalne poplave

(MKKuI.O, 1905.). Hidrografsku mrežu sliva čine vodotok Rječina i njezine pritoke Sušica, Mudni dol, Zala, Borovica i Duboki jarak (Studenski potok) kao i brojni izvori na dodiru fliša i karbonata.



**Slika 2.6.** Kretanja srednjih godišnjih protoka karakterističnih hidroloških postaja na vodotoku Rječina (1948.-2010.) (Žic i sur., 2013a)

Bitni pomaci na utvrđivanju granica (razvodnice) sliva napravljeni su novelacijom smjerova kretanja površinske i podzemne vode. Prilikom novelacije Institut za geološka istraživanja (1994.) je na hidrogeološkoj karti mjerila  $M=1:25000$  nacrtao smjerove glavnih skupina izviranja i naznačio razvodnice otjecanja. Ustanovljene su i površine topografskog ( $53,8 \text{ km}^2$ ) i hidrogeološkog ( $163,9 \text{ km}^2$ ) sliva. Odnos između topografskog i hidrogeološkog sliva ukazuje na znatne poteškoće kod utvrđivanja granica područja sliva vodotoka Rječine. Uzrok tome je geološka građa područja koja je sastavljena pretežno od propusnih formacija s izraženim krškim pojavama (Šikić, 1975.). Većim dijelom sliv se nalazi na teritoriju Hrvatske, a površina od  $59,46 \text{ km}^2$  (27,3 % cjelokupnog sliva) nalazi se na teritoriju Republike Slovenije.

Vodotok Rječina je karakteristična po velikim produkcijama i pronosu nanosa (oko  $10.000 \text{ m}^3$  godišnje, od čega se vodnim tokom transportira oko  $2.000 \text{ m}^3$ , nadvišenje korita uslijed nanosa od  $10 \text{ cm/god.}$  u donjem toku vodotoka), kao i prostornoj varijabilnost u

geometriji prirodnog korita (Hrvatske vode - VGO Rijeka, 2002.). Od samog izvorišta do ušća u more (na lokaciji Brajdica - Delta) vodotok ima dužinu od 18,7 km. Širina vodotoka varira od 9 do 16 m. Površina sliva se procjenjuje na 234 km<sup>2</sup>, a proteže se u dužini od 30-tak km (izravni orografski sliv) sve do vrha slovenskog Snježnika (1796 m n.m.) (Hrvatske vode - VGO Rijeka, 2002.). Širina sliva varira od 1 do 10 km, ovisno o reljefnim značajkama terena.

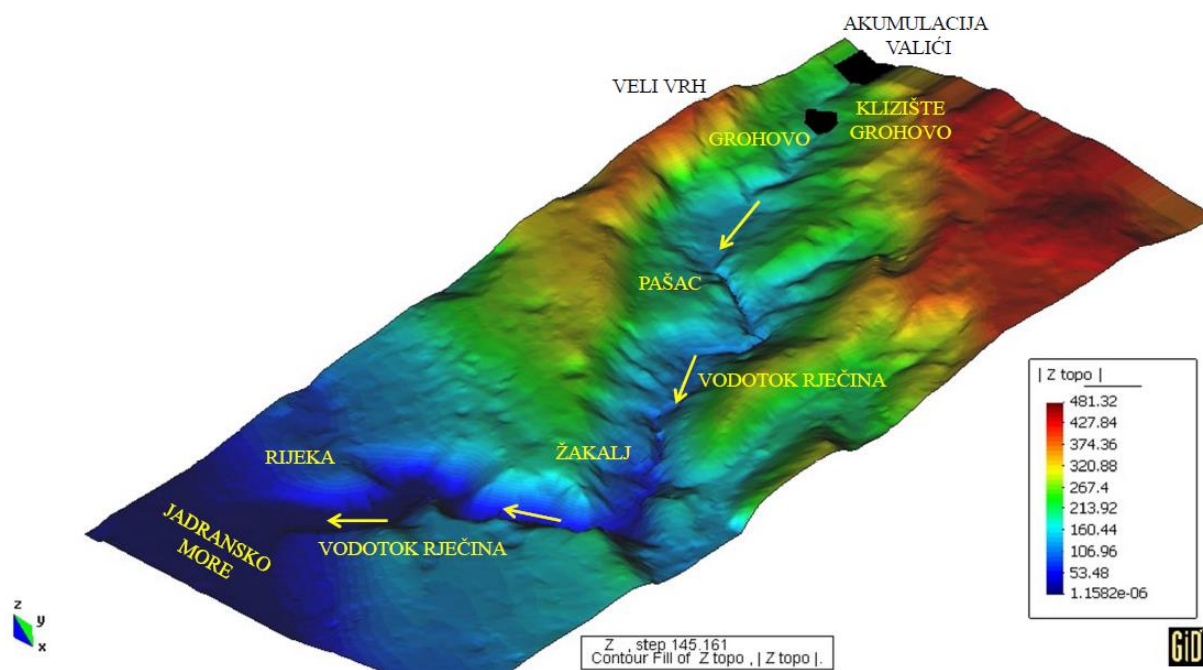
Gornji dio toka Rječine karakterizira prirodan tok koji protječe šire rasprostranjenim dolinskim područjem (riječne livade) koji za vrijeme većih voda zna kratkotrajno poplaviti. Taj se dio prostire do utoka pritoke Sušice kod naselja Lukeži, otprilike 8,8 km uzvodno od njenog ušća. Kanjonski dio toka Rječine se proteže od naselja Pašac do urbanog dijela grada Rijeke (područje tvornice papira). Na srednjem i donjem toku Rječine značajno je izmijenjen vodni režim nakon izgradnje akumulacije Valići 1968. godine za potrebe proizvodnje električne energije HE Rijeka. Srednji godišnji protok na postaji Grohovo, lociranoj neposredno nizvodno od brane Valići, prije izgradnje akumulacije iznosio je 9,12 m<sup>3</sup>/s, a danas iznosi svega prosječno 1,66 m<sup>3</sup>/s (Rubinić i Sarić, 2005.). Kanjonski dio Rječine koji je vrlo atraktivan u pogledu prirodnih značajki i kulturološkog naslijeđa (ostataka starih mlinova, stupa i stupica, pilana) u posljednje je vrijeme uglavnom potpuno suh. Na potezu od mosta Pašac do brane Valići nalazi se 23 konsolidacijskih stepenica, izgrađenih u razdoblju Austrougarske Monarhije od 1898.-1908. g., nakon katastrofalnog poplavnog vala od 19.9.1898., a u svrhu ublažavanja od posljedica poplava. U donjem toku Rječina najveći dio godine ima stalno vodno lice, dijelom zbog stalnog uspora mora, a dijelom iz razloga što se tu nalazi izlaz odvodnog kanala HE Rijeka (maksimalne propusnosti 12 m<sup>3</sup>/s), kao i izvor Zvir na koti 2,5 m n.m. (prosječna preljevna protoka za razdoblje od 1975.-2001. iznosila je 1,24 m<sup>3</sup>/s) (Holjević, 1999.; Rubinić i Sarić, 2005.).

Uzdužni pad vodotoka varira od 1,8 % u gornjem dijelu, 3,0 % u srednjem dijelu, do minimalnih 0,36 % u donjem dijelu toka. Korito od izvora Rječine do sela Grohovo meandrirajućeg je oblika i malenog nagiba (5-7 ‰) te U oblika poprečnog profila. Od sela Grohovo do izlaska iz kanjona Rječine korito ima V oblik poprečnog profila i veliki nagib (20-30 ‰). Nanosi u tom dijelu su krupni i vučeni, a pregibi česti (pregib Žakanj sa slapištem). Od kanjona Rječine do ušća u Riječki zaljev, nagib korita je smanjen (4-6 ‰), a korito je usječeno u sedimente fliša i karbonata. Prema rezultatima protoka, koji odgovara hidrometrijskom profilu Grohova (194,3 m n.m.), s ukupnog sliva koritom Rječine otječe više od 75 % svih oborina (Riđanović, 1975.).

Na temelju digitalnog elevacijskog modela terena (eng. *Digital Terrain Model - DTM*) izrađenog u ArcGIS 10.1 programu i GID 7.7.6. simulacijskom pred i post procesoru (Slika

2.7.) prikazana je u nastavku karta akumulacije toka (duljine riječne mreže), odnosno karta glavnog smjera toka na srednjem i donjem toku sliva Rječine (Slika 2.8.).

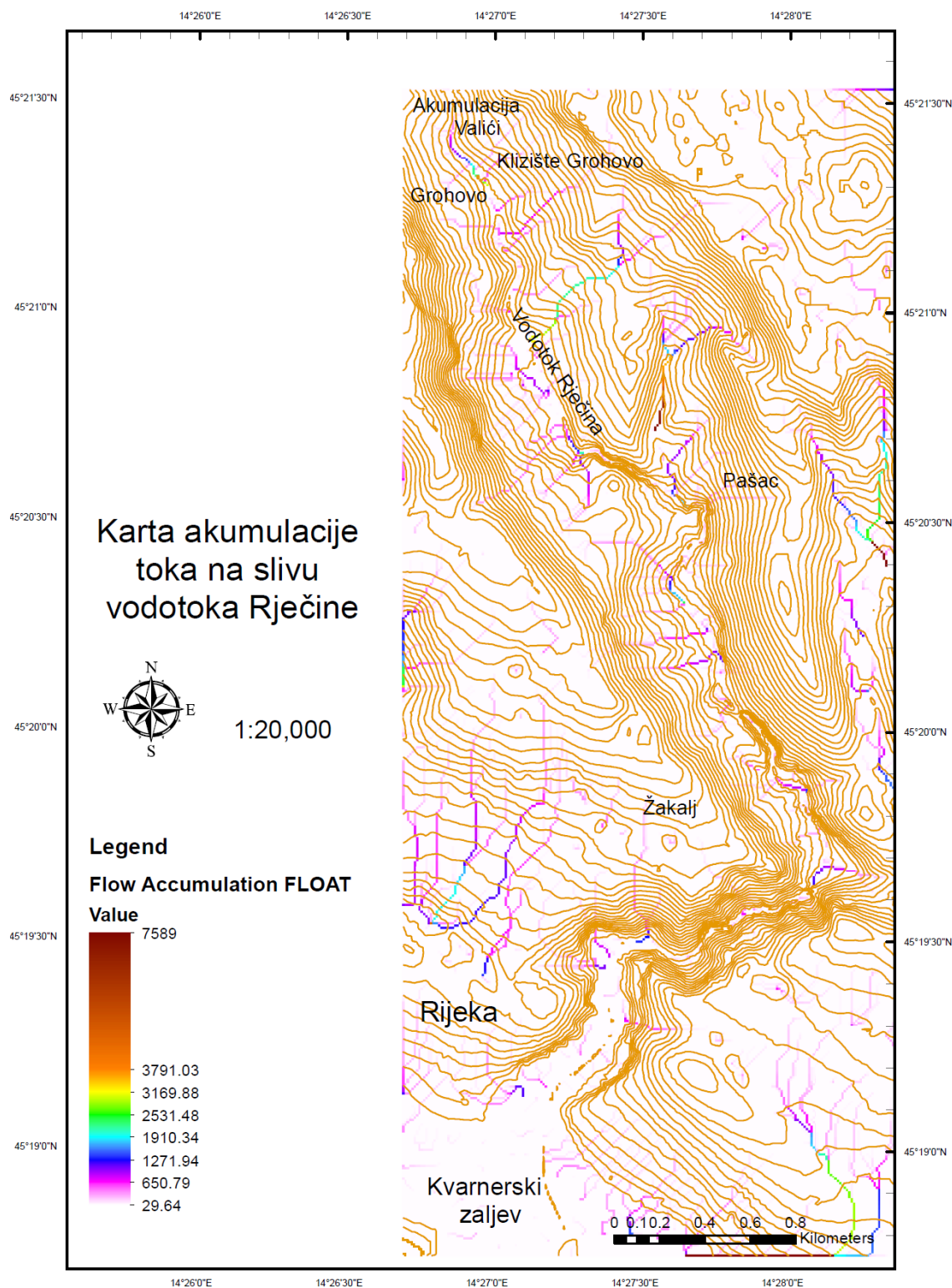
Prema strukturnom položaju naslaga u slivu Rječine podzemno otjecanje sliva okrenuto je od SI prema JZ. Prirodna brzina podzemnih tokova kreće se od 4 cm/s, a hidraulički gradijent varira od 0,030 do 0,060 (Biondić, 1981.). Na podzemno otjecanje osim strukturalnog položaja i litološkog sastava naslaga bitno utječe njihova tektonska poremećenost. Jedan od pokazatelja složenosti je i nesklad između količine oborina i gustoće riječne mreže koja na području sliva iznosi 0,2 km/km (Božičević, 1974.).



**Slika 2.7.** Digitalni elevacijski model terena srednjeg i donjeg toka Rječine, primjena GID 7.7.6. simulacijskog pred i post procesora (Žic i sur., 2015.)

U istraživanju objavljenom u sklopu elaborata Vodoprivredna osnova Gorskog kotara (1987.) ustanovljeno je da na varijabilnost izravnog i posrednog pritjecanja, a time i fluktuaciju protoka Rječinom, značajno utječe strmi teren sliva kojemu je malena retencijska sposobnost i neujednačen intenzitet oborina. Ekstremni protoci od 196 m<sup>3</sup>/s, na najnižvodnijem profilu Rječine, očekuju se u razdoblju od 10 godina, ekstremni protoci od 361 m<sup>3</sup>/s u razdoblju od 100 godina, dok se ekstremni protoci od 602 m<sup>3</sup>/s očekuju u razdoblju od 1000 godina. Unatoč promjenljivom režimu dosegnuta razina iskorištenosti vodnog potencijala sliva iznosi 75 % (Rubinić, 1997.). Valorizacijom vodnih resursa izmijenjen je prirodni režim otjecanja, poglavito na dijelu toka Rječine od brane Valići do ušća vodotoka Rječine u Riječki zaljev (Ožanić, 1999.). Kako na slivnom području vodotoka

Rječine nema alohtonog pritjecanja, vodna bilanca direktno ovisi o oborinskom režimu. Glavni faktori koji primarno utječu na prostornu raspodjelu oborina jesu cirkulacija atmosfere i orografija. Slivno područje vodotoka Rječine pod utjecajem je ciklogenetskog područja



Slika 2.8. Karta akumulacije toka (duljine riječne mreže) srednjeg i donjeg toka Rječine (Žic i sur., 2015.)



sjevernog Jadrana gdje se uz putujuće ciklone (najčešće su van Bebberove putanje Vc i Vd) koje dolaze nad ovo područje stvaraju i manji, dodatni ciklonalni vrtlozi koji su uzrok čestim oborinama (Rijeka 131,1; Klana 122,2; Platak 144,8 dana s oborinama). Stvarne vrijednosti prosječnih gorišnjih količina oborina za postaje u širem području oko sliva vodotoka Rječine prikazane su u Tablici 2.1.

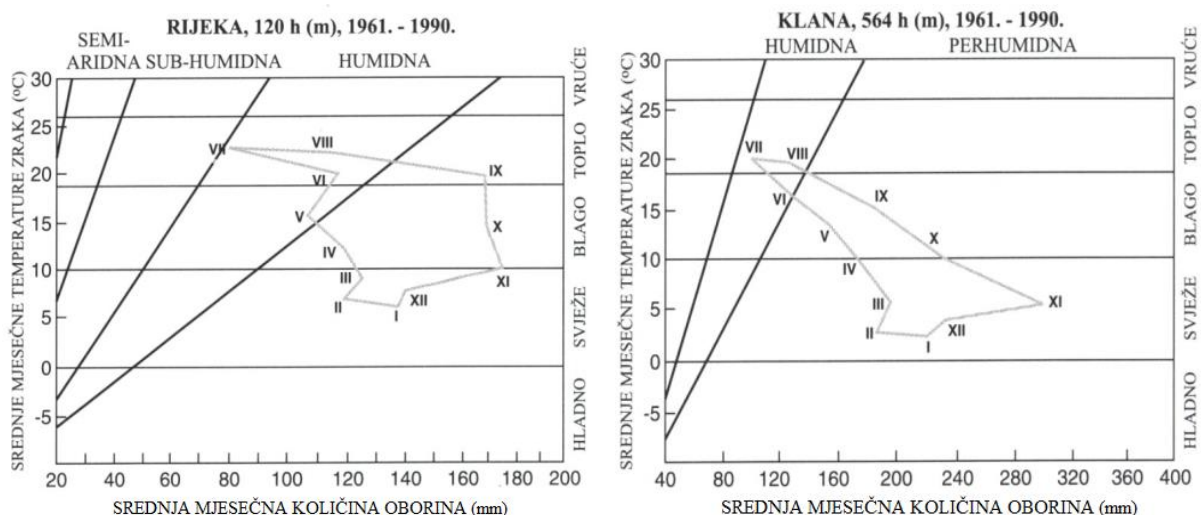
**Tablica 2.1.** *Prosječne godišnje količine oborina na pojedinim mjernim postajama u okolici grada Rijeke (Knežević, 1992.)*

Meteorološka postaja	h (m n.m.)	Minimalna	Maksimalna	Godišnji prosjek
Rijeka	120	1076	1973	1562
Čavle	316	1275	2747	1917
Marčelji	410	1414	2777	2152
Klana	564	1625	3006	2228
Plase	600	1114	2625	1828
Zlobin	730	1070	2892	1880
Platak	1111	2281	5784	3565
Risnjak	1420	2230	5890	3648

*Izvor: Postaje Platak (1931.-1960.) i Risnjak (1949./50.-1963./4.), B. Kirigin (1976.), ostale postaje (1961.-1990.). Državni HMZ Republike Hrvatske, Zagreb*

Prema Fosterovom dijagramu klima je na riječkom priobalju dijelom humidna i većinom perhumidna, a na ostalom dijelu sliva perhumidna (Slika 2.9.).

U prihrani vodotoka Rječine vodom izvori su značajniji od pritoka. Pritoci u bilanci srednjeg godišnjeg otjecanja Rječinom sudjeluju s približno 6 %. U sušnom razdoblju određene količine vode gube se u estavelama, koje su u vlažnom razdoblju funkcionirale kao izvori. Temeljne značajke režima otjecanja vode mogu se najbolje upoznati prema godišnjem hodu protoka na određenim mjernim postajama (Tablica 2.2.). Mjeseci pojave ekstremnih koeficijenata odgovaraju sredozemnom varijetetu kišno-snježnog (pluvio-nivalnog) režima. Primarni maksimum protoka najčešće je u studenom i prosincu (kišnica), a sekundarni u ožujku ili travnju (sniježnica). Najmanja godišnja fluktuacija koeficijenta otjecanja je na Zviru (1,13), te na dijelu toka od izvora Rječine do Martinova Sela (1,42), na kojem nema pritoka, a najveća na profilu Drastina (1,75). U Kellerovom hidrobrascu mala slova *g* i *h* oznake su ekstremno niskih, a E i F ekstremno visokih protoka, pa se iz tablice 2.3. može isčitati izrazit bujični karakter Rječine. Odnos godišnjeg hoda protoka na Rječini i godišnjeg hoda oborina koji gravitira izohipsi od 578 m n.m. (izračunato za meteorološke postaje Rijeka, Klana, Mrzle Vodice i Benkovac u razdoblju 1961.-1990.) dan je na slici 2.10.



**Slika 2.9.** Funkcionalni odnosi oborina i temperature, (Fosterov dijagram) (Knežević, 1992.)

**Tablica 2.2.** Srednji (SQ), srednji najniži (SNQ) i srednji najviši (SVQ) protoci ( $m^3/s$ ) na mjernim profilima vodotoka Rječine (Knežević, 1992., Vodoprivreda-Rijeka, 1945.-1997.)

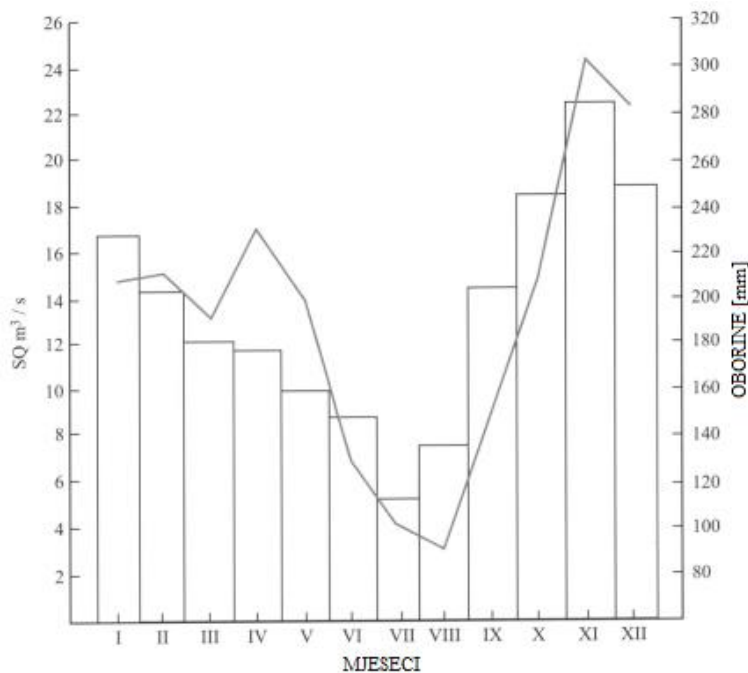
POSTAJA		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	SRED
IZVOR RJEČINE (1948.-1997.)	SQ	7,07	6,68	7,04	12,0	10,1	5,07	1,71	1,43	3,77	7,81	11,3	9,51	6,94
	SNQ	1,07	1,03	1,58	4,31	3,34	1,3	0,36	0,12	0,27	1,11	1,25	1,51	0,035
	SVQ	25,6	24,3	25	28,3	24,9	17,6	6,36	9,25	19,4	28,6	36	32,2	44,7
KUKULJANI (1948.-1975.)	SQ	9,32	8,96	8,88	13,7	10,4	4,85	2,45	1,37	4,63	8,61	15,4	12,7	8,45
	SNQ	1,2	0,52	0,24	4,08	3,51	0,69	0,0	0,0	0,0	0,0	6,12	1,42	5,06
	SVQ	31,0	26,6	22,7	23,2	21,9	14,8	9,81	4,48	22,2	28,8	32,1	27,7	12,5
MARTINOVO SELO (1965.-1994.)	SQ	7,82	7,47	7,85	12,8	10,4	5,34	1,64	1,53	4,48	8,75	12,1	10,2	7,91
	SNQ	1,3	1,17	1,77	4,52	3,48	1,13	0,49	0,27	0,42	1,1	1,25	1,58	0,089
	SVQ	35	32,4	31,3	33,5	28,8	21,2	6,17	5,64	25,4	40	48,2	44,0	69,0
DRASTIN (1987.-1997.)	SQ	12,2	9,73	8,38	15,1	12,3	7,11	2,44	2,67	5,8	15,8	22,6	16,6	10,9
	SNQ	2,98	2,81	2,59	6,36	4,04	2,09	0,53	0,64	1,64	2,68	3,05	3,25	0,479
	SVQ	44,5	43,7	35,9	40,5	36,8	26,2	7,78	12,7	23,3	61	81,6	63,4	109
GROHOVO (1948.-1967.)	SQ	10,9	8,72	8,29	13,2	9,26	4,68	2,81	1,65	5,68	11,1	17,2	15,9	9,11
	SNQ	2,12	1,51	2,18	4,86	3,31	1,79	0,78	0,79	0,47	1,3	2,59	2,98	0,029
	SVQ	4,51	46,8	31,2	34,8	25,9	18,8	12,6	6,96	38,9	48,9	57,3	58,6	86,1
ZVIR (1979.-1991.)	SQ	5,66	5,33	4,23	6,28	5,08	7,59	1,74	1,59	2,41	5,73	6,32	6,73	4,54
	SNQ	2,43	2,28	2,08	3,39	2,74	2,01	1,21	1,11	1,17	1,9	2,44	2,73	0,935
	SVQ	10,8	9,65	8,95	9,37	8,43	6,09	2,69	3,5	5,63	10,3	11,2	11,9	15,1

**Tablica 2.3.** Tipovi otjecanja na pojedinim mjernim profilima vodotoka Rječine (Knežević, 1992.; Vodoprivreda-Rijeka, 1945.-1997.)

Postaja	Period motrenja	Tip otjecanja
Izvor Rječine	1948.-1997.	Dg 4,8
Kukuljani	1948.-1975.	Eh 11,8
Martinovo Selo	1965.-1994.	Dg 4,8
Drastin	1987.-1997.	Fg 11,7
Grohovo	1948.-1967.	Eh 11,8
Zvir	1979.-1991.	Cf 12,8
Sušak	1949.-1965.	Eg 12,8

U litološkom sastavu sliva Rječine sudjeluju karbonatne i klastične naslage različite vodopropusnosti. Karbonatne stijene u čijem sastavu prevladavaju disolutni vapnenci raznih

starosti i formacija protežu se u širokom luku sve od Snežnika do Grobničkog polja. Na njima je nastao tipičan krški reljef ogoljelih uzvišenja i brojnih ponikava na dnu kojih je crvenica. Bitumenizirani vapnenci i dolomiti kao i krupno klastične breče prevladavaju u priobalju (Ožanić, 1999., prema Osnovnoj geološkoj karti 1:100000, list Labin). Klastične paleogenske naslage (fliš), značajne za površinsko otjecanje, pružaju se od Klane i Studene na SZ, dolinom Rječine do Orehovice gdje je njihovo površinsko pojavljivanje znatno reducirano.



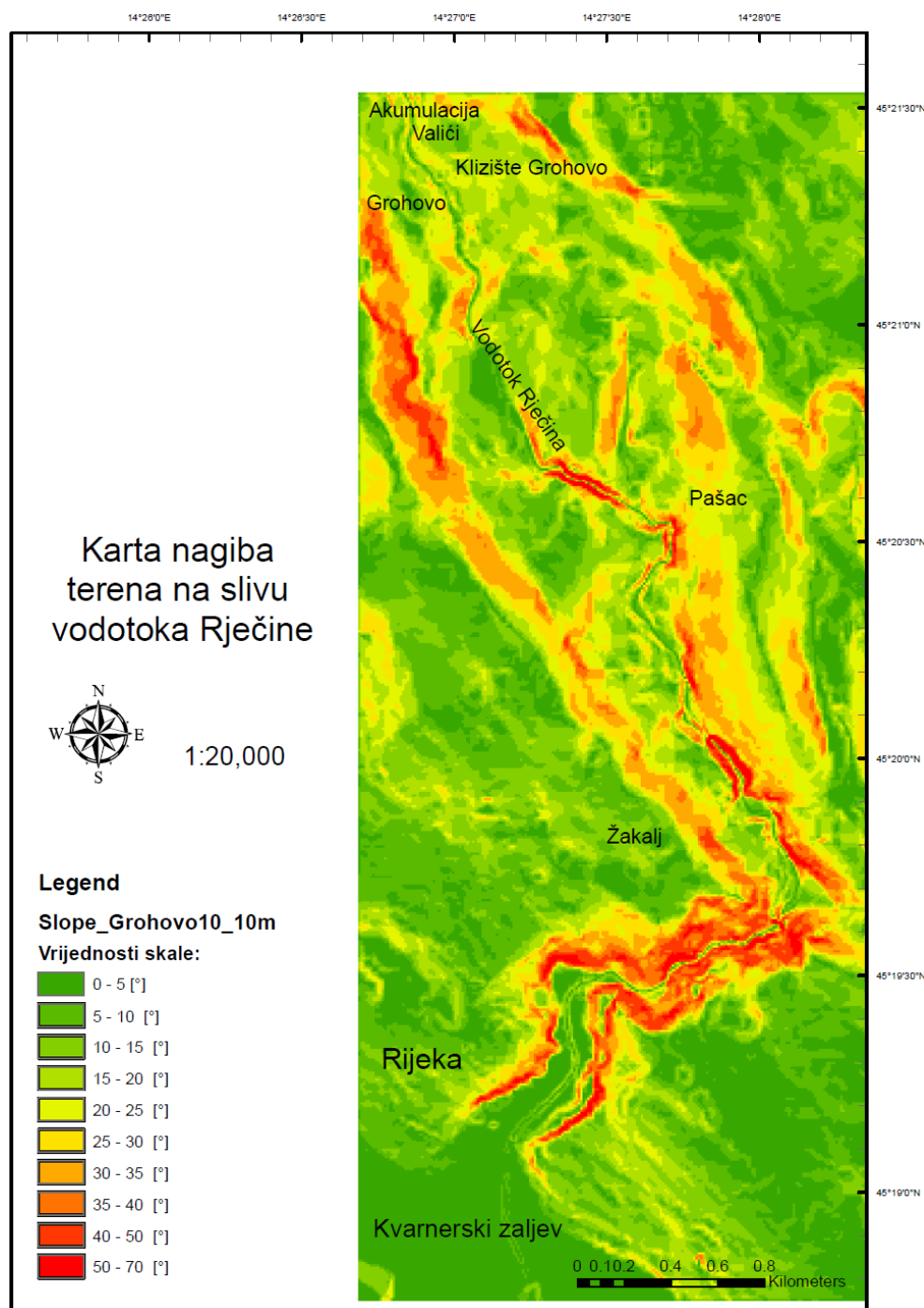
**Slika 2.10.** Režim protoka (Rječina - Sušak) i oborina (teorijska na nadmorskoj visini 578 m n.m.) u slivu Rječine (1961.-1990.) (Knežević, 1992.)

Unutar izdvojenih hidrogeoloških cjelina, susreću se i druge manje cjeline i to uglavnom u dolinama pritoka (Sušica, Zala, Lužac). U njihovoj građi sudjeluju valutice, koturine, kršje, pijesak i ilovača (pleistocenske naslage) kao i recentne naplavine (aluvij).

Nadmorske visine u slivu kreću se u rasponu od 0 do 649 m n.m., a nagibi padina uglavnom variraju u rasponu od 0° do 30° (Slike 2.11. i 2.12.). Cjelokupno slivno područje Rječine može se podijeliti na tri karakteristične zone. Prvu „Zonu prikupljanja“ čini najveći dio sliva (oko 250 km<sup>2</sup>) koje obuhvaća karbonatno planinsko područje u Hrvatskoj i Sloveniji nadmorske visine preko 700 m n.m., vrlo bogato oborinama (do 3000 mm/god.) sa vrlo malim antropogenim utjecajem (Biondić i sur., 1978.; IGI, 1997.; Rubinić i Sarić, 2005.). Druga tzv. „Zona povremenog istjecanja“ (40-tak km<sup>2</sup>) obuhvaća područje od spomenute planinske zone do kontakata karbonatnih stijena i fliša i Grobničkog polja, s nadmorskim visinama 300-700 m n.m. U ovoj zoni fliš predstavlja barijeru kretanju podzemnih voda, te postoji naznaka da se

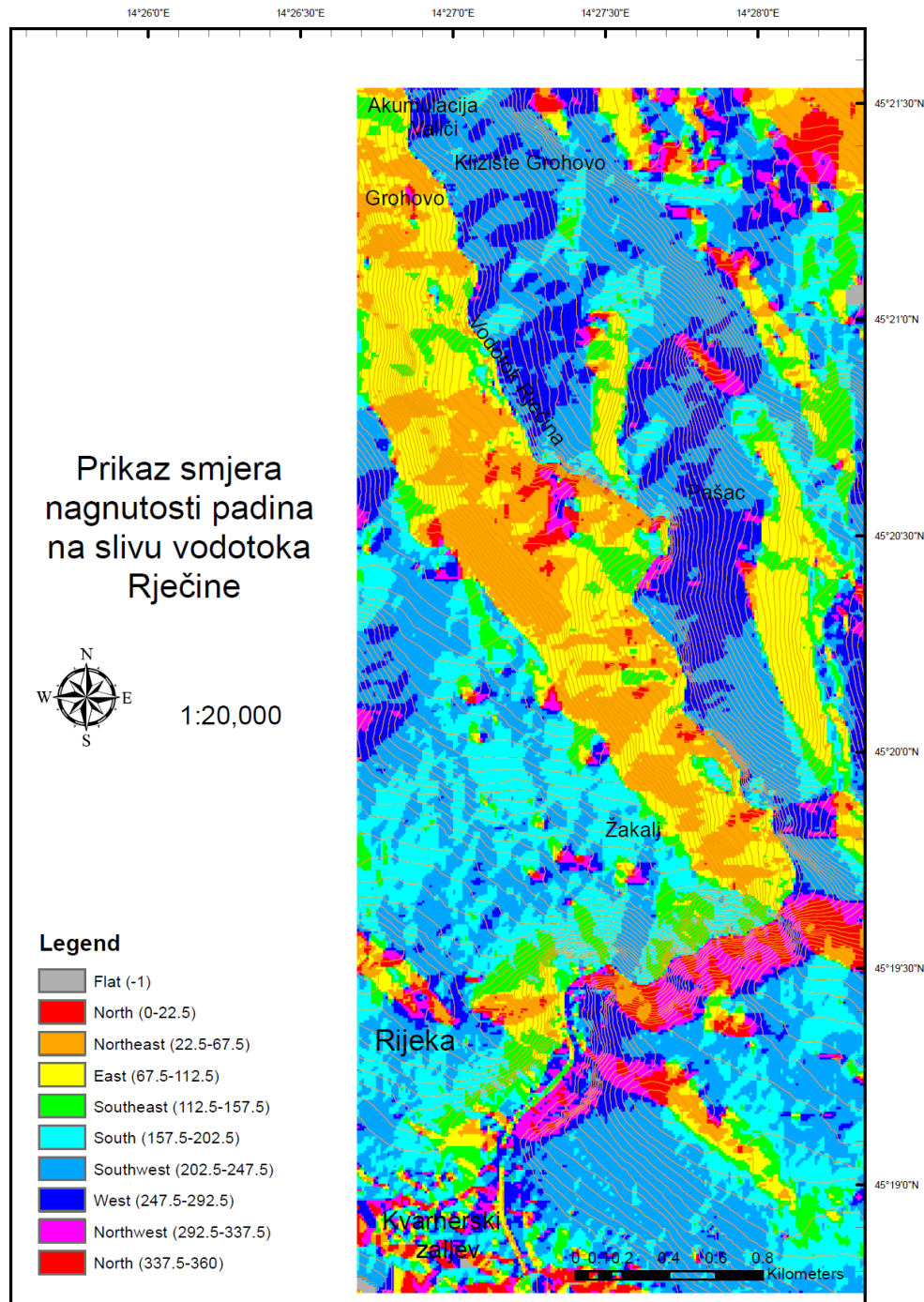


podzemne vode visokog krškoga vodonosnika dreniraju na mjestu mogućih prelijevanja preko flišne barijere (Izvor Rječine) (IGI, 1997.).



*Slika 2.11. Karta nagiba terena unutar srednjeg i donjeg toka Rječine*

Južno od Grobničkog polja locirana je treća, tzv. „Zona stalnog istjecanja“ (površine oko 25 km<sup>2</sup>) koja se rasprostire na području od 0-300 m n.m. Ona predstavlja zonu najvećeg antropogenog utjecaja na kakvoću voda izvorišta kojima se dreniraju podzemne vode.



*Slika 2.12. Prikaz smjera nagnutosti padina na srednjem i donjem toku Rječine*

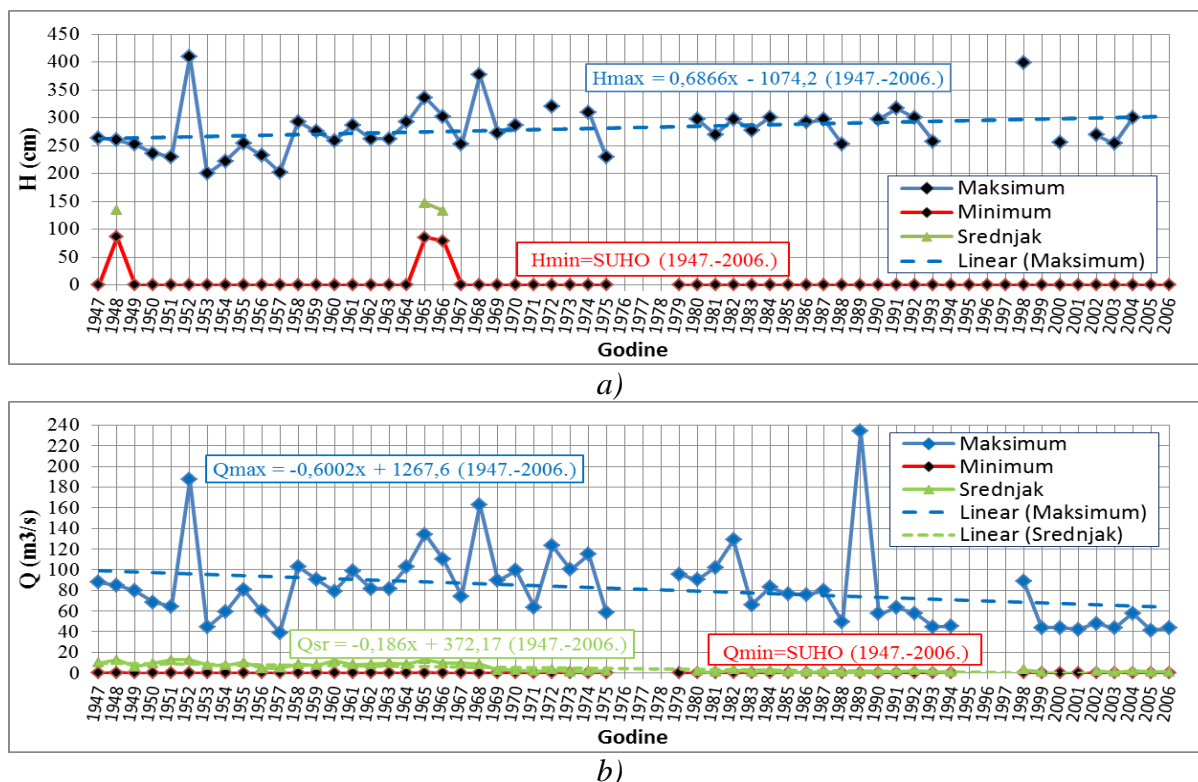
Središnji dio sliva Rječine je zanimljiv zbog aktivnih geomorfoloških procesa i povijesnih klizišta. Poprečni presjek doline je simetričan, s dnom doline na nadmorskoj visini u rasponu 150-200 m n.m. Padine s jedne i s druge strane vodotoka pokrivene su potencijalno nestabilnim površinskim naslagama. Ovo područje je geodinamički aktivno, a klizišta su glavni geološki hazard. Različiti tipovi pokreta na padinama uključuju reliktna i umirena duboka klizišta, reaktivirane odrone s litica vapnenca na vrhu padina i reaktivirana klizanja

koluvijalnih naslaga (dominantno krupnozrnih fragmenata i blokova vapnenaca) po flišnoj osnovnoj stijeni (Benac i sur., 2005a, 2005b).

## 2.4. Hidrološke značajke klizišta Grohovo

Klizište Grohovo najveće je aktivno kompleksno složeno retrogresivno klizište u obalnom području Hrvatske (Benac i sur., 2002., 2005a, 2009., 2010.). Kinematika strukturnih elemenata istraženog područja dijela doline Rječine zasnovana je na odnosu između relativno krutih karbonatnih stijena i relativno duktilnih siliciklastičnih stijena uslijed zajedničkog deformiranja. Vapnenci kredne i paleogenske starosti nalaze se na vrhovima padina, dok su paleogenske siliciklastične naslage i naslage fliša smještene u donjim dijelovima padina i u dnu doline Rječine (Benac i sur., 2002., 2010.). Tijekom vremena, krupni odlomci stijene porijeklom iz odrona stijenske mase pomiješali su se s materijalom iz trošnih zona fliša, stvarajući padinske naslage višemetarske debljine.

U nastavku rada dan je kratki osvrt na hidrološku analizu proizašlu na temelju mjernih podataka sa mjerne postaje Grohovo kao namjerodavnije stanice za opis i analizu istražnog područja. Na slici 2.13. i u tablici 2.4. prikazane su godišnje razine voda i protoka u periodu od 1947. do 2006. godine.

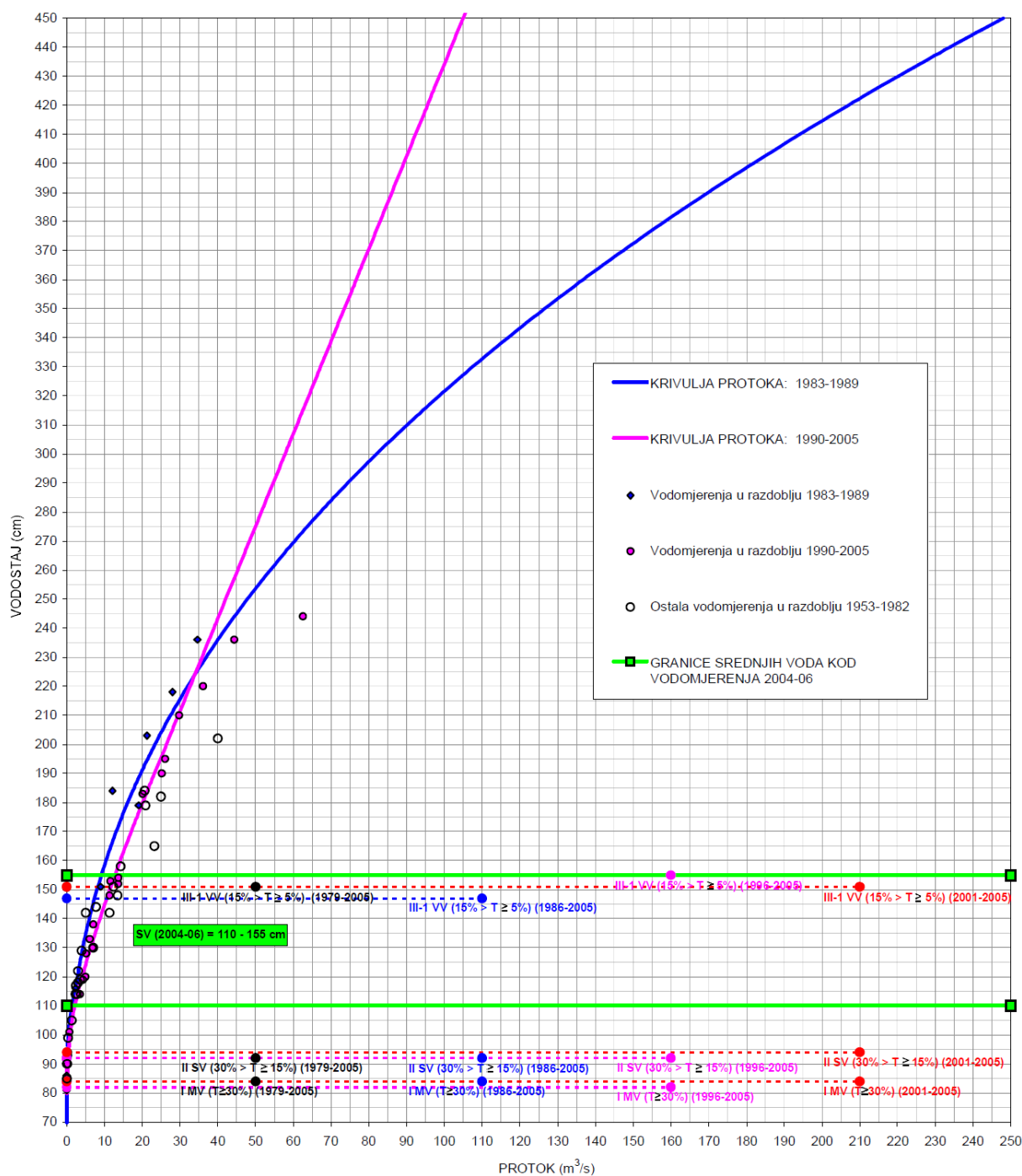


**Slika 2.13.** Serija karakterističnih (a) godišnjih razina vode i (b) protoka u period od 1947. do 2006. godine, mjerna stanica Grohovo-Rječina (6011) (modificirano prema Vodotok d.o.o., 2008.)

**Tablica 2.4.** Karakteristične godišnje razine voda i protoka u period od 1947. do 2006. godine, mjerna stanica Grohovo-Rječina (6011) (modificirano prema Vodotok d.o.o., 2008.)

Godina	KARAKTERISTIČNI GODIŠNJI VODOSTAJI (cm) za razdoblje od 1947. - 2006.				KARAKTERISTIČNI GODIŠNJI PROTOCI (m <sup>3</sup> /s) za razdoblje od 1947. - 2006.			
	Maksimum	Datum	Minimum	Srednjak	Maksimum	Datum	Minimum	Srednjak
1947.	264	-	SUHO	-	87,6	-	0	9,76
1948.	260	-	86	134	84,9	-	0,385	12,6
1949.	252	-	SUHO	-	79,5	-	0	5,92
1950.	236	-	SUHO	-	68,6	-	0	9,31
1951.	230	-	SUHO	-	64,5	-	0	12,6
1952.	410	-	SUHO	-	187	-	0	12,5
1953.	200	-	SUHO	-	44,2	-	0	7,6
1954.	222	-	SUHO	-	59,1	-	0	7,31
1955.	254	-	SUHO	-	80,8	-	0	10,1
1956.	232	-	SUHO	-	60	-	0	4,57
1957.	202	-	SUHO	-	38,7	-	0	4,99
1958.	293	-	SUHO	-	103	-	0	8,73
1959.	275	-	SUHO	-	90,6	-	0	7,44
1960.	259	-	SUHO	-	79,2	-	0	11,9
1961.	286	-	SUHO	-	98,4	-	0	8,09
1962.	262	-	SUHO	-	81,4	-	0	8,48
1963.	262	-	SUHO	-	81,4	-	0	9,82
1964.	292	-	SUHO	-	103	-	0	8,35
1965.	336	-	85	147	134	-	0,144	13,2
1966.	302	-	79	133	110	-	0,039	9,52
1967.	252	-	SUHO	-	74,3	-	0	9,2
1968.	377	-	SUHO	-	163	-	0	8,65
1969.	273	-	SUHO	-	89,2	-	0	2,87
1970.	287	-	SUHO	-	99,1	-	0	2,93
1971.	-	-	SUHO	-	63,6	-	0	1,35
1972.	320	-	SUHO	-	123	-	0	3,25
1973.	-	-	SUHO	-	99,9	-	0	1,25
1974.	310	-	SUHO	-	115	-	0	1,6
1975.	230	-	SUHO	-	58,6	-	0	1,86
1976.	-	-	-	-	-	-	-	-
1977.	-	-	-	-	-	-	-	-
1978.	-	-	-	-	-	-	-	-
1979.	-	-	SUHO	-	95,6	-	0	-
1980.	298	10.06.1980.	SUHO	-	90,1	10.06.1980.	0	1,73
1981.	270	02.10.1981.	SUHO	-	102	02.10.1981.	0	0,706
1982.	298	21.12.1982.	SUHO	-	129	21.12.1982.	0	3,3
1983.	278	17.10.1983.	SUHO	-	65,8	17.10.1983.	0	1,11
1984.	301	23.09.1984.	SUHO	-	82,9	23.09.1984.	0	2,27
1985.	-	21.03.1985.	SUHO	-	76,7	21.03.1985.	0	0,846
1986.	292	18.04.1986.	SUHO	-	75,9	18.04.1986.	0	0,728
1987.	297	24.11.1987.	SUHO	-	79,7	24.11.1987.	0	1,14
1988.	252	26.01.1988.	SUHO	-	49	26.01.1988.	0	0,828
1989.	-	05.11.1989.	SUHO	-	234	05.11.1989.	0	0,732
1990.	298	25.09.1990.	SUHO	-	57,2	25.09.1990.	0	1,46
1991.	317	15.11.1991.	SUHO	-	63,2	15.11.1991.	0	1,64
1992.	300	05.12.1992.	SUHO	-	57,8	05.12.1992.	0	2,2
1993.	258	24.10.1993.	SUHO	-	44,6	24.10.1993.	0	1,4
1994.	-	05.01.1994.	SUHO	-	45,2	05.01.1994.	0	0,597
1995.	-	-	SUHO	-	-	-	-	-
1996.	-	-	SUHO	-	-	-	-	-
1997.	-	-	SUHO	-	-	-	-	-
1998.	399	09.09.1998.	SUHO	-	88,9	09.09.1998.	0	3,17
1999.	-	16.04.1999.	SUHO	-	43,7	16.04.1999.	0	0,961
2000.	255	-	SUHO	-	43,7	-	0	-
2001.	-	-	SUHO	-	42,1	-	0	-
2002.	269	22.10.2002.	SUHO	-	48,1	22.10.2002.	0	1,8
2003.	254	-	SUHO	-	43,4	31.12.2003.	0	0,684
2004.	300	-	SUHO	-	57,8	31.10.2004.	0	2,01
2005.	-	-	SUHO	-	41,2	05.12.2005.	0	1,18
2006.	-	-	SUHO	-	43,4	-	0	1,16
1947.-1968.	410	1952	SUHO	147	187	-	0	9,12
1968.-1996.	377	1968	SUHO	-	234	05.11.1989.	0	1,93
1996.-2006.	399	09.09.1998.	SUHO	-	88,9	09.09.1998.	0	1,57

Na temelju hidroloških podataka kreirana je konsumpcijska krivulja za mjernu postaju Grohovo-Rječina za period od 1983. do 2005. godine (Slika 2.14.).

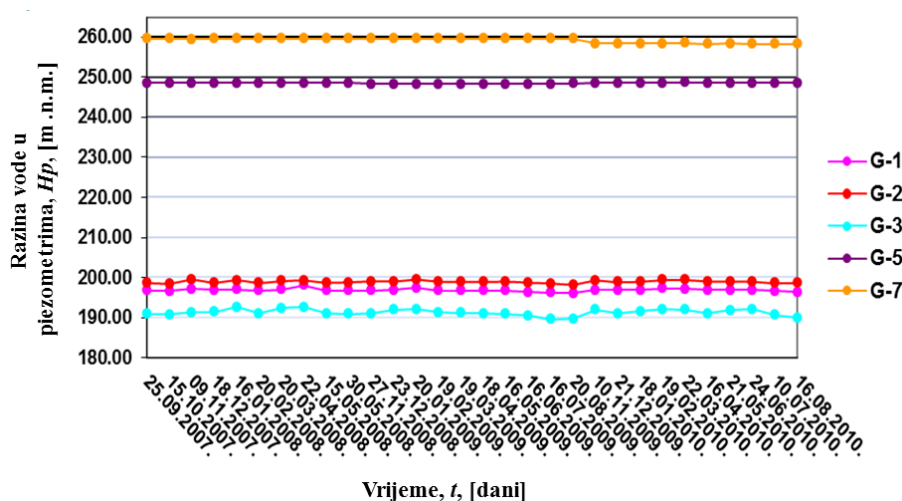


**Slika 2.14.** Krivulja protoka (konsumpcijska krivulja) i mjerenje protoka u period od 1983.-2005. godine, mjerna postaja Grohovo-Rječina (6011) (Vodotok d.o.o., 2008.)

Prije hrvatsko-japanskog bilateralnog projekta nije bilo značajnih hidroloških mjerenja na području klizišta Grohovo, osim povremenih mjerenja razine podzemnih voda u 7 piezometara koji se nalaze na poziciji klizišta Grohovo (samo 5 ih je u uporabi - P1, P2, P3,



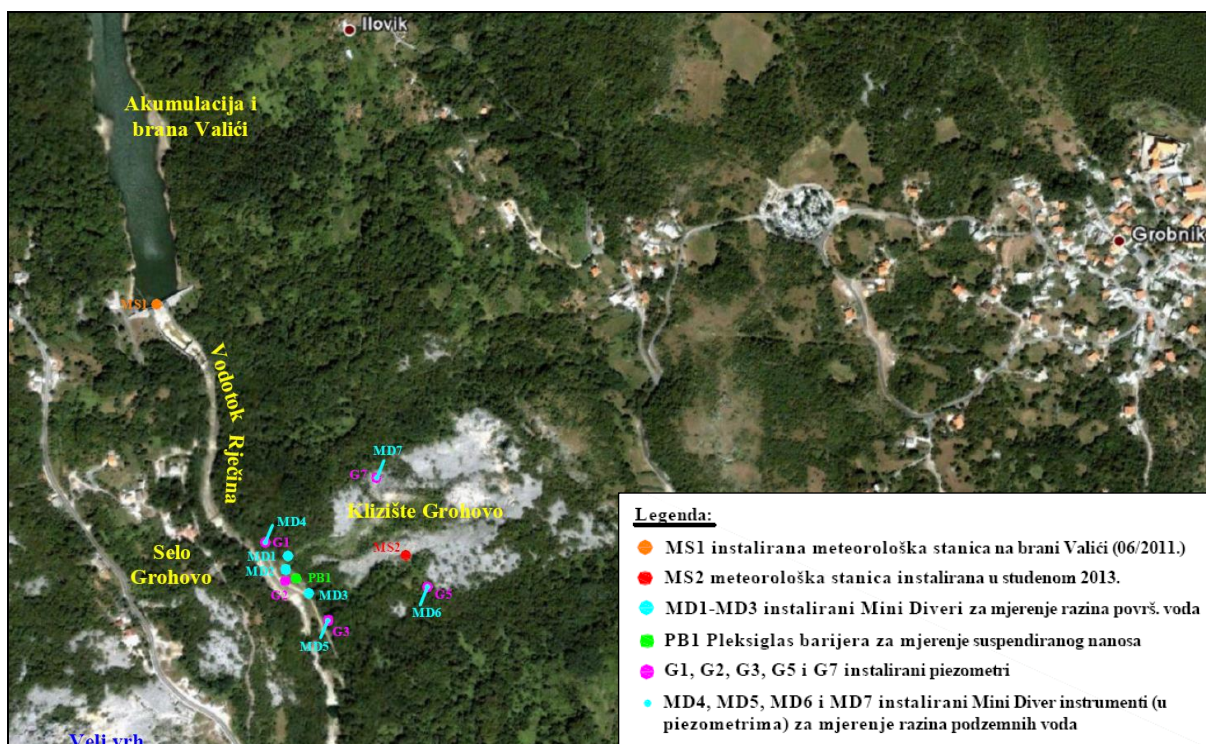
P5 i P7) (Slika 2.3.). Hrvatske vode, kao partner u projektu, dopustio je pristup podacima o varijacijama razina podzemnih voda na području klizišta Grohovo za period od 2007.-2010. godine (Slika 2.15.). Mjerenja su provođena svaki mjesec dana uz povremene iznimke. Neki od tih podataka su uspoređeni sa novim podacima mjerenja varijabilnosti razine podzemnih voda za razdoblje od 2011.-2014. godine, te su pojedine od tih vrijednosti (za određeni period godine) korištene kao ulazni parametri hidrološkog modela izrađenog u TRIGRS programu za potrebe određivanja stabilnosti padina na klizištu Grohovo.



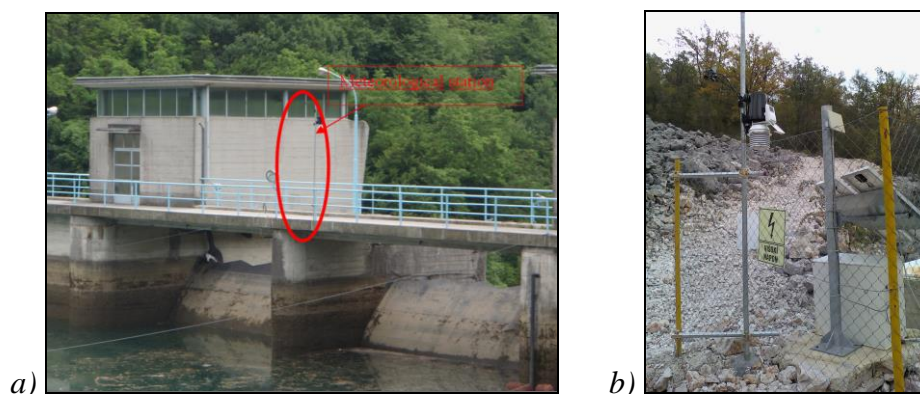
**Slika 2.15.** Grafički prikaz mjerenja razine podzemnih voda u piezometrima G1-G7 na klizištu Grohovo od 2007. do 2010. godine (Hrvatske vode, VGO Rijeka)

Od lipnja 2011. godine kontinuirano se prikupljaju hidrološki i hidrometeorološki podaci u neposrednoj blizini klizišta Grohovo. U nastavku je ukratko opisana mjerna oprema instalirana na klizištu Grohovo u svrhu dobivanja nužnih ulaznih parametara za izradu 2D numeričkih modela propagacije tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Krajem mjeseca svibnja 2011. instalirana je meteorološka stanica MS1 (*Davis Wantage Pro 2*) na području brane Valići (Slika 2.16.), nedaleko samog klizišta Grohovo, otprilike 300 m od nožice klizišta. Meteorološka stanica je postavljena na sredini krune brane (Slika 2.17.a)), na metalnom pocinčanom stupu promjera  $\varnothing 50$  mm, visine 4 m. Konzola meteorološke stanice je postavljena unutar vodočuvarske kućice, koja se nalazi na udaljenosti 70 m od same meteorološke stanice, čime je omogućeno bežično preuzimanje podataka sa konzole preko USB kabela. Meteorološka stanica MS1 mjeri 35 meteoroloških parametara kontinuirano svakih 10 minuta. Na samoj nožici klizišta Grohovo (blizina gabionskog potpornog zida) instalirana su tri Mini Diver instrumenta (MD1, MD2 i MD3) za mjerenje površinskih (procjednih) voda koje se sakupljaju kroz gabionski potporni zid (Slika 2.18.). Prvi Mini

Diver instrument (MD1) je postavljen na kraju lijevog sabirnog kanala, drugi (MD2) na kraju desnog sabirnog kanala, dok je treći Mini Diver (MD3) postavljen na kraju sabirnog kanala s lijeve strane koji ide paralelno sa gabionskim potpornim zidom (sakuplja procjedne vode iza gabionskog potpornog zida, Slika 2.16. i 2.19.). Mini Diveri MD1, MD2 i MD3 su postavljeni na dno u izbušene rupe dubine 17 cm na sredini sabirnih kanala oborinske vode (Slika 2.18.). Programirani su na vremenski inkrement od 1 minute, tako da ih je potrebno reprogramirati svakih 16 dana. Navedeni Mini Diver instrumenti mjere kontinuirano razine površinskih voda u kanalu, te temperature vode od srpnja mjeseca 2011. godine.



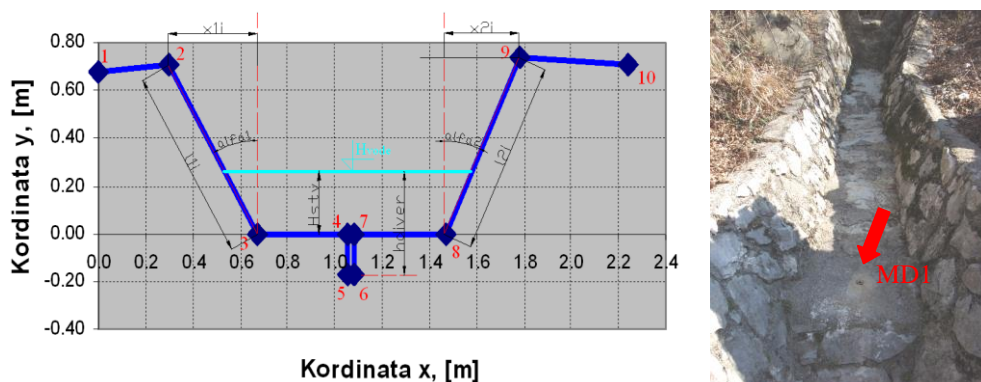
Slika 2.16. Karta instaliranih mjernih uređaja na području klizišta Grohovo



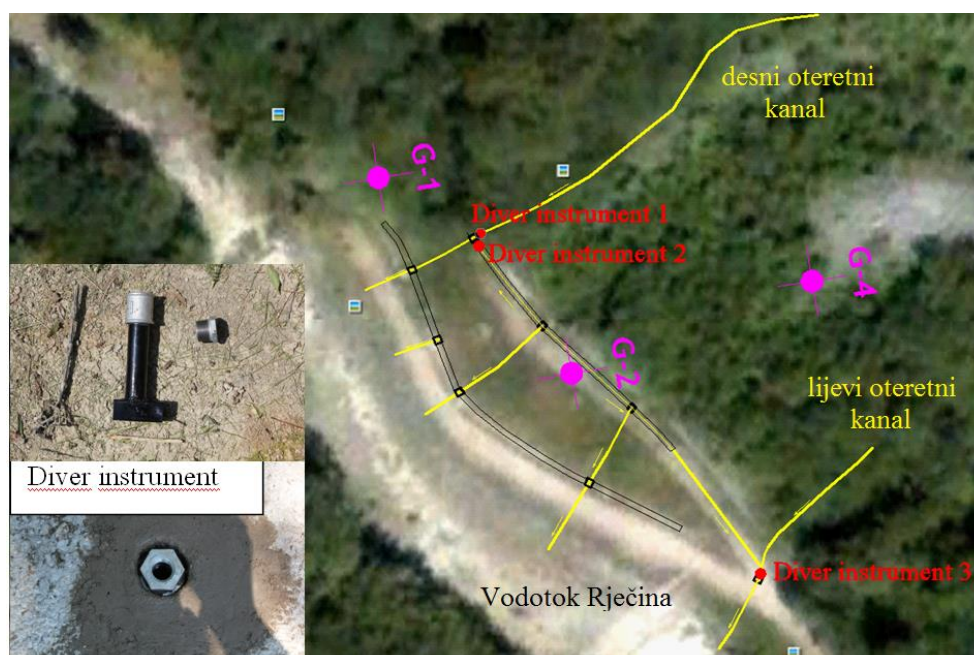
Slika 2.17. a) Instalirana meteorološka stanica MS1 na sredini krune brane Valići, b) instalirana meteorološka stanica MS2 na klizištu Grohovo (Foto: Elvis Žic)



Na području klizišta Grohovo (Slika 2.3.) postoji 5 ugrađenih piezometara (G1, G2, G3, G5 i G7). Iz piezometra G2 (sredina gabionskog potpornog zida) nije moguće vršiti mjerenje razina podzemnih voda, jer je uvidom ustanovljeno da je uslijed velikih oborina došlo do njegova zapunjenja sitnim suspendiranim materijalom (pretežno muljem i blatom). Ostali piezometri su upotrebljivi i iz njih su vršena mjerenje razina podzemnih voda. Postavljeno je četiri Mini Diver instrumenta (MD4, MD5, MD6 i MD7) u piezometre G1, G3, G5 i G7 na način da su spuštena do samog dna instaliranog piezometra. Kontinuirano mjerenje promjena razina podzemne vode u piezometru G1 se vrši od prosinca 2011., mjerenja u piezometru G3 od veljače 2012. godine, dok su mjerenja razina podzemnih voda u piezometrima G5 i G7 započela u travnju 2013. godine.



*Slika 2.18. Grafički prikaz poprečnog profila sabirnog kanala oborinske vode sa postavljenim Mini Diver instrumentom 1 (MD1) u rupi na sredini sabirnog kanala*



*Slika 2.19. Dispozicija Mini Diver instrumenata u blizini nožice klizišta Grohovo*



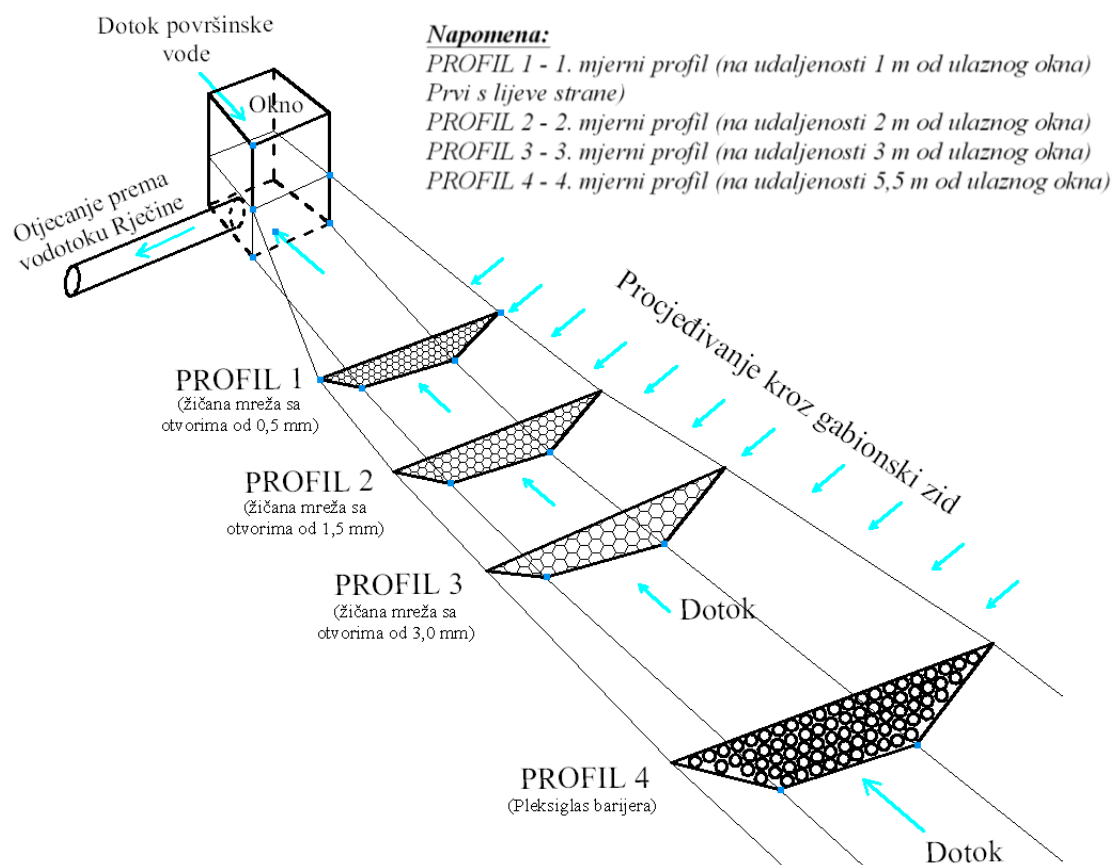
U studenome 2013. godine na području klizišta Grohovo instalirana je nova meteorološka stanica MS2 tipa Davis Wantage Pro2 sa svom popratnom opremom (Slike 2.16. i 2.17.b). Meteorološka stanica je postavljena u donjem dijelu klizišta Grohovo u dobro zaštićenom postojećem objektu (otprilike 80-tak metara iznad gabionskog potpornog zida - nožice klizišta (Slika 2.16.). Podaci sa postojeće MS2 se prikupljaju svakih 16 dana i nanovo reprogramiraju, a služe za potrebe ulaznih hidroloških parametara u SPH 2D modelu.

Tri piezometra (G1, G2 i G3) su u donjoj zoni klizišta (samoj nožici klizišta), dok su dva (G5 i G7) unutar same zone klizanja (u srednjoj zoni klizišta). Temeljem piezometara se kontinuirano mjere razine podzemnih voda, te postoji mogućnost iscrtavanja linija vodnog lica (prihranjivanja) podzemne vode prema Rječini.

Za potrebe dobivanja ulaznih geoloških parametara potrebnih za izradu numeričkog modela propagacije toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala izrađena je barijera od pleksiglasa za prikupljanje suspendiranog nanosa koji se procjeđuje kroz gabionski potporni zid na dnu nožice klizišta Grohovo (Slika 2.20.). Barijera može poslužiti za kvantitativno određivanje suspendiranog sitnozrnatog materijala u području nožice klizišta Grohovo.

Temeljem sakupljenih meteoroloških podataka s MS1 na kruni brane Valići analizirane su varijacije pojedinih najznačajnijih meteoroloških parametara za 2011., 2012., 2013. i 2014. godinu koji su poslužili kao ulazni parametri u SPH 2D simulacijskom programu. U nastavku je prikazana analiza za 2012. godinu (Slika 2.21.). Za svaki prikazani fizikalni parametar određene su njegove maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti. Meteorološki podaci za 2011. godinu su mjereni od lipnja mjeseca kada je po prvi put instalirana MS1. U 2012. godini nema podataka u zadnjem periodu mjeseca srpnja (posljednja dva tjedna), jer je u tom periodu vršen remont na temeljnjim ispustima i zapornici na brani Valići. Na temelju danih podataka izvršena je hidrološka analiza određivanja brzina toka u oteretnim kanalima, ukupni protok i volumen vode na području klizišta Grohovo pod utjecajem površinskog otjecanja i procjeđivanja kroz potporni gabionski zid.

Klizište Grohovo se nalazi neposredno nizvodno od akumulacije Valići koja nakon njezine izgradnje 1968. godine regulira ispuštanje vode u srednjem i donjem toku Rječine. Stoga su kao relevantni podaci za izradu 2D numeričkih modela širenja toka krupnozrnatog materijala korišteni isključivo hidrološki podaci sa relevantne meteorološke stanice MS1 i MS2. Hidrološka analiza koja je u nastavku dana temelji se na prikupljenim podacima s meteoroloških stanica, te podataka prikupljenih na Mini Diver instrumentima instaliranih na klizištu Grohovo.

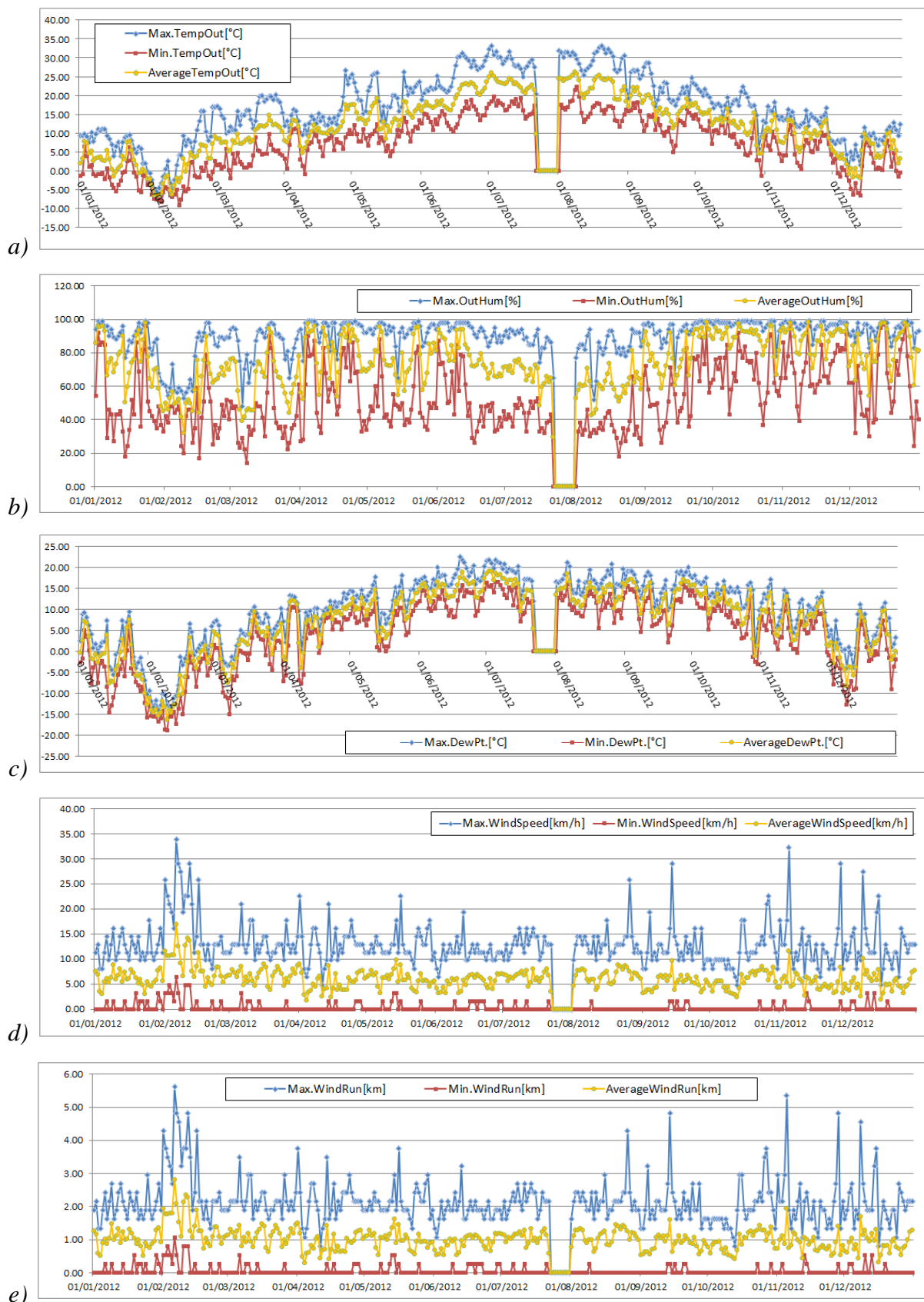


GEOMETRIJSKE VELIČINE NA POPREČNIM PROFILIMA			
PROFIL 1	PROFIL 2	PROFIL 3	PROFIL 4
$l_1=46,0$ cm	$l_1=42,0$ cm	$l_1=42,5$ cm	$l_1=57,0$ cm
$l_2=86,0$ cm	$l_2=88,0$ cm	$l_2=87,5$ cm	$l_2=94,0$ cm
$l_3=29,0$ cm	$l_3=32,0$ cm	$l_3=32,0$ cm	$l_3=28,0$ cm
$l_4=26,5$ cm	$l_4=31,0$ cm	$l_4=30,0$ cm	$l_4=19,0$ cm
$h_1=20,2$ cm	$h_1=20,5$ cm	$h_1=20,0$ cm	$h_1=16,5$ cm
$h_2=20,0$ cm	$h_2=19,3$ cm	$h_2=18,5$ cm	$h_2=13,5$ cm
$h_3=20,0$ cm	$h_3=20,3$ cm	$h_3=20,0$ cm	$h_3=15,0$ cm
$\alpha_1=45$ cm	$\alpha_1=50$ cm	$\alpha_1=51$ cm	$\alpha_1=51$ cm
$\alpha_2=42$ cm	$\alpha_2=54$ cm	$\alpha_2=53$ cm	$\alpha_2=48$ cm

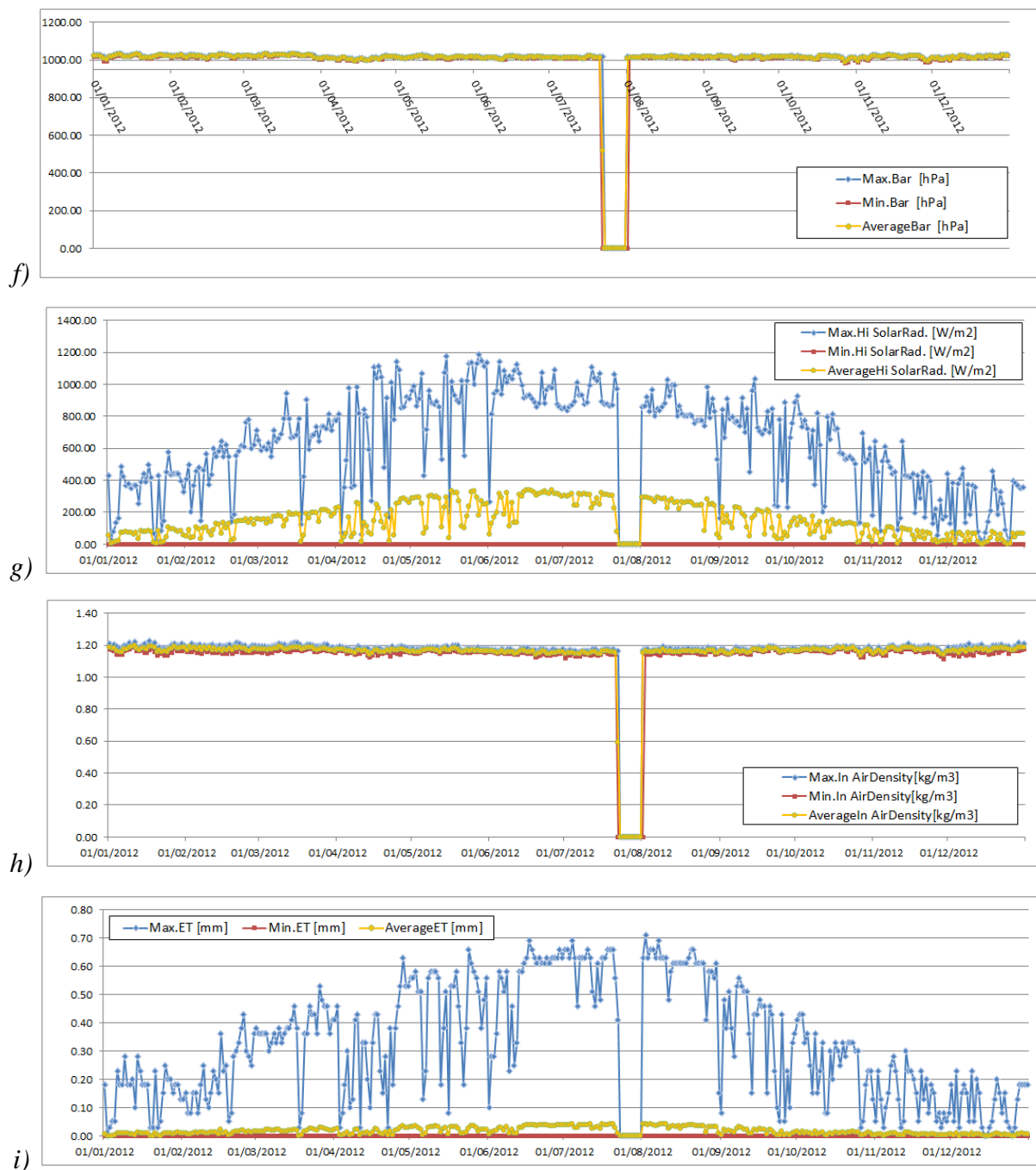
pogled odozgora (prema ulaznom oknu)

**Slika 2.20.** Izrada pleksiglas barijere za hvatanje sitnozrnatog suspendiranog materijala

Hidrološka analiza klizišta Grohovo zahtijeva u realnom vremenu procjenu odvodnje oborinske vode i volumena u dijelu odvodnog (retencijskog) kanala koji se nalazi ispred gabionskog potpornog zida u nožici klizišta. Metode istraživanja temelje se na hidrološkim i hidrauličkim podacima koji su prikupljeni terenskim mjerenjima na klizištu Grohovo. Baza sadrži podatke u realnom vremenu prikupljene s instaliranih mjernih uređaja: meteoroloških stanica, mini Diver i Baro Diver instrumenata (Slika 2.22.), ombrografa, limnigrafa, satelitskog radara i ADCP mjeraca protoka. Metode istraživanja obuhvatila su površinska istraživanja, istraživanja podzemnih voda (mjerenje razine podzemnih voda na području klizišta Grohovo), numeričko modeliranje primjenom SPH 2D simulacijskim programom i GIS tehnologiju u ovisnosti o dostupnim realnim podacima na određenim mjestima.



**Slika 2.21.** Grafički prikazi varijacija a) vanjske temperature zraka, b) vanjske vlažnosti zraka, c) točke rosišta, d) brzine vjetra, e) utjecaja dosega vjetra, f) atmosferskog tlaka, g) maksimalne solarne energije, h) gustoće zraka i i) evapotranspiracije u vremenu za 2012. godinu, meteorološka stanica MSI, brana Valiči

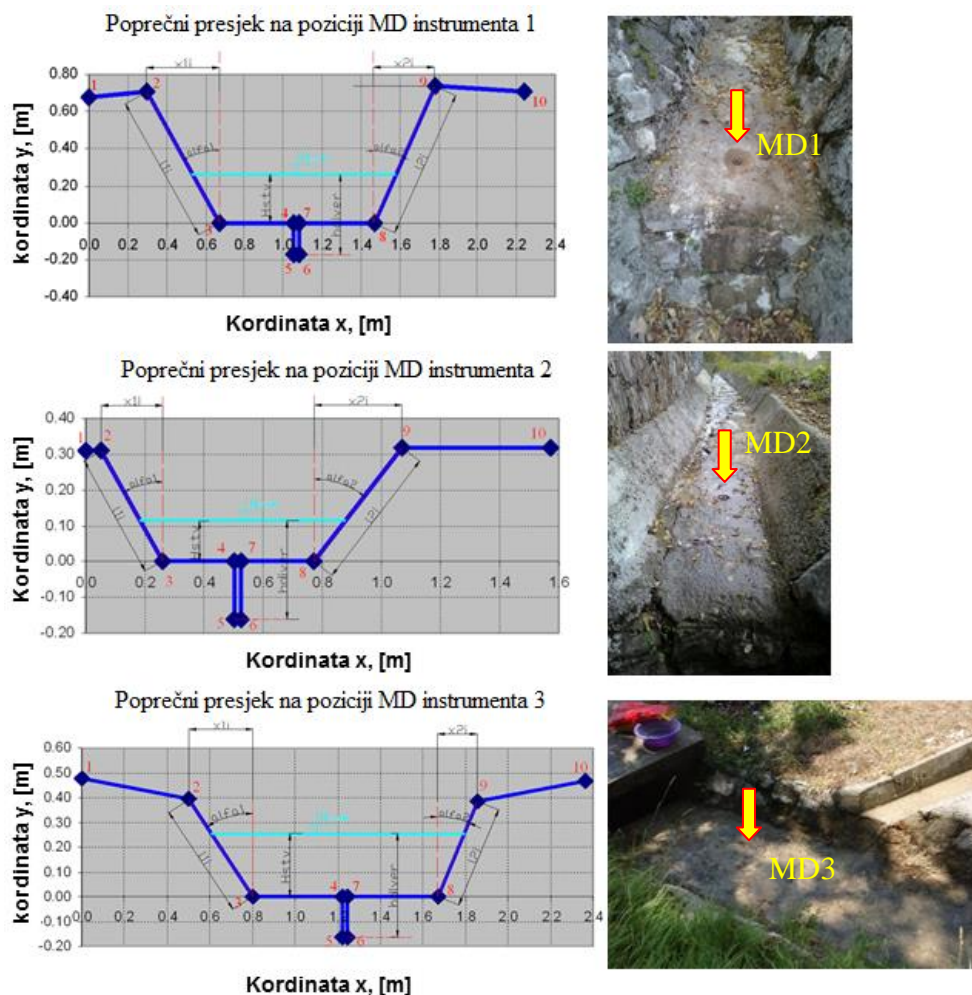


**Slika 2.21.** Grafički prikazi varijacija a) vanjske temperature zraka, b) vanjske vlažnosti zraka, c) točke rosišta, d) brzine vjetra, e) utjecaja doseg vjetra, f) atmosferskog tlaka, g) maksimalne solarne energije, h) gustoće zraka i i) evapotranspiracije u vremenu za 2012. godinu, meteorološka stanica MSI, brana Valiči, nastavak

Na slici 2.23. dani su grafički prikazi najznačajnijih hidroloških parametara u realnom vremenu za 2012. godinu. Dakako, za potrebe doktorskog rada izvršena je analiza hidroloških parametara za cjelokupni period od 2011.-2014. godine. Također je dana i njihova kratka analiza koja je u konačnici poslužila za određivanje mjerodavnih vrijednosti tih parametara u svrhu ulaznih podataka za SPH 2D numerički model. Maksimalna temperatura zraka u

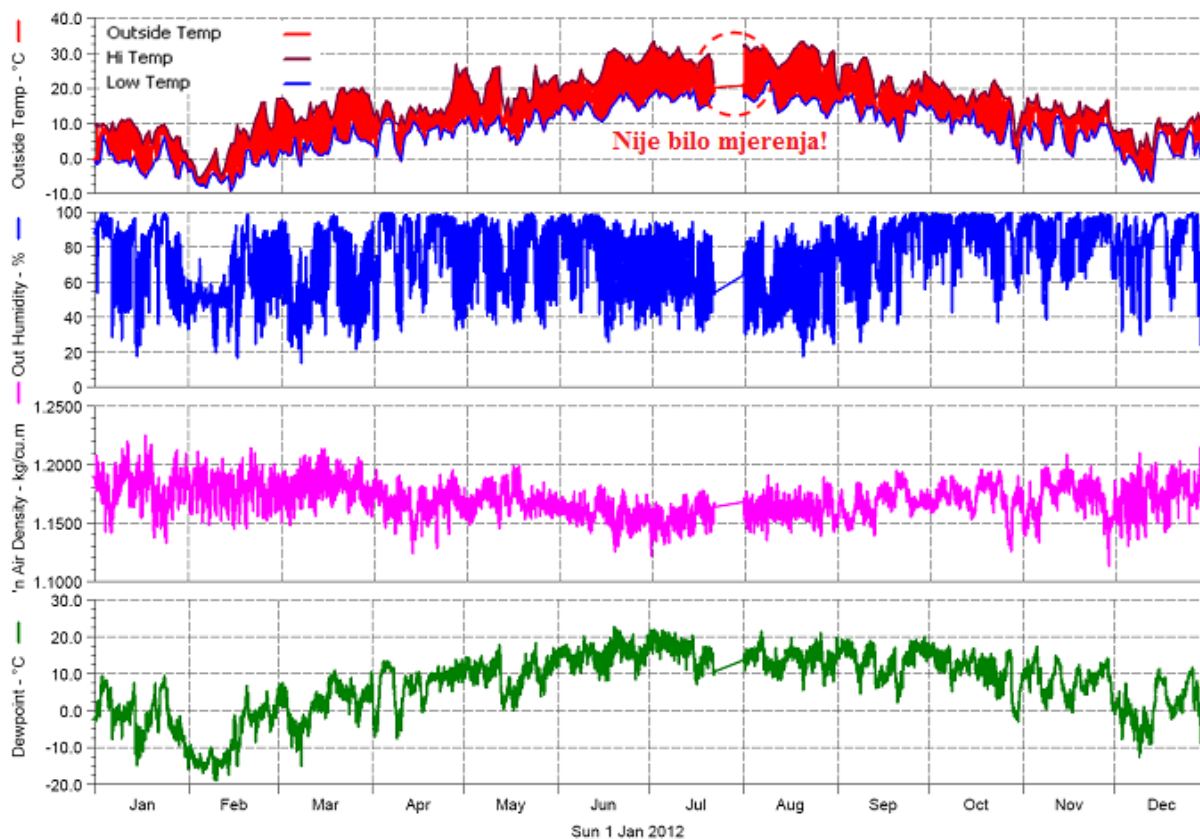


kolovozu 2011. iznosila je 33,7 °C, dok je minimalna temperatura zraka u prosincu 2011. iznosila -3,6 °C. Vlažnost zraka u 2011. varirala je u rasponu od 24% do gotovo 100%. Srednja gustoća zraka na klizištu Grohovo u 2011. bila je oko 1,17 kg/m<sup>3</sup>. Minimalne i maksimalne vrijednosti gustoće zraka bile su 1,123 kg/m<sup>3</sup> i 1,228 kg/m<sup>3</sup>. Najveća točka rosišta zabilježena za dano područje određena je sa vrijednosti od 22,3 °C.



**Slika 2.22.** Karakteristični kanalski poprečni presjeci na kojima su postavljene Mini Diver instrumenti MD1, MD2 i MD3, klizište Grohovo (Žic i sur., 2013a)

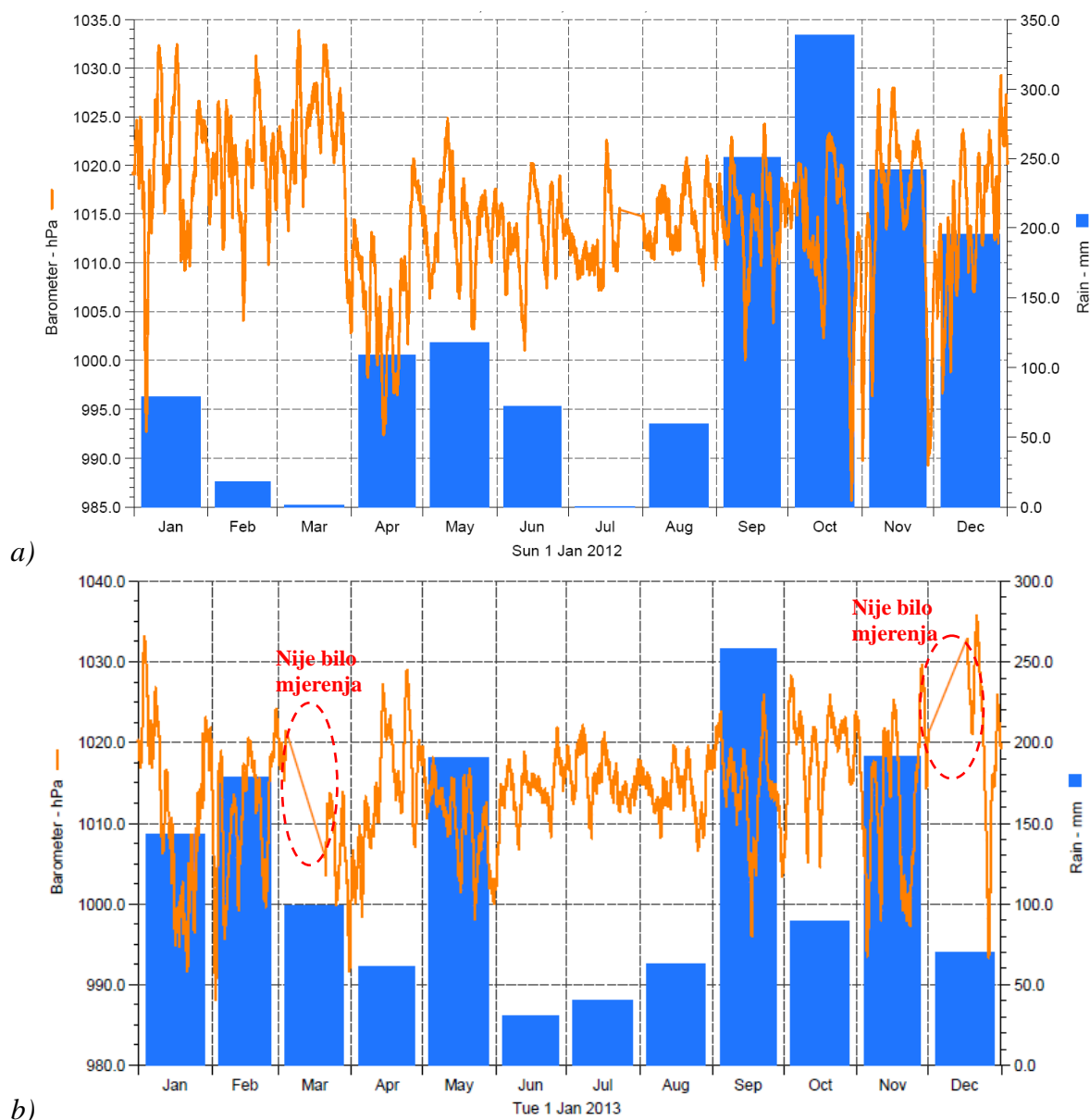
Treba napomenuti da ne postoje hidrološki podaci u razdoblju od 22. srpnja do kraja mjeseca (Slika 2.23.) zbog određenog hidrotehničkog remonta unutar krune brane Valići. Najveća i najmanja zabilježena vanjske temperature zraka u 2012. bile su 32,3 °C (u lipnju) i -9,3 °C (u veljači). Vlažnost zraka varirala je u rasponu od 14 do 100%, dok je najmanja i najveća gustoća zraka iznosila 1,112 kg/m<sup>3</sup> i 1,225 kg/m<sup>3</sup> (Žic i sur., 2013a). Najveća vrijednost točke rosišta bila je nešto veća od 21 °C u lipnju i kolovozu mjesecu (Slika 2.23.).



**Slika 2.23.** Grafički prikaz promjena vanjske temperature zraka, maksimalne i minimalne temperature zraka, vlažnosti zraka, gustoće zraka i točke rosišta u realnom vremenu za 2012. godinu, MS1 Valići (Žic i sur., 2013a)

Intenzitet oborine je važan parametar za praćenje pojave širenja toka krupnozrnatog materijala, koji je usko povezan sa zasićenosti materijala terena i potencijalnog pokretanja klizišta. Slika 2.24. prikazuje visoku varijabilnost ukupne mjesečne količine oborina u 2012. i 2013. godini. Većina oborina (237 mm) pala je tijekom mjeseca listopada 2011., dok je najmanja količina oborina (5 mm) zabilježena u kolovozu. Godina 2012. je bila sušna godina, u kojoj je najveća mjesečna količina oborina zabilježena u listopadu (338,6 mm); ožujak i srpanj su bili najsušniji mjeseci u godini (1,4 mm i 0,4 mm). Minimalni atmosferski tlak je odgovarao najvećem intenzitetu oborina, dok je maksimalni tlak zraka odgovarao pretežno sušnom razdoblju (Slika 2.24.a)).

Mjesečne kumulativne vrijednosti varijacija temperature zraka, oborina i brzina vjetra na području akumulacije Valići i njenoj široj okolini analizirane su za period od 2011.-2014. godine. U nastavku je dan tablični prikaz za 2012. godinu (Tablica 2.5.). U 2011., na klizištu Grohovo je ukupno palo oko 672,6 mm oborina (od lipnja do prosinca mjeseca), dok je ukupna količina oborina u 2012. iznosila 1484,9 mm (Žic i sur., 2013a).



**Slika 2.24.** Grafički prikaz promjena vrijednosti atmosferskog tlaka zraka i ukupnih mjesečnih oborina u realnom vremenu za a) 2012. i b) 2013. godinu, MS1 Valiči (Žic i sur., 2013a)

U nastavku je dan pregled varijacija maksimalnih brzina vjetra i evapotranspiracije na području klizišta Grohovo za 2012. i 2013. godinu (Slika 2.25.). Najveća zabilježena brzina vjetra u 2011. godini iznosila je 86,9 km/h (u srpnju), dok je srednja vrijednost za cijelu godinu iznosila oko 6,0 km/h. Maksimalna brzina vjetra od 83,7 km/h zabilježena je u veljači 2012. godine, dok je srednja godišnja brzina vjetra iznosila 6,1 km/h. Sjeverni vjetar je bio dominantan smjer vjetra na području klizišta Grohovo. Maksimalne vrijednosti evapotranspiracije su značajne za razdoblje od svibnja do kraja kolovoza. U 2011., maksimalni mjesečni iznos evapotranspiracije iznosio je 87,8 mm (u kolovozu), dok je najniži iznos evapotranspiracije iznosio 12 mm (u prosincu). U 2012., slične vrijednosti zabilježene

su, uz maksimalnu evapotranspiraciju od 85,8 mm (u kolovozu) i minimalnu evapotranspiraciju od 10 mm (u prosincu).

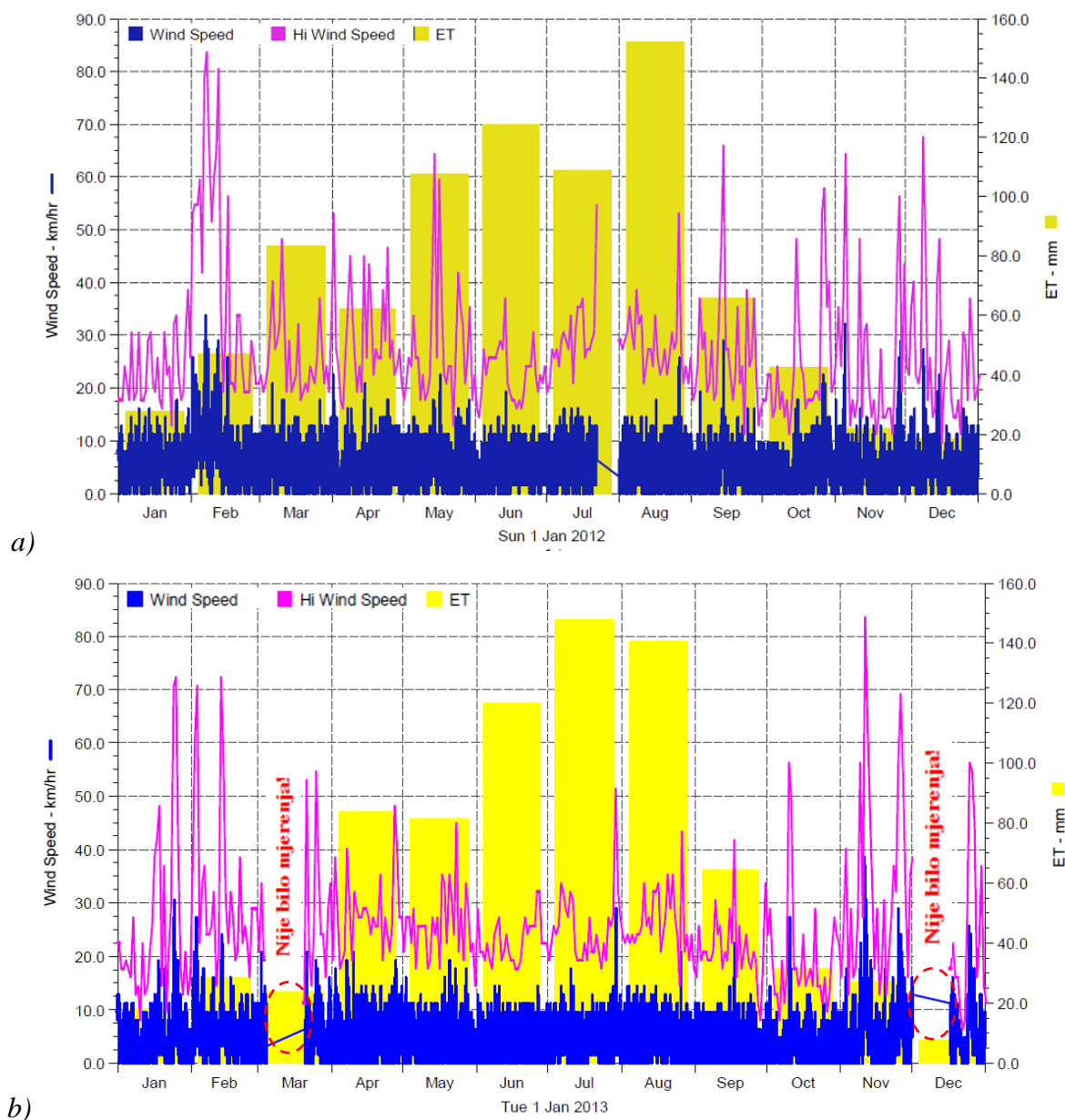
**Tablica 2.5. Godišnje meteorološke vrijednosti za 2012. godinu, Meteorološka stanica MS1 Valiči (Žic i sur., 2013a)**

TEMPERATURA (°C)														
Godina	Mjesec	Maks. sr. vrijednost	Maks. min. vrijednost	Srednjak	Bazni teper. stup. grijanja	Bazni teper. stup. hlađenja	Najveće vrijednosti	Datum	Najniže vrijednosti	Datum	Maks. >=32	Maks. <=0	Min. <=0	Min. <=-18
2012.	1	7,5	-0,9	2,8	481	0	11,2	11.	-5,7	28.	0	1	23	0
2012.	2	4,3	-3,9	-0,0	531	0	16,8	29.	-9,3	14.	0	10	25	0
2012.	3	15,7	3,5	9,5	274	1	20,1	28.	-2,2	8.	0	0	1	0
2012.	4	14,6	7,1	10,7	234	6	26,8	28.	-0,8	10.	0	0	1	0
2012.	5	20,2	9,3	14,5	138	20	26,4	24.	3,9	18.	0	0	0	0
2012.	6	25,5	14,3	19,5	39	77	31,2	19.	10,3	15.	0	0	0	0
2012.	7	28,9	17,2	23,0	4	107	33,3	2.	13,8	17.	2	0	0	0
2012.	8	29,7	16,3	22,9	14	158	33,2	20.	11,6	28.	4	0	0	0
2012.	9	22,6	12,9	17,2	71	37	28,8	9.	4,9	21.	0	0	0	0
2012.	10	17,8	8,8	12,6	181	4	22,8	1.	-1,3	30.	0	0	1	0
2012.	11	13,9	6,6	10,1	247	0	18,3	5.	0,5	17.	0	0	0	0
2012.	12	8,1	0,9	4,3	433	0	12,8	28.	-6,7	13.	0	0	12	0
		<b>17,2</b>	<b>7,5</b>	<b>12,0</b>	<b>2647</b>	<b>410</b>	<b>33,3</b>	<b>SRP</b>	<b>-9,3</b>	<b>VELJ</b>	<b>6</b>	<b>11</b>	<b>63</b>	<b>0</b>

OBORINE (mm)								BRZINA VJETRA (km/hr)					
Godina	Mjesec	Ukupno	Najveća u promatr. danu	Datum	Broj kišnih dana iznad (mm)			Godina	Mjesec	Srednjak	Najveća vrijednost	Datum	Dominant. smj. vjetra
					0,2	2	20						
2012.	1	79,4	53,6	3.	8	4	1	2012.	1	6,0	38,6	30.	N
2012.	2	18,0	12,6	20.	3	2	0	2012.	2	8,9	83,7	7.	N
2012.	3	1,2	0,8	18.	3	0	0	2012.	3	6,7	48,3	10.	N
2012.	4	109,0	30,0	11.	19	11	1	2012.	4	5,2	53,2	1.	N
2012.	5	117,8	47,0	7.	13	8	1	2012.	5	6,0	64,4	14.	N
2012.	6	72,0	29,4	12.	11	5	2	2012.	6	5,4	37,0	13.	N
2012.	7	0,4	0,4	15.	1	0	0	2012.	7	6,7	54,7	22.	N
2012.	8	59,4	34,8	31.	4	2	2	2012.	8	6,7	53,1	26.	N
2012.	9	251,0	113,8	19.	15	7	2	2012.	9	5,3	66,0	14.	N
2012.	10	338,6	105,6	15.	24	11	4	2012.	10	5,6	57,9	27.	N
2012.	11	242,1	54,6	1.	20	11	5	2012.	11	5,3	64,4	5.	N
2012.	12	196,0	67,4	15.	16	10	3	2012.	12	5,3	67,6	8.	N
		<b>1484,9</b>	<b>113,8</b>	<b>RUJ</b>	<b>137</b>	<b>71</b>	<b>21</b>			<b>6,1</b>	<b>83,7</b>	<b>VELJ</b>	<b>N</b>

Obrada i analiza podataka za klizište Grohovo temeljila se na prikupljanju hidroloških podataka sa tri mini Diver instrumenta koji su smješteni unutar odvodnih (oteretnih) kanala za prikupljanje oborinskih i procjednih voda sa područja klizišta Grohovo. Na temelju izmjerenih razina vode u odvodnim kanalima u stvarnom (realnom) vremenu i na temelju hidrauličko-geometrijskih parametara (Tablica 2.6.) mjereno za svaki poprečni presjek na poziciji instaliranih mini Diver instrumenata, određeni su maksimalni mjesečni protoci, ukupni volumen u određenom vremenskom periodu, kao i brzine toka u oteretnim kanalima.





**Slika 2.25.** Grafički prikaz varijacija brzina vjetra, maksimalne vrijednosti brzina vjetra i evapotranspiracije (ET) u realnom vremenu za a) 2012. i b) 2013. godinu, meteorološka stanica MS1 Valiči (Žic i sur., 2013a)

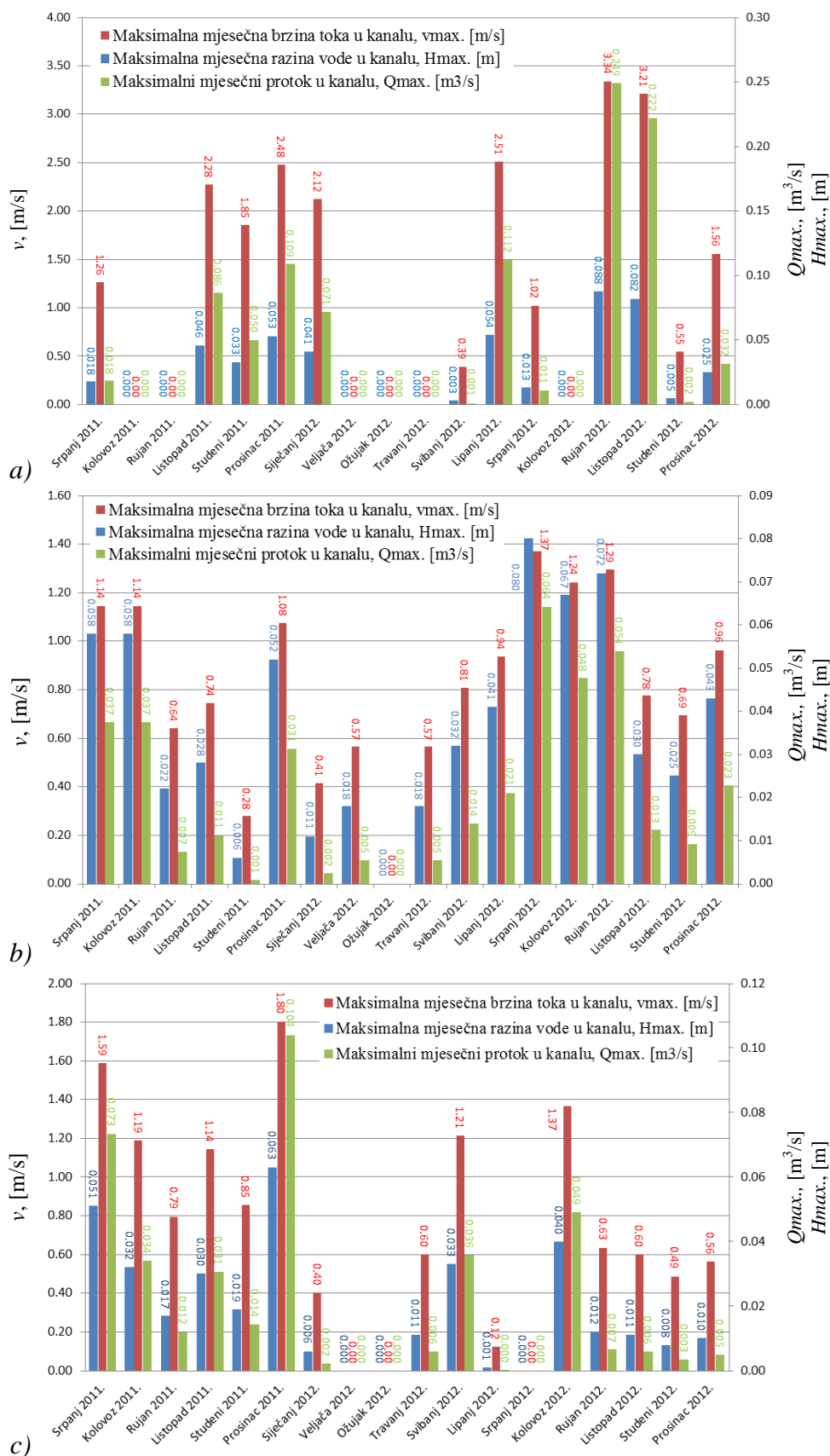
**Tablica 2.6.** Geometrijske i hidrauličke karakteristike za kanalski profil na poziciji instaliranih Mini Diver instrumenata, klizište Grohovo (Žic i sur., 2013a)

	MINI DIVER 1	MINI DIVER 2	MINI DIVER 3
Dubina rupe na poziciji Mini Divera instrumenta, [m]:	0,170	0,160	0,165
Pad dna kanala, [%o]:	32,0	6,6	13,6
Nagib bočnih stranica lijevog oteretnog kanala, [°]:	30,58	37,88	41,33
Nagib bočnih stranica desnog oteretnog kanala, [°]:	25,25	47,95	29,18
Manningov koeficijent hrapavosti, [m <sup>-1/3</sup> s]:	0,030	0,030	0,030
Vremenski korak, [s]:	60,00	60,00	60,00
Pridnena širina kanala, [m]:	0,800	0,510	0,870

Slika 2.26. ilustrira razlike u maksimalnim mjesečnim vodostajima, maksimalne mjesečne brzine strujanja u kanalu i maksimalne mjesečne protoke vode u kanalu na položaju Mini Diver instrumenata 1, 2 i 3, od srpnja 2011. do prosinca 2012. godine. Na lijevom odvodnom (oteretnom) kanalu, maksimalna brzina protoka je iznosila 3,34 m/s (Slika 2.26.a)). Visoke vrijednosti brzina posljedica su velikog nagiba kanala od 32%. U kolovozu i rujnu 2011., nije bilo zabilježenih razina vode od strane Mini Diver instrumenata. Stoga, brzinu strujanja vode, protoke i volumen oborinskih voda nije bilo moguće izmjeriti. Početkom veljače 2012., došlo je do zamrzavanje vode u odvodnim kanalima na području klizišta Grohovo zbog jake zime i niskih temperatura (-9,3 °C, 30 cm debelog sloja leda). Tijekom tog razdoblja, mini Diver instrumenti su oštećeni (puknuće keramičkih membrana), te su bili neupotrebljivi za mjerenje. Najveće mjesečne količine protoka vode u lijevom odvodnom kanalu (položaj MD1) zabilježene su u studenom (14055,0 m<sup>3</sup>) i listopadu 2011. godine (11177,2 m<sup>3</sup>) (Tablica 2.7.). Brzina strujanja u glavnom odvodnom kanalu (položaj MD2) varirala je od 0,28 do 1,37 m/s, maksimalni zabilježeni protok vode iznosio je 0,053 m<sup>3</sup>/s (Slika 2.26.b)), a maksimalni zabilježeni ukupni mjesečni volumen vode u srpnju i prosincu 2012. iznosili su 13987,6 m<sup>3</sup>, odnosno 7278,6 m<sup>3</sup> (Tablica 2.7.). Minimalna ukupna mjesečna količina vode (volumen) iznosila je 2,50 m<sup>3</sup> u studenom 2011.

Najveći ukupni mjesečni volumeni vode za desni odvodni kanal na klizištu Grohovo (položaj mini Diver instrumenta 3), koji se nalazi ispred gabionskog potpornog zida, iznosili su 20859,8 i 13329,5 m<sup>3</sup> u srpnju i kolovozu 2011. godine (Tablica 2.7.). Maksimalne mjesečne brzine protoka vode za određeni kanal bile su u rasponu od 0,12 do 1,80 m/s, a razina vode u rasponu od 8-63 mm, dok je maksimalni zabilježeni protok vode iznosio oko 0,10 m<sup>3</sup>/s (u prosincu 2011.). Pregled ukupnih mjesečnih volumena oborinske vode za pojedine odvodne kanale na klizištu Grohovo prikazano je u tablici 2.7. i na slici 2.27. Na temelju hidrauličnih izračuna oborinskog otjecanja na odvodnim kanalima podno klizišta Grohovo, izračunata je kumulativna godišnja količina oborinskih voda u 2011. i 2012. godini u vrijednosti 66266,7 i 42931,9 m<sup>3</sup>. Iako je hidraulička analiza za 2011. godinu uključila samo posljednjih 6 mjeseci u godini (od srpnja do prosinca), ukupni godišnji volumen oborinske vode je znatno veći u odnosu na cijelu 2012. godinu.

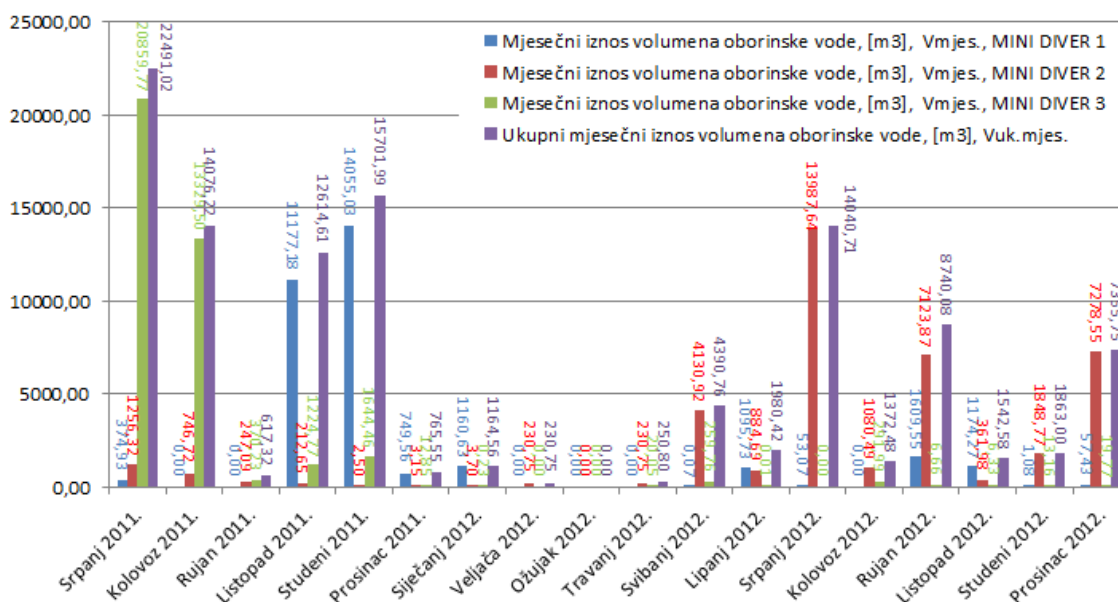
Za potrebe izrade hidrološkog modela primjenom TRIGRS programa, te djelomično za potrebe numeričkog SPH 2D modela korišteni su slijedeći hidro-meteorološki ulazni parametri: oborine, atmosferski tlak, temperature i gustoća zraka, brzine i smjer vjetera, evapotranspiracija, vlažnost zraka, te razine podzemnih voda.



Slika 2.26. Grafički prikaz promjena maksimalnih mjesečnih razina vode, maksimalnih mjesečnih brzina toka i maksimalnih mjesečnih protoka u kanalu za period od srpnja 2011. do prosinca 2012. godine na poziciji a) Mini Diver instrumenta 1, b) Mini Diver instrumenta 2, c) Mini Diver instrumenta 3, klizište Grohovo (Žic i sur., 2013a)

**Tablica 2.7.** Ukupni mjesečni volumen vode za period od srpnja 2011. do prosinca 2012. godine, Mini Diver instrumenti 1, 2 i 3, klizište Grohovo (Žic i sur., 2013a)

Mjesec	Mjesečne količine volumena vode, [m <sup>3</sup> ]			Ukupne mjesečne količine volumena vode, [m <sup>3</sup> ], V <sub>uk.mjesečno.</sub> [m <sup>3</sup> ]
	MINI DIVER 1	MINI DIVER 2	MINI DIVER 3	
	V <sub>mjesečno.</sub> [m <sup>3</sup> ]	V <sub>mjesečno.</sub> [m <sup>3</sup> ]	V <sub>mjesečno.</sub> [m <sup>3</sup> ]	V <sub>uk.mjesečno.</sub> [m <sup>3</sup> ]
Srpanj 2011.	374,93	1256,32	20859,77	22491,02
Kolovoz 2011.	0,00	746,72	13329,50	14076,22
Rujan 2011.	0,00	247,09	370,23	617,32
Listopad 2011.	11177,18	212,65	1224,77	12614,61
Studeni 2011.	14055,03	2,50	1644,46	15701,99
Prosinac 2011.	749,56	3,15	12,85	765,55
Siječanj 2012.	1160,63	3,70	0,23	1164,56
Veljača 2012.	0,00	230,75	0,00	230,75
Ožujak 2012.	0,00	0,00	0,00	0,00
Travanj 2012.	0,00	230,75	20,05	250,80
Svibanj 2012.	0,07	4130,92	259,76	4390,76
Lipanj 2012.	1095,73	884,69	0,01	1980,42
Srpanj 2012.	53,07	13987,64	0,00	14040,71
Kolovoz 2012.	0,00	1080,49	291,99	1372,48
Rujan 2012.	1609,55	7123,87	6,66	8740,08
Listopad 2012.	1174,27	361,98	6,33	1542,58
Studeni 2012.	1,08	1848,77	13,16	1863,00
Prosinac 2012.	57,43	7278,55	19,77	7355,75
<b>Suma (2011.):</b>				<b>66266,71</b>
<b>Suma (2012.):</b>				<b>42931,91</b>

**Slika 2.27.** Ukupni mjesečni volumeni vode u odvodnim kanalima za period od srpnja 2011. do prosinca 2012. godine, Mini Diver instrumenti 1, 2 i 3, klizište Grohovo (Žic i sur., 2013a)

### 2.4.1. Mini X-Band Dual polarimetrijski meteorološki radar

Točnost mjerenja količine oborina, njen intenzitet i prostorna distribucija, od presudne je važnosti za hidrološka istraživanja i razvoj sustava ranog uzbunjivanja za pojave poplava i klizišta na području sliva vodotoka Rječine. Na složenom i planinskom terenu veliki broj kišnih mjernih stanica nisu dovoljna za točnost mjerenja prostorne varijabilnosti oborina na velikim područjima kao što je sliv vodotoka Rječine. Meteorološki radar nudi način za mjerenje količine oborina sa visokom prostornom i vremenskom rezolucijom. No, prije nego što se radar upotrijebi za hidrološka mjerenja potrebno je analizirati njegove podatke na način da se oni usporede sa podacima sa drugih mjernih stanica ili kišomjera kako bi se procijenila njegova točnost, te ukoliko je potrebno da se odaberu odgovarajuće metode kalibracije.

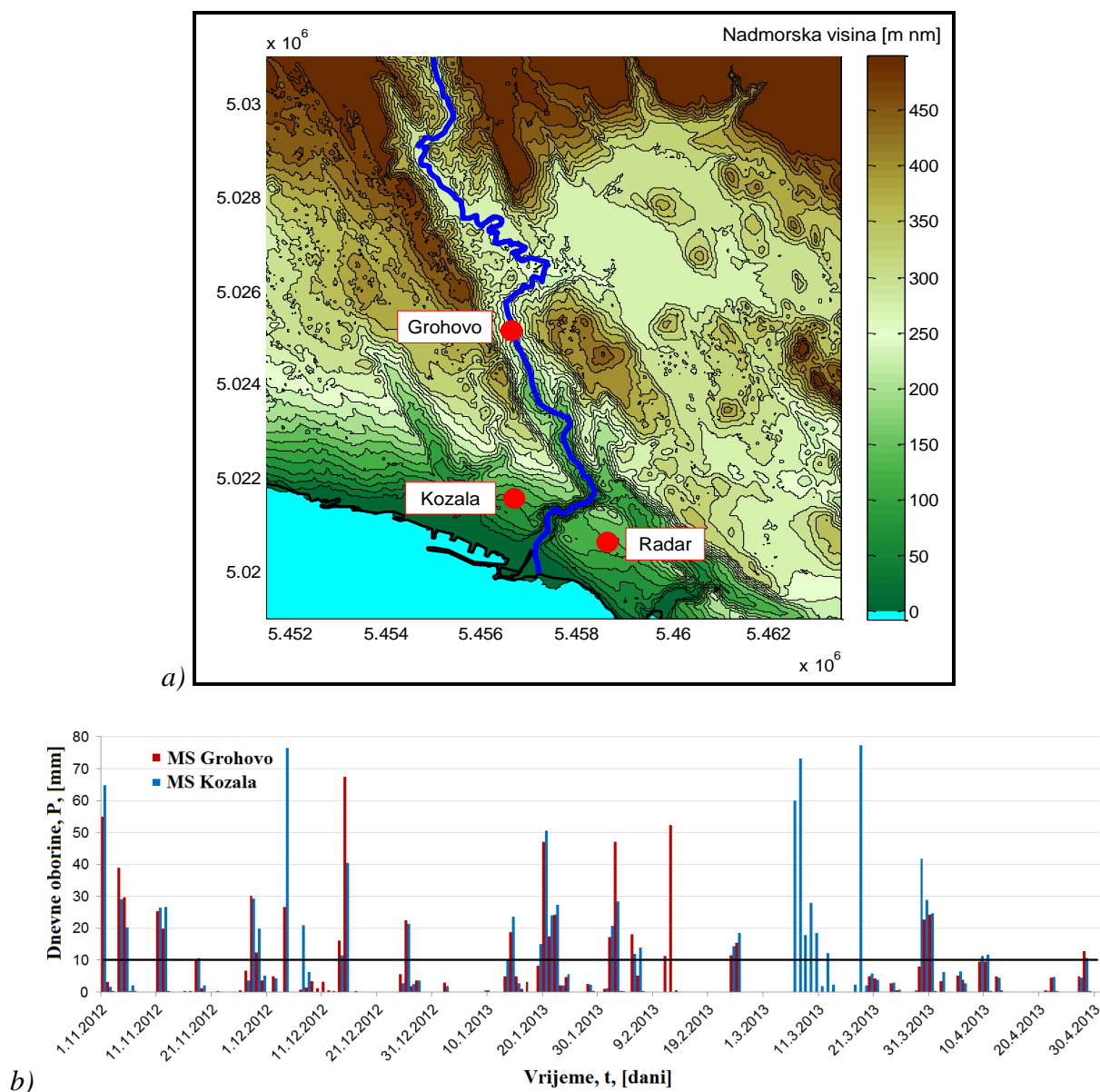
Radar koji se koristio u ovom istraživanju je Mini X-Band Dual polarimetrijski meteorološki radar, proizveden od strane FURUNO Electric Co, Ltd. Radar je darovala Japanska agencija za međunarodnu suradnju (JICA) u sklopu hrvatsko-japanskog projekta. Radar je instaliran u studenom 2012. godine na krovu zgrade Građevinskog fakulteta koja se nalazi u Kampusu Sveučilišta u Rijeci (Slika 2.28.). Radar ima rezolucijski raspon od 96 m i vremensku rezoluciju od 60 sekundi kako bi pokrio puni krug od 360°. Radi se o dvostrukom polarimetrijskom radaru.



*Slika 2.28. Instalacija Furuno X-Band Dual polarimetrijskog Doplerova radara i njegova primjena za tri karakteristična odabrana pilot područja unutar hrvatsko-japanskog bilateralnog znanstvenog projekta*



U periodu od studenog 2012. do srpnja 2013. radar je djelovao kao Doppler radar, s jednom horizontalnom polarizacijom. Radar služi za mjerenje intenziteta oborina u prostornoj i vremenskoj domeni za tri odabrana pilot područja unutar projekta (područje sliva vodotoka Rječine, sliva vodotoka Dubračine, te šire područje oko Mošćeničke Drage). Prikupljeni podaci sa radara u periodu od šest mjeseci uspoređeni su s dva mjerna ombrografa (jedan se nalazi na kruni brane Valići, u blizini klizišta Grohovo, na udaljenosti 4,9 km od mjesta instaliranog radara, a drugi se nalazi na području Kozale, 2,1 km od mjesta radara) (Slika 2.29.).



**Slika 2.29.** a) dispozicija dviju meteoroloških stanica u odnosu na meteorološki radar, b) dnevni podaci oborina (studeni 2012. – svibanj 2013. MS Valići (Grohovo), MS Kozala) (Krvavica i sur., 2013.)

Dvije navedene meteorološke stanice su izabrane zbog svoje blizine u odnosu na meteorološki radar. Ombrografi na meteorološkim stanicama su standardni kišomjeri s rezolucijom volumena od 0,2 mm, odnosno 10 i 5-minutnim vremenskim inkrementima snimanja podataka.

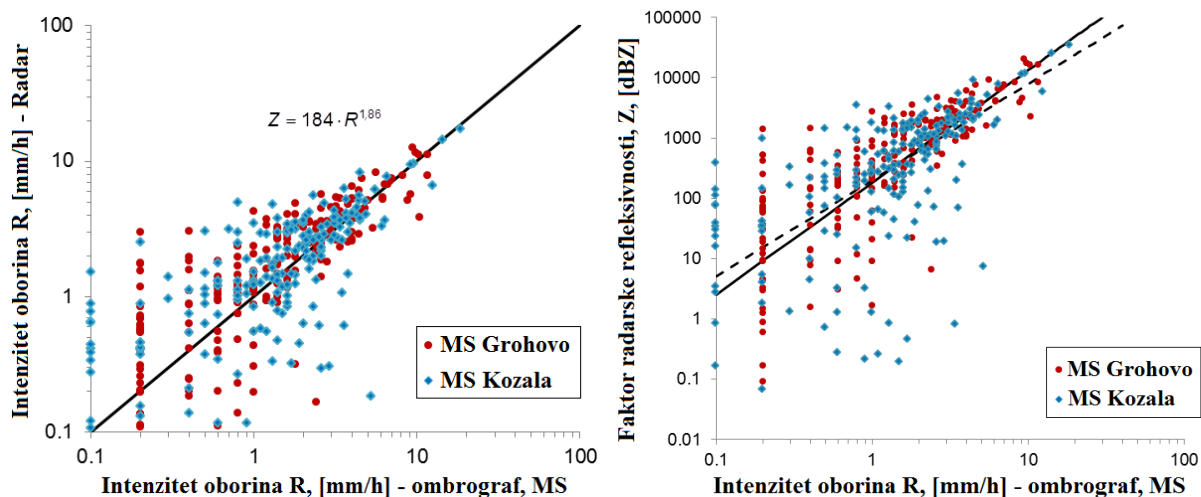
U razdoblju od studenog 2012. do svibnja 2013. razmatrano je 25 kišnih događaja. Niti jedan od dva ombrografa nisu zabilježila oborine veće od 10 mm u razdoblju od 24 sata. U nekim od tih slučajeva jedan ili drugi ombrograf nije radio na odgovarajući način. Ti podaci su isključeni iz analize, u kojima je uključeno ukupno 18 kišnih događaja prikladnih za radarsku analizu i usporedbu s ombrografima.

Kako se kiša ne može izravno mjeriti meteorološkim radarom, koristi se empirijski odnos  $Z-R$ :  $Z=X \cdot R^B$ , pri čemu je  $Z$  radarska refleksija, a  $R$  je intenzitet oborina. Formula se uglavnom koristi za pretvaranje intenziteta oborina. Analizirajući niz izmjerene radarske refleksivnosti i izmjerenu količinu oborina na obje kišomjerne stanice definiran je novi odnos  $Z-R$  ( $Z=184 \cdot R^{1,86}$ ) koja daje bolje statističke rezultate u odnosu na obično korištenu Marshallovu jednadžbu  $Z=200 \cdot R^{1,6}$  (Slika 2.30.).

A	B	r	RMSE	MAE	MBE	SumErr
240	1.37	<b>0.804</b>	2.624	1.398	-0.601	5.866
298	1.71	0.793	<b>1.417</b>	0.815	0.293	3.786
297	1.73	0.792	1.418	<b>0.814</b>	0.310	3.805
161	1.97	0.776	1.461	0.880	<b>0.000</b>	3.630
184	1.86	0.784	1.464	0.878	0.001	<b>3.619</b>
186	1.62	0.798	1.859	1.145	-0.367	4.624
200	1.6	0.799	1.817	1.111	-0.309	4.489

$$SumErr = r^{-1} + RMSE + MAE + |MBE|$$

$$\rightarrow Z = 184 \cdot R^{1,86}$$

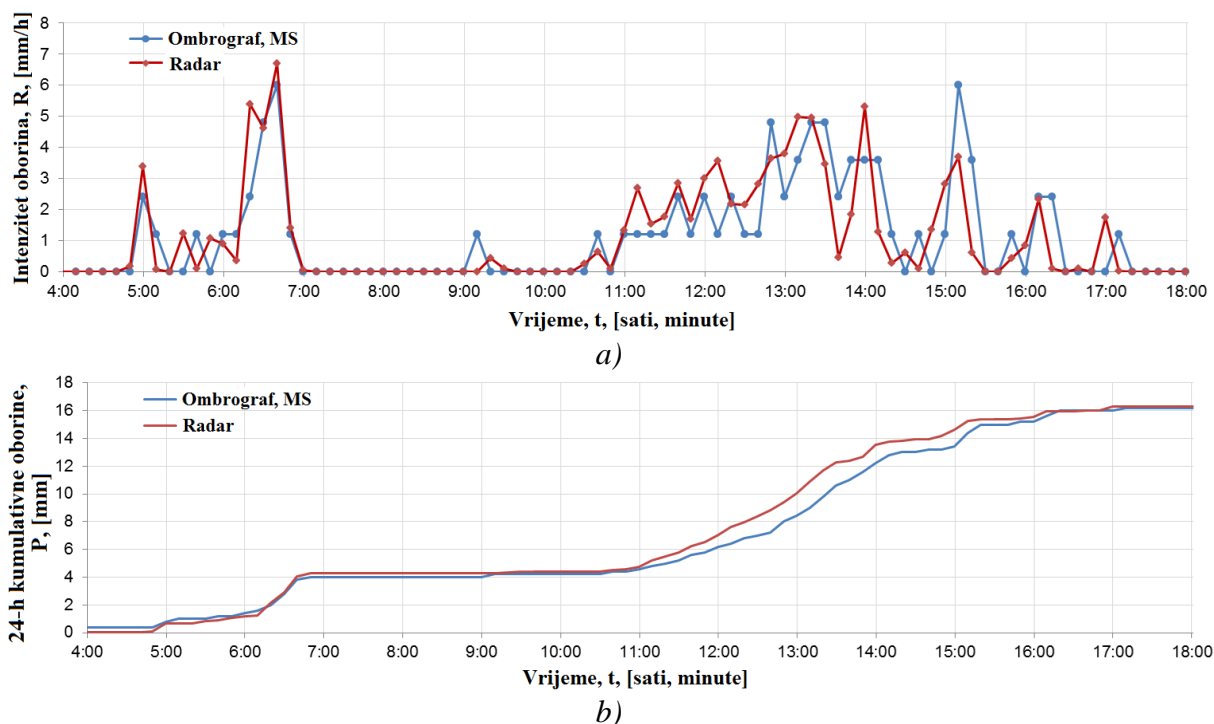


*Slika 2.30. Kalibracija meteorološkog radara (Krvavica i sur., 2013.)*

Kalibracija radara procjenjuje se usporedbom jednosatnog intenziteta kiše izračunatog iz izmjerene refleksije radara i jednosatnog mjerenja oborina sa obje mjerne stanice za

mjerenje kiše tijekom navedenih 18 kišnih događaja. Koeficijent korelacije i nekoliko statističkih pokazatelja (korijen srednje kvadratne greške, srednja apsolutna greška i srednja pristrana greška) se koriste u analizi. Rezultati su pokazali snažnu i jaku povezanost radarskih i kišomjernih podataka u većini kišnih događaja  $r > 0,7$  (26 od 36 slučajeva), ali za neke kišne događaje korelacija je bila vrlo slaba  $r < 0,2$  (3 od 36 slučajeva) (Krvavica i sur., 2013.). Korijen srednje kvadratne greške iznosio je oko 1,2, dok je apsolutna greška bila 0,8. Prosječna srednja greška pristranosti bila je pozitivna, te je time dala tvrdnju o radarskom podcjenjivanju podataka (Slika 2.31.).

U principu, radar je pokazao jaču korelaciju i manju grešku u odnosu na meteorološku stanicu na brani Valići (Grohovo), u odnosu na MS Kozala, što je neočekivano, jer se MS Kozala nalazi bliže instaliranom radaru i time je manje sklona gušenju signala. Stoga je u buduće potrebno sprovesti dodatne mjere za procjenu učinkovitosti radara, posebice tijekom ekstremnih visokih intenziteta kišnog događaja.



**Slika 2.31.** Usporedba radara i kišomjernih stanica, a) odnos intenziteta oborina u vremenu, te b) odnos 24-h kumulativne oborine u vremenu (Krvavica i sur., 2013.)



### 3. PROCJENA NASTANKA TOKA KRUPNOZRNATOG I SITNOZRNATOG MATERIJALA NA SREDNJEM TOKU RJEČINE

#### 3.1. Opća klasifikacija tipova klizanja u praksi

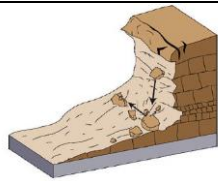
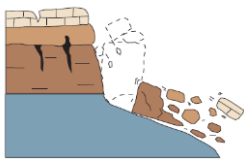
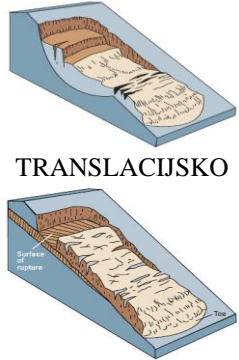
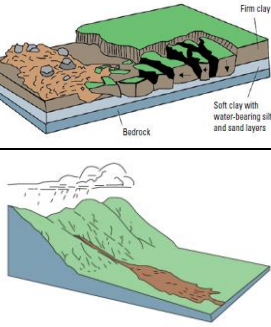
Inženjerski pojam klizišta je opći pojam za opisivanje pada i pokreta tla, stijene, organskog materijala pod djelovanjem gravitacije. Prema definiciji Crudena i Varnesa (1996.) klizište predstavlja svaki pomak stijenske mase, nevezanog ili vezanog tla niz kosinu. Gravitacija je primarni uzrok nastanka klizanja, ali postoji niz faktora koji doprinose klizanju kao što su podzemna voda, karakteristike tla, erozija, potresi, erupcije vulkana i slično. Mnogobrojna klizanja su povezana sa bujicama, erozijom tla, poplavama i slično. Prema mehanizmu kretanja (Tablica 3.1.) razlikuje se pet tipova klizanja: odronjavanje (eng. *fall*), prevrtanje (eng. *topple*), klizanje u užem smislu riječi (eng. *slide*), širenje (eng. *spread*) i tečenje (eng. *flow*) (Varnes, 1978.).

Materijal podložan klizanju može se opisati kao stijena (eng. *rock*, tvrda ili čvrsta masu koja je intaktna prije inicijacije kretanja) ili tlo (eng. *soil*, agregat čvrstih čestica, minerala ili stijena, koje su prethodno transportirane ili su nastale trošenjem na licu mjesta) (Varnes, 1978.; Mihalić, 2007.). Tla se dodatno dijele na vezani (eng. *earth*) i nevezani materijal (eng. *debris*) (Tablica 3.2.). Tlom se smatraju materijali u kojima je 80% ili više čestica manje od 2 mm (gornja granica pijeska), dok nevezani materijal (debris) sadrži značajan udio krupnozrnatog materijala, 20-80% čestica koje su veće od 2 mm s ostatkom čestica manjih od 2 mm (Varnes, 1978.). Gornji pojmovi se odnose na pokrenuti materijal prije nego što je aktiviran klizanjem. Pojam „debris“ (*debrit*, *detritus*, *stijensko kršje*) predstavlja u geologiji površinsku akumulaciju (nakupinu) nevezanog (rahlog, rastresitog) materijala koji je otkinut od mase temeljnih stijena kemijskim ili mehaničkim načinima, npr. razlaganjem (eng. *decay*) ili razaranjem (eng. *disintegration*) (Perić, 2007.). Sastoji se od fragmenata (odlomaka) stijena, materijala tla i katkada od organske tvari. Termin „*debris*“ se često rabi kao sinonim termina „*detritus*“ (*drobina*, *stijensko kršje*, *gruh*) kao općeg termina za rastresiti (rahli) mineralni i stijenski materijal koji je nastao mehaničkim razaranjem (lomljenjem) ili abrazijom (Perić, 2007.).

Prema Varnesovoj (1978.) klasifikaciji tipova klizanja koja je kasnije modificirana od strane Crudena i Varnesa (1996.), te doradena od strane Hutchinsona (1988.) i Hungra (2001.), tečenje (eng. *flow*), kao jedan od temeljnih tipova klizanja se dijeli na tečenje stijenske mase (eng. *flows in rock*) i na tečenje tla (eng. *flows in soil*). Tečenje stijenske mase se dodatno može podijeliti u tečenje blokova (eng. *rock flow*), te tečenje blokova u obliku

lavine (eng. *rock avalanche*). U tečenja tla mogu se svrstati tečenje krupnozrnatog (nekoherentnog) materijala (*debritni tok*, *tok stijenskog kršja*, eng. *debris flow*), tečenje krupnozrnatog materijala u obliku lavine (eng. *debris avalanche*), zemljano tečenje (eng. *earth flow*), te tečenje sitnozrnatog (pretežno koherentnog) materijala (blatno, muljevito tečenje, eng. *mudflow*).

**Tablica 3.1.** Tipovi klizanja prema Varnesu iz 1978. godine

Naziv nestabilnosti klizišta	Definicija	Slikovna predodžba
Odronjavanje (eng. <i>fall</i> )	Odvajanje mase sa strmih padina po površini, na kojoj ima malo ili uopće nema smicanja, već dolazi do slobodnog pada materijala, prevrtanja ili kotrljanja.	
Prevrtanje (eng. <i>topple</i> )	Rotacija (prema naprijed) odvojene mase oko osi koja se nalazi u njezinoj bazi ili u blizini baze; ponekad može biti izraženo kao međusobno prislonjeni odvojeni blokovi. Prevrtanje može prethoditi ili slijediti nakon odronjavanja ili klizanja.	
Klizanje (eng. <i>slide</i> )	Kretanje manje ili više koherentne mase po jednoj ili više dobro definiranih kliznih ploha (ploha sloma).	ROTACIJSKO
		TRANSLACIJSKO
Razmicanje ili širenje (eng. <i>spread</i> )	Glavni način kretanja je bočno razmicanje blokova uslijed kojega nastaju smičuće ili tenzijske pukotine.	
Tečenje (eng. <i>flow</i> )	Raznovrsna kretanja sa znatnim varijacijama brzine i sadržaja vode, a iskazuje se kao prostorno kontinuirana deformacija. Tečenje često počinje kao klizanje, odronjavanje ili kao prevrtanje na strmim padinama; dolazi do brzog gubitka kohezije pokrenutog materijala.	

Prema najdetaljnijoj klasifikaciji koju je dao Hungr i sur. (2014.), tečenje tla se može podijeliti na: tečenje stijenskog materijala (eng. *rock flow*) u koji spadaju siparišta (eng. *rock creep*), tok krupnozrnatog materijala (u koji spada tečenje talusnog materijala, tok debritnog materijala, debritna lavina, soliflukcija, protok suhog pijeska) i zemljani tok (s dodatnom

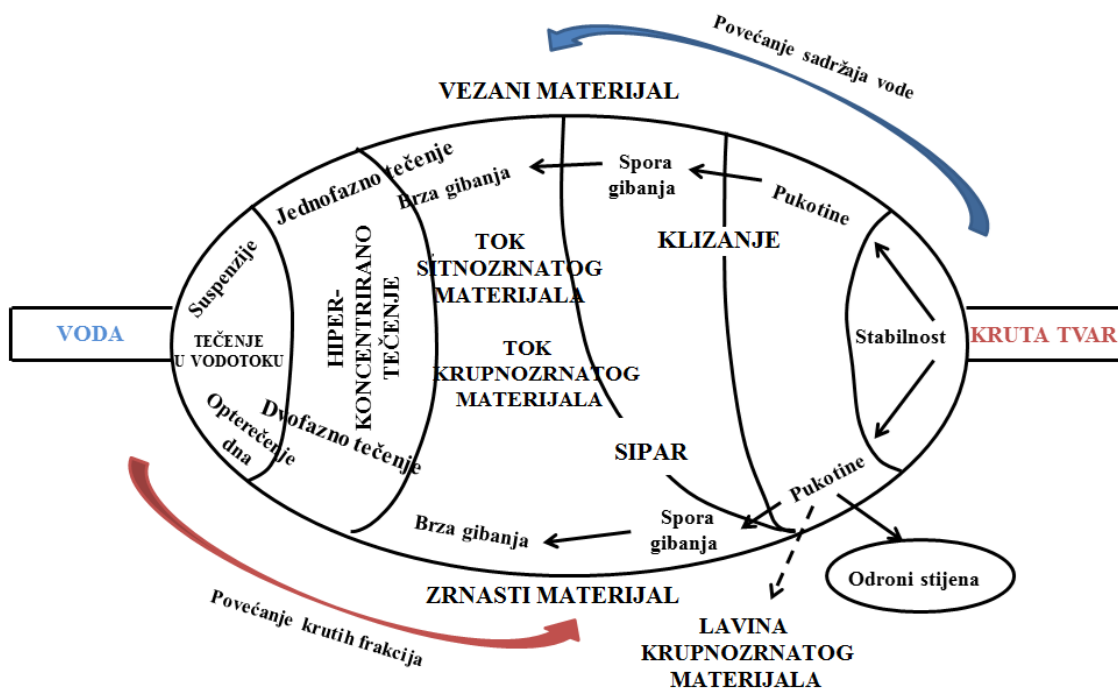
podijelom u tok suhog pijeska, tok vlažnog pijeska, brzi tok glinovitog materijala, zemljani tok, brzi zemljani tok i tok prapora i lesa).

**Tablica 3.2.** Podijela klizišta prema tipu materijala koji ga formira (Hungri i sur., 2014.)

Ime materijala	Opisni karakter	Pojednostavljeni terenski opis za potrebe klasifikacije	Odgovarajuća jedinstvena klasa tla	Laboratorijski pokazatelji
Stijena	čvrsta	Teško slomljiva sa čekićem		UCS>25 MPa
	slaba	Slaba obrada nožem		2<UCS<25 MPa
Glina	kruta	Plastična, može biti ukalupljena kada je vlažna, ima suhu črstoću	GC, SC, CL, MH, CH,	$I_p > 0,05$
	mekana		OL i OH	
	osjetljiva			
Glina	tekuće	Plastično, nesortirana preobrazba, u neposrednoj blizini granice tečenja	CL, CH i CM	$I_p > 0,05$ i $I_f > 0,5$
Prah, pijesak, šljunak i kamene gromade	suho	Neplastični (ili vrlo niske plastičnosti), zrnati, razvrstani	ML	$I_p < 0,05$
	saturirano	čestice mulja se ne mogu vidjeti prostim okom	SW, SP i SM	
	djelomično saturirano		GW, GP i GM	
Krupnozrnati (debritni) materijal	suho	Niska plastičnost, nesortirani i mješoviti	SW-GW	$I_p < 0,05$
	saturirano		SM-GM	
	djelomično saturirano		CL, CH i CM	
Treset		Organski		
Led		Ledenjački pokrov		

Na temelju krupnozrnatih i sitnozrnatih materijala, te njihova udjela vode i čvrstog materijala može se definirati osnovna klasifikacija gibanja mase (Slika 3.1.). Veći sadržaj vode odgovara tečenju u vodotocima i rijekama (bujicama, kanalima), dok je veći udio čvrstog materijala vezan za tip odrona i klizanje. U ovisnosti o sadržaju vode i krutog materijala može se jasno uvidjeti podjela na sipare, tok krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, hiperkoncentrirano tečenje i tečenje vode u vodotocima (veliki udio vode, mali udio krutog materijala; relativno čista voda).

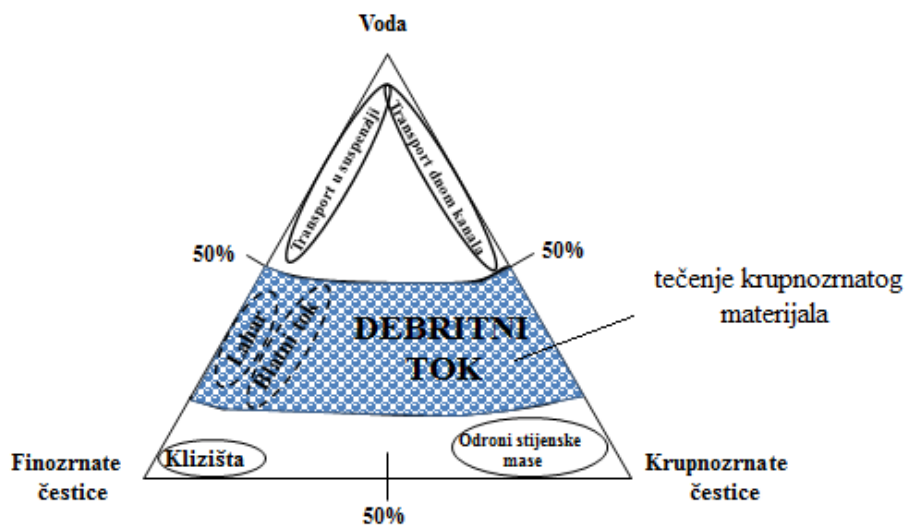
Tečenje nevezanog stijenskog materijala, tokovi krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala imaju više-manje istu koncentraciju vode, ali se oni razlikuju u veličini krutih čestica. Veličina krutih čestica kod tečenja nevezanog stijenskog materijala su mnogo veće u odnosu na blatno (sitnozrnato) tečenje i tečenje piroklastičnog materijala.



Slika 3.1. Klasifikacija gibanja mase kao funkcija krutih frakcija i tipa materijala, (modificirano prema Coussot i Meunier, 1995a)

### 3.2. Tokovi krupnozrnatog materijala i hiperkoncentrirani tokovi

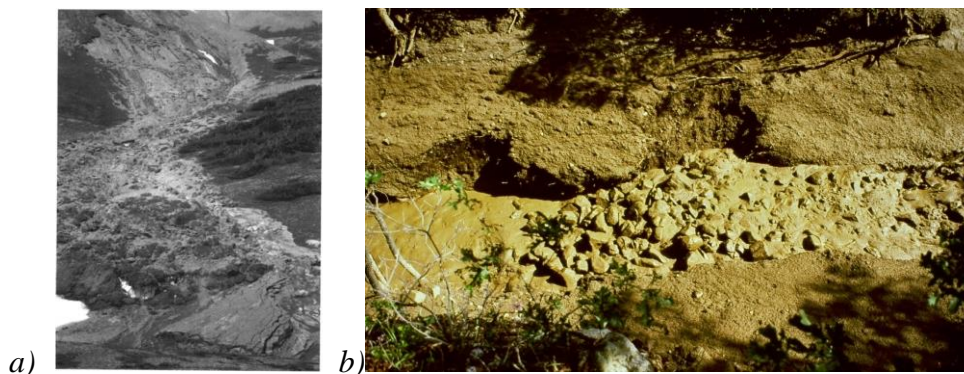
Pojavi toka krupnozrnatog materijala (debritni tokovi) predhodi klizanje materijala koje se može opisati kao stijena ili tlo. Slika 3.2. pokazuje da je udio čvrstih čestica, u tečenju suspendiranog nanosa (toka krupnozrnatog materijala) veći od 50 %. Tokovi krupnozrnatog materijala obično sadrže manje od 30 % mulja i sitnih čestica. Zemljano tečenje ima glinene sadržaje u rasponu između 10-70 (u prosjeku 40 %) i indeks plastičnosti 10-60 (u prosjeku oko 35 %) (Keefer i Johnson, 1983.). Tokovi krupnozrnatog materijala su obično neplastični ili slabo plastični.



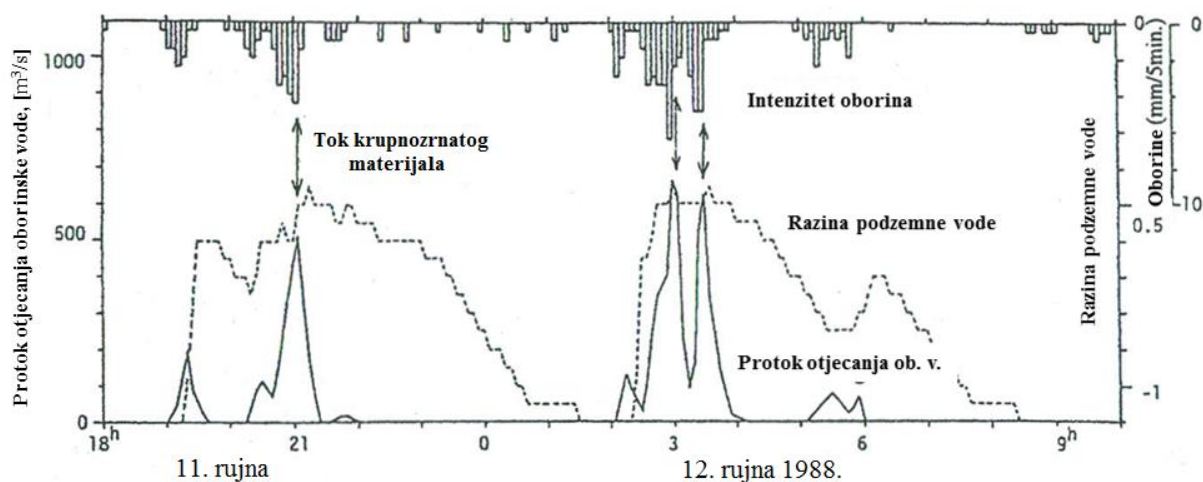
Slika 3.2. Sastav toka suspendiranog materijala/nanosa (trostruki fazni dijagram)

Tok krupnozrnatog materijala (debritni tok) predstavlja iznimno brzi protok zasićene neplastične mase stijenskog kršja (drobine) u strmom kanalu (Hungar i sur., 2001.). Termin „debritni tok“ predstavlja kretanje mase fragmenata (odlomaka) stijena, zemlje i mulja u kojem je više od polovice čestica promjera većeg od čestica pijeska (Perić, 2007.). Na temelju klasifikacije i definicije koje su dali Stiny (1910.) i Sharpe (1938.), tok krupnozrnatog materijala se definira kao nestacionarni i nejednoliki protok mase u strmom ograničenom kanalu koji se deponira na kraju toka (Davies i sur., 1992.). Pritom se promatra pulsirajuće tečenje pri kojem su hidrodinamički udari vode i nevezanog krupnozrnatog materijala odvojeni. Udari rastu zbog nestabilnosti protoka, pojave uzastopnog klizanja otpuštajućeg materijala ili zbog usporavanja toka uslijed formiranja prirodne brane od kamenog nabačaja. Volumen svakog vala može varirati, dok vrijeme između svakog vala može biti od sekunde, pa sve do 1 sata.

Tečenje toka krupnozrnatog materijala se sastoji od tekuće i čvrste (krute) faze propagacije. Čvrsta faza zauzima veći volumen (50-80 %) od tekuće faze (Coussot i Piau, 1995b; Coussot, 1995c; Takahashi, 2007.). Tokovi krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala imaju više-manje istu koncentraciju vode, ali se razlikuju u veličini krutih čestica (Slika 3.3.). Tečenje krupnozrnatog materijala nastaje na padinama sa prosječnim kutem nagiba od 20-45° (Iverson i sur., 1997a), a najveći uzročnik njegova nastanka su jaki intenziteti oborina i seizmičko djelovanje (Slika 3.4.). Tokovi krupnozrnatog materijala i hiperkoncentrirani tokovi spadaju u najrazornije pojave povezane s vodom. Oni se uglavnom pojavljuju u planinskim područjima u širokom rasponu morfoklimatskih okruženja i posljednjih godina privlače mnogo pažnje zbog sve veće učestalosti i broja smrtno stradalih osoba. Te se pojave događaju u vrlo kratkom vremenskom periodu, te zbog nenadanog događaja treba osigurati mjere od obrane, pogotovo kada su povezane s iznenadnim poplavama ili rušenjem brane.



**Slika 3.3.** a) Tok krupnozrnatog materijala u obliku lavine koji je proizašao iz plitkog kolutivja u alpskom području u blizini grada Jasper, Britanska Kolumbija, Kanada.  
b) klasični prikaz toka krupnozrnatog materijala



**Slika 3.4.** Odnosi između nastanka toka krupnozrnatog materijala, intenziteta oborina i razine podzemne vode (Takahashi, 2007.)

Tok krupnozrnatog materijala spada u tzv. gravitacijske tokove koji se kreću niz padinu uslijed djelovanja gravitacije pri čemu materijal sadrži različitu količinu vode koja pospješuje njegovo kretanje. Za takve je tokove karakteristično da nemaju internu deformaciju sedimenata, jer se kreću pojedina zrna i čestice. Oni su upotpunosti zasićeni, uz moguću iznimku siromašne matrice u frontalnoj zoni (čelu vala) s nakupinom kamenih oblutaka (Iverson, 1997b.). Količina sadržaja vode je vrlo promjenjiva zbog heterogenosti toka krupnozrnatog materijala i tranzicije iz gustog i krupnozrnatog vala ispred i više tekućeg dijela vala pozadi.

### 3.3. Procesi pokretanja tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala

Do pojave formiranja tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala dolazi kada se masa slabo sortiranih sedimenata, stijena i finozrnatog materijala, pomiješana s vodom, počne pokretati niz padinu uslijed povećanja porenog tlaka i gravitacijske sile. Takve tokove mogu uzrokovati različiti mehanizmi poput potresa koji može destabilizirati kosinu i uzrokovati klizišta, puknuće prirodno formirane brane koja pritom može otpustiti dovoljno materijala za formiranje toka krupnozrnatog materijala, kao i ljudska djelatnost (npr. rudarenje, iskopi i sl.). Nagib padine igra važnu ulogu u pokretanju toka krupnozrnatog materijala. Podaci koje su skupili Iverson i suradnici (1997a) pokazuju da je nagib kosine veći od  $20^\circ$  dovoljan da pokrene njegovo klizanje i formiranje. Za pokretanje klizanja voda ima važnu ulogu. Ona dolazi putem oborina ili snijega (Crosta, 2004.; Iverson i Delinger, 2001a, b.). U početnoj fazi voda u tlu povećava porni tlak i time smanjuje silu otpora materijala, a time i stabilnost kosine. Likvefakcija (ukapljivanje) stvara dodatna pokretanja mase u nizvodnom smjeru. Na taj način volumen krupnozrnatog nevezanog materijala pri tečenju znatno raste iz trenu u tren.



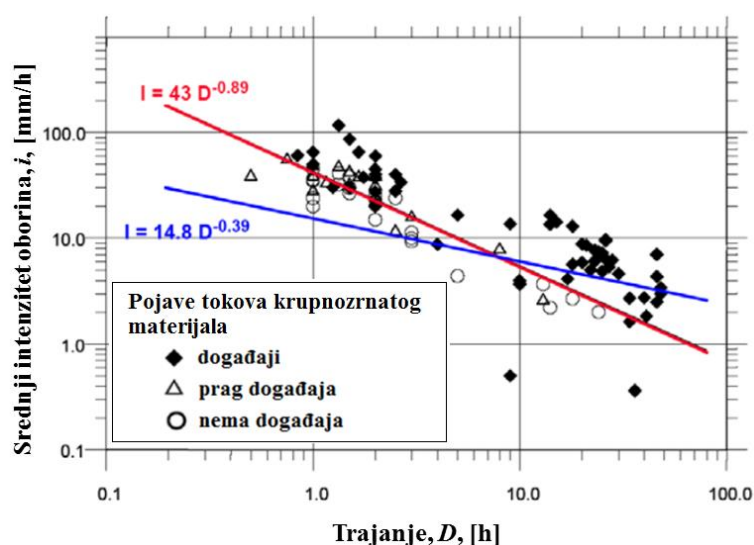
Likvefakciju može pokrenuti ili statičko ili cikličko opterećenje tla (Sivathayalan i Vaid, 2002.). Osjetljivosti tla na pojavu likvefakcije uglavnom ovise o veličini zrna i poroznosti, ali i o uvjetima stanja naprezanja u tlu (Hungar, 1995.; Iverson i Delinger, 2001b). U drugoj fazi oborine povećavaju površinsko otjecanje vode stvarajući pritom erozijsko djelovanje na površini klizišta. Voda brzo erodira dno i miješa se sa krupnozrnatim materijalom.

Prema Caineu (1980.) koji je koristio podatke sa 73 plitka klizišta i tečenja krupnozrnatog materijala, predložena je razina (prag) intenziteta oborina koja mora biti prekoračena za iniciranje takvog tipa tečenja, a ona glasi:

$$I = 14,82 * (D^*)^{-0,39} \quad (3-1)$$

pri čemu su  $I$  prosječan intenzitet oborina, [mm/sat], te  $D^*$  trajanje oborina, [sati].

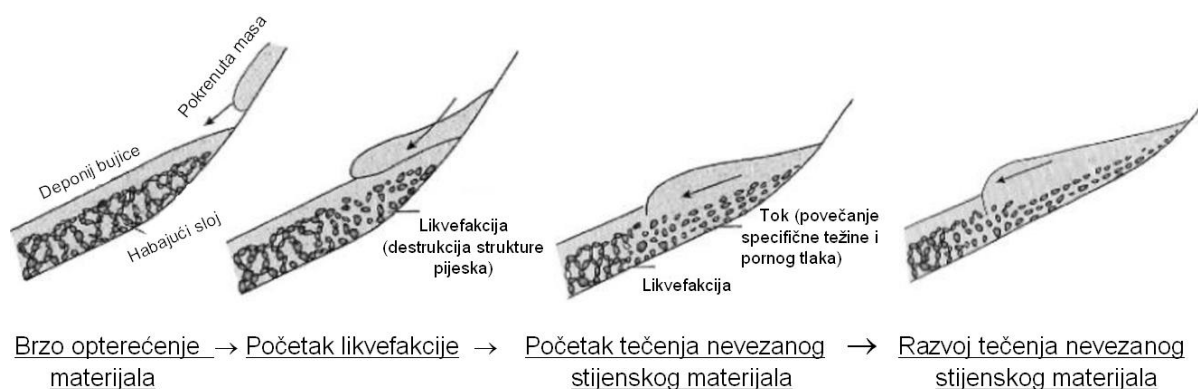
Dvije vrste meteoroloških događaja uzrokuju nastanak i pokretanje tokova krupnozrnatog materijala (Slika 3.5.). Prvi događaj ili pojavu čine kratke oluje visokog intenziteta koje u većini slučajeva generiraju poplavne bujice koje promiču stvaranje toka krupnozrnatog materijala uz glavni kanal. Takve pojave su česte u Švicarskoj, a stvaraju se već pri minimalnoj količini oborina intenziteta od oko 30 mm/h, dok su minimalne kumulativne količine oborina od oko 40 mm/h dostatne za stvaranje toka krupnozrnatog ili sitnozrnatog materijala (Rickenmann i Zimmermann, 1993.). Drugi tip oborina je vezan za stalne regionalne oluje koje dovode do značajnog prodora vode, velikih podzemnih otjecanja i djelomičnog ili potpunog zasićenja tla. Takve pojave pogoduju povećanju površinskog otjecanja, čime tla na strmim padinama postaju osjetljivija na mobilizaciju i pokretanje tokova krupnozrnatog materijala (Rickenmann, 2005b).



**Slika 3.5.** Odnos između kritičnog intenziteta oborina i trajanja pojave toka krupnozrnatog materijala. Podaci sa švicarskih Alpi (modificirano prema Zimmermann i sur, 1997.)

Propagacija nevezanog krupnozrnatog materijala predstavlja nestacionarno i nejednoliko tečenje (Slika 3.6.), jer se kreće nizvodno u obliku valova ili serije valova (Davies i sur., 1992.). Ona se može sastojati od jednog do više desetaka valova.

Tok krupnozrnatog materijala, kao i ostala gravitacijska kretanja mase, mogu biti podijeljena u tri razvojne faze: 1. fazu pokretanja u kojoj je inicijalna masa pokrenuta, 2. fazu tranzicije (prijenosa), u kojem se inicijalna masa širi uzduž osi kretanja, te 3. fazu taloženja (deponiranja), gdje se masa zaustavlja i taloži na tzv. taložnoj lepezi.



**Slika 3.6.** Prikaz nastanka toka nevezanog krupnozrnatog materijala (modificirano prema Blancu, 2008.)

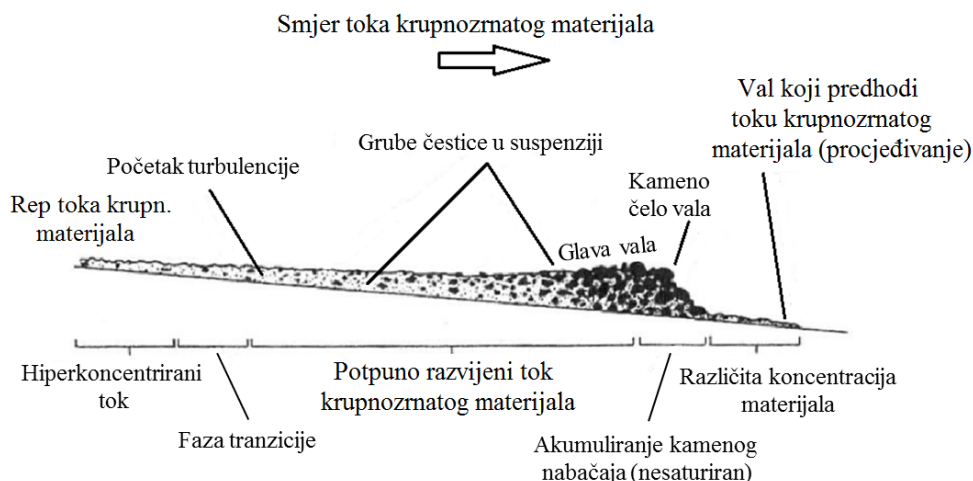
Tok krupnozrnatog materijala se sastoji od nekoliko osnovnih elemenata. Rep toka (eng. *Afterflow*) sačinjava protok sedimenata opterećen vodom i ima iste karakteristike kao i krupnozrnati materijal nastao poplavama, odnosno razrijeđen je i turbulentan. Tijelo vala u srednjem dijelu toka se sastoji od sitnijih čestica i pretežno tekućeg otpada. Posljednji dio vala je glava toka, koja je isturena naprijed (Slika 3.7.). Nositelj je najveće koncentracije velikih kamenih oblutaka te drugog krupnozrnatog materijala. Veliki kameni obluci mogu biti uključeni i zadržani u glavi toka. Oni dolaze iz repa toka i migriraju do glave toka uslijed transporta. Dubina tečenja i koncentracija krutih tvari se progresivno smanjuje od glave prema kraju repa određenog vala. Tijelo vala je zasićeno vodom dok je čelo vala nesaturirano. Interakcije između oba dijela daju gibanje toka krupnozrnatog materijala i karakteristike taloženja.

Prema liniji zakrivljenosti kanala, zbog centrifugalnih sila i reoloških svojstava tečenja, nasipi krupnozrnatog materijala s vanjske strane su veći od onih unutar kanala (Blanc, 2008.). Ovaj fenomen se naziva nadvišenje i omogućuje označavanje dinamičkog kretanja tečenja krupnozrnatog materijala. Na taj način moguće je izračunati brzine toka pomoću jednadžbe:

$$\bar{v} = (k_1 r_c g \cos \beta \tan \delta) * 0,5 \quad (3-2)$$



gdje su,  $\bar{v}$  srednja brzina toka, [m/s],  $r_c$  polumjer zakrivljenosti krivine, [m],  $g$  veličina gravitacijskog ubrzanja, [m/s<sup>2</sup>],  $\beta$  nagib kanala ( $\beta > 15^\circ$ ,  $\cos\beta$  se može zanemariti!),  $\Delta h$  nadmorska visina kao razlika između unutarnje i vanjske strane zavoja, [m],  $w$  širina ( $\tan\delta = \Delta h/w$ ), [m], te  $k_1$  korekcijski koeficijent, [/] (Costa, 1984a; Costa i Williams, 1984b).



**Slika 3.7.** Uzdužni profil vala kod toka krupnozrnatog materijala (Pierson, 1986.)

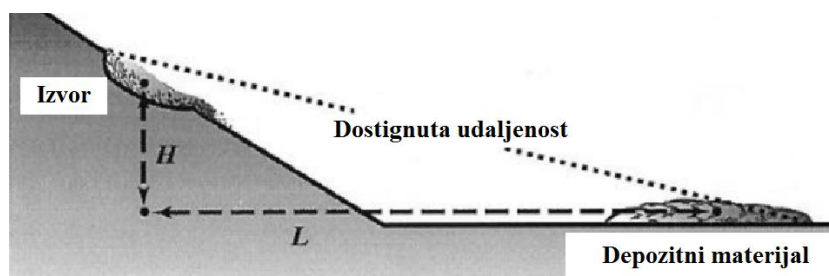
Zadnja geomorfološka karakteristika toka krupnozrnatog materijala je dosegnuta udaljenost toka koja se definira kao duljina puta preko koje putuje tok krupnozrnatog materijala. To je važan parametar zbog saznanja gdje taloženje prestaje i gdje su ugrožene zone (Fannin i Wise, 2001.). Tok krupnozrnatog materijala može dosegnuti dužine od nekoliko stotina metara, pa sve do više kilometara. Kao primjer, navodi se tok koji se dogodio u Nevado del Ruizu u Kolumbiji koji je putovao preko 10,3 km (Iverson, 1997b).

Tijekom gibanja, gravitacijska potencijalna energija toka krupnozrnatog materijala se pretvara u rad tijekom samog događaja (Iverson i sur., 1997a), (Slika 3.8.). Ukupni potencijal energije izgubljene tokom tečenja može se proračunati na slijedeći način:

$$E_p = MgH \quad (3-3)$$

pri čemu su  $E_p$  ukupna potencijalna energija, [kgm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>],  $M$  masa toka krupnozrnatog materijala, [kg],  $g$  konstanta gravitacije, [m/s<sup>2</sup>], te  $H$  nadmorska visina izvora toka krupnozrnatog materijala, [m].

Na temelju povezanosti između kvocijenta  $H/L$  i volumena toka krupnozrnatog materijala Rickenmann (2005a) daje slijedeću vezu:  $L=30*(MH)^{1/4}$ , pri čemu parametar  $M$  označava magnitudu događaja toka. Empirijski odnosi za određivanje magnitute toka krupnozrnatog materijala prikazani su u tablici 3.3.



Slika 3.8. Shematski prikaz poprečnog presjeka definiranog sa  $H$  i  $L$  parametrima za stazu toka krupnozrnatog materijala (Iverson i sur., 1997a)

Tablica 3.3. Empirijski odnosi za procijenu veličine događaja tokova krupnozrnatog materijala i/ili bujičnih poplava s nanosom (IRASMOS projekt, 2008.)

Empirijski izrazi	N	Izvor	
$M=K*A_c*100*S_c$	1420	Kronfellner-Kraus (1984.); Kronfellner-Kraus (1987.)	$M$ – maksimalna jačina događaja, [m <sup>3</sup> ] $M_a$ – srednja jačina događaja, [m <sup>3</sup> ] $A_c$ – površina sliva, [km <sup>2</sup> ] $S_c$ – srednji pad dna kanala, [-] $S_f$ – srednji nagib depozitne lepeze, [-] $L_c$ – duljina aktivnog kanala, [m] $K$ – faktor bujičnosti, [-] $I_G$ – geološki indeks, [-] $N$ – broj događaja, [-]
$M=37000*A_c^{0,78}$	≈ 65	Zeller (1985.)	
$M_a=150*A_c*(100*S_f-3)^{2,3}$	15	Hampel (1977.)	
$M=L_c*(110-250*S_f)$	82	Rickenmann i Zimmermann (1993.)	
$M_a=13600*A_c^{0,61}$	551	Takei (1984.)	
$M_a=29100*A_c^{0,67}$	64	D'agostino i sur. (1996.)	
$M_a=70*A_c*S_c^{1,28}*I_G$	64	D'agostino i Marchi (2001.)	

### 3.4. Određivanje protoka, brzine, dosega, debljine deponiranog materijala i ukupnog volumena toka krupnozrnatog materijala

Rasprava i opis metoda za procjenu dosega toka krupnozrnatog materijala detaljno je opisana u radovima Hungr i sur. (1984.), Cannon (1989.), Bathurst i sur. (1997.), Fannin i Wise (2001.), McDougall i Hungr (2003.), te Rickenmann (2005b). Predviđanje dosega udaljenosti može biti podijeljeno u empirijsko-statističke i dinamičke metode. Empirijsko-statistički pristup je nešto jednostavniji za korištenje u odnosu na dinamički pristup. Osim empirijskih izraza za određivanje dosega toka krupnozrnatog materijala, postoje i empirijski pristupi za određivanje procjene vršnog protoka i brzina toka. Dinamički modeli se temelje na jednadžbi očuvanja količine gibanja i zakonu očuvanja energije. Takvi pristupi za predviđanje brzine i dosega toka krupnozrnatog materijala (Tablica 3.4.) se temelje na metodi kontinuuma u kojima se unutar modela simuliraju deformacije pokretne mase uzduž korita (Hungr, 1995.; Iverson, 1997b; Rickenmann i sur., 2005a; Naef i sur., 2006.).

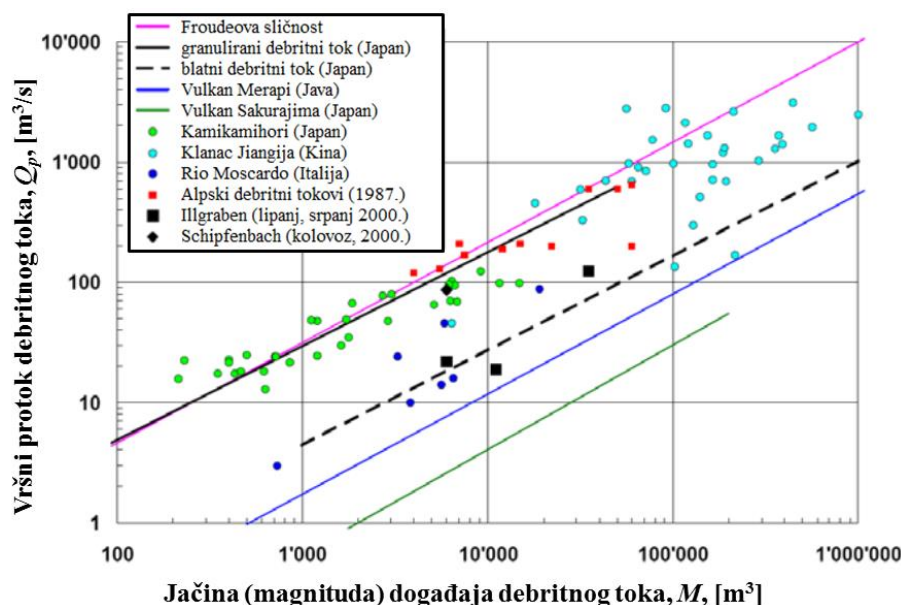
Na slici 3.9. prikazane su vrijednosti vršnog protoka i volumena toka krupnozrnatog materijala. Odgovarajuća jednadžba ima sljedeći oblik:

$$Q_p=0,1*M^{0,833} \quad (3-4)$$

Jednadžba vrijedi za zrnate tokove i tokove velikih kamenih oblutaka. U tim jednadžbama fizikalni parametar  $M$  je dan u  $[m^3]$  a protok  $Q_p$ , u  $[m^3/s]$ . Podaci prikazani na slici 3.9. odnose se na granulirani tok krupnozrnatog materijala koji je isturen ispred čela vala.

**Tablica 3.4.** Empirijske formule koje daju odnose za izračun vršnog protoka za tok krupnozrnatog materijala  $Q_p$  i jačine događaja  $M$  (Rickenmann, 1999.; Jakob, 2005b)

Tip toka krupnozrnatog materijala	Formula	Izvor
Granulirani tok krupnoz. materijala (Japan)	$Q_p = 0,135 * M^{0,780}$	Mizuyama i sur., (1992.)
Kameniti tok krupnozrnatog materijala	$Q_p = 0,04 * M_w^{0,90}$	Jakob (2005b)
Tok sitnozrnatog (blatnog) materijala	$Q_p = 0,0188 * M_w^{0,790}$	Mizuyama i sur., (1992.)
Vulkanski tok	$Q_p = 0,003 * M_w^{1,01}$	Jakob (2005b)
Vulkan Merapi (Indonezija)	$Q_p = 0,00558 * M^{0,831}$	Jitousono i sur., (1996.)
Vulkan Sakurajima (Japan)	$Q_p = 0,00135 * M^{0,870}$	Jitousono i sur., (1996.)



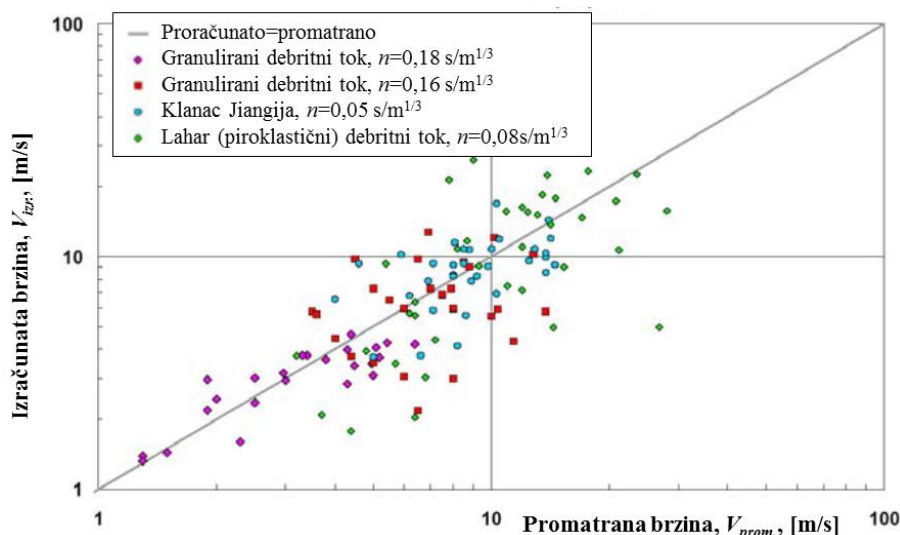
**Slika 3.9.** Odnos između vršnog protoka toka krupnozrnatog materijala (debritnog toka) i jačine događaja (Rickenmann, 1999.)

Mnoge predložene empirijske formulacije na bazi jednadžbi protoka i otpornosti u koritu baziraju se na određivanju srednjih brzina bilo preko empirijskih podataka dobivenih u prirodi ili u laboratoriju na fizikalnim modelima. Čeona brzina  $V$  toka krupnozrnatog materijala se može procijeniti pomoću Manning-Stricklerove jednadžbe (Rickenmann, 1999.):

$$V = (1/n) h^{0,67} I^{0,5} \quad (3-5)$$

gdje je  $h$  dubina toka,  $I$  nagib kanala, dok je pseudo-Manningova vrijednost koeficijenta hrapavosti  $n$  uzeta sa vrijednošću  $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$  (Costa, 1984a). Na slici 3.10. uspoređena je primjena Manningove jednadžbe, te daje usporedbu izračunatih i izmjerenih vrijednosti brzina za neke tokove krupnozrnatog materijala u svijetu (Rickenmann i Weber, 2000.). Hungr i sur.

(1984.), te Bulmer i sur. (2002.) predlažu da vrijednost koeficijenta korekcije u jednadžbi (3-2) treba biti  $k_f=0,1-0,5$ , pa novi oblik jednadžbe glasi  $V=(2g\Delta h)^{0,5}$ . Pritom  $\Delta h$  predstavlja visinu nadvišenja.



**Slika 3.10.** Primjena Manningove jednadžbe za tokove krupnozrnatog materijala, koristeći pseudo Manningove povratno izračunate vrijednosti koeficijenta hrapavosti  $n$  za svaki podskup podataka (Rickenmann 1999.; Rickenmann i Weber, 2000.)

Velike brzine daju tokovima krupnozrnatog materijala velike udarne pritiske, koji su odgovorni za uništenje materijalnih dobara i života ljudi (Costa, 1984a). Različite studije su provedene za procjenu utjecaja sila udara. Watanabe i Ikeya (1981.) predlažu slijedeći odnos za izračun veličine sile hidrodinamičkog udara:

$$P = \alpha \left( \frac{\gamma (v')^2}{g} \right) \quad (3-6)$$

pri čemu je  $P$  tlak sile hidrodinamičkog udara, [Pa],  $\alpha$  brzinski koeficijent glave toka, [/],  $\gamma$  jedinična težina materijala, [kN/m<sup>3</sup>], te  $v'$  glavna brzina toka krupnozrnatog materijala, [m/s].

Nekoliko empirijskih pristupa za procjenu doseg udaljenosti toka krupnozrnatog materijala dali su Bathurst i sur. (1997.). Za podskupinu od 71 toka krupnozrnatog materijala, uključujući i odrone te lavinu krupnozrnatog materijala, ali isključujući tokove sitnozrnatog materijala Corominas (1996.) razvija empirijski odnos za određivanje doseg materijala, koji se može prikazati kao:

$$L = 1,03 * V^{0,105} * H \quad (3-7)$$

gdje je  $H$  u [m],  $L$  u [m],  $V$  u [m<sup>3</sup>]. Vrijednost volumena varira između 102 i 1010 m<sup>3</sup>. Jednadžba ima koeficijent korelacije  $R^2=0,76$ . Iz regresijske analize koja koristi osnovne

podatke o tokovima krupnozrnatog materijala iz švicarskih Alpi proizlazi slijedeća jednadžba (Rickenmann, 1999.):

$$L = 1,9 * V * 0,16 * H^{0,83} \quad (3-8)$$

gdje je duljina  $L$  u [m], volumen  $V$  u [ $m^3$ ] i visina  $H$  u [m]. Gornja opisana jednadžba ima koeficijent korelacije  $R^2=0,75$  za skup koji uključuje 160 događaja toka krupnozrnatog materijala sa vrijednosti  $L$  u rasponu od 300 do 12600 m, volumenom  $V$  od  $7*10^2$  do  $10^6 m^3$ , te visinom  $H$  od 110 do 1820 metara.

Na temelju gotovo istih podataka koje je koristio Rickenmann (1999.), uključujući 144 toka krupnozrnatog materijala u švicarskim Alpama, Zimmermann i sur. (1997.) su definirali minimalnu envelopu kuta  $\tan\beta$  kao funkciju slivnog područja  $A_c$  [ $km^2$ ]:

$$\tan\beta_{min} = 0,20 * A_c - 0,20 \quad (3-9)$$

Jednadžba (3-9) se može koristiti kako bi se utvrdila vjerojatnost najveće udaljenosti putovanja toka krupnozrnatog materijala. Kod grube teksture takvih tokova minimalno promatrani kut putovanja je iznosio  $\tan\beta_{min}=0,19$  (Rickenmann i Zimmermann, 1993.).

Tok krupnozrnatog materijala se obično zaustavi na mjestu gdje njegova propagacija dosegne točku konačnog taloženja, tzv. koluvijalna ili taložna lepeza. Tipična lepeza ima nagib od 5-20 %. Na mjestu čela toka nevezani krupnozrnati materijal i voda se postepeno šire. Pritom se brzina propagacije i dubina smanjuju, materijal ne može više teći, usporava se i taloži (Major i Iverson, 1999.; Major, 2000.). Ukupni volumen pohranjenog krupnozrnatog materijala  $V_{uk}$  [ $m^3$ ], kod toka krupnozrnatog materijala dobije se zbrajanjem volumena početne (inicirajuće) mase ( $V_{ini}$ ) koja je uzrokovala pokretanje toka i volumen koji ulazi u tok ( $V_{ul}$ ), te se od te količine oduzme volumen deponiranog materijala ( $V_{dep}$ ):

$$V_{uk} = V_{ini} + V_{ul} - V_{dep} \quad (3-10)$$

Ukupan volumen toka krupnozrnatog materijala varira od  $100 m^3$  do nekoliko  $100000 m^3$ , a za najvećih događaja i do  $10^6 m^3$ .

Kod koluvijalne lepeze talog ima režnjasti oblik. Režnjevi imaju korak ispred sastavljen od grubih gromada (Slika 3.11.). Granice između depozitog krupnozrnatog materijala i čistog pokrova su dobro razgraničene. Kod tokova krupnozrnatog materijala sa većom gustoćom i viskoznosti, sedimenti su slabo sortirani. Depozit se sastoji od gline i od velikih gromada kamenja u promjeru do nekoliko metara.

Kada se tok krupnozrnatog materijala zaustavi u kanalu, depozit može formirati prirodnu branu. Takav materijal se može ukloniti tijekom prolaska novog vala ili može ostati u kanalu i biti erodiran nekim novim tokom. Tijekom transporta tok erodira pokose i dno



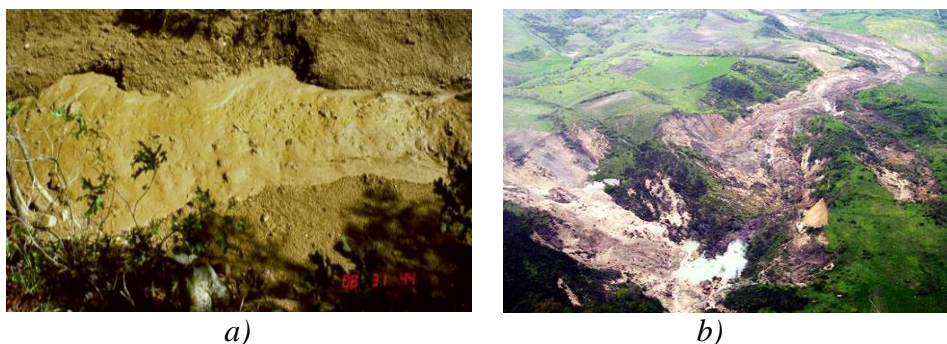
kanala. Rezultat tog procesa je zahvaćanje dodatnog volumena krupnozrnatog materijala koji će uvesti novi materijal u kanal (Chen i sur., 2006.).



*Slika 3.11. Deponiranje toka krupnozrnatog materijala reznjastog oblika (Blanc, 2008.)*

### 3.5. Tokovi sitnozrnatog materijala

Tečenje sitnozrnatog materijala definira tok sitnozrnatog materijala čiji je sastav (prah, glina) znatno plastičniji i čiji je indeks tečenja tijekom kretanja veći od 0,5. Takvo tečenje predstavlja vrlo brzi do iznimno brzi protok zasićenog plastičnog sitnozrnatog materijala u kanalu, uključujući značajan udio sadržaja vode u odnosu na izvorni materijal s indeksom plastičnosti  $>5\%$  (Hungar i sur., 2001.) (Slika 3.12.).



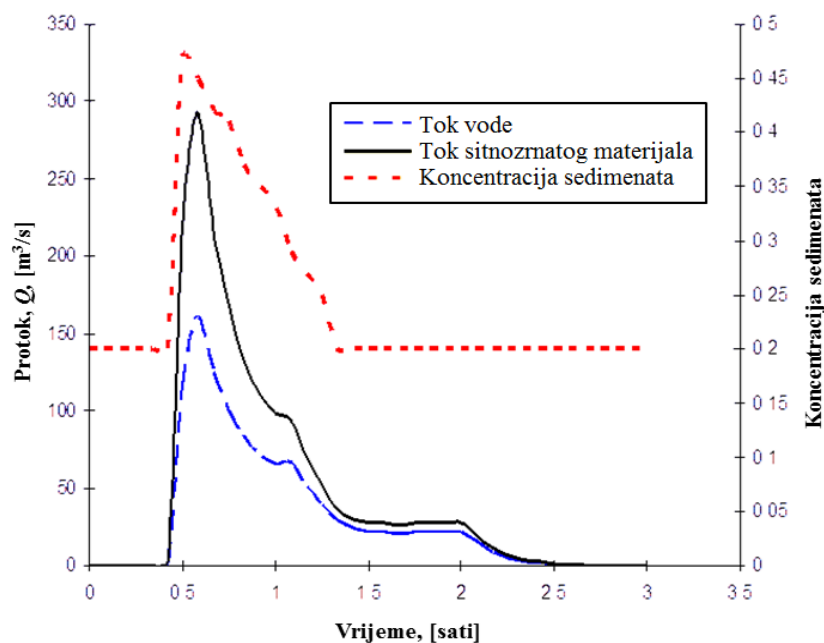
*Slika 3.12. a) Tipični tok sitnozrnatog (blatnog) materijala, b) prikaz toka sitnozrnatog (zemljanog) materijala na području regije Campania u Italiji (Fakultet Guadagno Sveučilišta u Sanniu, Benevento, Italija; O'Brien i sur., 1993.)*

Stupanj fluidnosti se određuje prema opažanoj brzini toka ili prema distribuciji i morfologiji formiranih sedimenata. Tokovi sitnozrnatog materijala su srednji članovi gradacijskog niza procesa u kojima sudjeluju voda, glina i stijensko kršje (fragmenti stijena) u različitim odnosima. Sadržaj vode u takvim tokovima može doseći 60% (Tablica 3.5.).

Stupanj vezivanja vodom, određen sadržajem gline i mineralogijom čvrstih čestica, ima kritični utjecaj na viskoznost smjese i brzinu toka. Na slici 3.13. prikazan je tipičan hidrogram za tok sitnozrnatog materijala u kojem se jasno vidi prirast koncentracije sedimenata i udio vode prilikom propagacije vala takvoga tipa.

**Tablica 3.5.** Ponašanje toka sitnozrnatog materijala kao funkcija koncentracije sedimenata (O'Brien i sur., 1993.)

Ponašanje toka sitnozrnatog materijala kao funkcija koncentracije sedimenata			
	Koncentracija sedimenata		Karakteristike toka
	po volumenu	po težini	
Tok sitnozrnatog materijala	0,48 – 0,55	0,72 – 0,76	Evidentno tečenje, sporo puzanje podržano tokom sitnozrnatog materijala, plastične deformacije pod njegovom vlastitom težinom, kohezivan tok, ne širi se znatno na ravnoj površini.
	0,45 – 0,48	0,69 – 0,72	Protok koji se širi po ravnoj površini, kohezivni tok, postoji mješanje smjese.
Poplava sitnozrnatog materijala	0,40 – 0,45	0,65 – 0,69	Lagano miješanje protoka, pokazuje svojstva tekućine sa deformacijama, širi se na horizontalnoj površini, ali održava površinu pod nagibom tekućine, prisutnost velikih kamenih oblutaka, valovi se pojavljuju, ali i brzo nestaju.
	0,35 – 0,40	0,59 – 0,65	Prisutnost šljunka i kaldrme, širi se gotovo na cjelokupnu horizontalnu površinu, pojavljuje se tekućina sa dvofaznim tokom, valovi putuju na površini.
	0,30 – 0,35	0,54 – 0,59	Razdvajanje vode na površini, valovi lagano putuju, najviše pijeska i šljunka je smješteno na dnu kanala i vrši njegovo opterećenje.
	0,20 – 0,30	0,41 – 0,54	Izrazito djelovanje valova, površinsko tečenje, sve čestice se nalaze u koritu u stanju mirovanja.

**Slika 3.13.** Tipičan prikaz hidrograma i odnosa koncentracije sedimenata kod vode i toka sitnozrnatog materijala (O'Brien i sur., 1993.)



### **3.6. Procjena nastanka toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na srednjem toku Rječine**

Na području srednjeg toka Rječine postoji jasna razlika između morfologije nasuprotnih obronaka doline Rječine i granulometrijskog sastava nagiba depozita. Jugozapadna strana sliva je gotovo u potpunosti pokrivena krupnozrnatim deluvijalnim materijalom, gdje su česti stjenski blokovi veličine 10 m<sup>3</sup>. Na vrhovima padina, karbonatne stijene definiraju rubove krške visoravni od flišnih kompleksnih stijena. Mjerenja pomaka i promatranih pojava nestabilnosti na SZ padini su indikativno prepoznatljivi geodinamički procesi koji se odnose na naprezanje reljefa (Benac i sur., 1999., 2002.).

U srednjem dijelu doline Rječine nestabilnosti se pojavljuju sa obje strane padina. Osnovni događaji geohazarda mogu uključivati kretanje depozita prema vodotoku Rječine, što u konačnici može dovesti do dvije skupine sekundarnih efekata (Erisman i Abele, 2001.). Prvi je potencijalno pregrađivanje vodotoka Rječine i formiranje prirodne brane uslijed klizanja. Drugo je moguće formiranje poplavnog vala izazvanog urušavanjem prirodne brane koja formira prirodno jezero, te posljedično plavljenje središnjeg i donjeg toka Rječine, točnije urbanog dijela grada Rijeke.

Jaki intenziteti oborina ili djelovanje potresa, zasebno ili u kombinaciji, mogu postati učinkoviti okidači za formiranje odrona u stjenskoj masi, klizanja i tokova krupnozrnatog materijala. Dnevna količina oborina iznad 100 mm je česta na području sliva vodotoka Rječine i ona najvećim dijelom izaziva pokretanje klizišta.

Zbog geološke građe terena gornji i središnji dio sliva Rječine obilježava velika produkcija i pronos nanosa. Osim toga, padine su često nestabilne u srednjem dijelu toka, uzvodno od ulaza u kanjonski dio, kojim prolazi korito sve do naplavne ravnice na ušću. Pronađeni su brojni vjerodostojni dokumenti o katastrofalnim poplavama tijekom 18. i 19. stoljeća, koji su prouzročili brojne štete u naseljima u dolini Rječine, te nekolicina i u gradu Rijeci. Poplave su često bile praćene pojavama klizanja i odrona u uzvodnom dijelu toka, te zatrpavanjem ondašnje luke na ušću Rječine.

Erozijski procesi i gravitacijske sile uzrokuju raspadanje karbonatne stijenske mase, razdvajanje blokova i fragmenata i njihovo klizanje preko flišnog temelja, kao i gomilanje talusnog materijala. Za razliku od karbonatnih stijena, flišna stijenska masa je više izložena vremenskim utjecajima. Tijekom vremena, krupnozrnati ulomci nastali odronjavanjem stijenske mase postepeno su prelazili u sitnozrnati materijal i taložili se na najnižim hipsometrijskim visinama (Benac i sur., 2005b). Ovi geomorfološki procesi proizvode potencijalno nestabilne padine sa depozitnim materijalom, koji su na nekim mjestima debljine

i do nekoliko metara. Dezintegracija karbonatnih škrapa, odrona i pomaka talusnog materijala su stalne pojave unutar središnjeg dijela toka Rječine. Pretežno prevladava odronjavanje, valjanje i odskakanje stjenske mase (Erismann i Abele, 2001.).

Klizište Grohovo se nalazi na SI padini unutar središnjeg dijela sliva Rječine, sjeverno od grada Rijeke. Kao složeno retrogresivno klizište, počelo se razvijati od stope prema vrhu padine. Na padini je otkriveno 13 pojedinačnih kliznih tijela. Klizna ploha uglavnom je predisponirana morfologijom flišne podloge. Veći dio kliznog tijela saturiran je podzemnom vodom koja se procjeđuje kroz pokrivač i teče po kontaktu s nepropusnom flišnom podlogom. Pokrenuti su i megablokovi vapenačke stijene na vrhu padine, koji klize po flišnoj podlozi.

Topografija padine također pogoduje pojavama nestabilnosti. Nagib padine varira od 15-24°. Dugotrajno puzanje padinskih tvorevina odvija se po flišnoj podlozi koja, nakon prekoračenja čvrstoće materijala, prelazi u klizanje. Megablok foraminiferskih vapnenaca odvojen je od svojega korjena i geoelektričkim sondiranjem je dokazano da leži na flišu (Benac i sur., 1999.). Vapenačke litice su gotovo vertikalne, a razrahljena stijenska masa pogoduje odvaljivanju olabavljenih blokova.

Praćenjem geodetskih repera u razdoblju prosinac 1998. - prosinac 1999. godine ustanovljeni su pomaci ne samo na padini oko aktivnog klizišta, već i između pojedinih dijelova vapenačkog megabloka odvojenih vlačnim pukotinama.

Preljevne vode iz akumulacije Valići mogu erodirati materijal u nožici inicijalnog klizišta, što također može utjecati na smanjenje stabilnosti padine i tako inicirati nova klizanja (Popescu, 1994.).

Više pojava klizanja i odrona u okolici klizišta Grohovo registrirano je krajem 19. stoljeća sa katastrofalnim posljedicama (Tablica 3.6.). Šire područje u blizini klizišta je geomehanički nestabilno (Vivoda i sur., 2012.). Siliciklastične naslage fliša ili osnovne stijene se odlikuju značajnom litološkom heterogenošću zbog čestog vertikalnog i bočnog izmjenjivanja različitih litoloških članova, kao što su lapori, kameni nanosi, šejlovi i sitnozrnati pješčenjaci (Benac i sur., 2005b, 2006.).

Jedan od primarnih ciljeva ovog rada bilo je analiziranje ulaznih parametara povezanih sa poplavnim valovima i odronima na odabranom području sliva Rječine. Osnovni parametri koji su pritom sagledani su: geološka struktura i uvjeti površinskih i podzemnih voda, učestalost oborina (intenziteta oborina) prije procesa klizanja, nagib klizišta i uvjeti odvodnje oborinskih i procjednih (podzemnih) voda, morfologija terena, gustoća i vrste biljnog pokrova, kao i seizmičnost područja. Ovi parametri ukazuju na uzroke klizanja na padinama koje se sastoje od flišnog materijala, kao i na pojave nastanka tokova krupnozrnatog

materijala. Na temelju prikupljenih meteoroloških, hidroloških i geoloških podataka sa područja klizišta Grohovo izrađen je 2D numerički model propagacije toka krupnozrnatog materijala nizvodno od samog klizišta (točnije od brane Valići) primjenom SOLFEC i SPH 2D simulacijskih programa. Kao jedan od mogućih scenarija uzeta je u razmatranje i mogućnost pucanja brane Valići, odnosno propagacija toka nastalog miješanjem akumulacijske vode sa materijalom nastalim klizanjem stijenske mase sa klizišta Grohovo.

**Tablica 3.6.** Pregled potresa i nestabilnosti padina u dolini Rječine kroz prošlost (Žic i sur., 2012a)

	<b>Godina</b>	<b>Povijesni događaj</b>	<b>Posljedice</b>
1.	1705.-1727.	Periodično produbljivanje dna korita na ušću.	
2.	1750.-1754.	Serijski potresi sa posljedicom nestabilnosti padina u dolini Rječine.	
3.	1767.	Prvi zapis klizanja na JZ padini.	
4.	1870.	Razorni potres, odron na JZ padini u blizini sela Grohovo.	Razorene mnoge kuće i stube koje se poslije više nisu obnavljale.
5.	1885.	Reaktivacija klizišta na JZ padini. Zabilježena kamena lavina na JZ padini.	Pomaknuto korito Rječine prema SI, oštećene gotovo sve kuće u selu Grohovo. Pokrenuto oko 170000 m <sup>3</sup> pretežito kamenih blokova koji su zatrpali županijsku cestu u duljini preko 100 m (Benac i sur., 2006.).
6.	1887.-1892.	Učestala manja klizišta i odroni.	
7.	1893.	Veliko klizište na SI padini.	Pomaknuto korito Rječine prema jugu, oštećene kuće u selu Grohovo.
8.	1894.	Izrada projekta regulacije Rječine.	
9.	1898.-1908.	Tijek izvođenja radova na regulaciji Rječine.	
10.	1908.	Lavina krupnozrnatog materijala (zabilježeno i formiranje blatnog toka)	Prekriveno selo Grohovo i djelomično korito Rječine. Procjenjeno je katastrofalno pokretanje mase od 1650000 m <sup>3</sup> , te pojava 50-metarskih fragmenata blokova (Benac i sur., 2006.).
11.	1967.	Nestabilnosti na desnoj obali Rječine tijekom izgradnje brane i akumulacije Valići.	Uočene pukotine i manji rasjedi podno Velog vrha.
12.	1985.	Kamena lavina na JZ padini.	Zatrpana županijska cesta u duljini preko 100 m kamenim blokovima volumena oko 170000 m <sup>3</sup> .
13.	1996.	Veliko klizište na SI padini i približno na mjestu klizišta iz 1893. godine.	Zatrpano korito Rječine, zaustavljeno ispuštanje vode iz akumulacije Valići, dio kliznog tijela iskopan iz korita. Procjena količine pokrenutog materijala je oko 850000 m <sup>3</sup> (Benac i sur., 1999.).
14.	od 1996.	Manja klizišta i odroni na obalama Rječine i na županijskoj cesti.	
15.	1998.-2011.	Monitoring na SI padini.	
16.	od 2009.	Novi sustav monitoringa na aktivnom klizištu na SI padini i na umirenom klizištu na suprotnoj JZ padini.	

Na području dijela sliva vodotoka Rječine, od akumulacije Valići do utoke vodotoka u Riječki zaljev, nalazi se veliki broj potencijalno nestabilnih padina, te posljedično s time i

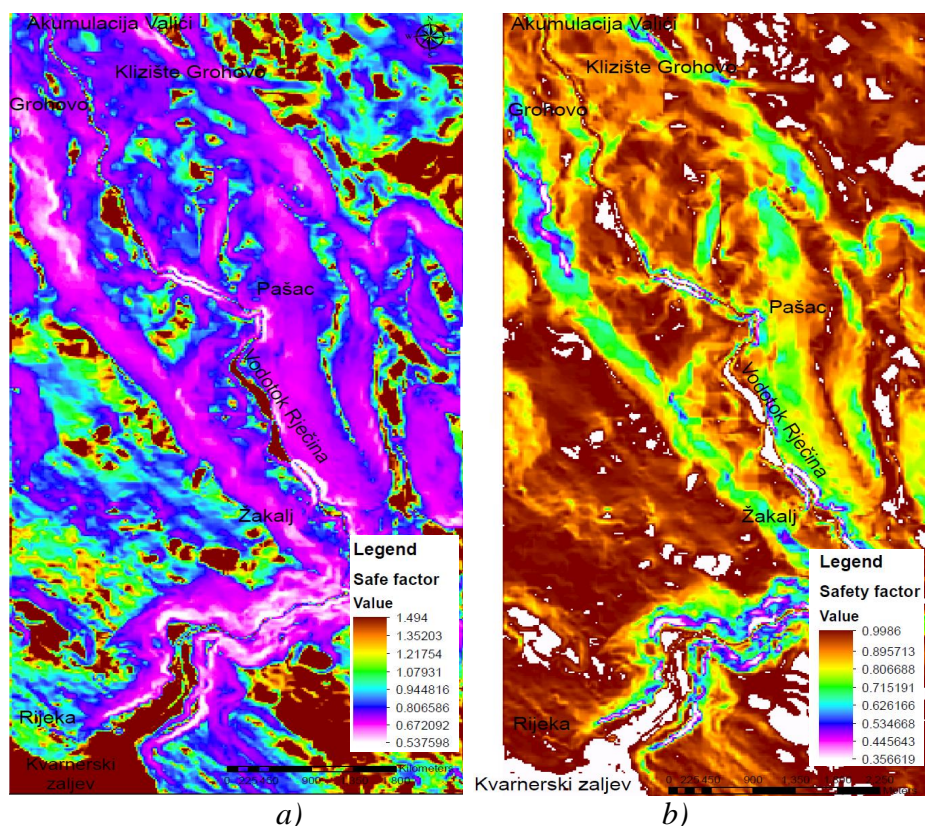
moгуćnost formiranja tokova krupnozrnatog materijala. Osnovna svrha rada bila je predvidjeti potencijalno najugroženije zone u kojima se klizišta mogu pojaviti. To je moguće postići preklapanjem različitih prostornih podataka korištenjem GIS tehnologije.

Za pouzdanu procjenu hazarda i rizika od pojave klizišta i tokova krupnozrnatog materijala na području srednjeg toka Rječine odabrana je GIS tehnologija (programski paket ArcGIS 10.1 i ArcInfo 10.1), što je podrazumijevalo uključivanje različitih slojeva informacija u GIS sustav. Veliki problem na samom početku predstavljao je odabir varijabli, potrebnih za analizu prirodnih pojava, kao i njihov način kombiniranja. Stoga je bilo potrebno prikupiti što više podataka s istraživanog područja, kako bi se temeljem kvalitetnih ulaznih podataka moglo pristupiti razradi metodologije i odabiru parametara, za koje se iz dosadašnjih istraživanja na području sliva vodotoka Rječine ispostavilo da mogu aktivno utjecati na samu pojavu klizišta i tokova krupnozrnatog materijala.

U prostornim kvalitativnim analizama srednjeg i donjeg toka Rječine korišten je modul Spatial Analyst Tools programskog paketa ArcGIS 10.1. i ArcInfo koji pruža širok raspon prostornog modeliranja i analizu značajki, analizu rasterskih podataka, izvođenje integrirane rastersko-vektorske analize i slično. Kao ulazne podloge korištene su ortofoto snimke terena u topografske karte u mjerilu 1:5000. Temeljem geodetskih podloga izrađen je digitalni elevacijski model terena. Na ispitivanom području je, s obzirom na raspoložive i dostupne podatke, za potrebe numeričkog modela propagacije toka krupnozrnatog materijala odabrano šire područje oko akumulacije Valići s klizištem Grohovo.

Na temelju izrađenih karata nagiba terena, koeficijenta difuzivnosti za određena područja unutar sliva, određenoj vrijednosti pornog tlaka i ostalim hidrogeološkim parametrima, dodatno se provelo deterministička analiza ispitivanja stabilnosti kosina na području dijela doline Rječine. Tom prilikom je izrađen model stabilnosti kosina pomoću TRIGRS 2.0 programa (Baum i sur., 2008.) u kojem je jedan od najvažnijih parametara predstavljao intenzitet oborine. Sprovedeno je nekoliko varijanti proračuna stabilnosti sa značajnim vrijednostima intenziteta oborina na području sliva od 31,5 mm/h (Primjer 1.), 50,4 mm/h (Primjer 2.) i 72 mm/h (Primjer 3.). Prikaz karata faktora sigurnosti s obzirom na utjecaj pornog pritiska i intenziteta oborina dana je na slici 3.14.

Na temelju provedene analize u TRIGRS 2.0 programu može se zaključiti da se nestabilnosti na kosini koje uzrokuju pojavu klizišta događaju zbog smanjenja čvrstoće i porasta posmičnog naprezanja.



**Slika 3.14.** a) Karta faktora sigurnosti pod utjecajem pornog pritiska, Primjer 1, intenzitet oborina 31,5 mm/h; b) karta faktora sigurnosti pod utjecajem pornog pritiska, Primjer 3, intenzitet oborina 70,0 mm/h, TRIGRS model, sliv vodotoka Rječine

### 3.6.1. Pojave klizanja i poplava u dolini Rječine u prošlosti

Dio doline vodotoka Rječine, između akumulacije Valići i ulaska u kanjonski dio je područje s najizraženijim hazardom od pojava nestabilnosti kosina u širem području Rijeke. Prema mnogobrojnim povijesnim zapisima, slikama i kartama koje opisuju pojave klizišta u povijesti u okolini naselja Grohovo u dolini Rječine klizanje je prvi put zabilježeno 1767. godine nakon pojave velikog broja klizanja i odrona izazvanih potresom 1750. godine s epicentrom u Rijeci (Tablica 3.6.). Velika klizanja uzrokovana oborinama i poplavama zabilježena su na obje obale Rječine kraj naselja Grohovo na kraju 19. stoljeća. Veliko klizanje nastalo je 1870. godine na JZ padini i nakon reaktivacije 1885. godine dio naselja Grohovo bio je zatrpan kamenom lavinom (Slika 3.15.). Veliko klizište pokrenulo se na JI padini Rječine, na lokaciji sadašnjeg aktivnog klizišta, a korito Rječine pomaknuto je za približno 50 m prema jugu. Brojna klizišta su se događala tijekom prve polovice 20. stoljeća, ali bez značajnih posljedica.

Novi problemi s klizištima javili su se tijekom gradnje brane Valići 1960. godine kada se pojavilo klizanje na SI padini neposredno uz branu. Klizište je sanirano tijekom izgradnje brane. Zbog relativno malog volumena akumulacije Valići, brana ne može akumulirati sve

dotoke uslijed velikih količina oborina, pa se relativno velike količine moraju prelijevati preko brane u tok Rječine. U takvim situacijama, erozija duž obala Rječine je vrlo velika, kao i hazard od mogućih pojava klizanja. Nakon posljednjeg velikog klizanja (1996.), klizna masa koja je pregradila korito odmah je uklonjena čime je uklonjen rizik mogućeg rušenja brane i stvaranja vodnog vala koji je mogao izazvati značajna oštećenja u Gradu Rijeci. Sveobuhvatna sanacija klizišta nije nikad provedena, ali su daljnji pomaci kliznog tijela smanjeni (Benac i sur., 2010.). Hazard i rizik od mogućih klizanja na flišnim padinama u dolini Rječine ostali su isti nakon pojave posljednjeg velikog klizanja 1996. godine.



**Slika 3.15.** a) Vodotok Rječina nakon klizanja 1885., stacionaža 10+60 km (Državni arhiv grada Rijeke – kutije A; B; C), b) klizište iz 1893. godine na lijevoj obali Rječine nasuprot naselja Grohovo (Državni arhiv Rijeka – kutija B)

Prema podacima iz Državnog arhiva grada Rijeke gotovo su se sve pojave nestabilnosti na padinama u slivu vodotoka Rječine događale u srednjem dijelu sliva, u području između naselja Lukeži i ulaza u kanjonski dio sliva, kod naselja Pašac (Matejčić, 1988.; Palinić, 1999.; Dubravić, 2001.). Na karti iz 1767. godine (Lopacsauer Plan Idealis) nalazi se prvi kartografski zapis klizanja na desnoj obali Rječine (JZ padina) kod naselja Grohovo. Tijekom 19. stoljeća zabilježeno je više poplava s katastrofalnim posljedicama (Tablica 3.7.).

**Tablica 3.7.** Najznačajnije poplave na području sliva vodotoka Rječine (Žic i sur., 2012a)

Datum poplave	Značajne karakteristike
10.11.1849.	Velika bujica
11.10.1852.	Katastrofalna poplava
18.11.1853.	Katastrofalna poplava
23.09.1879.	Velika bujica
11.1883.	Katastrofalna poplava
1884.	Katastrofalna poplava
1885.	Katastrofalna poplava praćena klizištima
19.09.1898.	Najveći zabilježeni poplavni val, 439 m <sup>3</sup> /s
28. i 29.09.1898.	Katastrofalna poplava
24.10.1898.	Katastrofalna poplava
17.09.1899.	Katastrofalna poplava. Izgubljen jedan život.



Pojave su bile osobito učestale u drugoj polovici 19. stoljeća. Nakon periodičnih poplava 1820. godine javljaju se prve ideje o potrebi premještanja toka Rječine i izgradnje nove luke ispred grada, posebice nakon što su katastrofalne poplave zabilježene 1849., 1852. i 1853. (Palinić, 1999.). Godine 1884. nakon obilnih kiša uslijedila je poplava, gdje su zabilježene velike štete. Uništene su ili teško oštećene brane, mlinovi, mostovi i kuće. No najveće štete dogodile su se 1885. godine kada se nakon dugotrajnih kiša ponovno aktiviralo klizište na desnoj obali Rječine pokraj sela Grohovo. Pritom je došlo do klizanja strme padine visine 80 m i širine 400 do 500 metara u korito vodotoka koje je tada i pomaknuto prema sjeveroistoku. Tom prilikom oštećene su gotovo sve kuće u selu. U listopadu 1892. godine (2. i 14. listopada) velike vode Rječine uzrokovale su odrone i štete na građevinama.

Prvi puta se potreba za intervencijom državnoupravnih službi pojavila prilikom nastanka velikih šteta uslijed klizanja na padinama oko naselja Grohovo, što je proglašeno elementarnom nepogodom (Državni arhiv Rijeka, kutija C).

Uslijed proloma kišnog oblaka, 24. listopada 1898., vodostaj Rječine se podigao na dotad nezabilježenu razinu. Tom je prilikom uništena velika drvena brana (približno na lokaciji današnje betonske brane Valići) gdje se vodotok granao prema mjesnom perilištu, a na desnoj obali primijećeni su novi pokreti na padinama. Ekstremno visoki vodni val odnio je konstrukciju visećeg mosta iznad Grohova zajedno s 10 metara visokim kamenim blokom u kojem je bilo ukliješteno uporište mosta.

Regulacijom srednjeg toka Rječine nisu zaustavljene pojave nestabilnosti na okolnim padinama. Registrirane su brojne manje pojave klizanja i odrona, te se mogu pronaći podaci o periodičnim čišćenjima korita Rječine od materijala donesenog gravitacijskim procesima s okolnih padina (Benac i sur., 1999.).

Zadnji značajni pomaci stjenske mase na području kizišta Grohovo (iz 1996.) potaknuti su dužim kišnim razdobljem koje je trajalo nekoliko mjeseci. U tom razdoblju srednja godišnja količina oborina iznosila je 1929 mm, 26 % više od prosječne srednje godišnje količine oborina za razdoblje između 1948. i 2009. (Oštrić i sur., 2011.). Dugo kišno razdoblje rezultiralo je kumulativnom oborinom od preko 900 mm u razdoblju od listopada do prosinca, što je za otprilike 75 % viša vrijednost u usporedbi sa prosječnim kumulativnim oborinama izračunatih za isto razdoblje od listopada do prosinca 1948.-2009. (519 mm). Mjesečna količina oborina od 342 mm za mjesec listopad 1996. bila je 94 %, odnosno za studeni (301 mm) 64 % veća od prosječnih mjesečnih vrijednosti u razdoblju od 1948.-2009.

Analiza provedena na dostupnim povijesnim podacima ukazuje da je mjesečna količina oborina na meteorološkoj postaji Rijeka 20 puta u prošlosti premašila vrijednost od 200 mm

oborina u razdoblju od rujna do prosinca mjeseca, s maksimalnom zabilježenom mjesečnom vrijednosti od 526,7 mm u listopadu 1998. (Oštrić i sur., 2011.). Analiza povijesnih kišnih događaja dodatno ukazuje na to da su visoki intenzitet oborina česti na slivnom području vodotoka Rječine. Na mjernoj postaji Rijeka dnevne oborine su u 13-godišnjem razdoblju (1993.-2006.) čak 83 puta premašile 50 mm oborina, te 6 puta oborine od 100 mm. U 1996. godini osam dnevnih oborina je premašilo vrijednost oborine od 50 mm, od kojih je pet bilo tijekom listopada i studenoga (Oštrić i sur., 2011.).

Povijesni podaci pokazuju visoki stupanj korelacije kišnih događaja s pokretima stjenske mase (odronima i klizištima), te mogućim posljedicama na formiranje tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na istoimenom području. Velike varijacije u pražnjenju vode iz akumulacije Valići, kratkotrajni poplavni valovi, te visoki transport nanosa kroz godinu zahtijevaju specifičan pristup obrane od poplava i problema formiranja tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. U tu svrhu, potrebno je sprovesti adekvatnu regulaciju koritom Rječine, te izvršiti izgradnju zaštitnih objekata koji pružaju punu i trajnu zaštitu. U 21. stoljeću pojavljuju se novi pokreti masa na obje padine. Registrirana su oštećenja na županijskoj cesti, te mjestimično urušavanje materijala u korito Rječine.

### **3.6.2. Monitoring na području klizišta Grohovo**

Prema preporukama Komisije za klizišta Međunarodnog udruženja za inženjersku geologiju (IAEG, 1990.) ukupna dužina reaktiviranog klizišta Grohovo iz 1996. godine iznosi  $L=425$  m, dužina pokrenute mase  $L_d=420$  m, najveća dužina klizne plohe  $L_r=405$  m, najveća širina pokrenute masa  $W_d=200$  m, najveća širina klizne plohe  $W_r=200$  m, debljina pokrenutog materijala  $D_d=6-20$  m, najveća dubina klizne plohe  $D_r=6-9$  (20) m, te visinska razlika od čela do nožice klizišta  $\Delta H=165$  m. Dosadašnja opažanja su pokazala da je klizno tijelo gotovo potpuno saturirano vodom, čak i tijekom sušnih razdoblja. Cjelokupna reaktivirana klizna masa procjenjena je na volumen koji iznosi otprilike  $3 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>.

Tijekom 2011. i 2012. godine uspostavljen je integrirani sustav monitoringa koji promatra područje klizišta Grohovo. Sustav monitoringa se sastoji od geodetskog i geotehničkog monitoringa (Arbanas i sur., 2012b).

U pogledu geotehničkog monitoringa, senzori za mjerenje porednog pritiska, inklinometri i vertikalni ekstenzometri su instalirani na dvije lokacije u središnjem dijelu kliznog tijela, na istoj lokaciji kao i GPS roveri i prizme. Ekstenzometri dugog raspona su instalirani u kontinuiranoj liniji od korita vodotoka Rječine do vapnenačkih megablokova na vrhu kosine. Ukupno je instalirano 11 ekstenzometara tipa NetLG 501E Osasi. U kombinaciji s

hidrološkom opremom za monitoring, koja se sastoji od mjerača pornog tlaka i pluviometra, moguće je rekonstruirati vezu između kiša, podzemne vode i odgovarajućeg ponašanja klizišta kao osnovu za postavljanje sustava za rano uzbunjivanje (Arbanas i sur., 2012b).

Prosječan pomak izmjeren ekstenzometrima kratkog raspona se kreće od 1-6 mm ovisno o lokaciji ekstenzometra. Ekstenzometri dugog raspona se protežu od korita vodotoka Rječine, preko samog klizišta, pa sve do vrha klizišta u blizini grada Grobnika. Najveći pomak na ekstenzometrima dugog raspona iznosi otprilike 11 mm, dok su na ostalim ekstenzometrima zabilježeni pomaci od 0,5–6 mm (Petričić, 2013.). Pomaci su najmanji na dnu klizišta, a u sredini i pri vrhu najveći. Vertikalni ekstenzometri i inklinometri se nalaze na dvije lokacije na klizištu Grohovo, unutar dva okna B1 i B2. Inklinometri se koriste za određivanje dubine plohe sloma i mjerenje pomaka po dubini, dok ekstenzometri služe za mjerenje pomaka u određenom vremenskom periodu. Analizom rezultata dobivenih inklinometarskim ispitivanjima u oknu B1 može se definirati klizna ploha koja se nalazi na dubini od 6 do 6,5 m. Daljnjom analizom je ustanovljeno da su pomaci na klizištu dobiveni inklinometrom u rangu između 2-7,5 mm, a na ekstenzometrima od 0,25-4 mm (Petričić, 2013.).

Porni tlak se mjeri na dvije lokacije unutar klizišta Grohovo, unutar okna u kojima se nalaze i inklinometar i vertikalni ekstenzometri. Rezultati mjerenja pornog pritiska u oknu B1 su uglavnom kontinuiranih vrijednosti (od 2,3 do 3,4 kPa), gdje svoje maksimalne vrijednosti postižu u kišnim, a minimalne u sušnim periodima kroz godinu.

Na temelju kontinuiranih mjerenja može se zaključiti da iako se klizište konitnuirano kreće tijekom cijele godine, a kišni periodi su kritični. Najveći pomaci su zabilježeni na vrhu i u sredini klizišta, dok je dno klizišta mirnije, a pomaci nastaju od materijala koji dolazi s viših dijelova klizišta. Rezultatima monitoringa je utvrđeno kako su vapnenački megablokovi relativno stabilni i kako je njihov pomak minimalan. Do većih pomaka je došlo u gornjem i u srednjem dijelu klizišta, što je potvrđeno ekstenzometarskim mjerenjima (pomaci od 6-11 mm). Donji dio klizišta je ostvario pomak od svega desetine milimetara. Širenje postojećeg klizišta Grohovo može destabilizirati karbonatne megablokove na vapnenačkoj škrapu na vrhu klizišta i ugroziti selo Kačani. U konačnici se može zaključiti da se klizište Grohovo neće zaustaviti bez provedba mjera sanacije. Pojava klizanja u nepovoljnim hidrogeološkim uvjetima je vrlo izvjesna. Mogući scenariji su zatrpavanje korita vodotoka Rječine kliznim materijalom, formiranje prirodne brane koja bi stvorila prirodno jezero u njenom uzvodnom dijelu, te mogućnost rušenja i propagacije poplavnog vala ili toka krupnozrnatog materijala nizvodno prema urbanom dijelu grada Rijeke.

## **4. METODOLOGIJA**

### **4.1. Općenito o matematičkim i numeričkim modelima**

Temeljito razumijevanje mehanizma pokretanja i mobiliziranja pojave toka krupnozrnatog materijala igra ulogu od iznimne važnosti za projektiranje odgovarajućih mjera prevencije i ublažavanja. Postizanje skupa konstitutivnih jednadžbi za opis toka krupnozrnatog materijala zadatak je od posebne važnosti (Julien i O'Brien, 1985.; Takahashi, 2000.). Za pravilno rješavanje ovog problema provedena su relevantna teorijska i eksperimentalna istraživanja u drugoj polovici prošlog stoljeća. Matematički (analitički) modeli su domena, jednadžbe i rubni uvjeti koje opisuju problem. Oni se mogu grubo kategorizirati na temelju tri svojstva: prisutnost jednadžbi za razvoj erozijskog djelovanja po dnu kanala, broj faza toka (jednofazno ili višefazno tečenje) i odabir reoloških zakona (Ghilardi i sur., 2000.).

Svi tehnički proračuni se temelje na matematičkim formulacijama uzročno-posljedičnih veza koje su značajne s obzirom na svrhu proračuna. Skup matematičkih objekata koji apstraktno reproduciraju učinke neke uzročno-posljedične veze mogu se smatrati njenim matematičkim modelom (Šerman, 2002.). Do matematičkog modela određenog dinamičkog sustava može se doći na dva načelno različita načina. Prvi je na temelju funkcija po kojima se tijekom vremena mijenjaju ulazi i izlazi sustava, tj. postupcima eksperimentalne identifikacije, dok je drugi način matematičkim formuliranjem uzročno-posljedičnih veza iz kojih proizlazi ovisnost izlaza sustava o njegovim ulazima, tj. postupcima matematičkog modeliranja. Prilikom modeliranja dinamike procesa polazi se od pretpostavki da su veze između uzroka i posljedica determinističke (da isti uzroci uvijek izazivaju iste posljedice), te da tvari imaju svojstvo kontinuuma (da zadržavaju svoja fizikalna svojstva i unutar infinitezimalno malog volumena).

Formuliranje matematičkog modela obuhvaća određivanje svih potrebnih jednadžbi i funkcija u skladu s prihvaćenim pretpostavkama, te njihovo preoblikovanje do konačnog oblika. Numerički (računski) model predstavlja algoritimizaciju matematičkog modela, gdje se aproksimiraju funkcije (polja) u prostoru i vremenu, odnosno gdje se diskretizira prostor i vrijeme. Pritom se provode numeričke integracije u vremenu, numeričke integracije polja, te iterativni postupci zadovoljavanja rubnih uvjeta.

Vjerodostojnu provjeru modela, omogućuje tek njegova usporedba s ponašanjem modeliranog sustava u uvjetima koji su relevantni s obzirom na svrhu modeliranja. Svaki izvorni matematički model dinamičkog sustava s koncentriranim parametrima sadrži

najmanje jednu diferencijalnu jednadžbu u kojoj je nezavisna varijabla vrijeme, a uz diferencijalne jednadžbe može sadržavati i algebarske jednadžbe i logičke relacije.

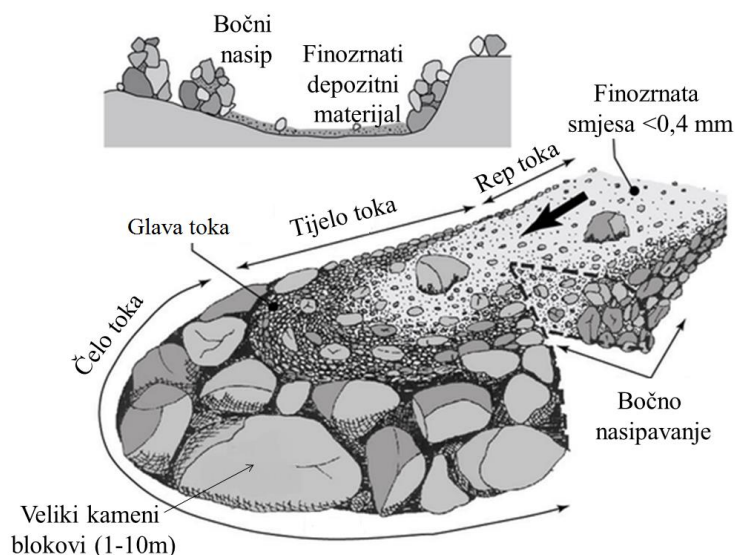
Analiza toka sitnozrnatog i krupnozrnatog nevezanog stijenskog materijala vrlo je važna zbog procijene rizika i ograničavanja ranjivih područja u kojima su potrebne mjere ublažavanja. Numerički model je najtočniji i najučinkovitiji alat za analizu toka takvog materijala. Metode na temelju kojih se baziraju numerički modeli moraju biti kvantitativne, točne, objektivne i moraju biti dostupne. Štoviše, numerički modeli zahtijevaju nekoliko podesivih ulaznih parametara za izračunavanje izlaznih vrijednosti. Danas u svijetu postoji nekoliko numeričkih simulacijskih programa koji se primjenjuju u analizi tečenja sitnozrnatog i krupnozrnatog nevezanog stijenskog materijala. Neke od značajnijih simulacijskih programa su SPH simulacijski program, PFC<sup>3D</sup> (eng. *Particle Flow Code in 3D*), SOLFEC, FLO-2D, te MIKE 11 simulacijski program. Većina navedenih programa se temelje na odabiru adekvatnih reoloških zakona (modela).

#### **4.2. Fizikalni model za opis toka krupnozrnatog materijala**

Za provjeru numeričkog (dinamičkog) modela potrebno je izvršiti provjeru njegovih rezultata sa laboratorijskim rezultatima na fizikalnom modelu ili terenskim mjerenjima na licu mjesta. Dobra poklapanja rezultata između računalnih i eksperimentalnih rezultata su bitni, jer se time potvrđuje ili odbacuje verifikacija modela, te se mogu predlagati mogući razvoj novih istraživanja.

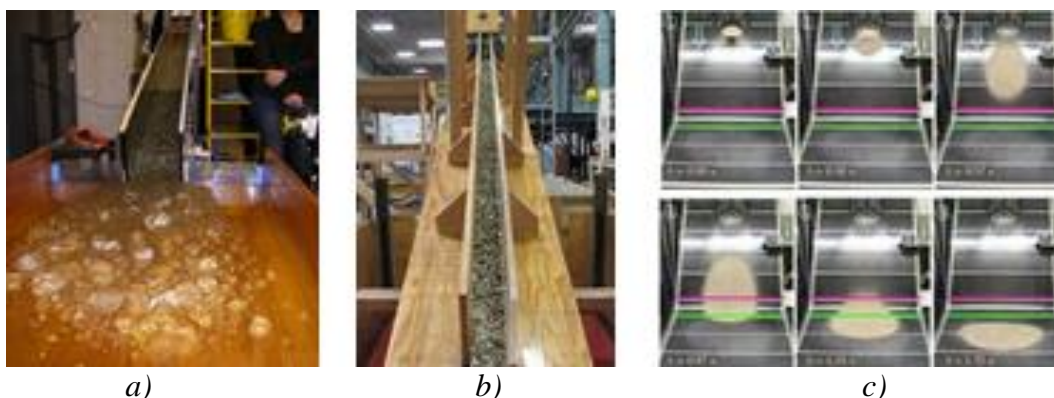
S eksperimentalne točke gledišta, istraživanje tečenja sitnozrnatog ili krupnozrnatog materijala često zna biti praćeno sa znatnim problemima, prvenstveno u pogledu mjera točnosti i mjerne tehnike, kao i simulacija toka pri eksperimentima. Terenska istraživanja je često puta teško provesti, jer su pojave poput toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala vrlo brze i nenadane (često traju i samo par minuta) (Slika 4.1.). Iznimno brze pojave gore navedenih katastrofalnih prirodnih pojava obično ne dopuštaju dovoljan broj opažanja za istu vrstu terenskih parametara (fizikalnih veličina). Prema različitim terenskim situacijama na kojima se promatra tok krupnozrnatog materijala uočen je problem u vidu homogenosti podataka, s obzirom na značajne terenske specifičnosti u kojima se pojave javljaju. Terenski podaci su neophodni za utvrđivanje kvalitete bilo kojeg matematičkog modela, kao što su i posebno važni za procjenu brzine, protoka, koncentracije, polja naprezanja, viskoznosti i veličine zrna (Lorenzini i Mazza, 2004.). Stoga potreba za adekvatnim opisom takvih pojava zahtijeva korištenje laboratorijskih pokusa ukoliko se ne mogu izvršiti terenska mjerenja. Mnogi eksperimenti u laboratoriju su provedeni na uzorcima suhog nevezanog materijala koji

se gravitacijski transformira putem umjetno sagrađenog hidrauličkog žlijeba (Slika 4.2.), dok se kod pojedinih fizikalnih modela promatra i utjecaj hrapavosti stjenki kanala i termodinamički utjecaj uslijed interakcije gibanja suspendiranog materijala i stjenki kanala (Okuda i sur., 1980.; Fink i sur., 1981.; Takahashi, 2007.).



**Slika 4.1.** Tipični poprečni profil toka krupnozrnatog materijala (Bardou, 2007.)

Nekoliko pouzdanih tehnika postoje danas za mjerenje svojstava tečenja stijenskog materijala. Jedan od njih je tzv. „glomazno invazivni postupak“, kod kojeg se postavljaju razni senzori unutar toka krupnozrnatog materijala i prate dinamičke promjene takvog materijala. Oni su podpomognuti korištenjem neinvazivnih tehnika kao što su ultrazvučne X-zrake (Lee i sur., 1974.; Abbott i sur., 1993.).



**Slika 4.2.** Fizikalni model toka krupnozrnatog materijala u laboratorijskim uvjetima (primjena različitih materijala za vizualnu predodžbu toka: a) led, b) šljunak, c) pijesak)

Uspješni fizikalni modeli tečenja krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala moraju dobro opisati mehaniku i proces mobilizacije, kao i kasniji tijek procesa taloženja. Mobilizacija



zahtijeva kolaps mase, količinu vode koja saturira materijal čvrste faze i posljedično ga pokreće, kao i promjenu energije, od gravitacijske do kinetičke. Međutim, postizanje dobre korelacije između numeričkih i eksperimentalnih rezultata ne mora striktno opravdavati valjanost izrade takvog numeričkog modela/algorithm, jer svaki fizikalni model daje (ili bi trebao davati) realnu sliku koja će se dogoditi u prirodi umanjenu za određeno mjerilo modela. Također je ponekad vrlo teško uskladiti standardne rubne uvjete na numeričkom i fizikalnom modelu.

Fizikalno modeliranje se sastoji od promatranja pojave u manjem mjerilu, pri čemu moraju biti zadovoljeni zakoni sličnosti u odnosu na stvarnu pojavu u prirodi. Za tečenje krupnozrnatog materijala, to zahtijeva korištenje određenih modela tekućine (npr. smjesa voda-glina) čiji je adekvatni sastav i dalje upitan. Kriteriji sličnosti se općenito temelje na Froudeovom zakonu sličnosti i drugim bezdimenzionalnim brojevima koji se biraju prema procijenjenoj reologiji krupnozrnatog ili sitnozrnatog materijala.

#### 4.2.1. Metodologija izrade fizikalnog modela

U okviru hrvatsko-japanskog bilateralnog znanstvenog projekta izrađen je eksperimentalni fizikalni model širenja toka krupnozrnatog materijala u hidrotehničkom laboratoriju (Ujigawa Open Laboratory) u sklopu Sveučilišta u Kyotu (Slika 4.3.).



**Slika 4.3.** a) Osnovni dijelovi fizikalnog modela toka krupnozrnatog materijala, b) deponirani krupnozrnati material, (Ujigawa Open Laboratory), Sveučilište u Kyotu (Žic i sur., 2013a)

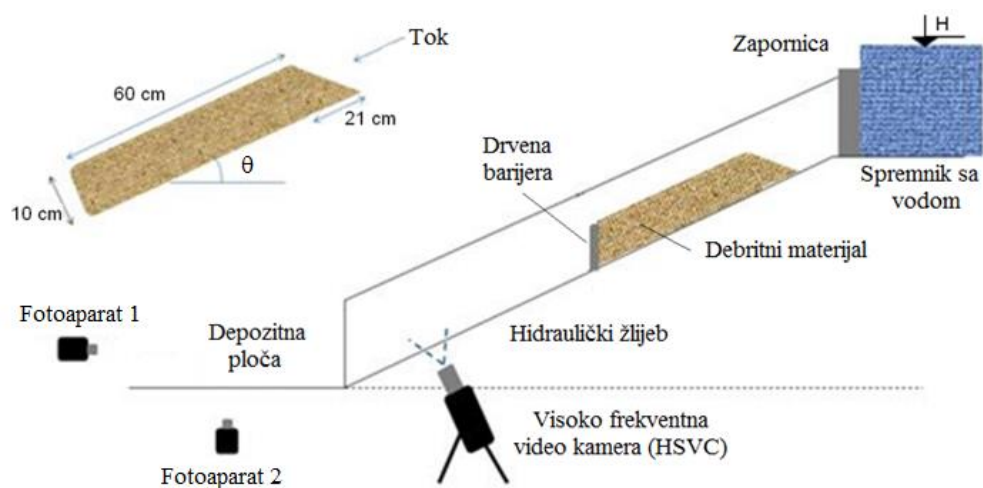
Eksperimentalni fizikalni model za kretanje toka krupnozrnatog materijala i Hidro-Debris2D simulacijski numerički model (Yamashiki i sur., 2012a, 2013.) za njegovu kalibraciju opisani su u nastavku. Za razumijevanje općeg ponašanja segregacije krupnozrnatih čestica proveden je fizikalni model za opis toka krupnozrnatog materijala sa više različitih promjera zrna. Video kamerom visoke razlučivosti i brzine snimanja (eng. *High Speed Video Camera* -

HSVC) praćen je svaki pomak čestica u usporedbi s rješenjima Hidro-Debris2D numeričkog modela (HD2DM), u kojem je primjenjena Lagrangeova numerička shema za opis gibanja čestica. Temeljna svrha istraživanja je bila da se u konačnici istraže karakteristična kretanja i mehanizam toka krupnozrnatog materijala i razvijanje što pouzdanijeg numeričkog modela za predviđanje katastrofalne pojave poput toka krupnozrnatog materijala kroz laboratorijske pokuse i numeričke simulacijske programe. Izrađeni fizikalni model pruža izračun vrijednosti nekih od najznačajnijih kvantitativnih parametara (brzina krupnozrnatog materijala u pridnenim i površinskim slojevima toka, koeficijent turbulencije, koeficijent trenja i sl.) koji su se koristili za izradu 2D numeričkih modela propagacije toka krupnozrnatog materijala u SOLFEC i SPH simulacijskim programima.

Glavni cilj Hidro-Debris2D numeričkog modela je procjena razvoja skupa čestica i praćenje njihovih gibanja sa uzetim promjerima zrna od 2,5 i 10 mm. Trenutni model razvoja temelji se na ranijem modelu kojeg su razvili Yamashiki i sur. (2012a,b). Kretanje putanje čestica može se analizirati pomoću visoko frekventne video kamere. Numerički model je razvijen pomoću tzv. markera i ćelijske metode (eng. *marker-and-cell (MAC) method*), koja uključuje SGS (eng. *Subgrid-skala*) model i tzv. metodu PSI-ćelije (eng. *Particle-Source-In Cell*) (Gotoh, 1992.; Crowe i sur., 1977.; Yamashiki i sur., 2012a). Procesi transporta, mobilizacije i nastanka zračnih mjehurića su simulirani u Lagrangeovom obliku, uvođenjem markera. Marker čestice se kreću kroz polje brzine, a zatim se markeri vade i koriste kako bi se utvrdilo koje ćelije sadrže tekućinu. Računalni kod za Hidro-Debris2D numerički model napisan je u C programskom jeziku, koristeći reference "103 Y0/VIFMAC" računalne knjižnice Sveučilišta u Kyotu, koje je kreirao Takemoto (1983.), a kojeg su razvili Sakai i sur. (1987.). Ulazni parametri koji opisuju numerički model temelje se na eksperimentalnom fizikalnom modelu toka krupnozrnatog materijala. Neki od najvažnijih ulaznih parametara koji su uzeti u numeričkom modelu su: kinematički koeficijent viskoznosti vode  $\nu=1,307 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, dinamički koeficijent viskoznosti vode  $\mu=1,307 \cdot 10^{-3}$  Pas, koeficijent trenja  $\mu'=0,3$ , koeficijent kohezije  $c=0$  kPa, te kut trenja  $\varphi=22-35^\circ$  (ovisno o zasićenju materijala). Da bi se razumjele karakteristike mehanizma usmjeravanja i proces propagacije toka krupnozrnatog materijala potrebno je potvrditi predviđanja (izlazne rezultate) iz numeričkog modela sa podacima dobivenim na fizikalnom modelu.

Fizikalni model ima tri glavna dijela koji obuhvaćaju spremnik za unos vode, pravokutni žlijeb i deponiranu ploču (Slika 4.3.). Na vrhu fizikalnog modela se nalazi spremnik za vodu, 1 m dug, 0,8 m širok i 0,7 m visok (volumena oko 0,56 m<sup>3</sup> vode), (Slika

4.4.). Pravokutni žlijeb za propagaciju toka krupnozrnatog materijala ima dimenzije širine i visine od  $0,2 \times 0,2$  m, a dug je 5m. Žlijeb ima mogućnost varijacije nagiba u rasponu od  $5^\circ$  do  $25^\circ$ . Čestice pijeska od 0,3 mm su zalijepljene na dno žlijeba kako bi predstavljale određenu površinsku hrapavost kanala, koja je uključena u numerički model kao Manningov koeficijent hrapavosti. Pravokutni žlijeb ima prozirnu bočnu stijenku radi lakšeg mjerenja i vizualne predodžbe procesa gibanja sa video kamerom velike brzine i dvama digitalnim fotoaparatima. Treći veliki dio modela je deponitna (taložna) ploča dimenzija  $2 \times 2$  m na kojoj se nalazi podijeljena skala radi mjerenja visine deponiranog krupnozrnatog materijala. U sredini deponitne ploče je raster mreže za mjerenje visina deponiranog materijala koji je manji u odnosu na periferne dijelove ploče. Nagib deponitne ploče se može prilagođavati od  $0^\circ$  do  $7^\circ$  (u proračunu je uzeta taložna ploča u horizontalnoj ravnini,  $0^\circ$ ), (Slika 4.4.).



**Slika 4.4.** Shematski dijagram eksperimentalnog (fizikalnog) modela toka krupnozrnatog materijala (Žic i sur., 2013a)

Za potrebe ispitivanja toka krupnozrnatog materijala promatrana su tri laboratorijska pokusa sa nagibima žlijeba od  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  i  $25^\circ$ . Za sve eksperimente protok ispuštanja vode je bio konstantan. Dobro promiješani i pobojani krupnozrnati materijal (manjih i većih frakcija) postavljen je 3,5 m uzvodno od deponirane ploče unutar pravokutnog žlijeba. Unutar svakog pokusa su rađene tri serije mjerenja. Materijal je postavljen u žlijeb određenog nagiba, a konstantan protok ispuštanja vode koji saturira i pokreće krupnozrnati materijal iznosio je 3,0 l/s. Protok se regulirao na uzvodnom kraju kanala putem elektromagnetskog ventila. Tijekom propagacije HSVC uređaj je snimao proces propagacije. Dodatno su bila postavljena dva fotoaparata, jedan u blizini deponirane ploče, a drugi u blizini potencijalnog izvora krupnozrnatog materijala. HSVC uređaj može pohranjivati slikovni zapis u kratkim vremenskim razmacima (0-9 s). Video snimke služe u kasnijoj provedbi analize kretanja toka

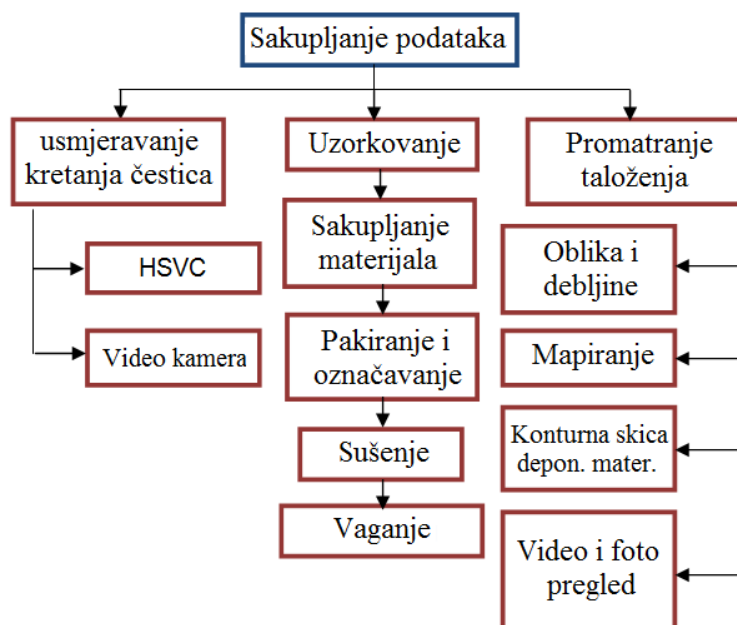
krupnozrnatog materijala. Eksperimentalni uvjeti na fizikalnom modelu prikazani su u tablici 4.1.

**Tablica 4.1.** Eksperimentalni uvjeti na fizikalnom modelu (Žic i sur., 2013a)

Slučaj	Duljina uzorka krupnozrnatog materijala, [cm]	Debljina uzorka krupnozrnatog materijala, [cm]	Opskrba vodom	
			Pozicija	Protok (l/s)
15°	81	10	Uzvodno, na kraju	3,0
20°	81	10	Uzvodno, na kraju	3,0
25°	81	10	Uzvodno, na kraju	3,0

Unutar fizikalnog modela korištene su dvije različite veličine čestica krupnozrnatog materijala. Svaki materijal se može lako razlikovati promatranjem njihove veličina kao i promjenom boje. Materijali imaju promjere zrna veličine 2,5 i 10 mm. Obje veličine zrna imaju istu težinu od 2,7 g/cm<sup>3</sup>. Svaki tip materijala je uzet u modelu sa masom od 10 kg. Materijal je predhodno dobro promiješan, te ugrađen za korištenje na eksperimentalnom modelu. Ukupna debljina materijala u izvornom obliku iznosila je 10 cm i bila je jednako raspoređena unutar pravokutnog žlijeba.

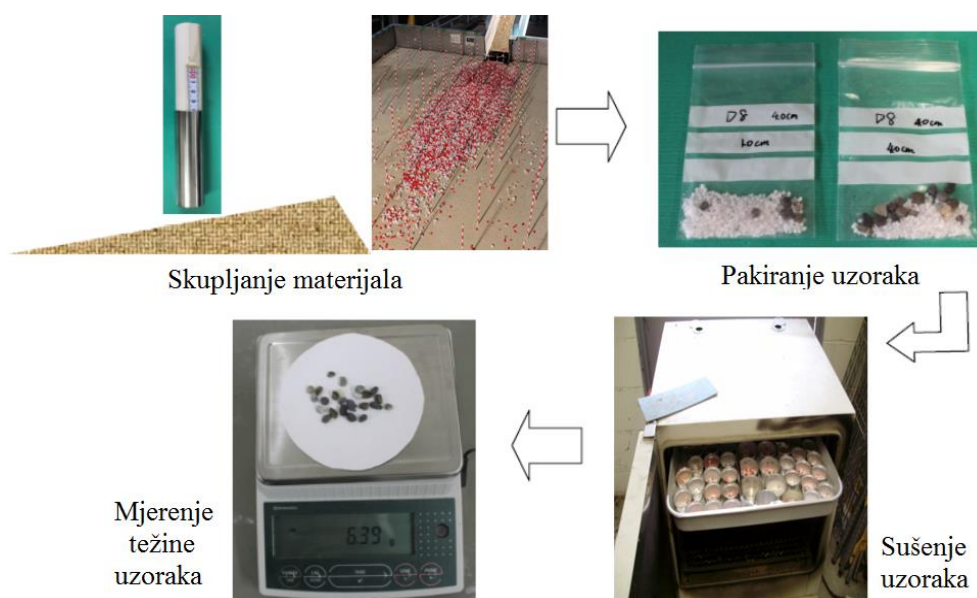
Eksperimentalno prikupljanje podataka podijeljeno je u tri dijela: (a) uzimanje uzoraka materijala, (b) promatranje materijalnih iskaza i (c) snimanje fotografija HSVC uređajem i video kamerama (Slika 4.5.). Glavni ciljevi ove metode su razumijevanje karakteristika čestica, distribucije čestica i dobivanje fizikalnih podataka taloženja materijala.



**Slika 4.5.** Koraci na fizikalnom modelu potrebni za mjerodavno ispitivanje propagacije toka krupnozrnatog materijala (Žic i sur., 2013a)

Promatranje deponiranog materijala na deponiranoj ploči uključuje: (1) mjerenje oblika i debljine depozita, kao i njegovu distribuciju, (2) mapiranje površinske strukture depozitnog materijala, (3) konturnu skicu taloženja materijala (2D i 3D prikazi), te (4) analizu preko video isječaka i fotografija iz faze formiranja taloženja toka krupnozrnatog materijala. Gornji procesi se ponavljaju više puta kako bi se dobili točni rezultati.

Cilj procesa uzorkovanja je da se odredi postotak materijala na različitim čvorovima (pozicijama) unutar deponirane ploče, kao i visine deponiranog materijala. Ovaj proces sačinjavaju četiri koraka. Prvi korak je prikupljanje materijala na određenom čvoru koji je identificiran. Ova metoda je sprovedena pomoću posebne opreme koju su razvili znanstvenici sa Sveučilišta u Kyotu. Nakon toga, materijal je na različitim visinama pakiran i zasebno označen, te sušen na 105 °C kroz 24 sata kako bi bio potpuno suh. Posljednji korak nakon sušenja je uzimanje težine svakog uzorka (Slika 4.6.).



**Slika 4.6.** Koraci tijekom uzorkovanja materijala na fizikalnom modelu (Žic i sur., 2013a)

Nakon sušenja svakog pojedinog uzorka, određene su njihove težine za svaku veličinu zrna materijala (u gramima). Također je određena ukupna težina pojedinog uzorka, kao i odnos zastupljenosti pojedine težine materijala u odnosu na ostale (omjeri su izračunati u odnosu na najveći promjer zrna materijala od 10 mm). Određen je broj zrna u uzorku za svaku veličinu (granulaciju) čestice. To je napravljeno za svako mjerenje zasebno, prvo, drugo i treće mjerenje. Rezultati sprovedenog fizikalnog modela dani su u nastavku.



#### 4.2.2. Fizikalni model toka krupnozrnatog materijala - obrada podataka

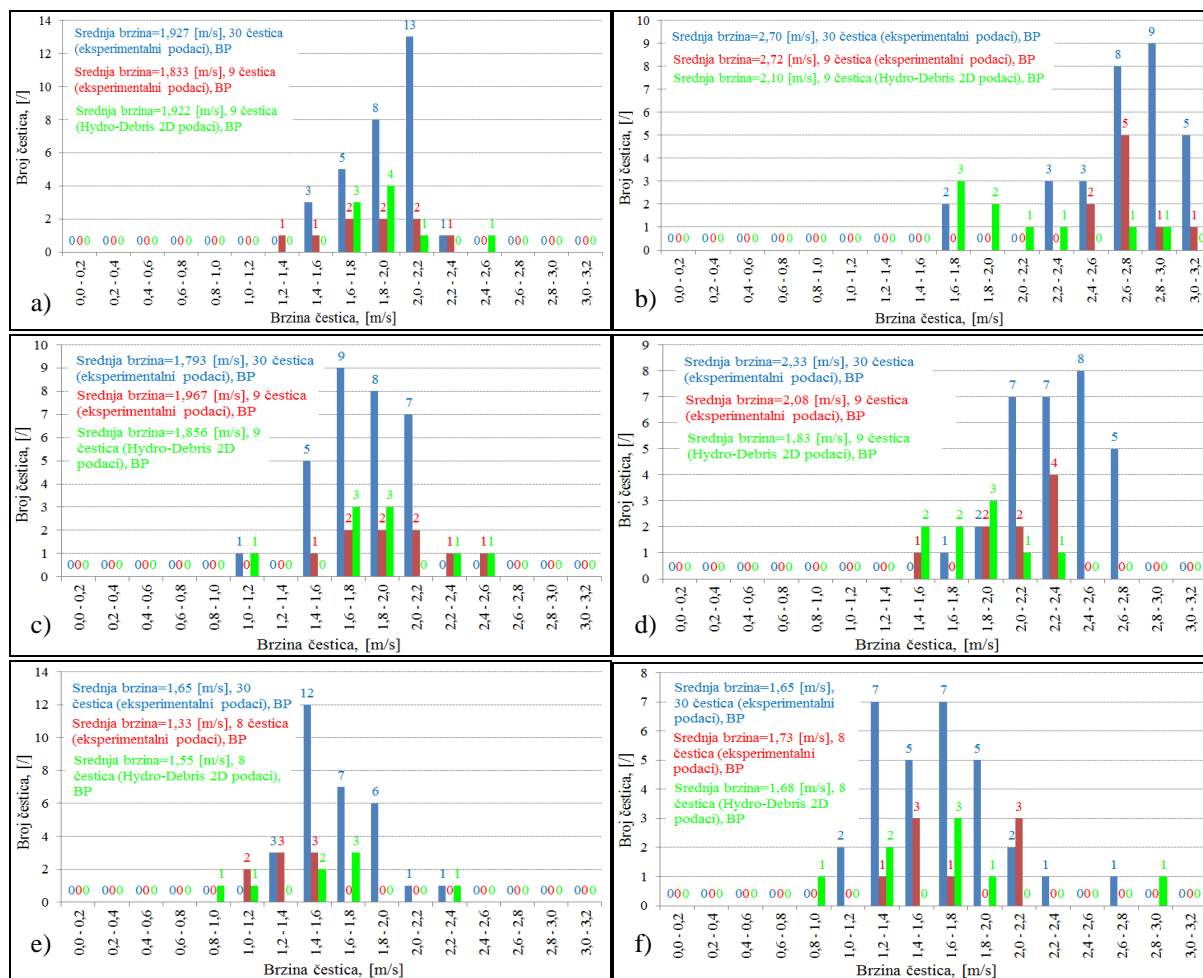
Završni proces prije analize toka krupnozrnatog materijala predstavlja sušenje svakog pojedinog uzorka, na temelju kojeg su određene njihove težine za svaku veličinu zrna materijala (u gramima). Također je određen broj zrna u uzorku za svaku veličinu čestice i za svako od triju mjerenja zasebno (Tablica 4.2.).

**Tablica 4.2.** Mjerenje specifične težine svakog uzorka i brojanje čestica u uzorcima na individualnim mjernim točkama unutar deponirane ploče (Žic i sur., 2013a)

	Težina materijala, [gram]			Ukupna težina uzorka, [gram]	Odnos materijala u uzorku (u odnosu na najveći promjer zrna) 10: 5: 2,5 mm	Odnos materijala u uzorku (u odnosu na najmanji promjer zrna) 2,5: 5: 10 mm	Broj čestica u uzorku		
	10 mm	5 mm	2,5 mm				10 mm	5 mm	2,5 mm
F4 (5 mm)	0,00	0,92	0,66	1,58	-	1:1,39:/	0	6	19
H4 (12 mm)	2,18	1,55	0,17	3,90	1:0,71:0,08	1:9,11:12,82	5	8	12
I4 (23 mm)	8,61	11,20	5,64	25,45	1:1,30:0,66	1:1,98:1,53	10	57	282
L4 (13 mm)	5,13	4,78	0,38	10,29	1:0,93:0,07	1:12,58:13,5	7	23	20
E5 (12 mm)	0,00	0,06	22,53	22,59	-	1:0,003:/	0	1	mного čest.
G5 29 mm (20 mm)	1,04	4,44	20,17	25,65	1:4,27:19,39	1:0,22:0,05	3	25	mного čest.
G5 29 mm (9 mm)	1,48	4,29	4,63	10,40	1:2,90:3,13	1:0,93:0,32	3	21	212
I5 31 mm (20 mm)	0,71	3,35	11,45	15,51	1:4,72:16,13	1:0,29:0,06	1	24	mного čest.
I5 31 mm (11 mm)	3,38	4,95	4,51	12,84	1:1,46:1,33	1:1,10:0,75	5	20	mного čest.
K5 (17 mm)	7,05	4,88	2,50	14,43	1:0,69:0,35	1:1,95:2,82	10	21	122
M5 (13 mm)	7,32	2,05	0,03	9,40	1:0,28:0,004	1 : 68,33 : 244,0	9	8	2
D6 (6 mm)	0,00	1,10	4,68	5,78	-	1:0,24:/	0	8	197
F6 30 mm (20 mm)	0,00	0,24	14,74	14,98	-	1:0,02:/	0	4	mного čest.
F6 30 mm (10 mm)	0,00	2,15	10,90	13,05	-	1:0,20:/	0	15	mного čest.
H6 31 mm (20 mm)	1,23	4,68	10,42	16,33	1:3,80:8,47	1:0,45:0,19	2	26	mного čest.
H6 31 mm (11 mm)	3,02	6,61	3,47	13,10	1:2,19:1,15	1:1,90:0,87	5	32	168
J6 23 mm (20 mm)	3,78	6,64	6,61	17,03	1:1,76:1,75	1:1,004:0,57	4	32	mного čest.
J6 23 mm (3 mm)	2,61	1,60	0,05	4,26	1:0,61:0,02	1 : 32,0 : 52,0	2	5	5
L6 (15 mm)	4,65	4,39	0,74	9,78	1:0,94:0,16	1:5,93:6,28	5	21	34
C7 (13 mm)	2,04	1,99	6,76	10,79	1:0,98:3,31	1:0,29:0,30	3	12	mного čest.
E7 (18 mm)	0,00	3,62	13,69	17,31	-	1:0,26:/	0	23	mного čest.
G7 31 mm (20 mm)	3,00	8,24	6,15	17,39	1:2,75:2,05	1:1,34:0,49	7	37	mного čest.
G7 31 mm (11 mm)	4,03	4,26	1,93	10,22	1:1,06:0,48	1:2,21:2,08	6	24	97
I7 (18 mm)	6,99	5,44	2,06	14,49	1:0,78:0,29	1:2,64:3,39	8	24	91
K7 (18 mm)	8,51	2,81	0,79	12,11	1:0,33:0,09	1:3,56:10,77	5	14	42

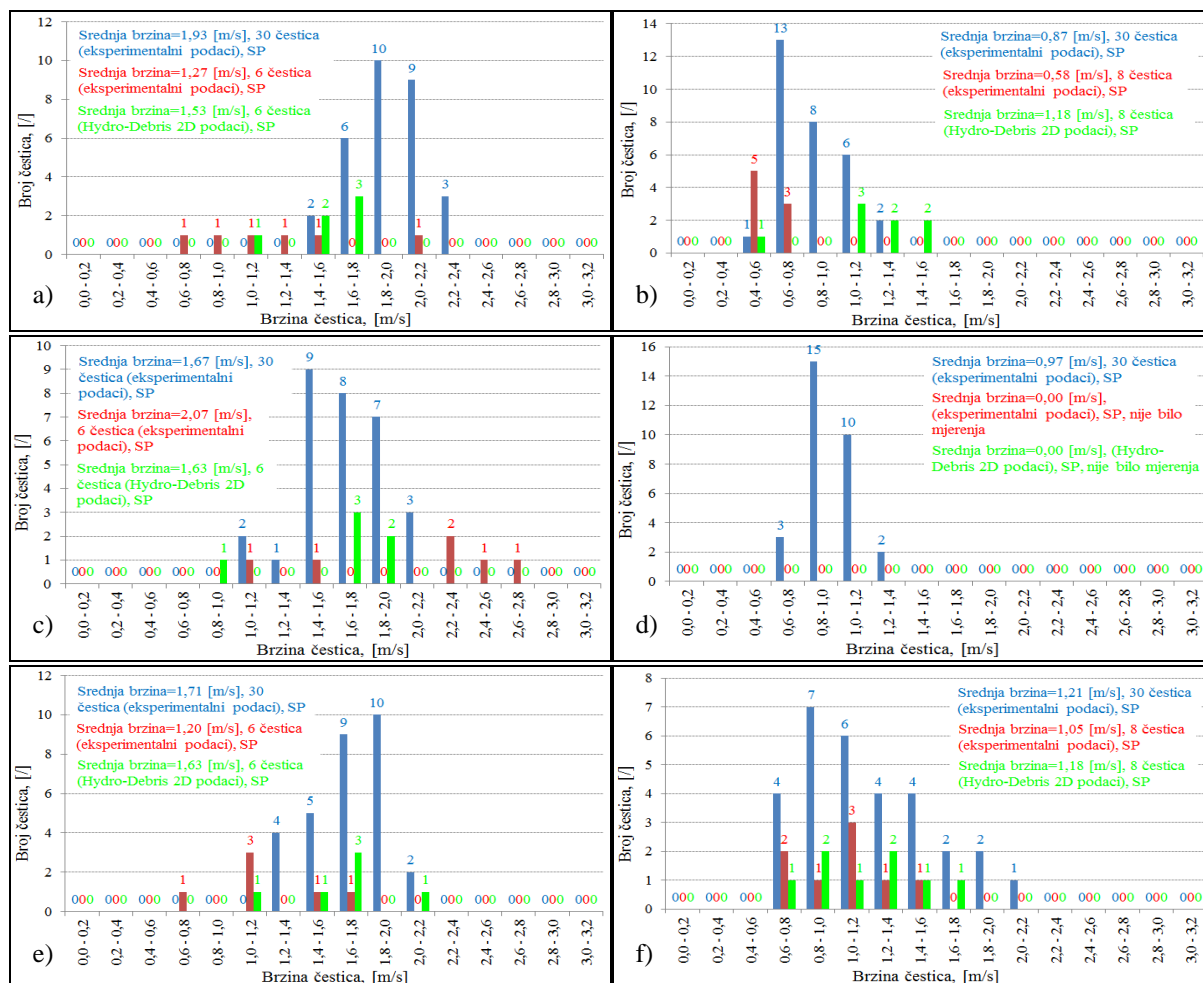
Pomaci velikih (BP – big particle) i malih čestica (SP – small particle) u određenom realnom vremenu (na početku simulacije - inicijalni slučaj, nakon 2s - srednji 2s slučaj i nakon 4s - posljednji slučaj) utvrđene su na temelju snimanja visokofrekventne video kamere (video snimaka). Stvarna brzina čestice određuje se dijeljenjem ukupne prijeđene udaljenosti i vremena potrebnog da ta čestica prijeđe s jednog mjesta na drugo (Slike 4.7. i 4.8.). Prosječne vrijednosti brzine za sve čestice dobiveni su temeljem osrednjavanja prosječnih brzina samovoljno uzetih 30 čestica u procesu propagacije, posebno uzetih za velike i male čestice (na različitim dijelovima poprečnog presjeka pravokutnog žlijeba na eksperimentalnom fizikalnom modelu).





**Slika 4.7.** Usporedba frekvencije brzine čestica na eksperimentalnom i numeričkom modelu za različite slučajeve u blizini nizvodnog dijela za velike čestice (BP), a) nagib kanala 25° - početni slučaj b) nagib kanala 25° - nakon 2s, c) nagib kanala 20° - početni slučaj, d) nagib kanala 20° - nakon 2s, e) nagib kanala 15° - početni slučaj, f) nagib kanala 15° - nakon 2s (Žic i sur., 2013c)

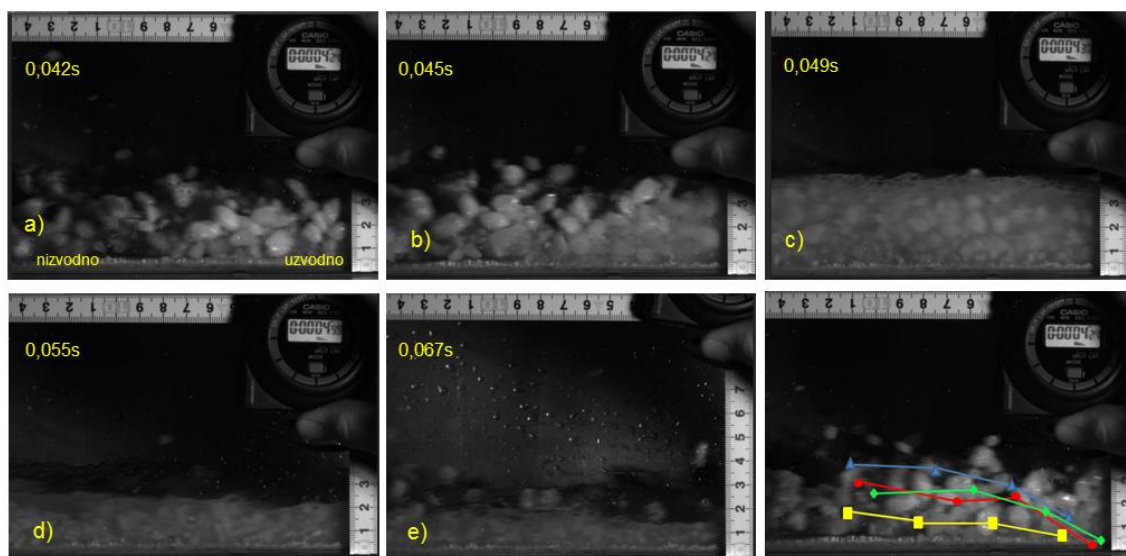
Prosječne brzine vrijednosti velikih (BP) i malih (SP) čestica dobivenih Hydro-Debris 2D numeričkim modelom uspoređene su sa prosječnim vrijednostima brzina na skupu proizvoljno odabranih 30 čestica (slučaj 1, eksperimentalni model), odnosno na skupu proizvoljno odabranih 9 čestica (slučaj 2, eksperimentalni model), (Slika 4.7.). Za pravokutni žlijeb nagiba kuta od 25° može se vidjeti da je prosječna brzina velikih čestica na eksperimentalnom fizikalnom modelu 1,93 m/s, dok je na numeričkom modelu dobivena sa vrijednosti od 1,92 m/s. Vrijednosti gotovo da se podudaraju, razlika je svega 0,005 m/s. Vrlo dobra korelacija prosječnih brzina za velike čestice dobivena je i kod ostalih slučajeva nagiba hidrauličkog žlijeba/kanala od 20° i 15°.



**Slika 4.8.** Usporedba frekvencije brzine čestica na eksperimentalnom i numeričkom modelu za različite slučajeve u blizini nizvodnog dijela za male čestice (SP), a) nagib kanala 25° - početni slučaj b) nagib kanala 25° - posljednjih 4s, c) nagib kanala 20° - početni slučaj, d) nagib kanala 20° - posljednjih 4s, e) nagib kanala 15° - početni slučaj, f) nagib kanala 15° - posljednjih 4s (Žic i sur., 2013c)

Na slici 4.7. može se uočiti da je prosječna brzina velikih čestica na početku propagacije toka krupnozrnatog materijala manja od prosječne brzine velikih čestica u prijelaznoj fazi nakon (2s) tečenja, koja vrijedi za sva tri ispitivana slučaja promjene nagiba pravokutnog žlijeba. To se može interpretirati kao činjenica da je brzina na čelu toka krupnozrnatog materijala izraženija u odnosu na tijelo i rep toka. Sa smanjenjem nagiba pravokutnog žlijeba/kana, prosječne brzine velikih i malih čestica se smanjuju. Ako se uspoređi prosječna brzina obojenih (malih) čestica može se zaključiti da su njihova odstupanja bila nešto izraženija u odnosu na prosječne brzine velikih čestica. Najveće razlike između vrijednosti prosječnih brzina kod malih čestica zabilježena je pri nagibu hidrauličkog pravokutnog žlijeba od 25° i ima vrijednost od 0,4 m/s, a odgovara slučaju početnog stanja propagacije toka krupnozrnatog materijala. Pri manjim kutevima (20° i 15°) odstupanja su zanemarivo mala.

Odstupanja od prosječne brzine za sitnije čestice na kraju propagacije toka krupnozrnatog materijala (nakon 4 s) između eksperimentalnog i numeričkog modela su vrlo značajne. Pri nagibu pravokutnog žlijeba od  $25^\circ$  prosječna vrijednost brzine iznosi 0,87 m/s dobivena na eksperimentalnom modelu, (slučaj 1.), dok je vrijednost brzine na HD2DM modelu gotovo 1,18 m/s (Slika 4.8.b). Velike čestice se kreću prema gore, te su brže od malih čestica. Kretanja većih čestica su dominantna u gornjoj zoni toka (gdje su veće brzine), dok su male čestice koncentrirane pri dnu (niže brzine toka), (Slika 4.9.).



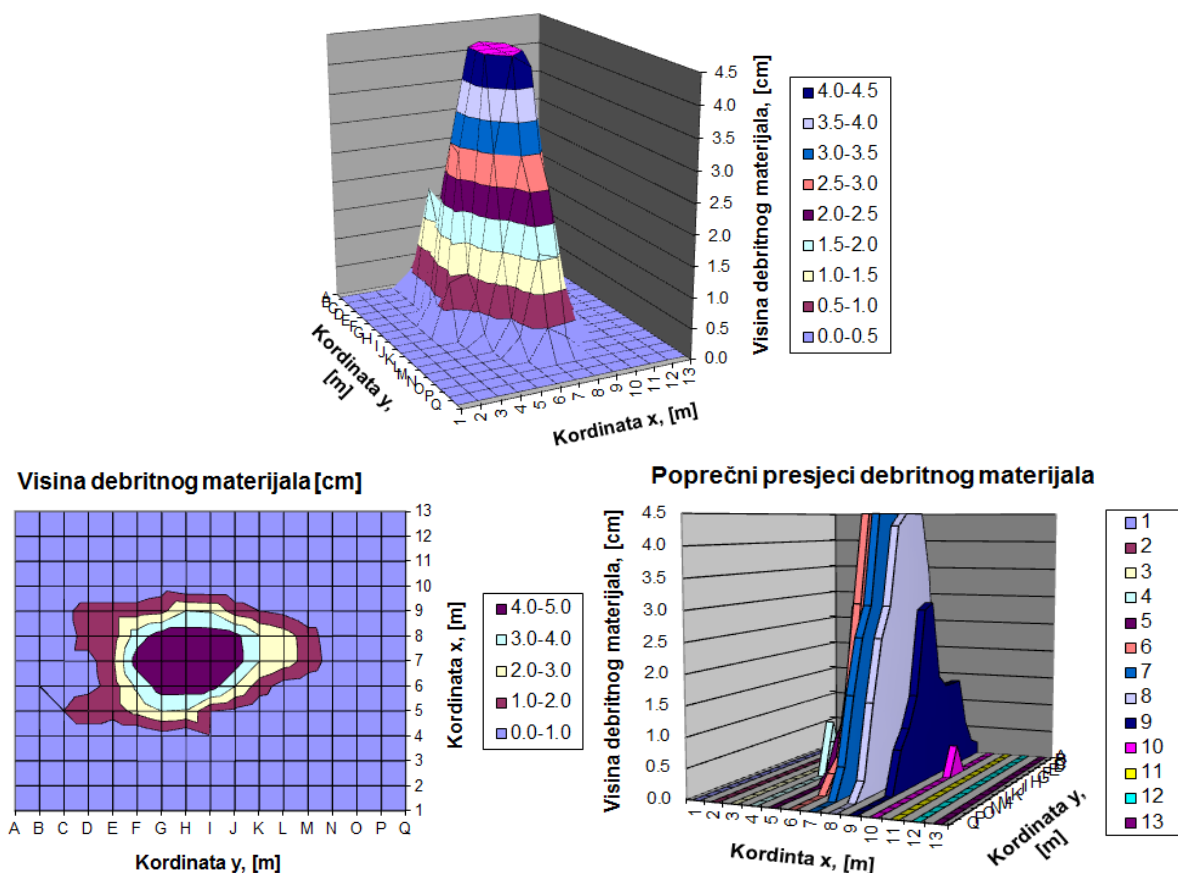
**Slika 4.9.** Prikaz kretanja i snimanja putanja čestica unutar toka krupnozrnatog materijala od (a) 0,042 s do (e) 0,067 s, primjena Photoshop CS6 programa (Žic i sur., 2013d)

Nakon uzorkovanja krupnozrnatog materijala na depositnoj (taložnoj) ploči, može se raznim računalnim programima definirati 3D prikaz deponiranog materijala, 2D prikaz dosega toka krupnozrnatog materijala, kao i prikaz krupnozrnatog materijala po pojedinim poprečnim profilima. Iz takvih prikaza se jasno mogu dobiti i vrijednosti deponiranog volumena na određenom mjestu, kao i procjene udara vala krupnozrnatog materijala (debritnog vala) na pojedine objekte. U nastavku je prikazan tablični i grafički prikaz gore navedenih elemenata na primjeru jednog eksperimentalnog pokusa (2. provedeno mjerenje!) propagacije toka krupnozrnatog materijala ispitivanog sa tri različite veličine granulacije zrna (Tablica 4.3., Slika 4.10.). Granulacija zrna u fizikalnom modelu uzeta je sa 2,5 , 5 i 10 mm. Nagib pravokutnog žlijeba u sva tri pokusa iznosio je  $25^\circ$ , dok je dolazni protok iz velikog spremnika iznosio 3 l/s. Svi ostali parametri i procedura rada je identična danom opisu kreiranja i mjerenja na fizikalnom modelu. Analiza toka krupnozrnatog materijala i

promatranje srednjih brzina tečenja sprovedene su neposredno nakon otvaranja zapornice (0 s), nakon 0,5 s, 1 s i 1,5 sekunde.

**Tablica 4.3.** Visine deponiranog materijala na deponiranoj (taložnoj) ploči – drugo mjerenje (nagib žlijeba 25°), Ujigawa Open Laboratory (Žic i sur., 2013a)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
C	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,2	0,6	0,4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
D	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,5	0,6	1,5	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
E	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	1,5	1,8	1,5	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
F	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3	3,2	4,5	3,5	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
G	0,0	0,0	0,0	0,5	3,0	4,5	4,5	4,5	1,7	0,5	0,0	0,0	0,0
H	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	4,5	4,5	4,5	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0
I	0,0	0,0	0,0	0,9	1,0	4,5	4,5	4,5	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0
J	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	3,0	4,5	4,3	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
K	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,5	3,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
L	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	2,5	2,5	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
M	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,6	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Q	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



**Slika 4.10.** 2D i 3D prikaz deponiranog krupnozrnatog materijala na deponiranoj ploči – drugo mjerenje (nagib žlijeba 25°), Ujigawa Open Laboratory (Žic i sur., 2013a)

Nakon provedene analize može se konstatirati da svako mjerenje na hidrauličkom žlijebu (za tri provedena pokusa) ima nešto drugačije 2D i 3D prikaze visina deponiranog krupnozrnatog materijala, pri istim definiranim ulaznim parametrima. Brzine propagacije toka na modelu se ne mijenjaju značajnije za istu granulaciju zrna materijala, ali se značajno mijenjaju po vertikalnom profilu kanala (Tablica 4.4.). Površinske brzine toka krupnozrnatog materijala su nešto veće u odnosu na pridnene brzine toka, što možemo sagledavati kao posljedicu konsolidacije materijala uslijed propagacije toka.

**Tablica 4.4.** Rezultati srednjih vrijednosti brzina toka krupnozrnatog materijala u različitim vremenskim inkrementima, Ujigawa Open Laboratory, Sveučilište Kyoto (Žic i sur., 2013a)

Vrijeme, [s]	UKUPNA SREDNJA BRZINA ČESTICA								
	Promjer čestica 10 mm, pad dna kanala 25°			Promjer čestica 5 mm, pad dna kanala 25°			Promjer čestica 2,5 mm, pad dna kanala 25°		
	Ukupna srednja brzina, proračun sa 30 čestica (eksperimentalni podaci), 1. mjerenje	Ukupna srednja brzina, proračun sa 30 čestica (eksperimentalni podaci), 2. mjerenje	Ukupna srednja brzina, proračun sa 30 čestica (eksperimentalni podaci), 3. mjerenje	Ukupna srednja brzina, proračun sa 30 čestica (eksperimentalni podaci), 1. mjerenje	Ukupna srednja brzina, proračun sa 30 čestica (eksperimentalni podaci), 2. mjerenje	Ukupna srednja brzina, proračun sa 30 čestica (eksperimentalni podaci), 3. mjerenje	Ukupna srednja brzina, proračun sa 30 čestica (eksperimentalni podaci), 1. mjerenje	Ukupna srednja brzina, proračun sa 30 čestica (eksperimentalni podaci), 2. mjerenje	Ukupna srednja brzina, proračun sa 30 čestica (eksperimentalni podaci), 3. mjerenje
0	3,70	3,39	3,74	3,93	3,35	4,01	3,01	1,70	2,76
0,5	3,78	3,32	3,65	3,83	3,22	3,92	2,91	2,38	2,68
1,0	2,94	3,19	3,34	3,16	3,08	3,38	2,52	2,17	2,30
1,5	2,13	2,98	2,75	1,85	1,71	2,17	1,32	1,85	1,54

### 4.3. Numerički modeli za opis toka krupnozrnatog materijala

Većina numeričkih modela za opis tokova krupnozrnatog materijala temelje se na zakonu očuvanja mase i količini gibanja, ali samo neki od njih uzimaju u obzir erozijsko djelovanje, odnosno taloženja koji utječu na vremenski razvoj dna kanala. Tokovi krupnozrnatog materijala su mješavine vode i materijala s visokim sadržajem grubih čestica, u kojima sudari između čestica i disperzivna naprezanja predstavljaju dominantne mehanizme rasipanja energije. Reološka svojstva tokova krupnozrnatog materijala ovise o različitim faktorima, kao što je koncentracija suspendiranih krutina, distribucija veličine čestica, oblik čestica, trenje među česticama i porni pritisak. Danas u praksi postoji nekoliko reoloških zakona (modela) za opis toka krupnozrnatog materijala. Oni se klasificiraju kao: Newtonovi reološki zakoni (Johnson, 1970.), linearni i nelinearni viskoplastični (O'Brien i sur., 1993.), dilatantni (Bagnold, 1954.), disperzivni ili turbulentni zakoni naprezanja (Arai i Takahashi, 1986.), biviskozni Binghamovi zakoni (Dent i Lang, 1983.), i zakoni trenja (Norem i sur., 1990.). Među njima, linearni (Bingham) ili nelinearni (Herschel-Bulkey) viskoplastični

reološki zakoni se naširoko koristi za opisivanje reologije tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala.

Modeliranje fluida kao dvofazne smjese nadilazi većinu ograničenja gore navedenih reoloških zakona (modela) i omogućuje širi izbor reoloških zakona kao što su: Bagnoldov zakon sa dilatantnom tekućinom (Takahashi i Nakagawa, 1994.), reološki zakon temeljen na Chézyjevoj jednadžbi s konstantnim koeficijentom trenja (Hirano i sur., 1997.), zakoni s kohezivnim doprinosom naprezanja (Honda i Egashira, 1997.) i Chenova zakonitost generalizirane viskoplastične tekućine (Chen i Ling, 1997.).

Unatoč mnogobrojnim reološkim zakonima, neki od fenomenoloških aspekata toka krupnozrnatog materijala još uvijek nisu dobro razjašnjeni. Primjera radi, mehanizam proloma brane je do sada promatran i analiziran pomoću jednofazne propagacijske teorije s čistom vodom, primjenjujući De Saint Venantove jednadžbe (Coussot, 1994.; Fread i Jin, 1997.). Mnogi drugi modeli, tzv. „kvazi dvofazni-modeli“, koriste De Saint Venantove jednadžbe zajedno sa djelovanjem erozije/taloženja i zakonom o očuvanju mase za čvrstu fazu, te uzimaju u obzir mješavinu različitih koncentracija.

Dinamički modeli se mogu klasificirati na više načina, ali glavne klasifikacijske sheme se najčešće odnose na (i) dimenzionalno rješenje (1D, 2D, 3D), (ii) izbor referentnog okvira (odabir Eulerovog referentnog okvira u mirovanju s obzirom na teren ili Lagrangeovog referentnog okvira koji se kreće s kliznom stjenskom masom) ili (iii) bazalnu reologiju.

Većina dinamičkih modela koristiti pristup redukcije dimenzije problema poznat kao „vrijednosti usrednjene po dubini“, u kojem su jednadžbe održanja mase i količine gibanja integrirane s obzirom na dubinu toka uz dodatna pojednostavljenja. Hidrostatski pritisak se pretpostavlja da raste linearno s dubinom od površine toka, na kojem se obično pretpostavlja da nema površinskog naprezanja, a posmična naprezanja po dubini su zanemarena (Savage i Hutter, 1991.). Takvo pojednostavljenje je temeljeno na činjenici da dubina varira postepeno, te je u odnosu na duljinu i širinu klizišta relativno mala. Kombinacija usrednjavanja po dubini toka sa pretpostavkom plitkog tečenja smanjuje jednu prostornu dimenziju jednadžbi održanja mase i količine gibanja. Jednodimenzionalni 1D modeli usrednjeni po dubini analiziraju kretanje stjenske mase s obzirom na topografiju kao uzdužni dio terena s unaprijed definiranom širinom, dok 2D modeli razmatraju topografiju i u pogledu uzdužnog poprečnog profila i kao poprečne presjeke toka.

Razvoj složenih numeričkih modela za opis tokova krupnozrnatog materijala imaju važne primjene u procjeni hazarda i njenoj analizi, te takvi modeli omogućuju kvantitativne procjene karakteristika toka krupnozrnatog materijala, uključujući dubinu i brzinu

napredovanja takvog toka, kao i njegov doseg i konačan volumen deponiranog materijala. Različiti scenariji i simulacijski prikazi mogu biti izgrađeni promjenom vladajućih parametara i rubnih uvjeta, koji omogućuje procjenu vjerojatnosti da će dani prostor biti izložen hazardu pod različitim okolnostima. U posljednje vrijeme je razvijeno nekoliko 1D numeričkih modela (Hungar, 1995.; Fraccarollo i Papa, 2000.; Arattano i Franzi, 2003.; Naef i sur., 2006.) i 2D numeričkih modela (Savage i Hutter, 1989.; O'Brien i sur., 1993.; Shieh i sur., 1996.; Laigle i Coussot, 1997.; Chen i Lee, 2000.; Pudasaini i sur., 2005.; Hungar i McDougall, 2009.) za opis tokova krupnozrnatog materijala.

Numerički modeli koriste ulazne parametre kako bi dobili izlazne vrijednosti. Ulazni parametri mogu biti sljedeći:

- pad terena čiji se podaci dobivaju iz digitalnog modela terena, (DMT)
- erodibilnost dna kanala koji daje informacije o količini erodiranog materijala dna kanala. Parametri erodibilnosti ovise o erozijskom zakonu koji se koristi u modelu.
- ulazni hidrogram daje podatke o količini vode.
- početni uvjeti (inicijalni volumen, početna dubina toka) su potrebni za opisivanje početnog stanja tečenja. Ti podaci se dobivaju nakon terenskih mjerenja.
- gustoća čvrstih čestica varira od 2500 do 3000 kg/m<sup>3</sup> (ovisno o tipu toka krupnozrnatog materijala)
- gustoća fluida se kreće oko 1000 kg/m<sup>3</sup> do 1200 kg/m<sup>3</sup> (ponekad i do 2100 kg/m<sup>3</sup>)
- viskoznost fluida varira od 0,001 do 0,1 Pas
- unutarnji kut trenja obuhvaća vrijednosti između 25° i 45°
- čvrsti volumni udio varira od 0,5 do 0,8, dok je tekući volumni udio između 0,2 i 0,5
- u slučaju tečenja krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala s velikom količinom vode, mogu se pojaviti procesi turbulencije, koji se opisuju koeficijentom turbulencije.

Svaki tip toka krupnozrnatog materijala odgovara drugačijim vrijednostima za predhodno opisane parametre, a za neke od njih su vrijednosti dane u knjizi „Fizika tokova krupnozrnatog materijala“ (eng. *The physics of debris flows*) profesora Iversona (1997b). Kvaliteta numeričkog modela toka krupnozrnatog materijala ne ovisi o broju ulaznih parametara, već o sposobnosti predviđanja dosega udaljenosti, brzine strujanja, uzorka taloženja i konačnog volumena krupnozrnatog materijala. Numeričke metode su uglavnom podijeljene na formulacije koje predstavljaju ponašanje krupnozrnate mase kao kontinuuma ili diskontinuuma. Idealizacija kao kontinuum pretpostavlja da se tečenje krupnozrnatog materijala prikazuje kao skup čestica koje se kreću nizvodno uz kanal, dok se kod idealizacije diskontinuumom promatra svaka čestica u gibanju zasebno (vrlo pogodno kod promatranja



klizanja velikih stjenskih blokova ili lavine krupnozrnatog materijala).

Empirijske metode i numerički modeli za procjenu dosega toka krupnozrnatog materijala uključuju različite pristupe (Tablica 4.5.).

**Tablica 4.5. Prikaz 2D dinamičnih numeričkih modela za određivanje dosega toka krupnozrnatog materijala**

Model	Reologija	Primjena rješenja	Referentni okvir	Reološka promjena	Stopa zahvaćanja
MADFLOW (Chen i Lee, 2007.)	Zakon trenja, Voellmyev i Binghamov zakon	Integrirani kontinuum	Lagrangeov s mrežom	ne	Definirana
TOCHNOG (Crosta i sur., 2003.)	Zakon trenja (elastoplastični zakon)	Diferencijalni kontinuum	Euler-Lagrangeov (adaptivna mreža)	da	Temeljena na procesu
RAMMS (Christen i sur., 2010.)	Voellmyev zakon	Integrirani kontinuum	Eulerov	da	Definirana i temeljena na procesu
DAN3D (Hungri i McDougall, 2009.)	Zakon trenja, Voellmyev i Binghamov zakon	Integrirani kontinuum	Lagrangeov bezmrežni	da	Definirana
FLATMODEL (Medina i sur., 2008.)	Zakon trenja i Voellmyev zakon	Integrirani kontinuum	Eulerov	ne	Temeljena na procesu
SCIDDICA S3-hex (D'Ambrosio i sur., 2003.)	Zakon baziran na energiji	Čelijski automati	Eulerov	ne	Temeljena na procesu
3dDMM (Kwan i Sun, 2006.)	Zakon trenja i Voellmyev zakon	Integrirani kontinuum	Eulerov	da	Definirana
PASTOR model (Pastor i sur., 2009.)	Zakon trenja, Voellmyev i Binghamov zakon	Integrirani kontinuum	Lagrangeov bezmrežni	da	Definirana
MassMov2D (Begueria i sur., 2009.)	Voellmyev i Binghamov zakon	Integrirani kontinuum	Eulerov	da	Definirana
RASH3D (Pirulli i Mangeney, 2008.)	Zakon trenja, Voellmyev i kvadratni zakon	Integrirani kontinuum	Eulerov	ne	Ne primjenjuje stopu zahvaćanja
FLO-2D (O'Brien i sur., 1993.)	Kvadratni zakon	Integrirani kontinuum	Eulerov	ne	Ne primjenjuje stopu zahvaćanja
TITAN2D (Pitman i Le, 2005.)	Zakon trenja	Integrirani kontinuum	Lagrangeov s mrežom	ne	Ne primjenjuje stopu zahvaćanja
PFC (Preh i Poisel, 2007.)	Zakon međučestica (interakcija čestica-zid)	Rješenje gibanja čestica (metoda različitih elemenata)	Metoda različitih elemenata	ne	Ne primjenjuje stopu zahvaćanja
VolcFlow (Kelfoun i Druitt, 2005.)	Zakon trenja i Voellmyev zakon	Integrirani kontinuum	Eulerov	ne	Ne primjenjuje stopu zahvaćanja

One se temelje na geometrijskom odnosu između kosine i depozita stijenske mase koje je inicirano sa klizišta (Nicoletti i Sorriso Valvo, 1991.; Evans i Hungr, 1993.; Corominas, 1996.; Hunter i Fell, 2003.; Hungr i sur., 2005.) ili na metodi promjene volumena (Cannon, 1993.; Fannin i Wise, 2001.). Nekoliko empirijskih metoda za procjenu dosega (udaljenosti) putovanja toka krupnozrnatog materijala i njegove brzine za potrebe izrade karata osjetljivosti od hazarda razvijeni su na temelju opažanja na terenu i na temelju analize odnosa između parametara koji karakteriziraju tok krupnozrnatog materijala. Ta dva parametra toka su predstavljena volumenom toka i njegovim prijeđenim putem koji on prolazi po određenoj konfiguraciji terena, uz mogućnost prepreka na tom putu.

Dinamički modeli za određivanje dosega tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala razvijali su se iz jednostavnih hidrodinamičkih modela i prelazili u složene modele koji uključuju različite metode računanja unutarnjeg naprezanja suspendirane mase, bazalnog naprezanja po dnu kanala, izračun pornih tlakova i lateralnih naprezanja i slično, a sve uz pristup različitim primjena reoloških zakona. Oni su klasificirani na temelju njihove provedbe i odabrane sheme stope zahvaćanja. A priori „definirana stopa zahvaćanja“ znači da je količina materijala koja ulazi definirana od strane korisnika, dok „procesno temeljena stopa zahvaćanja“ znači da je količina materijala koja ulazi u proračun dinamički izračunata po propisanom odnosu između relevantnih dinamičkih varijabli (npr. brzini, dubini toka, naprezanju po dnu kanala uzrokovanog trenjem i sl.) i stope zahvaćanja. Druge karakteristike modela koje ih međusobno razlikuju su temeljna reologija, referentni okvir za primjenu rješenja i promjenjiva reologija uzduž putanje toka.

Općenito, možemo razlikovati empirijske i racionalne metode. Empirijske metode se koriste za procjenu putanje toka krupnozrnatog materijala. One se temelje na geometrijskim odnosima između kosine i depozitnog materijala (Evans i Hungr, 1993.; Corominas, 1996.; Hungr i sur., 2005.) ili na temelju metode promjenjivog volumena (Cannon, 1993.; Fannin i Wise, 2001.). Racionalne metode se temelje na korištenju matematičkih modela različitih stupnjeva složenosti. One se dodatno dijele na sljedeće metode (Slika 4.11.):

(a) metode temeljene na diskontinuumu. Koriste se u slučajevima u kojima se propagacijska masa predstavlja kao skup čestica, gdje se svaka čestica (ili blok, kameni oblutak ili slično) može zasebno promatrati. Geometrija u takvim metodama se može modelirati sa dovoljnom preciznošću ili aproksimirati na pojednostavljeni oblik (Agliardi i Crosta, 2003.). Elementi diskontinuumu su često korišteni kod modela za opis stjenskih lavina. Stjenska lavina ili odron stjenskog materijala se aproksimira nizom čestica jednostavnih geometrijskih oblika (krugovi, elipse i sl.) sa zakonima koji opisuju kontaktne sile. Broj materijalnih parametara je

vrlo mali (trenje, ponekad početna kohezija i elastična svojstva kontakata). Okrugli stjenski blokovi (3D) ili stjenske ploče (diskovi, 2D) se mogu kombinirati u složenijim oblicima, te se također mogu izgenerirati s obzirom na granulometrijski sastav (Calvetti i sur., 2000.). Metode temeljene na diskontinuumu su pogodne i za simulacijske prikaze tipa tečenja poput klizanja stjenske mase u obliku toka, piroklastične tokove i tokove sitnozrnatog materijala.

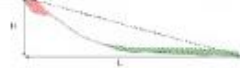
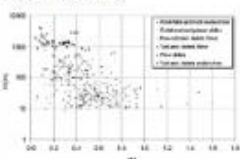

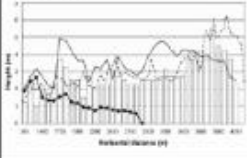
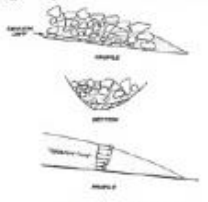
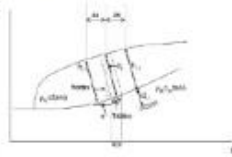
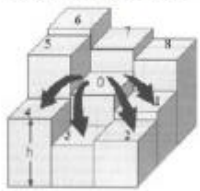

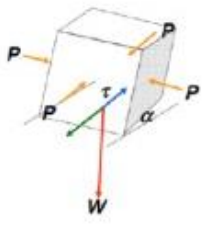
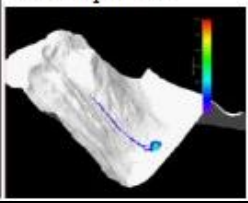
(b) metode temeljene na kontinuumu. One se temelje na mehanici kontinuuma, a mogu uključivati veze između hidromehaničkog ponašanja i termomehaničkih procesa (utjecaj temperaturnih promjena uslijed tečenja suspendirane mase po pridnenoj površini korita). U skupinu ovih metoda spadaju slijedeći modeli:

(b.1) 3D modeli temeljeni na teoriji smjese. Najsloženiji takav model uključuje sve faze prisutne u tečenju materijala (čvrstu, tekuću i plinovitu fazu). Ovdje relativno pokretanje mase materijala može biti veliko, a ova skupina modela se može primijeniti na najopćenitijem slučaju. Zbog velikog broja nepoznanica i jednadžbi ovi se modeli pretežno koriste za opis toka sitnozrnatog materijala i odrona stjenske mase (Quecedo i sur., 2004.).

(b.2) modeli brzina-tlak (Biot-Zienkiewicz model). U mnogim slučajevima, kretanje porne tekućine je vrlo sporo u odnosu na kostur (skelet) tla. Pritom treba napomenuti da se porni tlakovi mogu u potpunosti opisati.

(b.3) Uzimajući u obzir geometriju kod većine brzih propagacijskih klizanja mase, moguće je koristiti aproksimaciju korištenjem integracije po dubini uz pojednostavljenja. Ova metoda se klasično koristi u hidraulici otvorenih tokova i kod obalnog inženjerstva za opis tečenja u kanalima, opis propagacije dugih valova, morskih mijena i slično (Savage i Hutter, 1991.). Također je moguće da se informacije o bazalnom pornom tlaku odrede putem ovih modela (Iverson i Delinger, 2001a; Pastor i sur., 2008.). Ovim modelima se mogu opisivati tipovi klizanja i tečenja suspendiranog materijala poput odrona stjenske mase, piroklastični materijali, tokovi krupnozrnatog materijala, te klizanje sitnozrnatog koherentnog materijala u obliku toka (MacDougall i Hungr, 2004.).

(b.4) integrirani modeli po dubini mogu biti dodatno pojednostavljeni, kao u slučaju tzv. pristupa beskonačnih klizišta. Blok analiza koja se izvodi u mnogim slučajevima se sastoji od niza beskonačnih klizišta razvijenih preko promjenjive topografije. Disipacija pornog tlaka može biti uključena u model (Hutchinson, 1986.). U zadnje vrijeme su poboljšani tzv. „modeli blokova“ kako bi se razmotrio kinematički utjecaj grupe blokova i njihova međusobna interakcija, uključujući i termodinamički učinak (Pinyol i Alonso, 2010.; Alonso i Pinyol, 2010.).

Dimenzija proračuna	Tip metode	Ulazni parametri	Izlazne vrijednosti
1D	<p>Empirijske metode</p> <p>Heuristička</p> <p>Metoda kuta dosega (Angle of reach method)</p>  <p>Metoda promjene mase (Mass-change method)</p>	<p>volumen</p> <p>topografski profil</p> <p>unos na bazi vizualne percepcije i geomorfološke</p>	<p>- maksimalni doseg</p> <p>- površina deponiranog materijala</p> <p>- dubina toka</p>  <p>Devoli i sur., 2009.</p>
	<p>Analitičke metode (Point mass model)</p> 	<p>Reološki parametri</p> <p>Topografski profil</p>	<p>- maksimalni doseg</p> <p>- brzina</p> 
	<p>Numeričke metode (primjena kontinuuma)</p>  <p>Hungr, 1995</p>	<p>Reološki parametri</p> <p>Topografski profil</p> <p>Volumen</p>	<p>- Maksimalni doseg</p> <p>- brzina</p> <p>- udarni pritisak</p> <p>- dubina toka</p> 
2D	<p>Metoda bazirana na usmjeravanju toka</p> 	<p>DEM (Digitalni model terena)</p>	<p>Pxy - vjerojatnost da svaka čelija bude zahvaćena tokom</p> <p>- trajektorije toka i širenje depositnog materijala</p> <p>Horton i sur., 2008.</p> 
	<p>Numeričke metode</p> 	<p>DEM (Digitalni model terena)</p> <p>Reološki parametri</p> <p>Volumen</p>	<p>- širenje depositnog materijala</p> <p>- brzina</p> <p>- dubina toka</p> <p>- udarni pritisak</p> 

Slika 4.11. Shematski prikaz metoda za određivanje dosega toka krupnozrnatog materijala i dimenzije njihovih proračunskih domena (SafeLand projekt, 2012., točka 1.7)

Empirijske metode za procjenu dosega tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala obično se temelje na velikom broju terenskih opažanja i na statističkoj analizi odnosa između dosega toka i različitih mehanizama klizišta koji su vezani za geomorfološke parametre, inicirajući (pokrenuti) volumen mase sitnozrnatog ili krupnozrnatog materijala, te karakteristike terena. Empirijski pristupi temelje se na pojednostavljenim pretpostavkama i relativno lako se

primjenjuju na velikim područjima. Takve metode se mogu podijeliti u i) heurističke, ii) metode temeljene na promijeni mase, te iii) metode temeljene na promijeni kuta doseg (Hungar i sur., 2005.).

#### **4.4. Opis numeričkih modela korištenih u doktorskom radu**

##### **4.4.1. SOLFEC simulacijski program**

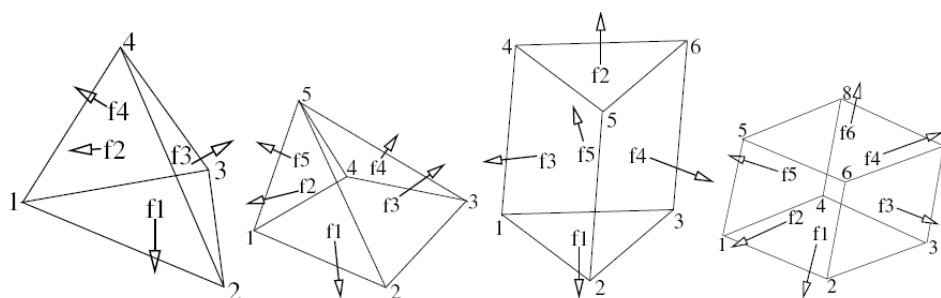
SOLFEC simulacijski program (Koziara, 2008., 2010.) je usmjeren na simulaciju sustava više tijela uz strogo poštivanje uvjeta na međusobnom kontaktu tijela. Simulacija je bazirana na proračunu korištenjem dinamike kontakata na temelju metode Moreau i Jean (Leine i Van de Wouw, 2008.; Moreau, 1988.), gdje se zadovoljavanje rubnih uvjeta na kontaktu tretira implicitno. SOLFEC je „open source“ simulacijski program temeljen na NSCD metodologiji (eng. *Non Smooth Contact Dynamics*) u kojoj su glavne varijable brzine i impulsi kontaktnih sila. Glavni cilj programa je osiguranje kvalitetne i robusne simulacijske platforme za rješavanje dinamičkih problema za promjenjive kontakte i trenje. Pri tome SOLFEC provodi numeričku integraciju jednadžbi gibanja uz detekciju i rezoluciju uvjeta na kontaktu. Unutar programa postoji još niz algoritamskih detalja poput raznih shema vremenskih integratora, nekoliko modela deformabilnosti tijela (kruti, pseudo-kruti, modeli s konačnim elementima), kao i nekoliko algoritama za detekciju (otkrivanje) kontakata, te nekoliko rješenja za simultano zadovoljenje uvjeta na kontaktima kao na primjer Gauss-Seidelova metoda numeričke integracije (Koziara, 2008.; Moreau, 1988.).

##### **4.4.1.1. Kreiranje računalnog koda u SOLFEC simulacijskom programu**

Definiranje problema (ulazne datoteke) u SOLFEC računalnom kodu su pisane u Python programskom jeziku. Python interpreter je ugrađen u SOLFEC simulacijski program. Funkcionalnost SOLFEC-a se može također proširivati uz pomoć Python programskog jezika dodavanjem brojnih objekata i podprograma. Računalni kod u SOLFEC programu se može izvršavati na više načina: interaktivno, gdje se kod izvršava u trenutku kada ga pišemo, skriptno, gdje se kod sprema unutar tekstualne datoteke koja se izvršava u trenutku pokretanja skripte (datoteke), te umetnuti način, gdje je moguće računalni kod izvršavati unutar programa pisanog u drugim programskim jezicima. U inženjerskoj praksi najčešće se koristi skriptni način izvođenja (Elkner i sur., 2006.).

Definiranim naredbama u Python računalnom kodu povezuje se ulazna datoteka koja specificira geometriju samog terena (generiranje mreže pomoću konačnih elemenata) (Koziara, 2010.). Kreiranjem pojedinih SOLFEC objekata definiraju se karakteristike

površine materijala po kojem teče fluid, kao i tip materijala (njegov oblik, veličina, fizikalna svojstva i sl.) koji će se nizvodno propagirati. Svaka logična cjelina ili „objekt“ u SOLFEC terminologiji ima određeni broj specificiranih entiteta koji određuju svojstva i oblik objekta (Slika 4.12.). U tom kontekstu je važno definiranje fizikalnih parametara (Youngov modul elastičnosti, Poissonov koeficijent, koeficijent trenja, koeficijent kohezije i sl.) kako bi se što bolje opisao kontakt između fluida i nepokretnog tla, te fluida i suspendiranog (nevezanog) materijala pri tečenju. Python zapisom se dalje odabire jedan od algoritama za vremensku integraciju jednadžbi gibanja, kao i odabir iterativne metode za zadovoljenje kontaktnih rubnih uvjeta. Tokovi krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, te slične pojave koje su matematički opisane parcijalnim diferencijalnim jednadžbama, se u većini slučajeva ne mogu riješiti strogo analitički. Da bi koristili numeričke metode rješavanja, potrebno je koristiti diskretizacijske metode koje aproksimiraju diferencijalne jednadžbe kao sustav algebarskih jednadžbi, koje se kao takve mogu riješiti na računalu. Aproksimacije u SOLFEC programu uključuju i prostor i vrijeme tako da numerička rješenja daju rezultate u diskretnim lokacijama u vremenu i prostoru. Točnost numeričkih rješenja ovise o kvaliteti korištene diskretizacije (Koziara, 2010.).



**Slika 4.12.** Tipovi elemenata u SOLFEC simulacijskom programu (Koziara, 2010.)

SOLFEC simulacije primjenjuju tzv. Signorini-Coulombov neglatki rubni uvjet na kontaktnoj plohi između tijela. Ovaj SOLFEC objekt zahtjeva specificiranje koeficijenta trenja, koeficijenta kohezije, koeficijenta restitucije i amortizaciju krutosti (Tablica 4.6.).

**Tablica 4.6.** Modeli površinskog materijala u SOLFEC programu (Koziara, 2010.)

Ime modela	Potrebne varijable
„SIGNORINI_COULOMB“	Koeficijent trenja, kohezija, koeficijent restitucije
„SPRING_DASHPOT“	Koeficijent elastičnosti opruge, amortizacija, koeficijent trenja, kohezija

Prilikom kreiranja objekata (tipa tijela) unutar SOLFEC simulacijskog programa postoji nekoliko konfiguracija (Tablica 4.7.). Sheme vremenskih integracija koje se mogu primijeniti u SOLFEC programu prikazane su u tablici 4.8.

**Tablica 4.7. Vrste konfiguracija u SOLFEC programu (Koziara, 2010.)**

Tip tijela	Opis konfiguracije
„RIGID“	Stupčana matrica rotacije slijedi trenutni centar mase.
„PSEUDO_RIGID“	Stupčani deformacijski gradijent slijedi trenutni centar mase.
„FINITE_ELEMENT“	Trenutne koordinate $x,y,z$ čvorova mreže.
„OBSTACLE“	Nema objekata definiranih Python programskim jezikom.

**Tablica 4.8. Sheme vremenskih integracija u SOLFEC programu (Koziara, 2010.)**

Sheme	Kinematika (tijela)	Napomene
'DEFAULT'	Svi	Koristi integrator zadanog vremena, bez obzira na temeljnu kinematiku.
'RIG_POS'	kruto	Eksplicitni, pozitivan energetske doprinos, bez očuvanja količine gibanja.
'RIG_NEG'	kruto	Eksplicitni, negativan energetske doprinos, točno očuvanje količine gibanja; po pretpostavci za kinematiku krutih tijela.
'RIG_IMP'	kruto	Polueksplicitna, nema energetske doprinosa i točnog očuvanja količine gibanja.
'DEF_EXP'	Polu-kruto, konačni element	Eksplicitna shema; po pretpostavci za kinematiku deformabilnih tijela, očuvanje energije i količine gibanja, uvjetno stabilna.
'DEF_LIM'	Polu-kruto, konačni element	Linearno implicitna shema; očuvanje energije i količine gibanja, stabilna za umjerene korake.
'DEF_LIM2'	Polu-kruto, konačni element	Linearno implicitna shema; jaka numerička disipacija, stabilna za velike korake.
'DEF_IMP'	Polu-kruto, konačni element	Linearno implicitna shema; očuvanje energije i količine gibanja, stabilna za velike korake.

Unutar SOLFEC-a primjenjuje se nelinearna blok Gauss-Seidelova metoda za iterativno rješavanje simultanog zadovoljenja kontaktnih uvjeta na svim mjestima gdje su tijela u dodiru (Tablica 4.9.) (Koziara, 2010.).

U svrhu dobivanja numeričke simulacije potrebno je definirati određena ograničenja na objekte koji su definirani unutar numeričkog koda. Neki od tih ograničenja koji se primjenjuju u SOLFEC programu su: GRAVITY (potprogram koji definira (postavlja) gravitacijsko ubrzanje), FORCE (definira mjesto djelovanja sile na tijelo), TORQUE (definira okretni moment na kruto tijelo). Detaljna objašnjenja se mogu naći u radu Koziara (2010.).

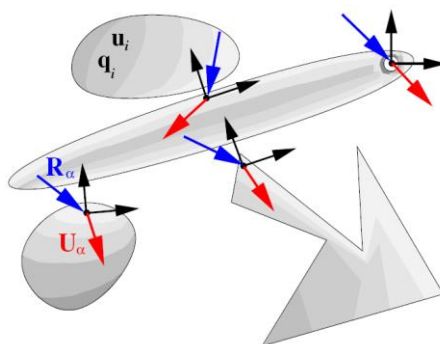


**Tablica 4.9.** Varijante paralelnog Gauss-Seidelova ažuriranja u SOLFEC programu (Koziara, 2010.)

„FULL“	Potpuno Gauss-Seidelovo ažuriranje kao u sekvencijskom slučaju. Iako najsporije, ono radi u svim slučajevima. Valja napomenuti, da sve donje varijante obično neće uspjeti za modele potpuno-krutih tijela.
„MIDDLE_JACOBI“	Jacobievo ažuriranje pri isključenom procesoru podataka W matricnih blokova koje komuniciraju sa procesorom viših i nižih boja. Koristi se za kinematiku deformabilnosti, gdje su off-diagonalne međuveze slabe. Gauss-Seidelovo vremensko izvršavanje mora biti prepolovljeno za veliki broj procesora.
„BOUNDARY_JACOBI“	Upotreba Jacobijeva ažuriranja za sve isključene procesorske podatke. Ovaj pristup će uspjeti u većini slučajeva. To služi kao ilustracija.
„SIMPLIFIED“	Jedan zamah preko kontakata je napravljen s predhodnim vrijednostima isključenih procesorskih podataka. Nakon toga slijede lokalne Gauss-Seidelove iteracije za sva ne-kontaktna ograničenja. Ovo je najbrži i vrlo dosljedan pristup za upotrebu dominantnih kinematičkih deformabilnih modela.

#### 4.4.1.2. Jednadžbe problema

Zbog potpunosti, u nastavku se slijede teoretske osnove i formulacija neglatke kontantne mehanike korištena u razvoju SOLFEC programa (Koziara, 2010.) u svrhu lakšeg razumijevanja opisa i korištenja SOLFEC računalnog koda. Na slici 4.13. postoje četiri različita tijela.



**Slika 4.13.** Četiri različita tijela za primjenu u SOLFEC programu (Koziara, 2010.)

Položaj svake točke svakog tijela naziva se konfiguracijom  $q_i$ . Brzina svake točke svakog tijela naziva se brzinom  $u_i$ . Sa parametrima  $q$  i  $u$  prikupljaju se sve konfiguracije i brzine svih tijela. Ako je proteklo vrijeme brzina poznato, vremenska konfiguracija se može izračunati kao:

$$q(t) = q(0) + \int_0^t u dt \quad (4-1)$$

Brzina je određena integrirajući Newtonov zakon:

$$u(t) = u(0) + M^{-1} \int_0^t (f + H^T R) dt \quad (4-2)$$

gdje je  $M$  inercijski operator (ovdje prikazan kao konstanta),  $f$  je vanjska sila,  $H$  je linearni operator, dok  $R$  reprezentira vektor kontaktnih sila u određenim točkama kontakata  $R_\alpha$ . Dok integriramo gibanje tijela, pratimo broj lokalnih koordinatnih sustava (lokalni okviri) na svakom kontaktu. Na prikazanoj slici 4.13. postoje njih četvero. Svaki lokalni okvir se odnosi na par točaka, koji pripadaju dvama različitim tijelima. Promatrač postavljen na lokalnom okviru izračunava lokalne relativne brzine  $u_\alpha$  jedne od točaka, gledano iz perspektive druge točke (Koziara, 2008.). Tako vektor  $U$  sadrži sve lokalne brzine. Zatim, možemo pronaći linearnu transformaciju  $H$ , tako da vrijedi:

$$U = Hu \quad (4-3)$$

Rubni uvjeti na kontaktu su opisani u lokalnom koordinatnom sustavu. Lokalnim relativnim brzinama odgovaraju lokalni reaktivni impulsi  $R_\alpha$ . To može biti zajednički opisano implicitnim odnosom:

$$C(U, R) = 0 \quad (4-4)$$

Stoga, u cilju integracije jednadžbe (4-1) i (4-2), u svakom trenutku vremena rješavaju se implicitne relacije (4-4). Primjer numeričke aproksimacije takvog postupka se može opisati kao:

$$q^{t+\frac{h}{2}} = q^t + \frac{h}{2} u^t \quad (4-5)$$

$$u^{t+h} = u^t + M^{-1} h f^{t+\frac{h}{2}} + M^{-1} H^T R \quad (4-6)$$

$$q^{t+h} = q^{t+\frac{h}{2}} + \frac{h}{2} u^{t+h} \quad (4-7)$$

gdje je  $h$  diskretni vremenski korak. Kako se vremenski korak  $h$  ne pojavljuje u izrazu  $M^{-1} H^T R$ , tada  $R$  može biti tumačen kao impuls (kao integral reaktivne sile u intervalu  $[t, t+h]$ ).

Na početku postoje:

$$q^0 \text{ i } u^0 \text{ kao početni opisani uvjeti.} \quad (4-8)$$

Veličina vanjske sile ovisi o konfiguraciji i vremenskom trenutku

$$f^{t+\frac{h}{2}} = f\left(q^{t+\frac{h}{2}}, t + \frac{h}{2}\right) \quad (4-9)$$

a uključuje i unutarnje i vanjske sile. Simetričan i pozitivno-definitan operator inercije

$$M = M(q^0) \quad (4-10)$$

ne ovisi o vremenu i izračunava se samo jednom. Linearni operator

$$H = H\left(q^{t+\frac{h}{2}}\right) \quad (4-11)$$

se izračunava u svakom vremenskom koraku. Broj redova linearnog operatora  $H$  ovisi o broju ograničenja. Zatim se izračunava:

$$B = H \left( u^t + M^{-1} h f^{t+\frac{h}{2}} \right) \quad (4-12)$$

i

$$W = HM^{-1}H^t \quad (4-13)$$

koja je simetrična i polu-pozitivno definitna. Linearna transformacija

$$U = B + WR \quad (4-14)$$

daje reaktivni impuls  $R$  vezan za lokalnu relativnu brzinu  $U = Hu^{t+h}$  u trenutku  $t+h$ . Odnos (4-14) se može smatrati lokalnim problemom dinamike. Konačno, slijedi

$$C(U, R) = C(B + WR, R) = C(R) = 0 \quad (4-15)$$

gdje je  $C$  nelinearan i obično glatki operator. Osnovni algoritam za dinamiku kontakta može se prikazati slijedećim koracima:

1. prvo treba obaviti polukorak i naći novu konfiguraciju

$$q^{t+h} = q^t + \frac{h}{2} u^t$$

2. zatim treba ažurirati postojeće rubne uvjete i detektirati nove kontaktne točke
3. izračunati  $W, B$
4. riješiti  $C(R) = 0$
5. ažurirati brzine

$$u^{t+h} = u^t + M^{-1} h f^{t+\frac{h}{2}} + M^{-1} H^T R$$

6. obaviti drugu polovicu koraka do konačne konfiguracije

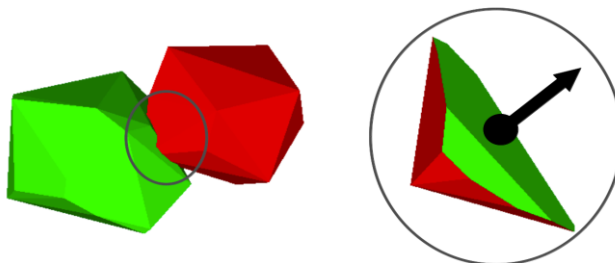
$$q^{t+h} = q^{t+\frac{h}{2}} + \frac{h}{2} u^{t+h}$$

U svakom vremenskom koraku implicitna jednačba  $C(R) = 0$  mora biti zadovoljena. U idealnom slučaju, kada za neki  $R$  vrijedi  $C(R) = 0$  postoji točno rješenje. Naravno, u numeričkom smislu to nije moguće. Za vrlo velike probleme, a posebice za probleme u kojima je broj ograničenja veći od broja kinematičkih sloboda, dobivanje vrlo preciznog rješenja je otežano, a često i nepraktično (Koziara i Bićanić, 2009.).

Kontaktne točka i normalni smjer rezultat su preklapanja dvaju konveksnih objekata (Slika 4.14.). Često postoji želja za korištenjem nekoliko dodirnih točaka, ali još uvijek nije moguće kontrolirati točnost kontaktne rezolucije od strane profinjenosti mreže.

Primjenom algoritma za otkrivanje kontakata, sva moguća volumenska preklapanja će biti otkrivena (Koziara, 2010.). Heuristički algoritam prorijeđivanja filtrira suvišne kontaktne točke. Detektiranje kontaktnih točaka u SOLFEC simulacijskom programu se temelji na

činjenici da prolazimo iznad svih kontaktnih mjesta i uspoređujemo svaki od njih s ostalim susjednim kontaktima kroz zajednička tijela (Koziara, 2008.). Ukoliko je područje kontakta manje od površine topološki susjednog kontakta, tada ga uklanjamo. Isto se događa ako dvije kontaktne točke koincidiraju.



**Slika 4.14.** Dodirne točke i normalan smjer izdvojen iz sjecišta dvaju konveksnih objekata (Koziara, 2008.)

Površinski materijal je dodijeljen za uparivanje površina. Za definiranje površinskog materijala u SOLFEC programu koristi se Signorini-Coulombov zakon. Uvjet brzine Signorinieveva zakona piše se u obliku:

$$\bar{U}_N \geq 0 \quad R_N \geq 0 \quad \bar{U}_N R_N = 0 \quad (4-16)$$

gdje je  $\bar{U}_N = U_N^{t+h} + \eta \min(0, U_N^t)$  koeficijent restitucije,  $U_N$  je normalna relativna brzina, a  $R_N$  je normalna reakcija. Normalni smjer je u skladu s pozitivnim smjerom brzine. Detalji teorije i implementacije se mogu naći u radu Koziara (2010.).

#### 4.4.1.3. Prostorna i vremenska diskretizacija

Matematički model za rješenje toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala u SOLFEC-u predstavlja sustav diferencijalnih jednačbi koji je potrebno prilagoditi rješavanju na računalu, tj. potrebno je unutar SOLFEC programa izabrati prikladnu metodu za diskretizaciju problema u prostoru i vremenu. Prostorna diskretizacija u SOLFEC programu koristi metodu konačnih elemenata (MKE), koja aproksimira domenu rješenja konačnim brojem susjednih elemenata raspoređenih u proizvoljne trokute, tetraedre i heksaedre. Nepoznanice problema su komponente vektora brzine,  $u$  u smjeru osi  $x$ ,  $v$  u smjeru osi  $y$  i  $w$  u smjeru osi  $z$ , definirane u centrima svakog elementa, dok se ostale skalarne vrijednosti definiraju u centru svakog elementa (Koziara, 2008.). Prateći odabir tipa numeričke mreže, potrebno je i odabrati aproksimaciju koja će se koristiti u diskretizacijskom procesu. Unutar SOLFEC-a odabiru se postavne funkcije (funkcije oblika) za polje brzina. Kod MKE primijenjene u SOLFEC simulacijskom programu proračunska domena je podijeljena u sustav diskretnih volumena ili konačnih elemenata općeg oblika. Rezultat diskretizacije je sustav algebarskih jednačbi koji

je linearan ili nelinearan, ovisno o prirodi pripadajuće parcijalno diferencijalne jednačbe od koje je sustav nastao. Za nelinearne slučajeve, jednačbe nastale diskretizacijom rješavaju se iterativnim tehnikama koje uključuju pogađanje rješenja, linearizaciju jednačbi oko tog rješenja i poboljšanja rješenja sve dok se ne postigne konvergencija rezultata (Štargel, 2006.). Vrlo je važno postaviti uvjete konvergencije za iteracijske metode. Prilikom proračuna nestabilnih tokova uzima se u obzir i četvrta dimenzija, vrijeme. Vrijeme je potrebno diskretizirati kao i prostor. Glavna razlika između vremenskih i prostornih koordinata je smjer utjecaja. Nakon diskretizacije prostornih derivacija u glavnim jednačbama postiže se povezani sustav nelinearnih diferencijalnih jednačbi oblika:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{F}(\vec{u}, t) \quad (4-17)$$

Takva jednačba se može integrirati po vremenu koristeći neku od metoda za rješavanje problema nestabilnih tokova. Pri tome treba zadovoljiti uvjete numeričke stabilnosti metoda korak po korak (uvjetno i bezuvjetno stabilne metode), gdje sve metode računanja napreduju kroz vrijeme korak po korak tj. "marširanjem" (eng. *time-marching methods*) (Štargel, 2006.). Za rješavanje stabilnih tokova, prostorna diskretizacija vodi do povezanog sustava nelinearnih algebarskih jednačbi oblika:

$$\vec{F}(\vec{u}) = 0 \quad (4-18)$$

Za dobivanje rješenja potrebno je uvesti određenu iterativnu metodu kako bi se riješila nelinearnost gore navedenih jednačbi.

#### **4.4.2. Simulacijski prikazi korištenjem SOLFEC simulacijskog programa (bujični vodotok Slani potok)**

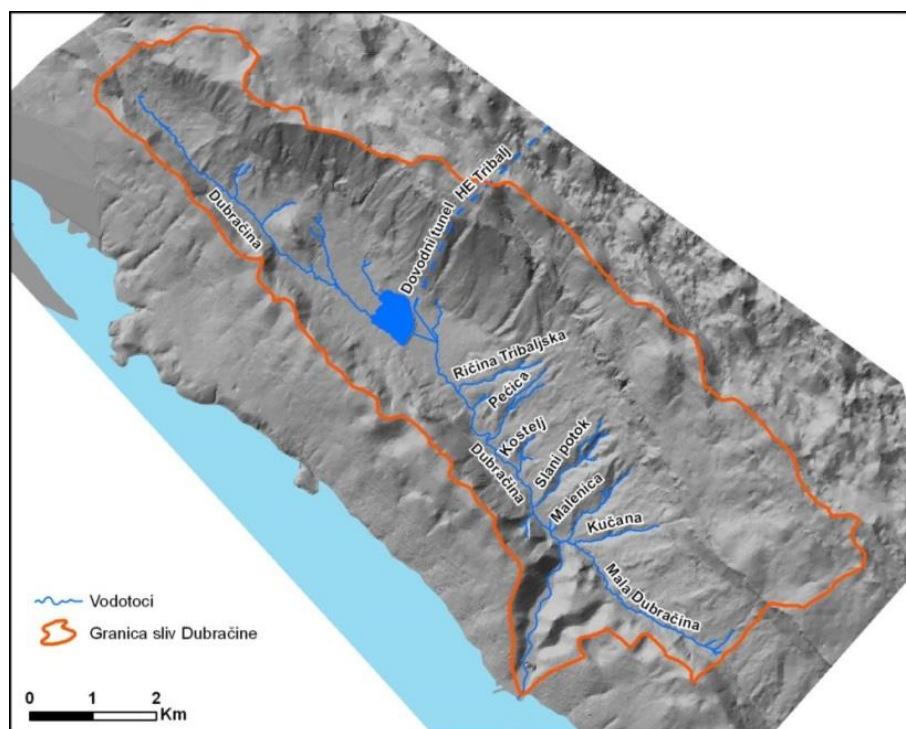
Na temelju metodologije rada SOLFEC simulacijskog programa kreiran je numerički model za propagaciju toka sitnozrnatog i krupnozrnatog materijala na bujičnom vodotoku Slani potok i njegove erozijske baze unutar sliva vodotoka Dubračine (Slika 4.15.). Vodotok Slani potok se nalazi u slivu vodotoka Dubračine (43,5 km<sup>2</sup>), smještene u Primorsko-Goranskoj županiji u zaleđu grada Crikvenice koja se proteže u smjeru SZ-JI, paralelno s jadranskom obalom (Slika 4.16.). U slivu Dubračine je prisutna intenzivna erozija, koja je osobito jako izražena na padinama Slanog potoka, gdje je formiran krajolik tipa tzv. „badlands“ (Benac i sur., 2005c).

Sliv Slanog potoka ima površinu približno 2 km<sup>2</sup>. Nalazi se na geografskim visinama između 50 i 700 mn.m. Donji dio sliva površine 0,9 km<sup>2</sup> prekriven je flišom, te čini glavninu

površinskog otjecanja. Gornji dio sliva je većinom krška zaravan sa koje su otjecanja zanemariva.



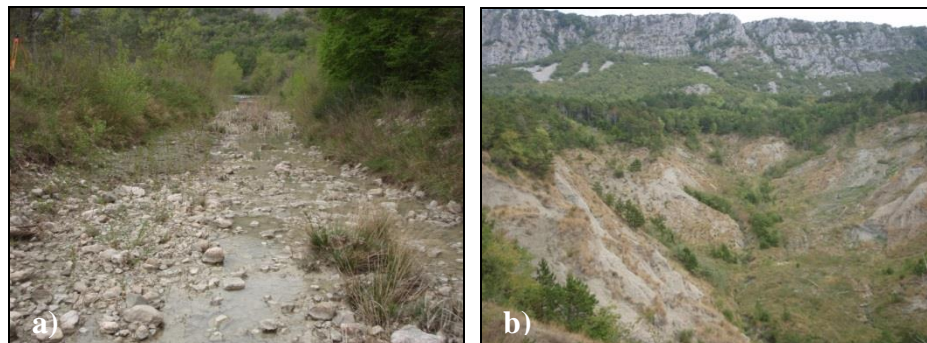
**Slika 4.15.** Prikaz bujičnog vodotoka Slani potok i erozijske baze za potrebe izrade računalnog koda u SOLFEC simulacijskom programu (Žic i sur., 2012b, 2012c)



**Slika 4.16.** Hidrografska mreža u slivu vodotoka Dubračine (A. Rubinić, 2009.)

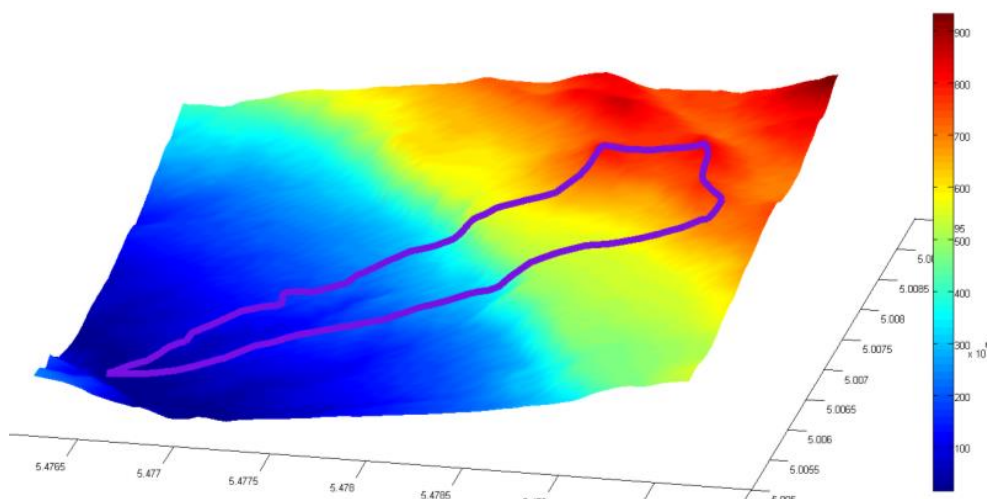
Zahvaćena površina erozijske baze bujičnog vodotoka Slani potok je veličine oko 3 km<sup>2</sup>, čime su ugrožena okolna naselja Belgrad, Baretići, Grižane i Kamenjak, kao i okolne ceste (Slika 4.17.). Retencije unutar vodotoka su gotovo u potpunosti ispunjene nanosom, pretežno

prahom i blatom. Unatoč brojnim mjerama sanacije provedenih tijekom cijelog 20. stoljeća i dalje je izražen proces sveopće degradacije terena, pa se navodi da stanje poprima svojstva “trajne elementarne nepogode” (Benac i sur., 2009.).



**Slika 4.17.** a) Bujični vodotok Slani potok (zimski period), b) erozijska baza vodotoka Slani potok (Foto Elvis Žic)

Srednji nagib sliva Slanog potoka je 22%, nagibi se kreću u rasponu od 5% do 100%, što sliv karakterizira kao veoma strm (Slika 4.18.). Nagibi sliva determiniraju otjecanja i procese erozije. Vrijeme koncentracije sliva po Kirpichu je 15 minuta. Za dio sliva na flišnoj podlozi srednji nagib sliva iznosi 19%, dok je vrijeme koncentracije 9 minuta (Ružić i sur., 2011.).



**Slika 4.18.** Karta nagiba sliva Slanog potoka u slivu Dubračine (Ružić i sur., 2011.)

Za potrebe izrade numeričkih modela propagacije tokova sitnozrnatog materijala izrađen je digitalni ortofoto prikaz područja Slanog potoka u mjerilu 1:5000, posljedica čega je nastala digitalna ortofoto karta. Izrađeni digitalni ortofoto, upotrebljavan zasebno ili u zajedništvu sa vektorskim podacima, služi za dobivanje jednostavnih informacija, kao što su koordinate točaka, udaljenosti, površine i volumeni klizne mase. Za potrebe izrade ovog rada



dotatno je sproveden digitalni elevacijski model terena za sliv Dubračine i bujični vodotok Slani potok (Žic i sur., 2012b).

Flišna erozijska baza iznad vodotoka Slani potok predstavlja vrlo trošan i nestabilan materijal koji pri jakim intenzitetima oborina odronjava stijenski materijal i transportira ga do manjih bočnih pritoka koji u konačnici dospijevaju u vodotok Slani potok (Slika 4.17.). Dobivanje simulacijskih prikaza propagacije toka sitnozrnatog materijala od iznimne je važnosti za grad Crikvenicu koja se nalazi oko 3 km nizvodnije od erozijske baze, iz razloga što se velike količine suspendiranog nanosa iz vodotoka Slani potok mogu transportirati u vodotok Dubračinu, te potom nastaviti put prema gradu Crikvenici. Pritom postoji mogućnost hazarda i rizika u pogledu oštećenja građevinskih struktura i imovine u urbanom dijelu grada Crikvenice kao i ugrožavanje flore i faune na širem području utoke vodotoka u more zbog povećanja koncentracije, pretežno sitnozrnatog materijala.

U SOLFEC simulacijskom programu je težnja da se iterativnim postupkom zadovolje neglatki rubni uvjeti na svim kontaktima (klizanje, statičko trenje, nemogućnost penetracije uz mogućnost odvajanja i sl.). Gauss-Seidelova metoda se pritom koristi za traženje reakcija na jednom kontaktu, uz zadovoljavanje rubnog uvjeta na tom istom mjestu, a da su pri tome reakcije na svim ostalim lokacijama „zamrznute“. Kad se zadovolji jedna lokacija, prelazi se na drugu, a sve ostale potom postanu „zamrznute“. Budući da se na svakoj lokaciji pri tome mijenja reakcija, treba se vratiti na stare lokacije, pa postupak iterativno prelazi (sijeće) preko svih lokacija, dok uvjeti nisu simultano posvuda zadovoljeni. Iterativne metode u SOLFEC-u daju dobra rješenja za mali  $\Delta t$ . Problemi sa velikim rasponom vremenskih koraka su najveća poteškoća na koju se nailazi pri rješavanju regularnih diferencijalnih jednadžbi. Zbog toga je od velike važnosti ispitati ponašanje određene metode pri velikim vremenskim koracima.

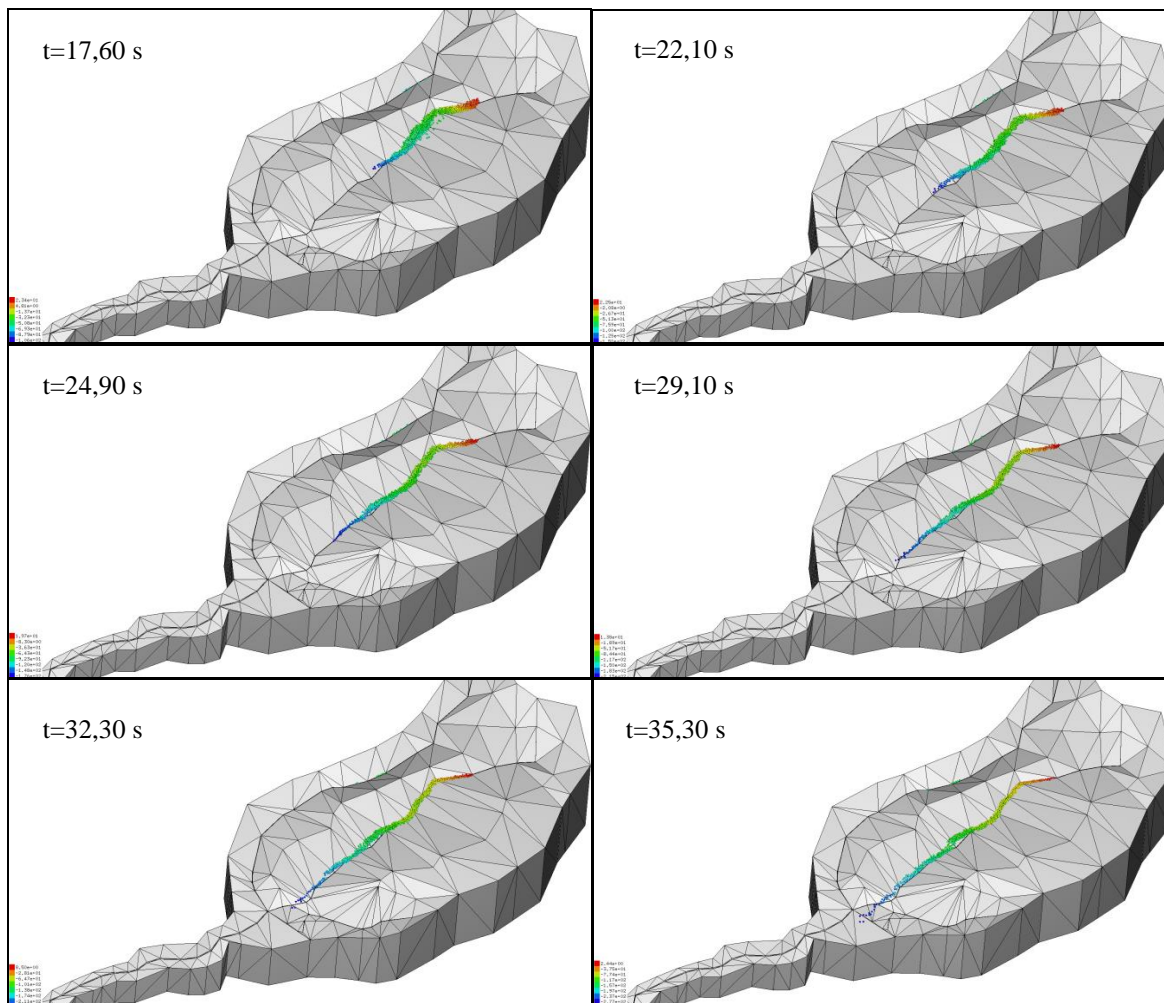
Pri radu sa SOLFEC simulacijskim programom potrebno je razmotriti i pitanje točnosti pojedinih metoda. Za mali vremenski korak moguće je koristiti Taylorov razvoj da bi se pokazalo da eksplicitna Eulerova metoda, krećući od poznatog rješenja za  $t_n$ , daje rješenje za  $t_n + \Delta t$  sa greškom proporcionalnom sa  $(\Delta t)^2$ . S obzirom da je broj koraka potreban za računanje nekog konačnog vremena  $t = t_0 + T$  obrnuto proporcionalan  $\Delta t$ , (greška se gomila pri svakom vremenskom koraku) greška će na kraju biti proporcionalna sa samim  $\Delta t$ .

Odabir integracijske metode, tj. modela aproksimacije kretanja krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala kroz vrijeme, je od velike važnosti za modele postavljene pomoću diferencijalnih jednadžbi. Najveći problem integracijskih shema je da odabirom maksimalnog vremenskog koraka vodimo računa u pogledu stabilnosti metode i točnosti izračuna. Za

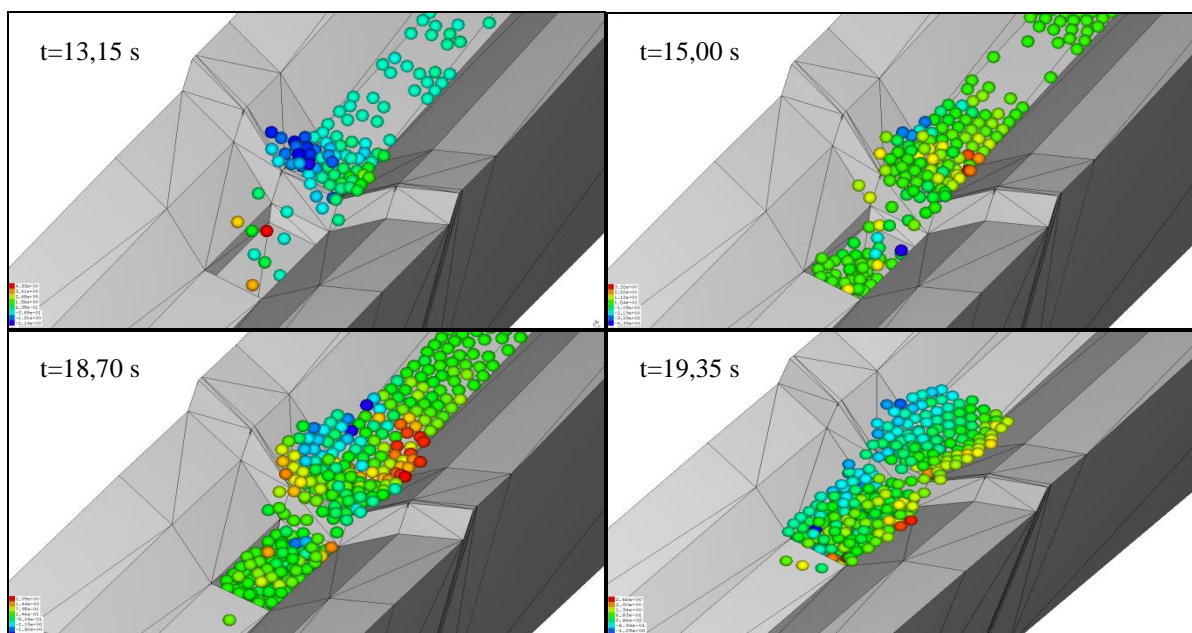
stabilnu integraciju potreban je mali vremenski korak, tako da je pogreška ograničavanja vremenskog koraka mnogo manja od pogreške ograničavanja prostora.

Za područje vodotoka Slani potok napravljeno je nekoliko numeričkih simulacija za procjenu osjetljivosti propagacije toka sitnozrnatog i krupnozrnatog materijala na promjene vrijednosti modelskih parametara. Pri tome se varirao: koeficijent trenja u opsegu 0 - 0,3 Pas, promjeri čestica od 0,005 - 0,3 m, gustoća krupnozrnatog materijala od 1800 - 2100 kg/m<sup>3</sup>, Youngov modul elastičnosti 15\*10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>, Poissonov koeficijent 0,2 - 0,25. Vremenski korak u proračunu je 0,005 s. Broj čestica koje propagiraju u tečenju se dobiva generiranjem dimenzija (širine, duljine i visine) pojedinih kliznih ploha unutar računalnog koda, te odabira promjera materijala. U nastavku su prikazane simulacije tečenja sitnozrnatog flišnog materijala unutar erozijske baze vodotoka Slani potok (Slika 4.19.), te taloženja suspendiranog nevezanog flišnog materijala na jednoj od taložnica unutar vodotoka Slani potok (Slika 4.20.). Iako je u modelima uzet relativno veliki promjer zrna materijala (formalno su to u prirodi manji kameni obluci!) valja napomenuti da su kod promatranja modela punjenja gornje i donje taložnice na samom početku uzimani relativno mali promjeri čestica, gdje se željela analizirati propagacija toka sitnozrnatog materijala sa erozijske flišne baze. Međutim, zbog velikog broja sitnozrnatih čestica broj matematičkih operacija znatno raste u kratkom vremenskom periodu (veliki broj kontaktnih točaka) za što je potrebno mnogo memorije, kao i postojanje određenog super kompjutera radi brže provedbe proračuna.

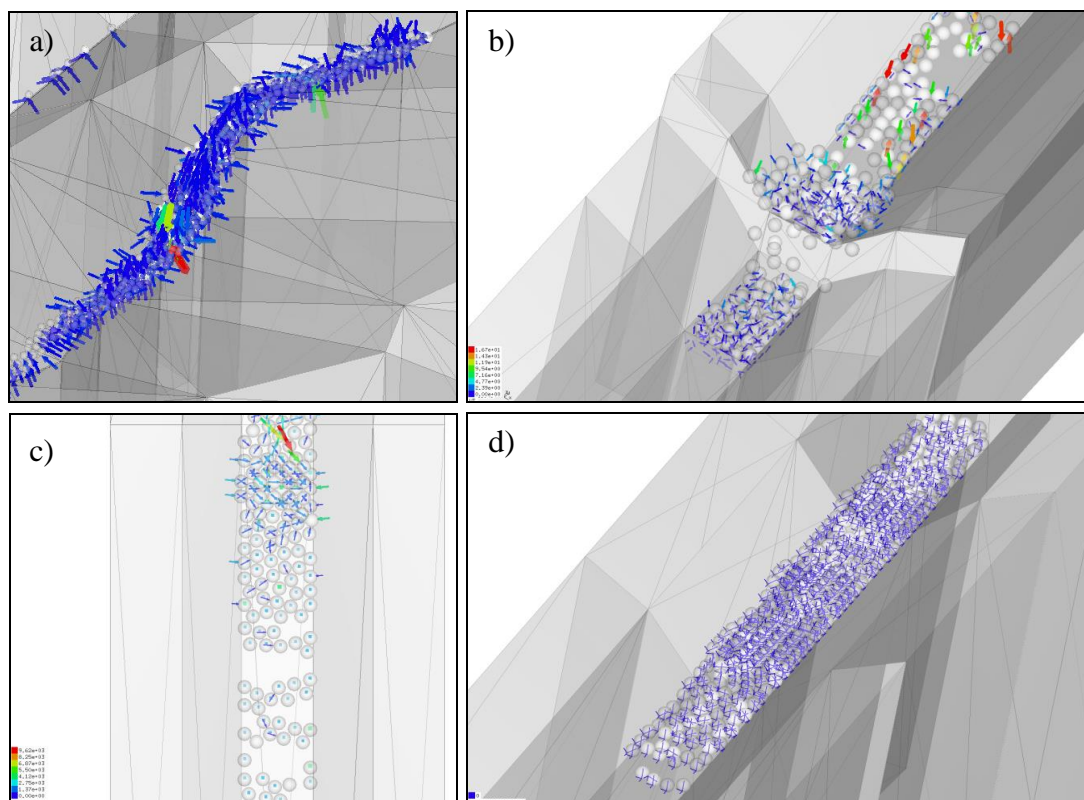
Tijekom simulacije u SOLFEC programu u svakom se trenutku mogu pregledavati dobivene fizikalne veličine: pomaci čestica u x, y i z smjeru ( $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$ ), brzine čestica  $V_x$ ,  $V_y$  i  $V_z$ , razna naprezanja u odabranom smjeru ili ravnini ( $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_z$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{xz}$ ,  $S_{yz}$ ), sile u kontaktnim točkama, reakcije čestica sa okolnim terenom, reakcije među česticama i još mnogo drugih fizikalnih parametara (Slika 4.21.). SOLFEC za svaku traženu fizikalnu veličinu može izvršiti nakon simulacije detaljan ispis podataka, izvršenih entiteta u vremenu (primjena naredbe HISTORY). Primjera radi, želi se izračunati broj suspendiranih čestica koje ulaze u gornju i donju taložnicu u ovisnosti o promjenjivom koeficijentu trenja uzetom u modelu za konstantni pad dna kanala (Slika 4.19.). Primjenom naredbe HISTORY može se dobiti točna pozicija određene suspendirane čestice (kamenog oblutka!) u vremenu na temelju jasno definiranih geometrijskih položaja gornje i donje taložnice u modelu. Na slikama 4.22. i 4.23. je grafički prikazan postotak prolaska kamenih oblutaka na gornjoj i donjoj taložnici u ovisnosti o vremenu za različite serije koeficijenta trenja.



*Slika 4.19. Simulacija tečenja suspendiranog nevezanog materijala na primjeru erozijske baze vodotoka Slani potok (Žic i sur., 2014.)*

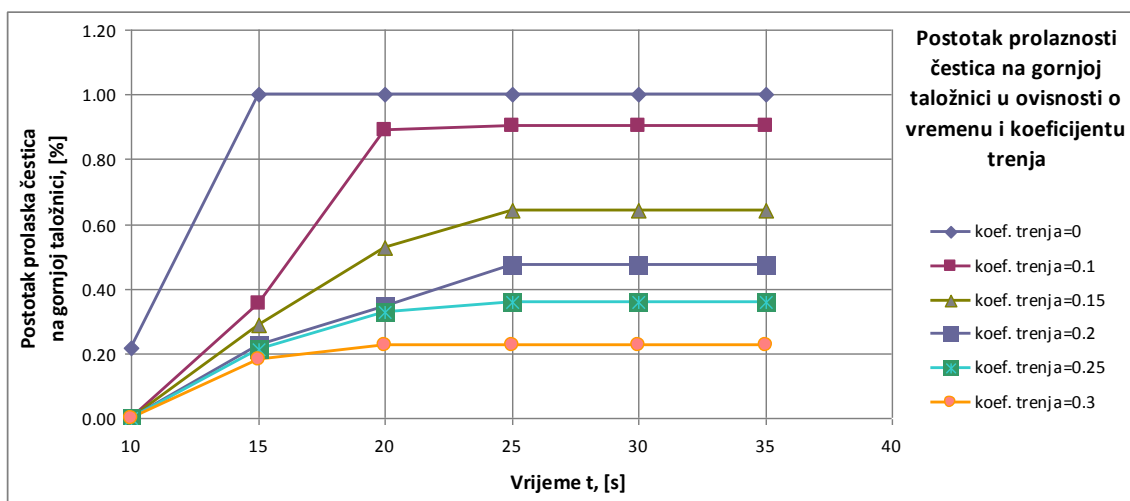


*Slika 4.20. Simulacija tečenja suspendiranog nevezanog materijala na primjeru gornje i donje taložnice unutar bujičnog vodotoka Slani potok (Žic i sur., 2014.)*



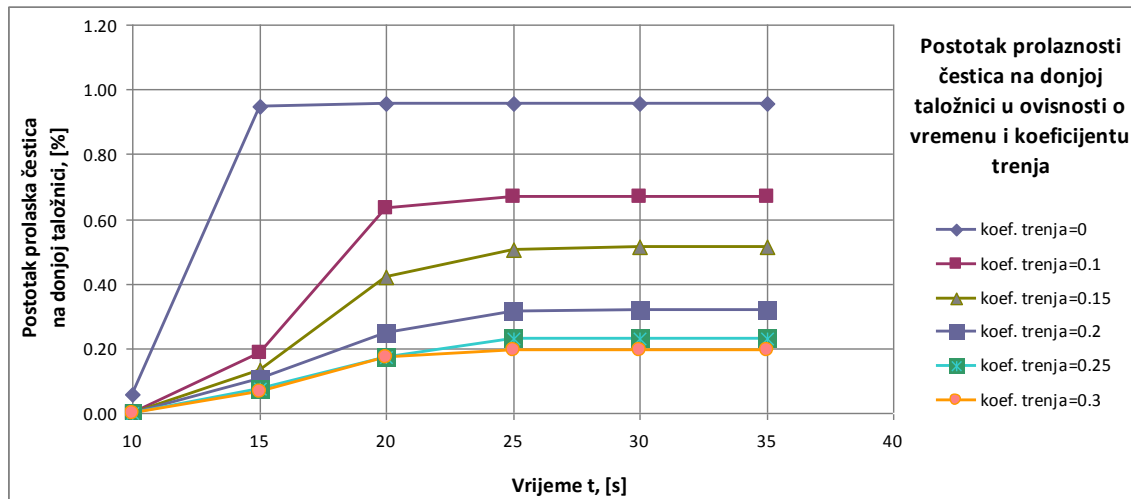
Slika 4.21. Vizualni prikazi a) kontaktnih točaka, b) kontaktnih sila, c) tangencijalnih naprezanja i brzina, te d) reznih sila unutar SOLFEC programa (Žic i sur., 2014.)

Ukupni broj ulaznih čestica	Vrijeme $t$	Koeficijent trenja	Promjer čestica	Broj čestica u gornjoj taložnici	Vrijeme $t_1$	Pad dna kanala, $I$	Vrijeme $t_2$	Gustoća čestica, $\rho$	Vremenski inkrement, $\Delta t$	Trajanje proračuna	Youngov modul elastičnosti	Poissonov koeficijent
[/]	[s]	[Pas]	[m]	[/]	[s]	[%]	[s]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[s]	[s]	[N/m <sup>2</sup> ]	[/]
328	8,415	0,00	0,3	328	14,02	2,0	9,38	1800	0,005	100	$15 \cdot 10^9$	0,25
328	10,33	0,10	0,3	296	20,22	2,0	12,04	1800	0,005	100	$15 \cdot 10^9$	0,25
328	10,48	0,15	0,3	210	25,78	2,0	11,83	1800	0,005	100	$15 \cdot 10^9$	0,25
328	10,56	0,20	0,3	155	25,1	2,0	11,17	1800	0,005	100	$15 \cdot 10^9$	0,25
328	10,78	0,25	0,3	118	22,34	2,0	12,49	1800	0,005	100	$15 \cdot 10^9$	0,25
328	10,83	0,30	0,3	74	22,83	2,0	12,83	1800	0,005	100	$15 \cdot 10^9$	0,25



Slika 4.22. Postotak prolaska suspendiranih čestica (kamenih oblutaka) na gornjoj taložnici u ovisnosti o vremenu i koeficijentu trenja;  $t$  - vrijeme kada je prvi put suspendirana čestica ušla u gornju taložnicu,  $t_1$  - proteklo vrijeme prikupljanja čestica u gornjoj taložnici,  $t_2$  - proteklo vrijeme do prvog ulaska čestice u donju taložnicu (Žic i sur., 2014.)

Ukupni broj dolaznih čestica	Vrijeme $t_2$	Koeficijent trenja	Promjer čestica	Broj čestica u donjoj taložnici	Vrijeme $t_3$	Pad dna kanala, $I$	Vrijeme $t_4$	Gustoća čestica, $\rho$	Vremenski inkrement, $\Delta t$	Trajanje proračuna	Youngov modul elastičnosti	Poissonov koeficijent
[/]	[s]	[Pas]	[m]	[/]	[s]	[%]	[s]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[s]	[s]	[N/m <sup>2</sup> ]	[/]
328	9,38	0,00	0,3	313	15,94	2,0	10,25	1800	0,005	100	15*10 <sup>9</sup>	0,25
328	12,04	0,10	0,3	219	22,24	2,0	14,995	1800	0,005	100	15*10 <sup>9</sup>	0,25
328	11,83	0,15	0,3	169	30,38	2,0	-	1800	0,005	100	15*10 <sup>9</sup>	0,25
328	11,17	0,20	0,3	104	25,30	2,0	-	1800	0,005	100	15*10 <sup>9</sup>	0,25
328	12,50	0,25	0,3	75	24,40	2,0	-	1800	0,005	100	15*10 <sup>9</sup>	0,25
328	12,83	0,30	0,3	64	24,21	2,0	-	1800	0,005	100	15*10 <sup>9</sup>	0,25



**Slika 4.23.** Postotak prolaska suspendiranih čestica (kamenih oblutaka) na donjoj taložnici u ovisnosti o vremenu i koeficijentu trenja;  $t_2$  - proteklo vrijeme do prvog ulaska čestice u donju taložnicu,  $t_3$  - proteklo vrijeme za prikupljanje čestica u donjoj taložnici,  $t_4$  - proteklo vrijeme do izlaska prve čestice iz donje taložnice (Žic i sur., 2014.)

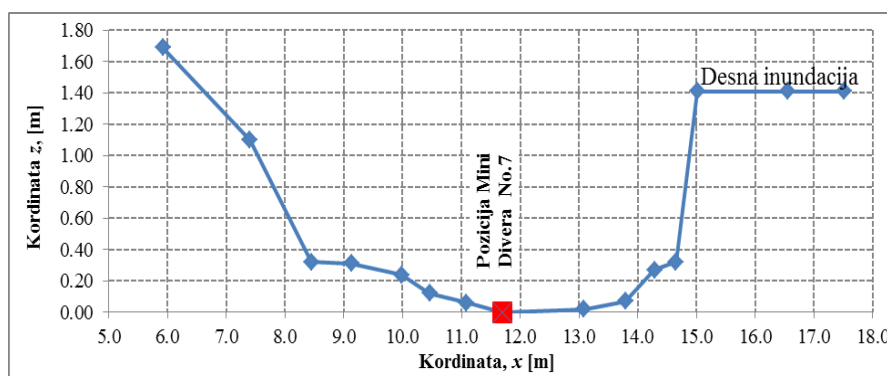
#### 4.4.2.1. Verifikacija numeričkog modela

Na temelju hidrauličke analize provedene na bujičnom vodotoku Slani potok izvršena je verifikacija numeričkog modela propagacije toka izrađenom računskim kodom u SOLFEC programu. Ulazni parametri u numeričkom modelu odgovaraju vrijednostima sa slika 4.22. i 4.23. Numerički model je verificiran sa koeficijentom trenja od 0,2 Pas. Hidraulička analiza na vodotoku Slani potok provedena je na temelju hidroloških podataka o intenzitetu oborina na danom području, točnije za izmjereni vršni intenzitet oborina koji je nastupio u periodu od 01.-02. studenog 2012. Na temelju predhodno izmjenjenog nagiba dna kanala ( $I_{kanala}=1,67\%$ ), poprečnog profila ispred gornje taložnice u ovisnosti o razini vode u kanalu ( $A-h$ ), te usvojenog koeficijenta hrapavosti za dani kanal ( $n=0,04\text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ; uzeta vrijednost za kanal koji ima obložene pokose gustom puzavom travom i mjestimičnim gmljem, predhodno ohrapavljenih dnom kanala sa mjestimičnim velikim kamenim oblucima, slabo održavani kanali/bujice) određena je konsumpcijska (protočna) krivulja, odnosno varijacija protoka u kanalu  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] u ovisnosti o razini vode  $h$  [m] (Slika 4.24. i 4.25., Tablica 4.10.). Vrijednosti razine vode tijekom provedenog pokusa osiguravao je postavljeni Mini Diver instrument (MD No.7) postavljen 2 m uzvodnije od početka gornje taložnice kako pojava linije depresije u kanalu ne bi utjecala na točnost izračuna protoka (Slika 4.25.).





**Slika 4.24.** Pogled na vodotok Slani potok: a) uzvodno od gornje taložnice, b) nizvodno od donje taložnice (Foto: Elvis Žic)

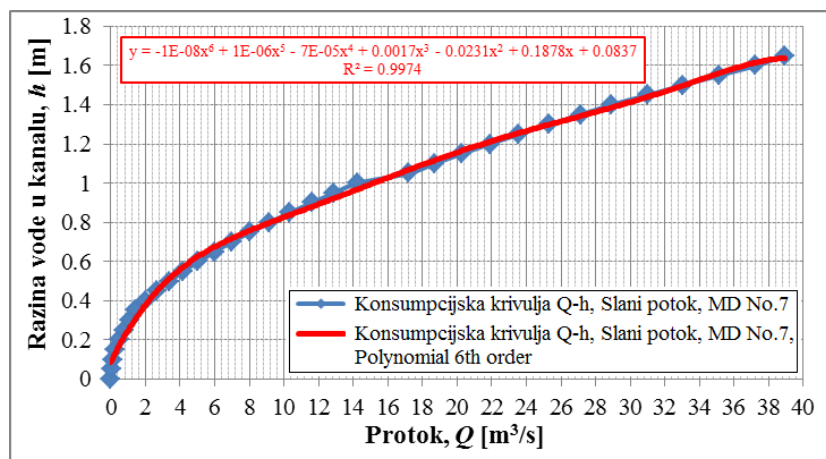


**Slika 4.25.** Poprečni profil vodotoka Slani potok, neposredno uzvodno od gornje taložnice (mjereno na stacionaži MD No.7) (Žic i sur., 2014.)

Protočna krivulja, zajedno sa ulaznim geometrijskim i kinematičkim parametrima poslužila je za opis toka krupnozrnatog materijala provedenog u SOLFEC programu (Slika 4.26.). Sam izračun određivanja mjerodavnog broja kamenih oblutaka koji prolaze gornjom i donjom taložnicom unutar vodotoka kroz određeni vremenski period vršeno je vizualnom predodžbom na licu mjesta pomoću visokofrekventne video kamere marke Canon EOS Kiss X4. Radi dodatne sigurnosti i kontrole provedena su i tri dodatna mjerenja u istom vremenskom periodu na način da je troje ljudi zasebno brojalo kamene oblutke koji su punili gornju i donju taložnicu (Slika 4.27.). Ukupno odstupanje na izmjenjenim podacima troje individualnih mjeritelja dobiveno na temelju srednjeg izračunatih podataka u brojanju kamenih oblutaka iznosilo je 13% (za prvu (gornju)) i 9 % (za drugu (donju)) taložnicu u odnosu na izmjerene vrijednosti dobivene visokofrekventnom kamerom. Dakako, uzete su izmjerene vrijednosti prolaska kamenih oblutaka snimljenih sa video kamerom koja omogućuje usporeni snimak video zapisa do 1/100 sekunde. Analiza i izračun su provedeni pomoću Adobe Photoshop CS6 64-bitnog programa.

**Tablica 4.10.** Konsumpcijska (protočna) krivulja na poprečnom profilu vodotoka Slani potok (MD No.7) neposredno uzvodno od gornje taložnice (Žic i sur., 2014.)

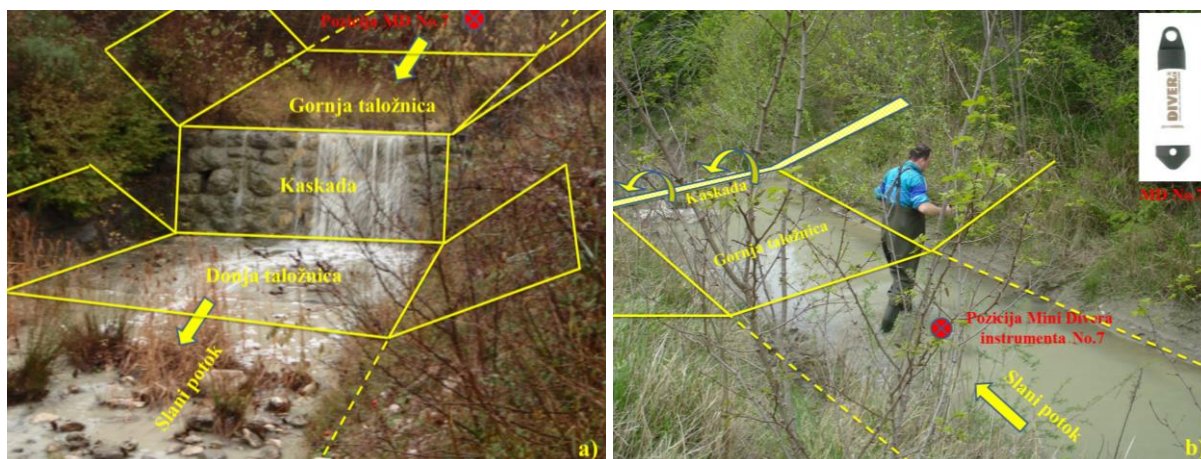
	Visina, z [m]	Površina, A [m <sup>2</sup> ]	Površinska širina vodotoka, B [m]	Omoč. opseg, O [m]	Hidraulički radijus, R [m]	Manningov koeficijent hrapavosti, n [m <sup>-1/3</sup> s]	Chezyev koeficijent, C [m <sup>1/2</sup> /s]	Pad dna kanala, I [‰]	Brzina vode, v [m/s]	Protok, Q [m <sup>3</sup> /s]
1	0,05	0,062	2,16	2,16	0,028	0,04	13,82	0,01677	0,30	0,019
2	0,10	0,197	3,05	3,065	0,064	0,04	15,82	0,01677	0,52	0,102
3	0,15	0,362	3,50	3,534	0,102	0,04	17,10	0,01677	0,71	0,257
4	0,20	0,546	3,85	3,906	0,140	0,04	18,01	0,01677	0,87	0,476
5	0,25	0,749	4,22	4,291	0,174	0,04	18,69	0,01677	1,01	0,756
6	0,30	0,972	4,82	4,903	0,198	0,04	19,09	0,01677	1,10	1,070
7	0,35	1,253	5,96	6,059	0,207	0,04	19,22	0,01677	1,13	1,418
8	0,40	1,554	6,07	6,216	0,250	0,04	19,84	0,01677	1,29	1,996
9	0,45	1,860	6,19	6,363	0,292	0,04	20,37	0,01677	1,43	2,653
10	0,50	2,179	6,30	6,52	0,334	0,04	20,83	0,01677	1,56	3,398
11	0,55	2,490	6,42	6,667	0,374	0,04	21,22	0,01677	1,68	4,181
12	0,60	2,814	6,53	6,825	0,412	0,04	21,57	0,01677	1,79	5,047
13	0,65	3,143	6,64	6,982	0,450	0,04	21,89	0,01677	1,90	5,978
14	0,70	3,478	6,76	7,129	0,488	0,04	22,18	0,01677	2,00	6,980
15	0,75	3,819	6,87	7,286	0,524	0,04	22,45	0,01677	2,11	8,038
16	0,80	4,166	6,99	7,433	0,560	0,04	22,70	0,01677	2,20	9,167
17	0,85	4,518	7,10	7,59	0,595	0,04	22,93	0,01677	2,29	10,350
18	0,90	4,876	7,22	7,737	0,630	0,04	23,15	0,01677	2,38	11,602
19	0,95	5,239	7,33	7,894	0,664	0,04	23,35	0,01677	2,46	12,906
20	1,00	5,609	7,44	8,051	0,697	0,04	23,54	0,01677	2,54	14,269
21	1,05	6,364	7,67	8,356	0,762	0,04	23,89	0,01677	2,70	17,185
22	1,10	6,752	7,83	8,544	0,790	0,04	24,04	0,01677	2,77	18,685
23	1,15	7,148	7,99	8,732	0,819	0,04	24,18	0,01677	2,83	20,249
24	1,20	7,551	8,15	8,92	0,847	0,04	24,32	0,01677	2,90	21,876
25	1,25	7,963	8,31	9,109	0,874	0,04	24,45	0,01677	2,96	23,568
26	1,30	8,382	8,47	9,297	0,902	0,04	24,57	0,01677	3,02	25,327
27	1,35	8,810	8,63	9,485	0,929	0,04	24,69	0,01677	3,08	27,150
28	1,40	9,247	8,73	9,739	0,949	0,04	24,78	0,01677	3,13	28,920
29	1,45	9,696	8,96	9,864	0,983	0,04	24,93	0,01677	3,20	31,031
30	1,50	10,14	9,12	10,04	1,010	0,04	25,04	0,01677	3,26	33,046
31	1,55	10,609	9,28	10,254	1,035	0,04	25,14	0,01677	3,31	35,133
32	1,60	11,066	9,45	10,438	1,060	0,04	25,24	0,01677	3,37	37,250
33	1,65	11,544	9,89	10,869	1,062	0,04	25,25	0,01677	3,37	38,904
34	1,70	11,981	11,13	12,168	0,985	0,04	24,94	0,01677	3,20	38,388

**Slika 4.26.** Protočna krivulja na poziciji Mini Diver instrumenta (MD No.7), neposredno iznad gornje taložnice, vodotok Slani potok (Žic i sur., 2014.)

U tablici 4.11. i na slici 4.28. prikazana je usporedba između podataka dobivenih numeričkim modelom i izmjerenih podataka na vodotoku, te postotak odstupanja danih vrijednosti nakon



određenog vremenskog perioda. Iz proizašle usporedbe može se konstatirati da izrađeni numerički model (time i računalni kod) u SOLFEC programu vrlo dobro opisuje tok krupnozrnatog materijala, odnosno punjenje gornje i donje taložnice kamenim oblucima (Tablica 4.11.).



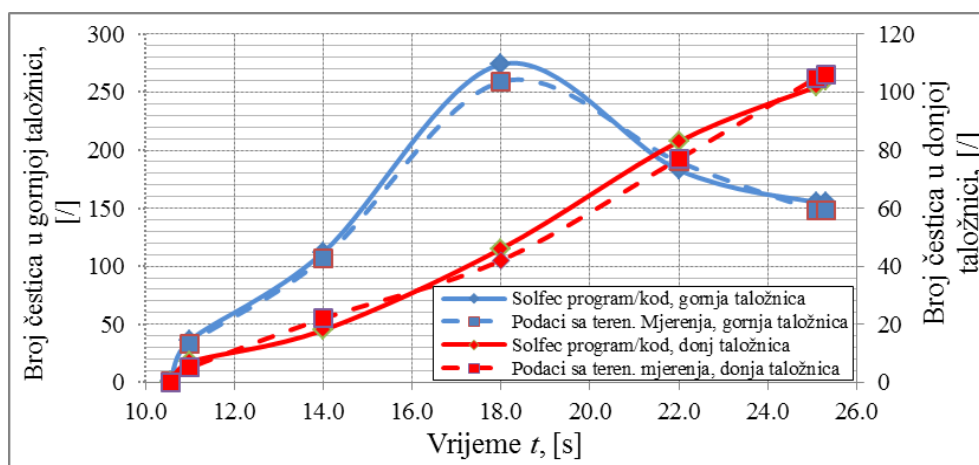
**Slika 4.27.** Mjerenje prolaznosti kamenih oblutaka na bujičnom vodotoku Slani potok: a) prikaz dispozicije gornje i donje taložnice, b) prikaz dispozicije Mini Diver instrumenta (MD No.7) uzvodno od gornje taložnice (Foto: Elvis Žic)

**Tablica 4.11.** Verifikacija numeričkog modela izrađenog u SOLFEC programu. Usporedba proračunatih (SOLFEC program) i izmjerenih (terensko mjerenje) vrijednosti broja prolaznih kamenih oblutaka na primjeru gornje i donje taložnice na bujičnom vodotoku Slani potok, Sliv Dubračine, Vinodolska dolina (Žic i sur., 2014.)

Promjer čestica	Gustoća čestica, $\rho$	Koefficient trenja	Ukupni broj dolaznih čestica	Vrijeme $t$	PRIMJENA SOLFEC PROGRAMA		TERENSKO MJERENJE		POSTOTAK ODSTUPANJA	
					Broj čestica u gornjoj taložnici	Broj čestica u donjoj taložnici	Broj čestica u gornjoj taložnici	Broj čestica u donjoj taložnici	Gornja taložnica	Donja taložnica
[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Pas]	[/]	[s]	[/]	[/]	[/]	[/]	[%]	[%]
0,3	1800	0,20	328	10,56	1	0	1	0	0,00	0,00
0,3	1800	0,20	328	11	36	7	33	5	9,09	40,00
0,3	1800	0,20	328	14	112	18	107	22	4,67	-18,18
0,3	1800	0,20	328	18	274	46	259	42	5,79	9,52
0,3	1800	0,20	328	22	183	83	190	77	-3,68	7,79
0,3	1800	0,20	328	25,1	155	102	148	105	4,73	-2,86
0,3	1800	0,20	328	25,3	155	104	148	106	4,73	-1,89

Prikazani numerički model u SOLFEC programu se može kvalitativno upotrijebiti za primjenu i na drugim sličnim vodotocima, bujicama, rijekama ili umjetno sagrađenim (prizmatskim) kanalima. Također se danim numeričkim modelom može promatrati i propagacija toka sitnozrnatog i piroklastičnog „lahar“ materijala (materijala vulkanskog podrijetla), ali je pritom trajanje numeričke simulacije znatno duže zbog većeg broja operacija

koje se vrše u SOLFEC simulacijskom programu (izuzetno veliki broj čestica sitnozrnatog materijala koje se međusobno sudaraju i vrše trenje u doticaju sa kanalskim dnom).



**Slika 4.28.** Grafička usporedba (verifikacija) proračunatih (SOLFEC program) i izmjerenih (terensko mjerenje) vrijednosti broja prolaznih kamenih oblutaka u ovisnosti o vremenu (Žic i sur., 2014.)

Primjenom SOLFEC simulacijskog programa mogu se provoditi simulacijske analize tečenja krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Time je omogućena dobra procjena ulaznih parametara koji definiraju nastanak i pokretanje takvih tipova tečenja na određenom području. Program ujedno daje kvantificirane vrijednosti svih ulaznih parametara i izlaznih vrijednosti koji su nužno potrebni za kalibraciju i verifikaciju numeričkog modela. Znanstveni doprinos SOLFEC simulacijskog programa je proširenje saznanja i bolje razumijevanje fizike procesa propagacije krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, kao i mogućnost dobivanja grube procjene (analize) hazarda i rizika uzrokovanih mogućim pojavama takvim tipovima tečenja na određenom području. Primjenom Python programskog jezika može se postići implementiranje erozijskih zakona unutar računskog koda u SOLFEC programu čime bi se u budućnosti mogle bolje sagledavati pojave propagacije nevezanog stijenskog materijala po određenoj konfiguraciji terena. U tom pogledu bio bi izuzetno značajan njegov doprinos za potrebe održivog razvoja na širem ispitivanom području bujičnog vodotoka Slani potok. Kao takav, SOLFEC simulacijski program bi mogao u budućnosti omogućiti izradu smjernica za buduće geozoniranje flišnih područja.

#### 4.4.3. Primjena SPH simulacijskog programa

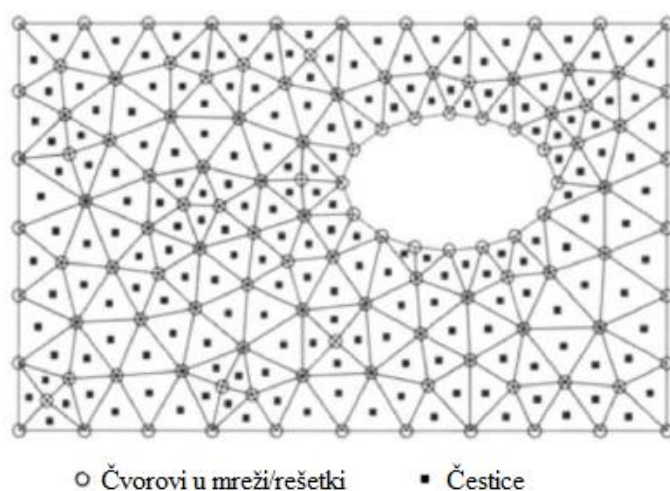
SPH metoda (eng. *Smoothed Particle Hydrodynamics Method*) predstavlja jednu od važnih grupa metoda tzv. nelokalnih metoda aproksimacije fizikalnih polja, koja se često koristi za procjenu propagacije toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, tečenje stijenske

mase nastale klizanjem, te tečenje suho-zrnatih materijala (Jakob, 2005a). Istraživački simulacijski programski paket SPH 2D koji koristi formulaciju i numerički model, gdje je dimenzija jednadžbi problema smanjena zbog dodatne pretpostavke usrednjavanja i integracije po dubini, kreiran je 2005. godine, a njegov autor je Manuel Pastor iz Madrida. Program je pisan u programskom jeziku Fortran 90, dostupan kao open-source program (Pastor i sur., 2007., 2009.). Primjenom numeričkog modela izrađenog SPH metodom može se predvidjeti doseg udaljenosti toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, brzine toka, širina deponiranog materijala (tzv. lepeza taloženja), kao i konačni volumen deponiranog materijala i površina zahvaćena takvom pojavom tečenja. Simulacija se temelji na matematičkom, reološkom i numeričkom modelu. Temelj matematičkog modela je povezivanje integracije po dubini uz korištenje tzv. „ $U-p_w$ “ formulacije (brzina – porni tlak) prema Biot-Zienkiewicz jednadžbi. Reološki zakoni odgovaraju konstitutivnim jednadžbama, a odnose se na tenzor napreznja i deformacija. Zakon trenja i Voellmyev zakon se upotrebljavaju za simuliranje toka nevezanog stijenskog materijala (Liu i Liu, 2003.). SPH 2D integrirani model je provjeren korištenjem analitičkih postupaka i povratne metode. Unutar simulacijskog paketa SPH 2D implementiran je Hungrov i Egashirin erozijski zakon za modeliranje erozijskih procesa uzduž propagacije toka (Egashira i sur., 2001.; Hungr, 1990a, 1995.).

Većina numeričkih modela za opis propagacije toka krupnozrnatog materijala se bazira na heterogenom i višefaznom kretanju mase kao jednofaznog kontinuuma. Formulacija SPH 2D modela pretpostavlja postojanje dvije faze, granuliranog kostura sa šupljinama ispunjenim bilo vodom ili blatom. Ukoliko se zanemari posmični otpor faze fluida, tenzor napreznja u smjesi se može rastaviti na "porni tlak" i tzv. efektivno napreznje, te se mehaničko ponašanje smjese može opisati sustavom diferencijalnih jednadžbi koje kontroliraju dinamiku svake od faza, kao i spojnice među njima. Nakon što se zadaju početni i rubni uvjeti, prostornu i vremensku integraciju sustava diferencijalnih jednadžbi je moguće izvesti s numeričkim metodama.

U SPH metodi, stanje sustava predstavlja skup čestica, koja posjeduju pojedina svojstva materijala čije se ponašanje može opisati jednadžbama očuvanja količine gibanja i mase. Od samog kreiranja SPH metode za rješavanje trodimenzionalnih problema u astrofizici u beskonačnom prostoru (Lucy, 1977.; Gingold i Monaghan, 1977.), SPH metoda je opsežno istraživana i proširena na dinamički odziv mehaničkih sistema deformabilnih tijela, kao i dinamička tečenja fluida sa velikim deformacijama.

SPH metoda, odnosno „metoda hidrodinamike glatkih čestica“, kao bezmrežna Lagrangeova metoda, predstavljena kao metoda čestica, ima svoje određene karakteristike. Ona ima posebne prednosti u odnosu na tradicionalne numeričke metode na bazi mreža. Prilagodljivost SPH metode se postiže aproksimacijom polja varijabli koja se obavlja za svaki korak na temelju trenutnog lokalnog skupa proizvoljno distribuiranih čestica (Slika 4.29.). Aproksimacije u SPH metodi ne zahtijevu unaprijed definirane mreže za povezivanje čestica u procesu računanja. Priroda takve bezmrežne metode je vrlo atraktivna za probleme u kojima tradicionalno metoda konačnih elemenata (MKE) ili metoda konačnih razlika (MKR) nailaze na poteškoće. Dodatna značajka SPH metode je povoljna kombinacija Lagrangeove formulacije u jednadžbama gibanja i aproksimacije čestica. Za razliku od bezmrežnih čvorova u drugim bezmrežnim metodama koje se koriste samo kao interpolacijske točke, čestice u SPH metodi također nose svojstva materijala, a mogu se pomicati pod djelovanjem unutarnjih i vanjskih sila.



**Slika 4.29.** Početno generiranje čestica za kontinuum pomoću trokutaste mreže u 2D prostoru (Liu i Liu, 2003.)

Originalno je SPH metoda razvijena za rješavanje problema u području Hidrodinamike koji se zasnivaju na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama (PDJ) polja varijabli, kao što su gustoća, brzina, energija, itd. Dobivanje analitičkih rješenja za takav skup parcijalnih diferencijalnih jednadžbi obično nije moguće, osim za pojedine jednostavne slučajeve. Potrebno je osigurati aproksimaciju za vrijednosti funkcije polja i njihove derivacije u bilo kojem vremenskom trenutku. Funkcija aproksimacija se tada primjenjuje na PDJ za kreiranje skupa običnih diferencijalnih jednadžbi (ODJ) u diskretiziranom obliku s obzirom na vrijeme. Ovaj skup diskretiziranih ODJ se potom može riješiti pomoću jedne od standardnih

integracijskih postupaka. Kako bi se postigle gore navedene zadaće potrebno je u SPH metodi voditi računa o sljedećim koracima:

1. problem domene predstavlja skup distribuiranih proizvoljno odabranih čestica (Bezmrežna diskretizacija točaka). Pri aproksimaciji polja u SPH metodi se koristi tzv. „kernel“ funkcija
2. kernel aproksimacija se zatim provodi zamjenom integracije u integralnu zastupljenost u polju funkcije i njezinih derivacija sa sumacijom nad svim odgovarajućim vrijednostima na susjedne čestice u lokalnom području. (tzv. *Compact Support* ili kompaktna podrška)
3. aproksimacija čestica se vrši na svakom koraku, a time i korištenje čestice ovisi o trenutnoj lokalnoj distribuciji čestica. (Adaptacija)
4. aproksimacijom čestica se obavljaju svi uvjeti vezani za polje funkcija u PDJ za kreiranje skupa ODJ u diskretiziranom obliku s obzirom na vrijeme. (Lagrangeova metoda)
5. ODJ su rješene pomoću eksplicitnog integracijskog algoritma kako bi se postiglo brzo vremensko koračanje za dobivanje svih polja fizikalnih veličina u prošlom vremenu. (Dinamika).

Točka 1. određuje prirodu bezmrežne SPH metode. Ključni problem je osigurati stabilnost numeričkih rješenja, posebno kod nepravilnih čvorova ili čestica u kompaktno podržavanoj domeni koje se koriste za probleme sa tzv. Neumannovim rubnim uvjetima (Liu i Gu, 2002.). Točka 2. matematički osigurava potrebnu stabilnost SPH metode, kako bi integralna reprezentacija osigurala glatkoću polja. Takozvana „Slaba formulacija“ rezultira obično vrlo stabilnim postupkom. Prilagodljivost SPH metode se postiže izvođenjem točke 3. u svakom vremenskom koraku gdje se čestice proizvoljno distribuiraju u trenutnom području. Formulacija SPH metode ne ovisi na arbitrarnost raspodjele čestica koje se mijenja s vremenom. Da bi se osigurala dovoljna točnost integracije, a time i numeričke stabilnosti, potrebno je koristiti dovoljan skup čestica. Čestice su dodijeljene masi nakon aproksimacija čestica, što znači da su one zapravo fizički materijalne čestice. Korištenje Lagrangeova opisa gibanja čestica u točki 4. samo je jedan od mogućih načina primjene u SPH metodi. U točki 5. je prikazan konvencionalni način vremenske integracije korak po korak za rješavanje dinamičkog problema, gdje je bitno koristiti veličinu vremenskog koraka koji osigurava numeričku stabilnost. Kombinacija ovih 5 strategijskih točaka čini SPH metodu bezmrežnom, adaptivnom i stabilnom.

U posljednjih nekoliko desetljeća razvijena je nova skupina metoda koje su karakteristične po tome što ne koriste mreže za diskretizaciju domene ("meshless" metode), već samo čvorove (Liu, 2002a). Kao primjere tih metoda, vrijedna je spomena Metoda difuznog elementa (eng. *Diffuse Element Method, DEM*) koju su uveli Nayroles i sur., (1992.), Galerkinova metoda slobodnih elemenata (eng. *Element Free Galerkin Method, EFG*) koju su razvili Belytschko i sur., (1994.), HP-oblak metoda (eng. *The HP-cloud method*) koju su osmislili Duarte i Oden (1996.), Metoda jedinične podijele (eng. *The Partition of Unity Method, PUM*) koju su uveli Babuska i Melenk (1995.), Metoda konačne točke (eng. *the Finite Point Method, FPM*) autora Onate i Iddlesohn (1998.) i, na kraju, SPH metoda. SPH metoda i njezine različite varijante su glavni tipovi metoda čestica, te su uključene u mnoge komercijalne kodove (Liu i Liu, 2003.). U praktičnim primjenama, bezmrežna metoda može biti povezana s drugim bezmrežnim metodama ili konvencionalnim numeričkim metodama uzevši punu prednost svake metode (Attaway i sur., 1994.; Johnson, 1994.; Gu i Liu, 2001.). Neka vrlo dobra mišljenja i kritike o bezmrežnoj metodi i metodi čestica može se naći u radu Belytschko i sur. (1996.), te Li i Liu (2002.). SPH metoda se trenutno primjenjuje na problemima makroskopskog kontinuuma računalne mehanike fluida i mehanike čvrstih tijela (Nitsche i Zhang, 2002.; Liu i sur., 2002b).

#### **4.4.3.1. Matematički, reološki i numerički model u SPH 2D**

U nastavku slijedi opis modela i formulacija koji su uključeni u SPH 2D simulacijski okvir, koji se bazira na teoretskim izlaganjima iz raznih radova M. Pastora i Blanca (Pastor i sur., 2007., 2008., 2009., 2015.; Blanc, 2008., 2011.).

##### **4.4.3.1.1. Matematički model**

Tla su geomaterijali sa porama, koja se mogu ispuniti vodom, zrakom i drugim tekućinama. Oni su, dakle, višefazni materijali, izloženi zajedničkom mehaničkom ponašanju. Porni tlak tekućine koja ispunjava pore, igra temeljnu ulogu u ponašanju tih materijala. Kad se tlo smatra smjesom, jednadžba kontinuiteta i jednadžba ravnoteže momenta, te konstitutivne jednadžbe se mogu formulirati za svaku fazu. Prvi takav model koji opisuje vezu između čvrste faze i tekućine je predložio Biot (1941.) za linearno elastične materijale. Ovaj početni model je proširen daljnjim razvojem na fakultetu u Swanseau (UK), gdje je profesor Zienkiewicz sa suradnicima model proširio na teoriju nelinearnih materijala i problem velikih deformacija.



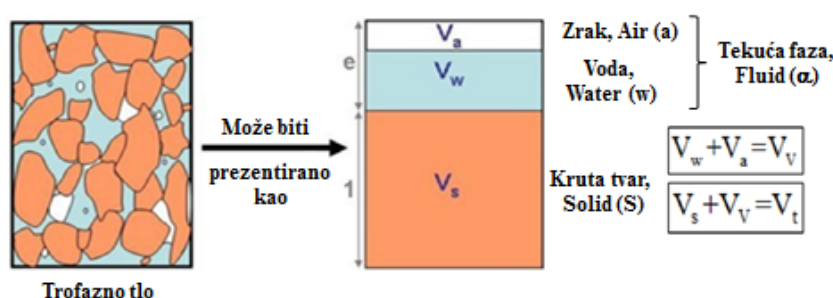
Tla su heterogeni materijali koji su uglavnom mješavina čvrstih čestica suprotstavljenih u međuprostoru tekućine (voda i zrak), koja ispunjava pore. Poroznost ( $n$ ) predstavlja dio šupljina u smjesi, tj. omjer između volumena šupljina ( $V_v$ ) i ukupnog volumena ( $V_t$ ):

$$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_v}{V_v + V_s} \quad (4-19)$$

gdje je  $V_s$  volumen koji zauzima čvrstu fazu. Iz ove definicije mogu se definirati sljedeći odnosi (Slika 4.30.):

$$V_s = (1-n)V_t \quad (4-20)$$

$$V_v = V_a + V_w = nV_t \quad (4-21)$$



**Slika 4.30.** Skica reprezentativnog uzorka tla

Šupljina može biti ispunjena zrakom (a-air), vodom (w-water) ili oboje. Pretpostavljajući da se faze fluida ( $\alpha$ ) ne miješaju, stupanj zasićenosti ( $S_\alpha$ ) se može tada definirati za svaku fazu tekućine  $\alpha$  kao kvocijent između volumena šupljina omočenih tekućinom i ukupnog volumena pora:

$$S_\alpha = \frac{V_\alpha}{V_v} \quad (4-22)$$

U slučaju da tekućina ima i zrak i vodu, najčešći slučaj, udjeli vode i zraka u porama mogu biti izraženi kao:

$$S_w = \frac{V_w}{V_v}; \quad S_a = \frac{V_a}{V_v} \quad (4-23)$$

odnosno vrijedi

$$S_w + S_a = 1 \quad (4-24)$$

Prema stupnju zasićenja smjese, mogu se razlikovati različite vrste tla:

- zasićeno (saturirano) tlo kada je  $S_a = 0$  i  $S_w = 1$ , tj. šupljine su ispunjene samo vodom,
- suho tlo kada je  $S_a = 1$  i  $S_w = 0$ , te
- poluzasićeno tlo kada je  $0 < S_w < 1$ , tj. međuprostor zauzima voda i zrak.

Gustoća,  $\rho^{(\alpha)}$ , tekuće faze ( $\alpha$ ) je definirana kao kvocijent mase volumena u fazi. Ako  $\rho_\alpha$  smatramo gustoćom fluida ove faze, gustoća se određuje na sljedeći način:

$$\rho^{(\alpha)} = nS_\alpha \rho_\alpha \quad (4-25)$$

Gustoća zraka ( $\rho_a$ ) uvelike ovisi o tlaku. Gustoća vode je gotovo konstantna i iznosi  $\rho_w=1000$  kg/m<sup>3</sup>. Za čvrstu fazu, gustoća  $\rho^{(s)}$  se računa po izrazu:

$$\rho^{(s)} = (1-n)\rho_s \quad (4-26)$$

Gustoća čvrstih čestica ( $\rho_s$ ) je konstanta i uzimamo je sa vrijednosti od približno 2650 kg/m<sup>3</sup>. Relativna Darcyeva brzina ( $\omega^\alpha$ ), koja predstavlja brzinu tekuće faze u pogledu brzine čvrste faze, povezuje brzinu tekuće faze ( $v^\alpha$ ) s brzinom čvrste faze ( $v^s$ ), a formulira se na sljedeći način:

$$\omega^\alpha = nS_\alpha (v^\alpha - v^s) \quad (4-27)$$

Darcyeva brzina se može formulirati kao:

$$\omega^\alpha = nS_\alpha \omega_\alpha \quad (4-28)$$

Iz relacije (4-27), brzina tekuće faze se može prikazati kao funkcija brzine čvrste faze:

$$v^\alpha = \frac{\omega^\alpha}{nS_\alpha} + v^s \quad (4-29)$$

Ukupno Cauchyovo naprezanje,  $\sigma$ , koje djeluje na smjesu može se rastaviti u:

$$\sigma = \sigma^{(s)} + \sum_{\alpha=1}^{nfaza} \sigma^{(\alpha)} \quad (4-30)$$

pri čemu su  $\sigma^{(s)}$  parcijalno naprezanje čvrste faze, dok je  $\sigma^{(\alpha)}$  parcijalno naprezanje tekuće porne faze. Takva parcijalna naprezanja,  $\sigma^{(s)}$  i  $\sigma^{(\alpha)}$  mogu biti definirana kao:

$$\sigma^{(s)} = (1-n)\sigma_s \quad (4-31)$$

i

$$\sigma^{(\alpha)} = nS_\alpha \sigma_\alpha \quad (4-32)$$

Istovremeno, parcijalno naprezanje  $\sigma^{(\alpha)}$ , se može rastaviti na hidrostatsku i devijatorsku komponentu:

$$\sigma^{(\alpha)} = -nS_\alpha p_\alpha I + nS_\alpha s_\alpha \quad (4-33)$$

gdje pojedini elementi predstavljaju  $s_\alpha = dev(\sigma_\alpha)$  devijatorsku komponentu,  $I$  je jedinični tenzor drugog reda, a  $p_\alpha$  tlak tekuće faze  $\alpha$  (Pastor i sur., 2007.). U slučaju da je međuprostorna tekućina samo voda, devijatorska komponenta se može zanemariti, te stoga parcijalno naprezanje poprima oblik:

$$\sigma^{(w)} = -nS_w p_w I \quad (4-34)$$

Prosječan pritisak,  $\bar{p}$ , tekuće faze može biti predstavljen kao:

$$\bar{p} = \sum_{\alpha=1}^{nfaza} p^{(\alpha)} = \sum_{\alpha=1}^{nfaza} S_{\alpha} p_{\alpha} \quad (4-35)$$

U općem slučaju sve tri faze (kruta, tekuća i plinovita (zrak)) su prisutne u tlu, pa ukupno Cauchyovo naprežanje iznosi:

$$\sigma = \sigma^{(s)} + \sigma^{(w)} + \sigma^a \quad (4-36)$$

odnosno slijedi

$$\sigma^{(s)} = (1-n)\sigma_s \quad \sigma^{(w)} = -nS_w p_w I \quad \bar{p} = S_w p_w + S_a p_a \quad \sigma^{(a)} = -nS_a p_a I$$

S druge strane, tenzor efektivnog naprežanja proizlazi iz sljedećeg izraza:

$$\sigma = \sigma' - \bar{p}I + n \sum_{\alpha=1}^{nfaza} S_{\alpha} s_{\alpha} \quad (4-37)$$

U slučaju da je devijatorsko naprežanje međuprostorne tekućine jednako nuli, efektivno naprežanje postaje:

$$\sigma' = \sigma + \bar{p}I \quad (4-38)$$

#### 4.4.3.1.2. Opći model

Materijalna derivacija  $D/Dt$ , predstavlja promjenu brzina za fiksnu česticu fluida, a definira se kao sljedeći operator:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \cdot grad \quad (4-39)$$

U općem slučaju od skalarnih materijalnih svojstava, ukoliko su vezane na čestice, vrijedi slijedeći odnos:

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x_j} v_j \quad \left( \frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + v \cdot grad\Phi \right) \quad (4-40)$$

Dakle, materijalna derivacija je kombinacija:

- lokalne derivacije,  $\partial\Phi/\partial t$ , koja predstavlja promjenu količine u vremenu u fiksnom položaju.
- konvektivne derivacije,  $v_i \cdot grad\Phi$ , koja predstavlja promijenu zbog kretanja čestica tekućine iz jedne u drugu poziciju, gdje su svojstva fluida prostorno različita.

Opći model se sastoji od sljedećih jednažbi:

Prve jednažbe ravnoteže mase (jednažba kontinuiteta) za krutu i tekuću fazu koje glase:

$$\frac{D^{(s)}\rho^{(s)}}{Dt} + \rho^{(s)} \operatorname{div} v^{(s)} = 0 \quad (4-41)$$

$$\frac{D^{(\alpha)}\rho^{(\alpha)}}{Dt} + \rho^{(\alpha)} \operatorname{div} v^{(\alpha)} = 0 \quad (4-42)$$

Druga je jednadžba linearne ravnoteže količine gibanja za krutu i tekuću fazu:

$$\rho^{(\alpha)} \frac{D^{(\alpha)}v^{(\alpha)}}{Dt} = \rho^{(\alpha)}b + \operatorname{div} \sigma^{(\alpha)} - k_{\alpha}^{-1}\omega^{(\alpha)} \quad (4-43)$$

$$\rho^{(s)} \frac{D^{(s)}v^{(s)}}{Dt} = \rho^{(s)}b + \operatorname{div} \sigma^{(s)} - k_{\alpha}^{-1}\omega^{(\alpha)} \quad (4-44)$$

U gornjim jednadžbama  $b$  predstavlja vanjske sile,  $\sigma^{(s)}$  je djelomični Cauchyev tenzor naprezanja za čvrstu fazu,  $\sigma^{(\alpha)}$  parcijalni Cauchyev tenzor naprezanja za tekuću fazu,  $k_{\alpha}$  permeabilnost (propusnost) faze  $\alpha$ , dok  $\omega^{(\alpha)}$  predstavlja Darcyevu relativnu brzinu (Pastor i sur., 2007., 2009.; Blanc, 2008.).

Treći dio modela se temelji na konstitutivnim jednadžbama. Posljednje jednadžbe su kinetičke jednadžbe koje povezuju brzinu i tenzor deformacije:

$$D^{\alpha} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i^{\alpha}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j^{\alpha}}{\partial x_i} \right) \quad (4-45)$$

gdje  $D$  predstavlja prirast deformacijskog tenzora.

Ponašanje tla je određeno vezom između različitih faza. SPH 2D simulacijski program koristi već spomenuti matematički model " $U-p_w$ " kojeg su predložili profesor Zienkiewicz i njegov tim sa Sveučilišta u Swansea, (C.T. Chang, P. Bettess, T. Shiomi, A.H.C. Chan, M. Pastor, O.K. Paul i B. Schrefler). Oni su proširili teoriju Biota (1941., 1955.) na nelinearan materijal i velike deformacije (1980., 1984., 1990., 2000.). Model " $U-p_w$ " je formuliran sa nepoznanicama pomaka čvrste faze i pornog tlaka, dok model " $V-p_w$ " koristi brzine kao nepoznanice umjesto pomaka.

Uz pretpostavku da su relativne brzine fluida između faze i njezinog ubrzanja male, model „ $V-p_w$ “ se može formulirati kao funkcija brzine čvrste faze i relativne brzine u čvrstoj fazi (Darcyeva brzina). Osim toga, uz pretpostavku da je tlo zasićeno, model se sastoji od sljedećih izraza:

$$\operatorname{div} (-k_w \operatorname{grad} p_w) + \operatorname{div} v^s = 0 \quad (4-46)$$

$$\rho \frac{D^{(s)}v^s}{Dt} = \rho b + \operatorname{div} \sigma \quad (4-47)$$

Konstitutivna jednadžba i kinetičke jednadžbe su iste kao i one kod općeg modela. U slučaju da je gustoća konstantna, ravnoteža smjese mase se reducira na:

$$\operatorname{div} v^s = 0 \quad (4-48)$$

#### 4.4.3.1.3. Propagacijsko-konsolidacijska aproksimacija

Analiza klizišta i tečenje toka krupnozrnatog materijala, zahvaljujući svojem obliku i geometrijskim svojstvima omogućuje pojednostavljenja. Važno je naglasiti da brzo tečenje uključuje dvije fizikalne pojave, a one su konsolidacija i disipacija pornog tlaka, te propagacija. Radi lakše vizualne predodžbe, osi  $x_1$  i  $x_2$  će se izabrati na ravnini bliskoj padini (horizontalnoj osi), a os  $x_3$  će biti normala (okomica) na tu ravninu. Model „ $V-p_w$ “ se može postaviti u bezdimenzijski oblik uvođenjem sljedećih jednakosti:

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= x_1 / L & \hat{x}_2 &= x_2 / L & \hat{x}_3 &= x_3 / L \\ \hat{v}_1 &= v_1 / \sqrt{gL} & \hat{v}_2 &= v_2 / \sqrt{gL} & \hat{v}_3 &= v_3 / \varepsilon \sqrt{gL} \\ \hat{\sigma} &= \sigma / \rho_o gH & \hat{p}_w &= p_w / \rho_o gH \end{aligned} \quad (4-49)$$

uz pretpostavku da se brzina polja može rastaviti na način:

$$\hat{v} = \hat{v}_0 + \hat{v}_1 \quad (4-50)$$

i polje pornog tlaka razgraditi kao:

$$\hat{p}_w = \hat{p}_{w_o} + \hat{p}_{w_1} \quad (4-51)$$

Na taj način, polje  $v_1$  se može identificirati kao polje brzine koje odgovara jednodimenzijskoj konsolidaciji, a  $v_o$  kao polje brzina koje odgovara širenju (propagaciji).

Polazna točka je jednažba ravnoteže za zasićeno tlo dobivena iz gornjih jednadžbi (jednadžba 4-46 i 4-47). "Propagacijsko-konsolidacijski" model se sastoji od skupa sljedećih parcijalnih izvedenih jednadžbi:

$$\rho \frac{Dv_o}{Dt} = \rho b + \operatorname{div} \sigma \quad (4-52)$$

$$\operatorname{div} v_o^{(s)} = 0 \quad (4-53)$$

$$\frac{1}{K_T} \frac{Dp_w}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_3} \left( k_w \frac{\partial p_w}{\partial x_3} \right) \quad (4-54)$$

gdje  $K_T$  predstavlja volumetrijsku krutost čvrstog skeletona, čvrste jezgre. Uzimajući u obzir uvjet nekompresibilnosti (jednadžba (4-53)), jednadžba (4-52) se može napisati u konzervativnom obliku kao:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) + \rho b_i \quad (4-55)$$

#### 4.4.3.2. Integrirani model po dubini

Mnoga brza, katastrofalna klizišta imaju prosječne dubine koje su male u odnosu na njihovu duljinu i širinu. Sljedeći rad Pastora i sur. (2007., 2009.), u ovom slučaju, moguće je pojednostaviti 3D propagacijsko-konsolidacijski model integriranjem njegovih jednadžbi duž okomite osi. Rezultat takvog reduciranog 2D integriranog modela predstavlja odličnu kombinaciju točnosti i jednostavno pruža važne informacije kao što su brzina propagacije, vrijeme doseganja do određenog mjesta, trenutne dubine na određenoj poziciji i slično.

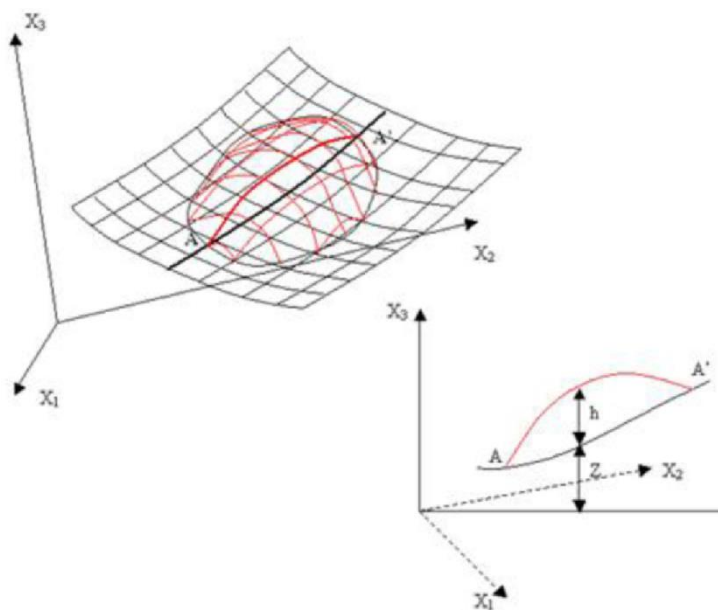
Sljedeći model proizlazi iz jednadžbi (4-52) do (4-55). Podindeksi "0" u polju brzina i "1" u polju pornog tlaka će biti izostavljeni. Ove jednadžbe će biti integrirane u smjeru normale površine terena pomoću Leibnitzova i Reynoldsova teorema (Blanc, 2008.). Koristiti će se referentni sustav prikazan na slici 4.31.

##### • Jednadžba kontinuiteta:

Jednadžba ravnoteže masa je integrirana u smjeru dubine i daje:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (h\bar{v}_j) = 0 \quad \text{za } j = 1, 2 \quad (4-56)$$

gdje je  $\bar{v}_j$  komponenta prosječne brzine uzduž osi  $X_j$ .



**Slika 4.31.** Referentni sustav i označavanje korišteno u numeričkoj analizi (Blanc, 2008.)

Općenito, bazna površina se ne mijenja i  $\frac{\partial}{\partial t} (h + z) = \frac{\partial h}{\partial t}$ , ali u nekim slučajevima, događa se

erozija i taj fenomen se mora uzeti u obzir uvođenjem brzine erozije,  $e_r$ , definirane kao:



$$e_R = -\frac{\partial z}{\partial t} \quad (4-57)$$

Dakle, dobiva se  $\frac{\partial}{\partial t}(h+z) = \frac{\partial h}{\partial t} - e_R$  i mora biti integrirana u jednadžbu ravnoteže masa (jednadžbu kontinuiteta). Stoga je po dubini integrirana jednadžba ravnoteže masa slijedeća:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(h\bar{v}_j) = e_r \quad \text{za } j = 1,2 \quad (4-58)$$

• Linearna jednadžba ravnoteže momenta (količine gibanja):

Uz pretpostavku da su naprezanja na površini jednaka nuli, naprezanja na dnu kanala su dana kao:

$$\tau_B = -\rho gh \text{ grad } Z - \tau_b \quad (4-59)$$

Jednadžba (4-55) linearne ravnoteže momenta je integrirana u smjeru dubine i daje oblik:

$$\rho \frac{D(h\bar{v})}{Dt} + \text{grad} \left( \frac{1}{2} \rho gh^2 \right) = -\frac{1}{\rho} e_r \bar{v} + \rho bh + \text{div}(h\bar{s}) - \rho gh \text{ grad } Z - \tau_b - \rho h \bar{v} \text{div}(\bar{v}) \quad (4-60)$$

Uzima se u obzir postojanje zasićenih slojeva visine,  $h_s$ , na dnu mase koja teče (Hungar, 1995.). Stoga je, smanjenje prona tlaka uzrokovano vertikalnom konsolidacijom tog sloja. Koeficijent konsolidacije,  $C_v$ , uvodi se preko izraza:

$$C_v = \frac{k_w}{\gamma_w c'} = K_T k_w \quad (4-61)$$

pri čemu je  $C_v$  koeficijent konsolidacije,  $k_w$  permeabilnost,  $\gamma_w$  specifična težina tekućine,  $c'$  kompresibilnost materijala, odnosno  $K_T$  volumetrijska krutost čvrstog kostura.

Konsolidacijska jednadžba integrirana po dubini proizlazi iz integracije jednadžbe (4-54), te ima oblik:

$$\frac{\partial}{\partial t}(P_{w_1} h) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\bar{v}_k P_{w_1} h) = -\frac{\pi^2}{4h^2} c_v P_{w_1} \quad (4-62)$$

Uz pretpostavku fiksnog volumena, što odgovara stupcu integriranom u smjeru dubine i kretanje sa prosječnom brzinom, jednadžbe tako integriranog modela glase:

$$\frac{Dh}{Dt} + h \text{div}(\bar{v}) = e_r$$

$$\rho \frac{D(h\bar{v})}{Dt} + \text{grad} \left( \frac{1}{2} \rho gh^2 \right) = -\frac{1}{\rho} e_r \bar{v} + \rho bh + \text{div}(h\bar{s}) - \rho gh \text{ grad } Z - \tau_b - \rho h \bar{v} \text{div}(\bar{v}) \quad (4-63)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(P_{w_1} h) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\bar{v}_k P_{w_1} h) = -\frac{\pi^2}{4h^2} c_v P_{w_1}$$

Ovaj sustav jednadžbi se može riješiti primjenom brojnih numeričkih metoda (MKR, MKE) ili bezmrežnom „meshless“ metodom, kao što je SPH metoda.

#### **4.4.3.3. Reološki zakon**

Matematički model koji je predhodno opisan mora biti kompletiran pomoću konstitutivnih ili reoloških zakona koji povezuju tenzore naprezanja i deformacije. U slučaju čvrstog tla, u posljednjih nekoliko desetljeća posvećen je veliki napor za razvojem rigoroznih konstitutivnih zakona (modela) računajući na najvažnije aspekte ponašanja tla. Danas postoji širok izbor između mnogih elastoplastičnih, viskoplastičnih, hipoplastičnih, kao i nelinearnih inkrementalno-generaliziranih plastičnih zakonitosti, odnosno „modela“. Obje klase modela, za čvrsta ili fluidizirana tla, se često spominju pod nazivom "konstitutivne jednadžbe" i "reološki modeli".

U kontekstu istraživanja toka krupnozrnatog materijala postoje dvije različite linije istraživanja posvećene ponašanju fluidiziranog geomaterijala. Prva linija je započela s radom Takahashia (1978.) u kojem autor navodi da se materijal, koji čini tok krupnozrnatog materijala, sastoji od čestica raspršenih u viskoznoj tekućini. Takahashi pretpostavlja da se Bagnoldova teorija (Bagnold, 1954.) može primijeniti na tečenje toka krupnozrnatog materijala. Bagnoldova teorija se odnosi na brzo tečenje u sastavu sa jednolikim i kuglastim (sfernim) česticama. Bagnoldov reološki zakon vrijedi za opisivanje ponašanja iznimno brzog tečenja suhe mase formirane od nekohezijskih čestica. Takav reološki zakon nije preporučljiv u slučaju smjese vode i tla, poput toka krupnozrnatog materijala (Coussot, 1995a). Štoviše, Bagnoldova teorija nije u stanju predvidjeti i procijeniti tečenje toka krupnozrnatog materijala, što joj je jedna od glavnih karakteristika.

Polje naprezanja odgovara minimumu nivoa naprezanja, koje mora biti premašena za inicijalizaciju toka krupnozrnatog materijala. Na temelju tog ponašanja, razvijen je drugi smjer istraživanja, koji razmatra tečenje krupnozrnatog materijala kao viskoplastičnu tekućinu. Razvijeno je nekoliko reoloških zakona na bazi eksperimentalnih podataka dobivenih sa reometrom, te na temelju teorijskih razmatranja i iz opažanja na terenu. Najpoznatiji viskoplastični zakon je Binghamov zakon (Bingham i Green, 1919.).

U nastavku rada prikazan je zakon trenja i Voellmyev zakon, iako SPH 2D model integriran po dubini omogućuje i primjenu sljedećih reoloških zakona: Newtonovog zakona za laminaran i turbulentan režim toka, Bagnoldov i Binghamov zakon. Treba napomenuti da se u većini studija tok krupnozrnatog materijala opisuje ili pomoću zakonitosti trenja ili pomoću Voellmyeva zakona, dok se tok sitnozrnatog materijala opisuje Binghamovim zakonom.

**4.4.3.3.1. Zakon trenja i Voellmyev zakon**

Većina integriranih modela po dubini koristiti jednostavne reološke zakone zbog poteškoća u njihovoj provedbi. Zakon trenja je jedan od dostupnih jednostavnih zakona, a dolazi iz modela autora Chenga i Linga (1996.), zanemarujući koheziju i viskozne uvjete. U ovom slučaju, vertikalna raspodjela posmičnih napreznja  $\tau(z)$  i Mohr-Coulombova napreznja  $s(z)$  dani su na sljedeći način:

$$\tau(z) = \rho g (h-z) \sin \theta \quad (4-64)$$

i

$$s(z) = \rho_d' g (h-z) \cos \theta \tan \phi \quad (4-65)$$

gdje je  $h$  dubina toka,  $z$  nadmorska visina,  $\theta$  kut nagib korita i  $\rho_d'$  gustoća potopljenih čestica koja je jednaka  $\rho_s - \rho_w$ . Budući da su obje distribucije linearne, ukoliko su vrijednosti (4-64) i (4-65) jednake na dnu, te vrijednosti će biti jednake po dubini. Taj uvjet glasi:

$$\tan \theta = \frac{\rho_d'}{\rho} \quad (4-66)$$

U ovom slučaju, nije moguće dobiti distribuciju brzine bez dodatnih informacija. S obzirom na pridreno posmično napreznje, obično se provodi aproksimacija u slijedećem obliku:

$$\tau_b = -\rho_d' g h \tan \phi \frac{\bar{v}_i}{|\bar{v}|} \quad (4-67)$$

U nekim slučajevima, tečenje fluidiziranog tla na dnu vodotoka/korita se odvija po nekom drugom materijalu. U tom slučaju, ukoliko je kut trenja,  $\delta$ , između oba materijala manji od kuta trenja fluidiziranog tla, pridreno posmično napreznje je dano kao:

$$\tau_b = -\rho_d' g h \tan \phi_b \frac{\bar{v}_i}{|\bar{v}|} \quad (4-68)$$

gdje je kut trenja s dnom,  $\phi_b$ , dan kao:

$$\phi_b = \min(\delta, \phi) \quad (4-69)$$

U ovom pojednostavljenom modelu, porni tlak  $p_w$  može biti uključen na slijedeći način:

$$\tau_b = -\left(\rho_d' g h \tan \phi_b - p_w^b\right) \frac{\bar{v}_i}{|\bar{v}|} \quad (4-70)$$

Temeljem posljednje jednadžbe, može se zaključiti da porni tlak ima učinak sličan padu kuta trenja. Uz jednostavni zakon trenja, Voellmyev zakon se pokazao prikladnim za modeliranje tečenja krupnozrnatog materijala (Hungar, 1995.; Evans i sur., 2001.). Pritom se zakon trenja može napisati u obliku:

$$\tau_b = -\left(\rho_d' gh \tan \phi_b - p_w^b\right) \frac{\bar{v}_i}{|\bar{v}|} + \rho g \frac{|\bar{v}|}{\zeta} \bar{v}_i \quad (4-71)$$

te se zbog disipacije turbulencije uvodi koeficijent turbulencije  $\zeta$  i uzima u obzir dubina pridnenog sloja gdje sudjeluje većina posmičnih deformacija.

#### 4.4.3.4. Numerički model

Aproksimacije funkcija i derivacija vrijede na razini kontinuuma. Ako je informacija pohranjena u diskretnom obliku (nizu točaka ili čvorova), potrebno je izgraditi diskretne aproksimacije. SPH metoda uvodi pojam "čestica", na način da povezuje informacije o varijablama polja i njihove derivacije. Sve operacije se počinju označavati čvorovima. Skup čestica ili čvorova  $\{x_K\}$  s  $K=1 \dots N$  će na taj način biti predstavljene. Klasična strategija MKE ima više čvorova u onim zonama gdje se očekuje veći gradijent. U SPH 2D modelu se koriste dvije različite mreže, jedna za opisivanje topografije terena, a druga je SPH mreža. Drugi zanimljiv aspekt je da su čvorovi kod SPH 2D modela grupirani na različitim mjestima i oni predstavljaju početni izvor pokretanja.

Jednadžba kontinuiteta, jednadžba ravnoteže količine gibanja i disipacija pornog tlaka su diskretizirane. Diskretizacija rezultira iz običnih diferencijalnih jednadžbi (ODJ). Rješenja ODJ se mogu integrirati koristeći numeričke sheme kao što je Runge Kutta 4. reda, koja je korištena u ovom radu.



## **5. IMPLEMENTACIJA EROZIJSKIH ZAKONA U SPH 2D SIMULACIJSKI PROGRAM**

### **5.1. Značajke erozijskih zakona**

Pregledom literature može se zaključiti da postoji tek nekoliko studija koje su pokušale kvantificirati erozijsko djelovanje tijekom propagacije toka krupnozrnatog materijala. Razlog tomu su brza kretanja toka krupnozrnatog materijala uz snažne hidrodinamičke udare na instalirane uređaje. S druge strane, najpouzdanije bi bilo erozijsko djelovanje procijeniti tijekom samog procesa propagacije. Nakon što se prirodna pojava dogodi vrlo je teško procijeniti vrijednosti važnih parametara uzduž trase: brzinu strujanja (toka), dubinu toka, te prenesenu količinu volumena krupnozrnatog materijala. Vrlo je teško pronaći odnos između stope erozije i drugih veličina karakterističnih za tok krupnozrnatog materijala. Malo erozijskih zakona je dostupno u literaturi. U ovom radu razmatrani su erozijski zakoni po Egashiri, Hungru i Voellmyu. Prvi je već implementiran unutar SPH 2D dubinski integriranog model za opis tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, dok je implementacija druga dva zakona realizirana unutar ovog doktorskog rada. U nastavku je također predložen i primjenjen novi erozijski zakon koji se temelji na utjecaju nagiba dna kanala sa promjenom vrijednosti tzv. erozijske stope rasta. Novo predloženi erozijski zakon je dobiven modifikacijom erozijskog zakona koji je dao Thomas Blanc (2008.).

Važnost erozijskih zakona leži u tome što je na temelju tih zakona moguće bolje opisati erozijsko djelovanje na samom dnu kanala/vodotoka koje je u uskoj vezi sa pridnenim brzinama toka. Također, vrlo važan parametar u sagledavanju erozijskih zakona leži u određivanju tangencijalnih (pridnenih) naprezanja koja se pojavljuju na dnu vodotoka. Tangencijalna naprezanja na dnu vodotoka ovise o odabranom reološkom zakonu fluida, te o ulaznim reološkim parametrima koji će u konačnici dati vertikalni prikaz brzina unutar vodotoka. Ovisno o vrijednostima pridnenih brzina toka ovisiti će i erozijska djelovanja na dno i pokose kanala/vodotoka.

### **5.2. Opis erozijskog zakona po Hungru**

Hungru (1995.) koristiti erozijsku stopu koja se povećava proporcionalno dubini toka, što rezultira u djelomičnoj razdiobi dubina ulaznog materijala i eksponencijalni rast toka krupnozrnatog materijala s pomakom. Iako je ovaj zakon empirijski, on ima fizikalno značenje. Promjene u uvjetima naprezanja dovode do kolapsa na riječnom dnu i tako zahvaćeni materijal ima posljedice na promjene ukupnog normalnog pridnenog naprezanja.

Empirijski zakon se temelji na ulaznom parametru,  $E_s$  koji predstavlja erozijsku stopu pomaka, tzv. stopu rasta (prinos). Ovaj parametar predstavlja normalnu dubinu dna erodiranog po jediničnom toku i pomaku, a dimenzija mu je  $L^{-1}$ . Valja napomenuti da se taj koeficijent razlikuje u odnosu na erozijsku stopu,  $e_r$ . Koeficijent  $e_r$  je vremenski zavisna erozijska stopa. Stopa rasta,  $E_s$ , je neovisna od brzine strujanja. Primjera radi, kada je  $E_s$  konstantan i ima vrijednost 0,01, volumen toka krupnozrnatog materijala se povećava za 1 %, pri pomaku od 1 metra. Hungrov zakon se sastoji od odnosa između erozijske stope  $e_r$  i stope rasta  $E_s$ :

$$e_r = E_s * h * v \quad (5-1)$$

gdje je  $h$  dubina toka, a  $v$  je prosječna brzina strujanja po dubini. Iz jednadžbe (5-1) moguće je izvesti promjenu volumena tijekom vremenskog koraka  $dt$ . SPH 2D po dubini integrirani model omogućuje sljedeće odnose:

$$h_i = \frac{V_i}{A_i} \quad (5-2)$$

pri čemu su  $V_i$  volumen čestice  $i$ , [ $m^3$ ],  $h_i$  visina čestice  $i$ , [ $m$ ], dok je  $A_i$  područje čestica  $i$  (konstantna tijekom vremena), [ $m^2$ ]. Podsjećajući se na  $e_r = \Delta h / dt$  i jednadžbu (5-1), promjena volumena tijekom vremenskog koraka  $dt$  može biti opisana kao:

$$\frac{\Delta h_i}{dt} = E_s h_i v_i \quad \Delta h_i = \frac{\Delta V_i}{A_i} = E_s h_i (v_i dt) \quad (5-3)$$

odnosno vrijedi  $\Delta V_i = E_s (h_i A_i) \Delta_s = E_s (V_i) \Delta_s$ , gdje je  $\Delta_s$  prijedeni put u vremenu  $dt$ . Posljednja jednadžba odgovara prirodnom eksponencijalnom rastu jednadžbe za tečenje krupnozrnatog materijala. U SPH 2D postoje dvije glavne linije u potprogramu "Erosion\_SW" (Pastor, 2007.; Blanc, 2008.):

- izračun erozijske stope nakon jednadžbe (5-1), i
- aktualiziranje novog volumena toka krupnozrnatog materijala:

$$V_i = V_i + \frac{dt * e_r * V_i}{h_i} \quad (5-4)$$

Potprogram "Erosion\_SW" se poziva na kraju svakog vremenskog koraka i radi se ažuriranje vrijednosti brzine i dubine toka nakon aproksimacije Runge Kutta metodom (Pastor, 2007.).

### 5.3. Opis erozijskog zakona po Egashiri

Erozijski zakon po Egashiri (1993.) se temelji na mjerenjima provedenim na dovodnom kanalu, kao i numeričkoj i dimenzionalnoj analizi. Egashira pretpostavlja da je nagib dna

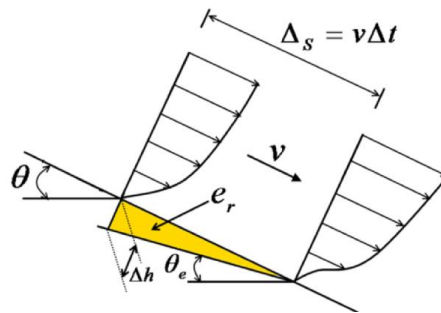


kanala uvijek usklađen s njegovom ravnotežom u slučaju putovanja toka krupnozrnatog materijala preko erodibilnog dna (Slika 5.1.). Pozivajući se na sliku 5.1. zakon očuvanja mase erodiranog prinesenog materijala se može primijeniti na sljedeći način:

$$e_r \Delta_s = e_r v \Delta t = c_* v \Delta h \quad (5-5)$$

U gornjem izrazu parametar  $c_*$  predstavlja koncentraciju sedimenta volumena sedimenta dna (od nepokretnog sloja),  $\theta$  je nagib dna kanala (rijeke, korita, bujice), dok je  $\theta_e$  nagib ravnoteže dna. Iz jednadžbe (5-5) slijedi oblik:

$$\frac{e_r}{v} = c_* \frac{\Delta h}{\Delta_s} \quad (5-6)$$



Slika 5.1. Definijska skica erozijske stope (Blanc, 2008.)

Na temelju gornje jednakosti Egashira dobiva njegov erozijski zakon zamjenom izraza

$$\theta - \theta_e = \arctan\left(\frac{\Delta h}{\Delta_s}\right):$$

$$e_r = c_* v \tan(\theta - \theta_e) \quad (5-7)$$

sa:

$$\theta_e = \tan^{-1}\left\{\frac{(\rho_s - \rho_w)c}{(\rho_s - \rho_w)c + \rho_w} \tan \phi\right\} \quad (5-8)$$

Parametri u formuli (5-8) definiraju gustoću mase čestica sedimenata,  $\rho_s$ , gustoću mase vode,  $\rho_w$ , koncentraciju sedimenta toka krupnozrnatog materijala po volumenu,  $c$ , te unutarnji kut trenja dna kanala  $\phi$  aproksimiran kutem trenja pridnenog sloja  $\tan \phi_b$ . Egashirin erozijski zakon odgovara jednadžbi (5-7) i (5-8) i zahtijeva poznavanje vrijednosti koncentracije ostatka sedimenta uslijed tečenja materijala i koncentracije sedimenta (po volumenu) od sedimenata dna kanala. U usporedbi sa erozijskim zakonom prema Hungru, gdje korisnik mora unijeti samo jedan parametar (koeficijent erozije, odnosno stopu rasta), u Egashirinom zakonu, korisnik mora unijeti dva parametra, a oni su:

- $c$ , koncentracija sedimenata ostataka toka po volumenu,
- $c_*$ , koncentracija sedimenta po volumenu sedimenta dna kanala (od nepokretnog sloja).

Eksperimentalno, Takahashi i suradnici su (1992.) dokazali da koncentracija sedimenta toka krupnozrnatog materijala ( $c$ ) ne može prelaziti vrijednost  $0,9c_*$ . Stoga je potrebno uvijek provjeriti nejednakost  $c < 0,9c_*$ . SPH 2D dubinski integrirani model verificira taj uvjet u slučaju da ulazni parametri nisu ovjereni od strane korisnika.

### 5.3.1. Primjena erozijskog zakona po Egashiri u SPH 2D modelu

Korištenjem Egashirinog zakona moguće je procijeniti volumen sedimenta, koji je pohranjen tijekom tečenja. U stvari, kada je kut  $\theta_e > \theta$ , erozijska stopa,  $e_r$  je negativna i to odgovara taloženju naslaga i smanjenju volumena toka materijala (Blanc, 2008.; Pastor i sur., 2008., 2009.). Kada je erozijska stopa  $e_r < 0$ ,  $dh/dt < 0$  visina čestica se smanjuje. Egashirin erozijski zakon može biti implementiran za procjene samo erozijskih procesa, tj. kada je erozijska stopa negativna za čestice, i tada nema promjene njegovog volumena.

Kada je materijal dna erodiran, on se vrlo brzo ukloni (ispire) putem tečenja. Na taj način erozijski procesi osiguravaju povećanje volumetrijske koncentracije sedimenata. Zbog toga gustoća smjese nije konstantna. Unutar SPH 2D modela pretpostavlja se konstantna gustoća smjese. Normalno je da se koncentracija sedimenata mijenja tijekom vremena, no to nije moguće u trenutnoj verziji SPH 2D po dubini integriranog modela. Stoga je pretpostavka da kada dođe do erozijskih procesa, da koncentracija sedimenta ostaje konstantna (Brufau i sur., 2000.). Empirijski faktor (konstanta)  $K$  se uvodi u Egashirin erozijski zakon nakon čega se dobiva modificirani oblik:

$$e_r = Kc_*v \tan(\theta - \theta_e) \quad (5-9)$$

pri čemu se parametar  $\theta_e$  računa prema izrazu (5-8).

Modifikacija erozijskog zakona Egashire zahtijeva tri ulazna parametra koji korisnik modela mora odrediti kako bi osigurao vjerodostojnu simulaciju. Pored dva prethodno opisana parametra ( $c$ ,  $c_*$ ) potrebno je dodatno poznavati i empirijski faktor  $K$ .

### 5.4. Novi erozijski zakon implementiran u SPH 2D model

Novi erozijski zakon koji je implementiran u SPH 2D po dubini integrirani model je modificirani oblik erozijskog zakona koji je predložio Thomas Blanc 2008. godine. Za razliku od prijašnjih opisanih erozijskih zakona, novi erozijski zakon koristi utjecaj nagiba dna

kanala/vodotoka na erozijsko djelovanje. Novi predloženi zakon daje bolje izlazne vrijednosti (rezultate) u pogledu ovisnosti erozijske stope rasta i erozijskog pomaka (rezultati su dani u podpoglavlju 6.3.1.), a njegov oblik je slijedeći:

$$e_r = K * v * h * (\tan \theta)^{2,5} \quad (5-10)$$

pri čemu je  $K$  empirijski faktor, [1],  $\theta$  nagib dna kanala/rijeke/vodotoka za promatrani prostorni inkrement, [°], dok je  $v$  brzina toka, [m/s], a  $h$  dubina toka, [m]. Ovaj erozijski zakon omogućuje izračun erozijske stope rasta uzimajući u obzir nagib dna kanala/vodotoka dobiven na temelju prostorne diskretizacije domene, kao i trenutnu brzinu i dubinu toka uslijed propagacijskog vala. Ideja o primjeni novog erozijskog zakona je proizašla na temelju radova Cannon i Savage (1988.), Rickenmann i sur. (2003.), te Stock i Dietrich (2006.). Između ostalog, u radu Rickenmann i sur. (2003.) predložen je erozijski zakon kod kojeg značajan utjecaj na eroziju ima upravo pad dna kanala  $I$ :

$$A_e = a_o * V_m * (\rho_m / \rho_v) * I^{\beta_I} \quad (5-11)$$

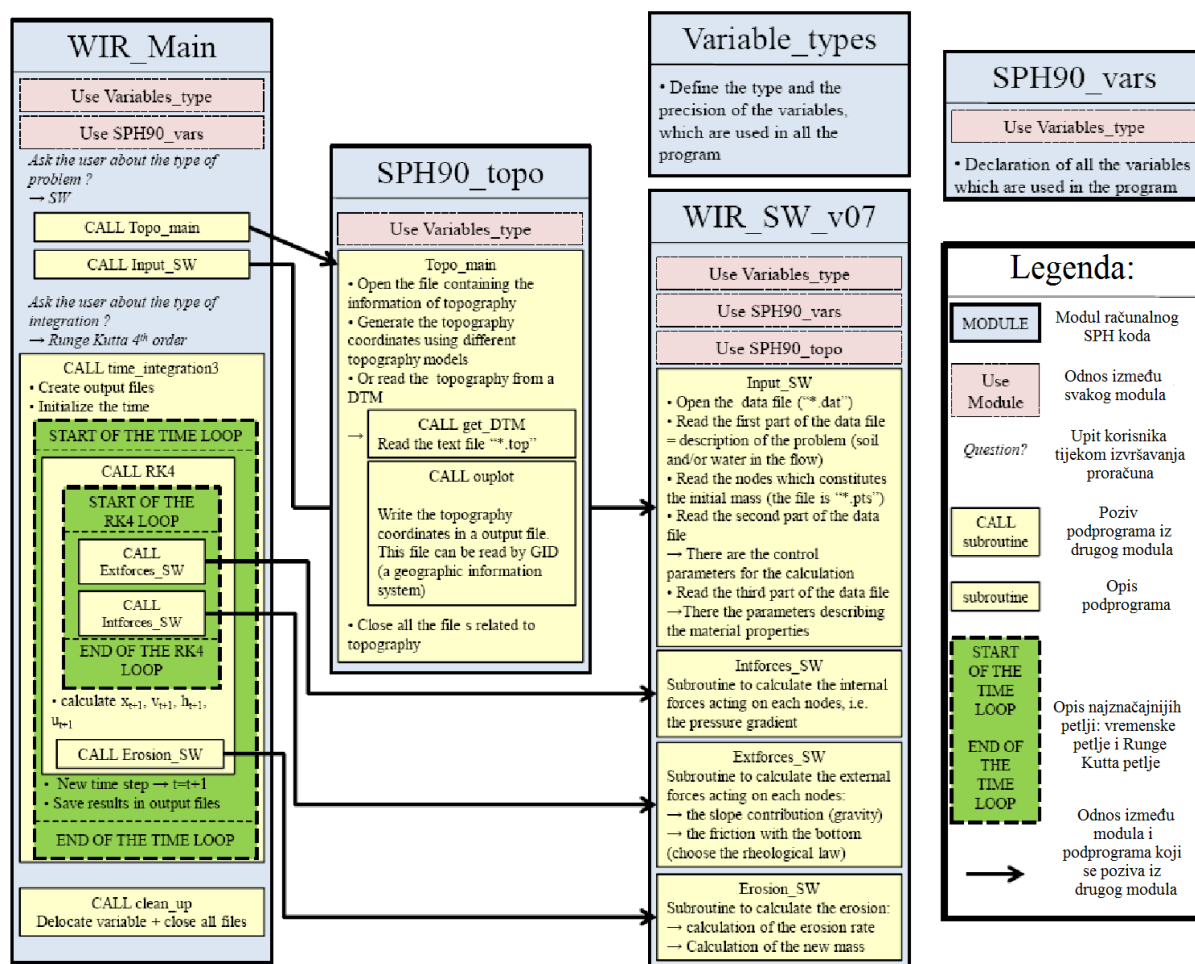
pri čemu  $A_e$  predstavlja erozijski prinos materijala po jediničnoj duljini kanala,  $a_o$  je empirijski faktor (ekvivalent empirijskom faktoru  $K$  kod Egashirinog erozijskog zakona),  $V_m$  predstavlja uzvodni volumen mješavine toka krupnozrnatog ili sitnozrnatog materijala sa vodom,  $\rho_m$  je gustoća ulazne mješavine (smjese),  $\rho_v$  gustoća vode u mješavini, dok su  $I$  pad dna kanala i  $\beta_I$  eksponent nagiba kanala.

Novi predloženi erozijski zakon prema izrazu (5-10) je temeljen na kombinaciji ulaznih parametara koji se koriste u erozijskim zakonima po Hungru i Egashiri. Empirijski koeficijent  $K$  u ovom slučaju može biti predstavljen kao indikator Egashirine osnovne procjene proporcionalnosti između erozijske stope  $e_r$  i razlike kuteva  $\theta - \theta_e$ , odnosno indikator da je pretpostavljena metoda za određivanje ravnoteže nagiba kanala neprimjenjiva za određeni slučaj. Eksponent 2,5 kod pada dna kanala predstavlja empirijsku vrijednost koja se temelji na analizi eksperimentalnih podataka dobivenih na fizikalnim modelima. Predstavljeni zakon treba dodatno provjeriti na određenom fizikalnom modelu u laboratoriju, odnosno kroz određene numeričke modele sličnog tipa kao što je SPH 2D integrirani model po dubini. Predloženi erozijski zakon je integriran unutar SPH 2D modela, te je pokazao realnije rezultate u odnosu na Egashirin i Hungrov erozijski zakon u pogledu dosega toka sitnozrnatog materijala na primjeru stvarnog događaja na vodotoku Rječina iz 1908. godine. Prilikom odabira ovog erozijskog zakona treba voditi računa da empirijski faktor (parametar)  $K$  ima vrijednost u rangu od 0,012-0,02. Također i eksponent kod vrijednosti  $\tan \theta$  ne smije imati veliku vrijednost (između 2,45-2,62), jer u suprotnom djelovanje erozije na dnu

kanala/vodotoka postaje više izraženije. Daljnji rad sa primjenom predloženog erozijskog zakona može uvelike poboljšati sliku erozijskog djelovanja uzduž vodotoka i dati bolje izlazne rezultate u pogledu volumetrije erodiranog materijala i dubina deponiranog materijala u odnosu na primjenu postojećih erozijskih zakona.

### 5.5. SPH 2D računalni kod i njegova struktura

Računalni kod SPH 2D po dubini integriranog modela je pisan u programskom jeziku FORTRAN 90 (Pastor, 2007.). Program se sastoji od 7 modula (Slika 5.2). Četiri od njih daju osnovu programa: dva modula se odnose na varijable (njihova deklaracija i definicija), jedan modul se odnosi na topografiju terena, te jedan na glavni proračunski modul.



Slika 5.2. Prikaz strukture računalnog koda primjenjenog u SPH 2D modelu (Blanc, 2008.)

Tri preostala modula se ne koriste istovremeno - svaki se koristi za simulaciju tipa drugačijeg prirodnog hazarda:

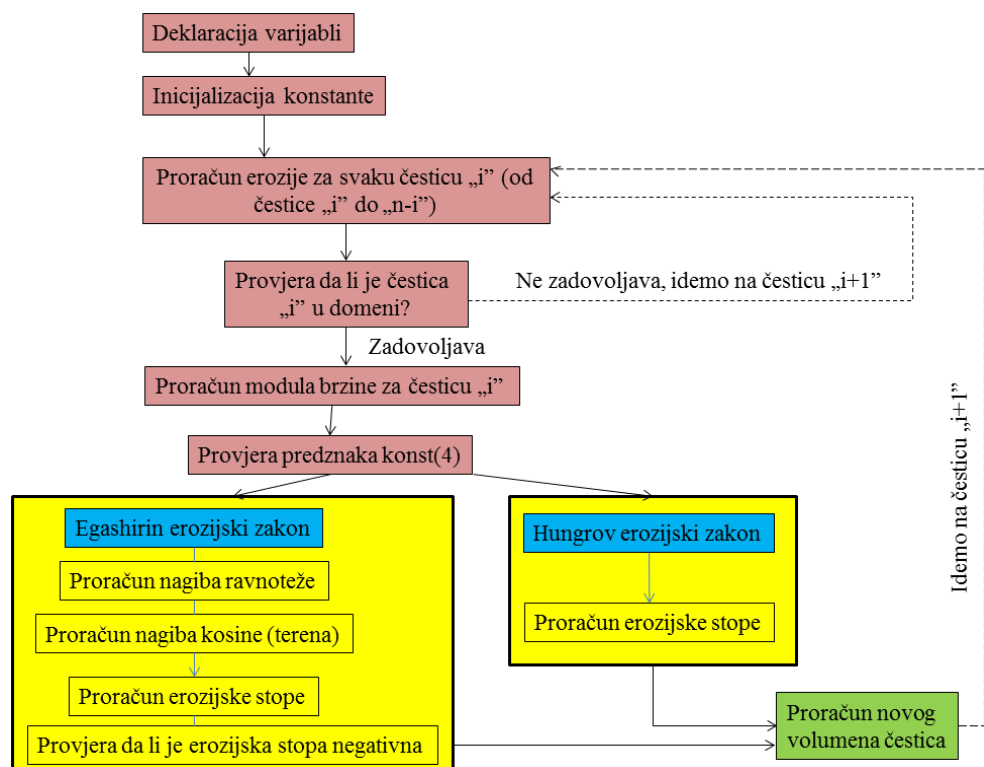
- modul za simulaciju toka krupnozrnatog materijala i klizišta (modul "plitka voda"- „Shallow water“),

- modul koji rješava Navier-Stokesove jednačbe,
- modul za simulaciju rasprostiranja valova iz akumulacije koje je pokrenulo klizište.

Ulazni podaci su sadržani u tri datoteke:

- „\*.top“ datoteka sadrži podatke o topografiji. Informacija može biti ili u vidu prezentacije elevacijskih podataka terena ili točaka mreže koje generiraju SPH 2D model.
- „\*.pts“ datoteka sadrži sve čvorove ili čestice koje čine početnu (inicijalnu) masu protoka.
- „\*.dat“ datoteka sadrži informacije o vrsti događaja koji se simulira, parametre simulacije i svojstva materijala.

Kako se rad vezuje uz modeliranje tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala koristi se tzv. „Shallow water“ SW modul. Struktura SPH 2D po dubini integriranog modela sažeta je na slici 5.2. gdje je dan odnos između modula i potprograma označenih u shemi (Blanc, 2008.). Ulazni parametri za erozijski zakon nalaze se u datoteci (\*.dat). Parametar nazvan "const (4)", uzima pozitivne ili negativne vrijednosti za odabir erozijskog zakona. Ukoliko je vrijednost  $const(4)=0$  tada se ne uključuje erozijsko djelovanje u modelu, a u slučaju da je ta vrijednost različita od nule odabire se tip erozijskih zakona. Struktura koda za podprogram „Erosion\_SW“, prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3. Struktura podprograma "Erosion\_SW" primjenjena u SPH 2D modelu

Sa slike je vidljivo da prilikom odabira Egashirinog erozijskog zakona moramo poznavati tri ulazna parametra, dok je kod primjene erozijskog zakona po Hungru potrebno znati samo jedan parametar. Ranije opisani potprogram se poziva na svakom koraku i time ostvaruje za svaku česticu njezin volumen tijekom erozijskog procesa na temelju predhodno definiranog vremenskog inkrementa. Kako je erozijska mjera prisutna u jednadžbi ravnoteže, kao posljedica toga u SPH 2D modelu, erozijska mjera je izračunata u potprogramu "Erosion\_SW" nakon što je izračunat moment čestica.

### 5.5.1. Ulazni parametri u SPH 2D modelu

U nastavku su prikazani najvažniji hidrološki i geotehnički parametri koji se koriste za opisivanje pojave toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala (Tablica 5.1.). Dubina i brzina toka su dva glavna izlazna parametra numeričkog modela za opis takvih tipova tečenja. Porni pritisak se ne može smatrati izlaznom vrijednošću, jer njegova vrijednost nije relevantna za ocjenu tečenja krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Numerički model koji je primijenjen u ovom radu zahtijeva definiranje ulaznih parametara i učinak pornog pritiska kako bi se što realnije dobio opis propagacije toka, njegov doseg, te vrijednosti brzina i dubina uslijed tečenja koje trebaju biti mjerodavne sa stvarnim (realnim) vrijednostima u prirodi.

Važan ulazni parametar pri opisu toka krupnozrnatog materijala predstavlja nagib terena, odnosno konfiguracija terena. Informacije o tim parametrima su sadržane u digitalnom elevacijskom modelu terena. Za izračun trenja u pridnenom sloju korita, zakon trenja zahtijeva parametre kao što su gustoća smjese ( $\rho$ ), kut trenja ( $\tan(\phi)$ ), te u slučaju Voellmyeva zakona trenja, koeficijent turbulencije ( $\zeta$ ). To su glavni parametri kalibracije modela.

**Tablica 5.1.** Parametri koji opisuju proces tečenja krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala u SPH 2D modelu

Fizikalni parametri	Matematički simbol	Vrsta parametra
Nagib	Z (nadmorska visina)	Ulazni parametar
Erodibilnost	$e_r$ (erozijska mjera, stopa)	Kalibracijski parametar
Početni volumen	Zaključen iz početne visine: $h$	Ulazni parametar
Viskoznost	$\eta$	Ulazni parametar
Kut trenja mješavine (smjese)	$\tan\phi$	Kalibracijski parametar
Volumni udio čvrste tvari	$c$	Kalibracijski parametar
Koeficijent turbulencije	$\zeta$ (Voellmyev koeficijent)	Kalibracijski parametar
Brzina toka	$\bar{v}$ Dubinski integrirana brzina	Izlazni parametar
Dubina toka	$h$	Ulazni parametar + Izlazni parametar
Volumen	Zaključen iz dubine toka	Izlazni parametar
Položaj depozita	Zaključen iz brzine toka	Izlazni parametar

SPH 2D po dubini integrirani model uzima u obzir većinu parametara koji su definirani (relevantni) za opisivanje toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, no za vjerodostojan model potrebno je izvršiti kalibraciju.

### **5.5.2. Verifikacija erozijskih zakona i SPH 2D modela**

Kako bi procijenili valjanost numeričkog modela, potrebno je odabrati (i) matematički model i (ii) reološke zakone koje treba implementirati u numerički model. Što se tiče reoloških zakona, usporedbe mogu biti izvršene samo uz pomoć jednostavnog fluida čija su reološka svojstva dobivena u laboratoriju. Općenito govoreći, laboratorijska mjerenja i testovi su rijetko dostupni za fluidizirano zemljište uključujući katastrofalne tokove krupnozrnatog ili sitnozrnatog materijala. Stoga se provjera valjanosti reoloških zakona može provesti inverznom simulacijom događaja i posljedica koje su se zabilježile u prošlosti. Izlazni rezultati se uspoređuju sa terenskim mjerenjima ili laboratorijskim podacima dobivenim na fizikalnom (eksperimentalnom) modelu radi verifikacije i kalibracije numeričkog modela. Za provjeru valjanosti u radu korištenog SPH 2D po dubini integriranog modela, primjenjeno je nekoliko različitih scenarija formiranja poplavnih valova, te tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na širem području oko klizišta Grohovo i akumulacije Valići. Numeričke simulacije za pojedine moguće scenarije, te njihova analiza i zaključna razmatranja dani su u Poglavlju 6.

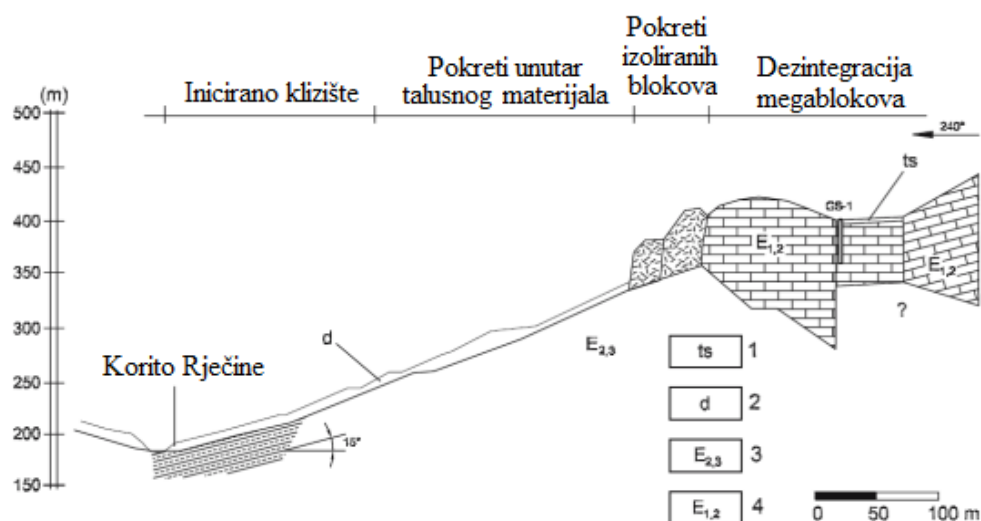




## 6. SIMULACIJE TOKA KRUPNOZRNATOG I SITNOZRNATOG MATERIJALA NA SREDNJEM DIJELU TOKA RJEČINE (KLIZIŠTE GROHOVO)

### 6.1. Geomorfološki (geotehnički) i hidrogeološki parametri za definiranje toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo

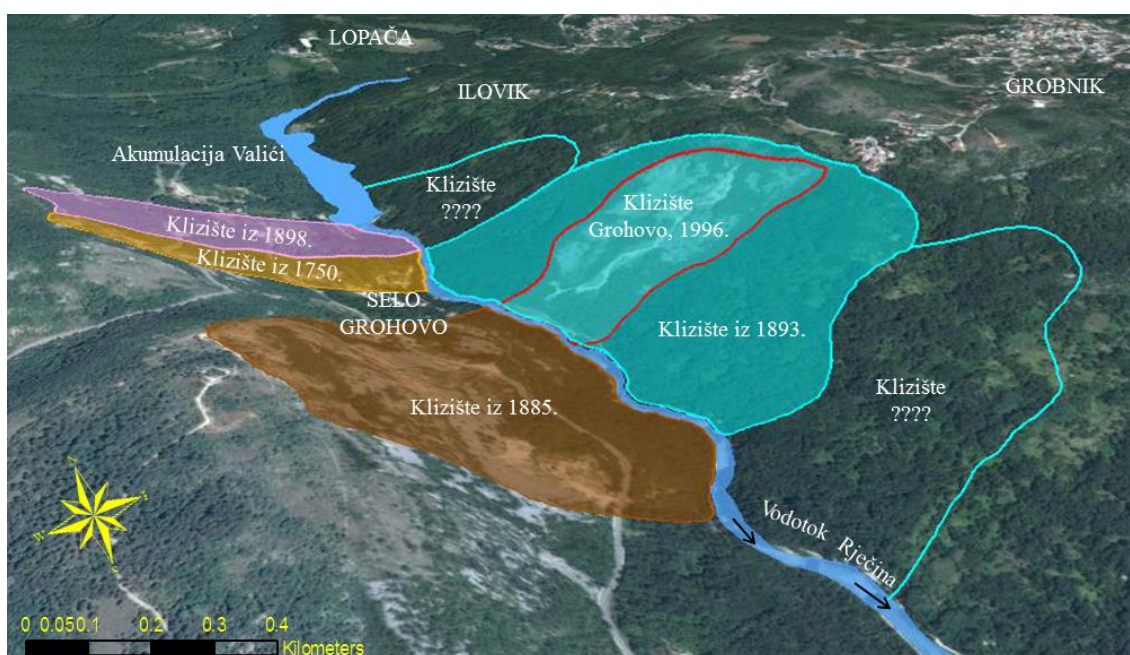
Neotektonski pokreti, potaknuti od strane subdukcije Jadranske ploče, izazivaju nepravilna slijeganja dolinskog dna i nestabilnosti okolnog terena na širem području grada Rijeke (Blašković, 1997.), uključujući i klizište Grohovo. Procesi su dodatno potaknuti gravitacijskim klizanjima vapnenačkih blokova na flišnoj stijeni u podlozi. Kinematika strukturnih elemenata cijele tektonske jedinice (dolina Rječine-Bakarski zaljev-Vinodolska dolina) pod kontrolom je odnosa između karbonatnih stijena i relativno plastičnog flišnog materijala. Krečnjaci iz perioda Krede i Paleogena se nalaze na vrhu padina, dok se paleogenski fliš nalazi na donjim padinama i na dnu doline. Učinci deformacija su najupečatljiviji na granici vapnenca i fliša. Fliš se odlikuje svojom heterogenošću, s čestim vertikalnim i lateralnim izmjenama različitog litološkog sastava. Za razliku od vapnenačkih stijena na vrhu padina, flišna stijenska masa je gotovo u potpunosti pokrivena materijalom pod utjecajem atmosferilija, vrlo trošna i nestabilna (Slika. 6.1.).



*Slika 6.1. Generalizirani poprečni profil nagiba kosine klizišta Grohovo, 1 – crvenica, 2 – formacija nagiba, 3 – paleogenski fliš, 4 – paleogenski vapnenac (Benac i sur., 2005b)*

Promjene u naprezanju uzrokovane su osebujnim tektonskim deformacijama (Anderson i Jackson, 1987.; Blašković, 1997.) što je rezultiralo odronjavanjima vapnenačke stijenske

mase, te odvajanjem mega-blokova, raspadanjem stijenske mase i akumuliranjem deponiranog materijala podno mega-blokova. Za razliku od vapnenca, flišna stijenska masa je sklonija površinskom trošenju. Krupnozrnati fragmenti koji potječu iz odrona stijenske mase miješaju se s glinom iz područja trošne zone i stvaraju depozitni materijal na padinama debljine nekoliko metara. Zbog intenzivnog raspadanja vapnenačke stijenske mase na vrhu padine, sekundarni deponirani materijal se nakuplja ispod litica, a sastoji se od stjenovitog krupnozrnatog materijala sa malom količinom sitnozrnatih primjesa (Benac i sur., 2006.). Ispitivanja na području srednjeg dijela toka Rječine ukazuju na složena klizišta i brojne pojedinačne pokrete (Slika 6.2.).



**Slika 6.2.** Nekoliko značajnih povijesnih klizišta u srednjem dijelu toka Rječine

Prema Skemptonu i Hutchinsonu (1969.) klizište Grohovo je definirano kao odron stijenske mase. Prema načinu kretanja mješovitog stjenovitog materijala i tla može se prema klasifikaciji Varnesa (1978.) opisati kao lavina krupnozrnatog materijala. Prema položaju klizne površine i geološkim čimbenicima, klizište bi se moglo klasificirati i kao translacijsko kretanje ili klizanje stjenovitih blokova tipa IIIb (Antoine i Girauda, 1995). Crozier (1984.), te Keaton i Degraff (1996.) razmatraju klizište kao fenomen reaktivacije (Tip Ib). Nekoliko povijesnih epizoda pokretanja mase klizišta i posljedice koje su pritom nastale pokazuju potrebe za predviđanjem ponašanja klizišta i uspostavu sustava za rano uzbunjivanje kako bi se smanjio hazard povezan sa rizikom i zaštitom ljudskih života (Benac i sur., 2006.).

### **6.1.1. Nestabilnost područja u okolini brane Valići**

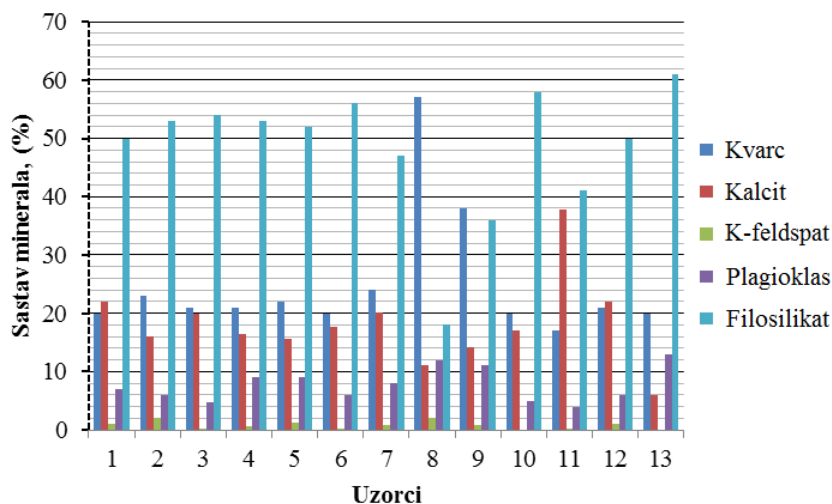
Šire područje oko akumulacije Valići je niskog stupnja stabilnosti. Najgora predviđanja hazarda su vezana za moguće pojave klizišta na padinama oko akumulacije. Takve pojave klizišta mogu izazvati vrlo ozbiljne posljedice kao što su punjenje akumulacije kliznim materijalom, mogućnost formiranja poplavnog vala koji može preljevati krunu brane i uzrokovati velike štete nizvodno od nje, kao i mogućnost proloma brane uslijed opterećenja stjenske mase koja bi tom prilikom djelovala po visini brane. Rezultati provedene determinističke 3D analize stabilnosti kosina pomoću LS-Rapid numeričkog simulacijskog programa pokazuju da se na kritičnim područjima oko akumulacije mogu očekivati znatna dodatna klizanja i odroni stjenske mase potaknuta nepovoljnim hidrogeološkim uvjetima. Dokaz o klizanjima vidi se u visokim riječnim terasama uzvodno od brane Valići. U posljednje vrijeme su značajni manji odroni stjenske mase neposredno nizvodno od same brane, pretežno s lijeve strane vodotoka Rječine.

### **6.1.2. Geotehničke značajke uzoraka tla na klizištu Grohovo**

Za dobivanje mineraloških, fizikalnih i geotehničkih svojstva uzoraka tla s područja klizišta Grohovo provedena je analiza na 22 reprezentativna uzorka iz fliša, od kojih je 18 uzeto iz bušotinske jezgre (1999.), dok je preostalih 4 uzeto s površine terena 2006. godine (Benac i sur., 2014.). Za potrebe mineraloške analize sprovedena je dodatno analiza sitnozrnatih frakcija (do 1 mm), (Slike 6.3. i 6.4.).

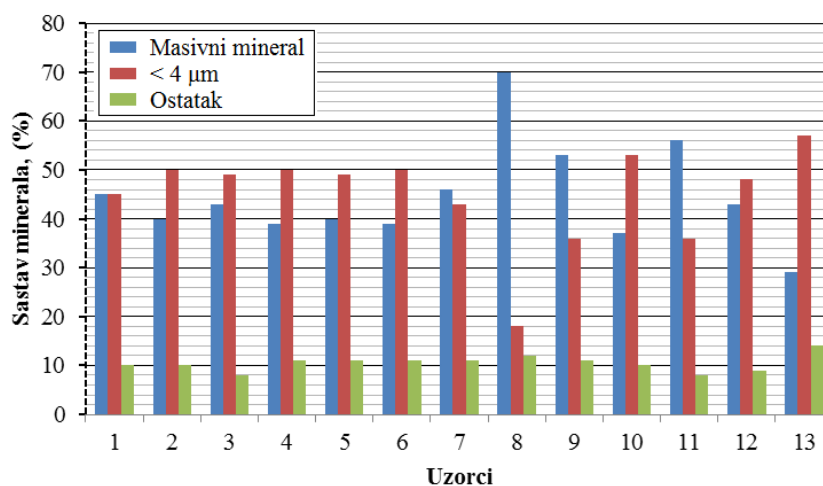
Standardna geotehnička laboratorijska ispitivanja su provedena na 13 bušotinskih uzoraka i na 4 površinska uzorka. Na temelju odnosa između mineralogije i zrna veličine uzoraka uzetih iz bušotina za vrijeme perioda ispitivanja od 1998.-2003. određen je granulometrijski sastav za karakterističan materijal s klizišta Grohovo (Slika 6.5.) (Benac i sur., 2014.).

Analiza tla pokazuje da je prah dominantna veličina u sastavu tla, iako su frakcije gline također značajne i variraju između 17 i 38 %. Prema sedimentološkoj metodi analize veličine zrna (Slika 6.5a) i geotehničkoj analizi (Slika 6.5.b)) može se vidjeti da je u svim uzorcima dominantan prah i glina. Stoga se može zaključiti da na ispitivanom području prevladava glinasti prah ili prašnjasta glina. Prosječna veličina čestica ( $D_{50}$ ) pri geotehničkoj analizi ima raspon od 0,004 - 0,042 mm, odnosno kod sedimentološke metode analize veličine zrna 0,0028-0,056 mm (Slika 6.5.). Indeks plastičnosti za ispitivani materijal varira u granicama od  $I_p=14-22\%$  iz čega se može zaključiti da materijal ima nisku do srednju plastičnost. Granica tečenja iznosi  $W_L=32-43\%$  (Benac i sur., 2014.).



	Sastav minerala (%)												
Kvarc	20	23	21	21	22	20	24	57	38	20	17	21	20
Kalcit	22	16	20	16	16	18	20	11	14	17	38	22	6
K-feldspat	1	2	0.2	0.6	1.3	0.3	0.9	2	0.8	0	0.3	1	0
Plagioklas	7	6	4.8	9	9	6	8	12	11	5	4	6	13
Filosilikat	50	53	54	53	52	56	47	18	36	58	41	50	61
Dubina (m)	5.0	1.0	2.5	4.5	3.0	3.4	7.0	10.3	14.0	1.0	4.5	8.5	0.0
Bušotine	G-1	G-2	G-2	G-2	G-3	G-3	G-3	G-3	G-4	G-5	G-5	G-5	G-4
Br. uzorka	1	2	3	4	6	7	8	9	13	14	15	16	22
Uzorak na grafu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

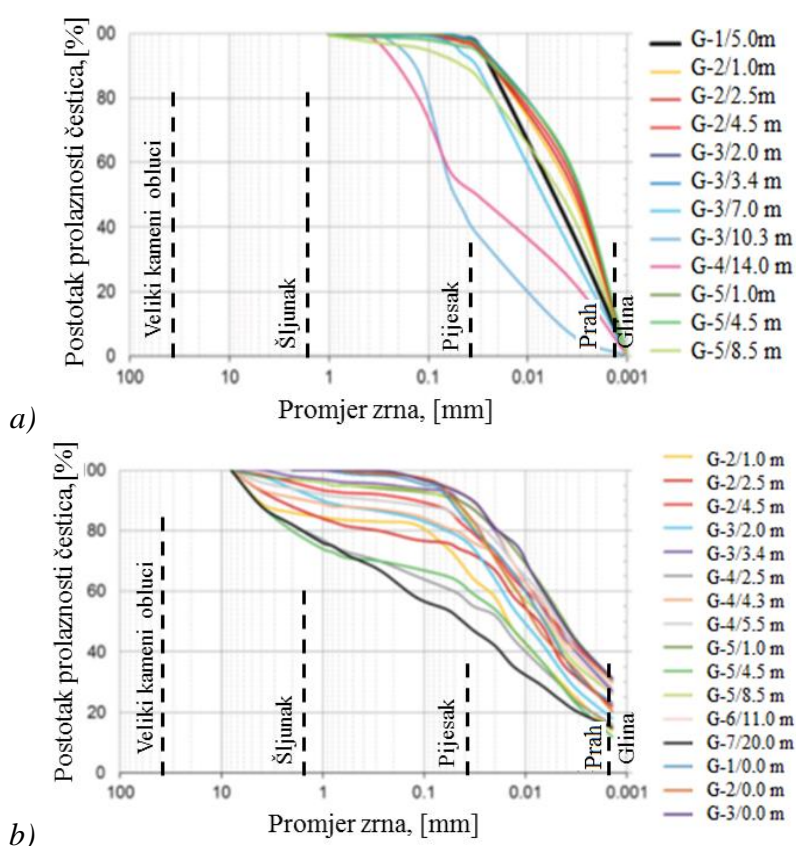
Slika 6.3. Sadržaj veličine zrna materijala uzoraka prikupljenih na klizištu Grohovo (modificirano prema Benac i sur., 2014.)



	Sastav minerala (%)												
Masivni mineral	45	40	43	39	40	39	46	70	53	37	56	43	29
< 4 μm	45	50	49	50	49	50	43	18	36	53	36	48	57
Ostatak	10	10	8	11	11	11	11	12	11	10	8	9	14
Dubina (m)	5.0	1.0	2.5	4.5	3.0	3.4	7.0	10.3	14.0	1.0	4.5	8.5	0.0
Bušotine	G-1	G-2	G-2	G-2	G-3	G-3	G-3	G-3	G-4	G-5	G-5	G-5	G-4
Br. uzorka	1	2	3	4	6	7	8	9	13	14	15	16	22
Uzorak na grafu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Slika 6.4. Minerološki sastav materijala uzoraka prikupljenih na klizištu Grohovo (modificirano prema Benac i sur., 2014.)

Prema kvantitativnoj mineraloškoj analizi u sastavu materijala u uzorcima otkrivena je prisutnost sljedećih minerala gline: kaolinit, ilit, klorit, mješoviti slojevi minerala gline, a u nekim uzorcima vermikulit i smektit (IGH, 2000.). Kvarc, kalcit i filosilikati čine 86-96% mineralnog sastava u svim provedenim uzorcima. Temeljem laboratorijskih ispitivanja provedena su ispitivanja čvrstoće polja direktnog smicanja na osam uzoraka iz kojih su određene vrijednosti vršnog kuta trenja u granicama od  $23,7^\circ < \phi < 26,1^\circ$ , te kohezija u granicama od  $1 < c < 9,5$  kPa.



**Slika 6.5.** Rezultati analize veličine zrna: a) sedimentološka metoda, b) geotehnička metoda (Granulacijska klasifikacija tla prema ISO/DIS 14688), (modificirano prema Benac i sur., 2014.)

Na temelju laboratorijskih ispitivanja uzoraka materijala može se sa velikom vjerojatnošću reći da u donjem dijelu koluvijalnog materijala u tijelu klizišta prevladavaju prašnjasto-glinovite naslage.

### 6.1.3. Laboratorijska ispitivanja uzoraka s područja klizišta Grohovo

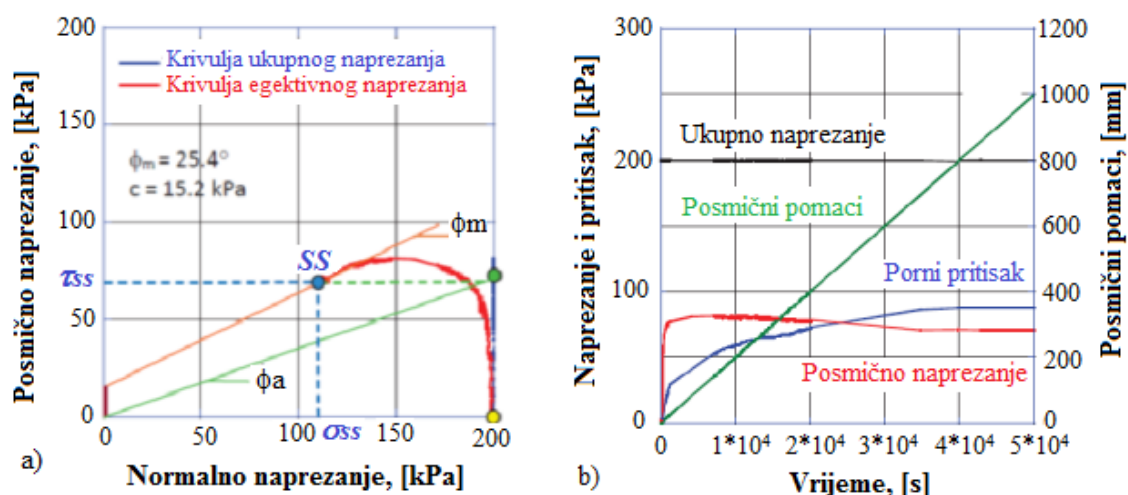
Ispitivanje tla provedena su na reprezentativnim uzorcima pomoću prstenastog aparata za izravno smicanje koji je posebno dizajniran za te potrebe (Oštrić i sur., 2012.). Uređaj je



pogodan za ispitivanje uzoraka duž klizne plohe s velikim posmičnim pomacima u statičkim i/ili dinamičkim lokalnim uvjetima. Rezultati testiranja su nužno potrebni kao ulazni podaci za LS Rapid numerički simulacijski program koji ih koristi za analizu razvoja i širenje klizne mase. Namjena uređaja je dobivanje parametara čvrstoće tla kao i dokazivanje simulacijskog testa klizanja tla.

Uzorci tla s klizišta Grohovo uzeti su iz flišnog tijela u središnjem dijelu tijela klizišta. Kontrolna brzina proveden pod stalnim smicanjem iznosila je 0,002 cm/s u nedreniranim uvjetima. Na temelju ispitivanja uzoraka dobivene su preliminarne vrijednosti pojedinih geotehničkih parametara: kut trenja  $\phi_m=25,4^\circ$ , kohezija  $c=15,2$  kPa, kut trenja  $\phi_a=20,4^\circ$  (Oštrić i sur., 2012.), (Slika 6.6.).

Za potrebe izrade simulacija u SPH 2D bilo je potrebno odrediti podatak o vrijednosti mjerodavnog pornog tlaka  $r_u$  koji je usvojen kao  $r_u=0,60$ . Vrijednost  $r_u=0,60$  odgovara vrijednosti razine podzemne vode koja je jednaka koti površine terena.



**Slika 6.6.** Nedrenirani kontrolni test brzine na zasićenom glinenom uzorku klizišta Grohovo: a) krivulja naprezanja, b) vremenska serija podataka za naprezanje, porni tlak i posmične pomake (Oštrić i sur., 2012.)

U tablica 6.1. prikazani su neki od značajnih geotehničkih parametara dobiveni laboratorijskim ispitivanjima uzoraka na području klizišta Grohovo. U istoj tablici su dani pojedini od tih parametara korišteni kao ulazni podaci u SPH 2D i SOLFEC simulacijskim programima za opis propagacije tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na području središnjeg dijela toka Rječine. Preostali ulazni parametri korišteni u simulacijskim programima SPH 2D i SOLFEC-u su dani prilikom opisa svakog od mogućih scenarija prirodnih pojava hazarda prikazanih u nastavku rada.

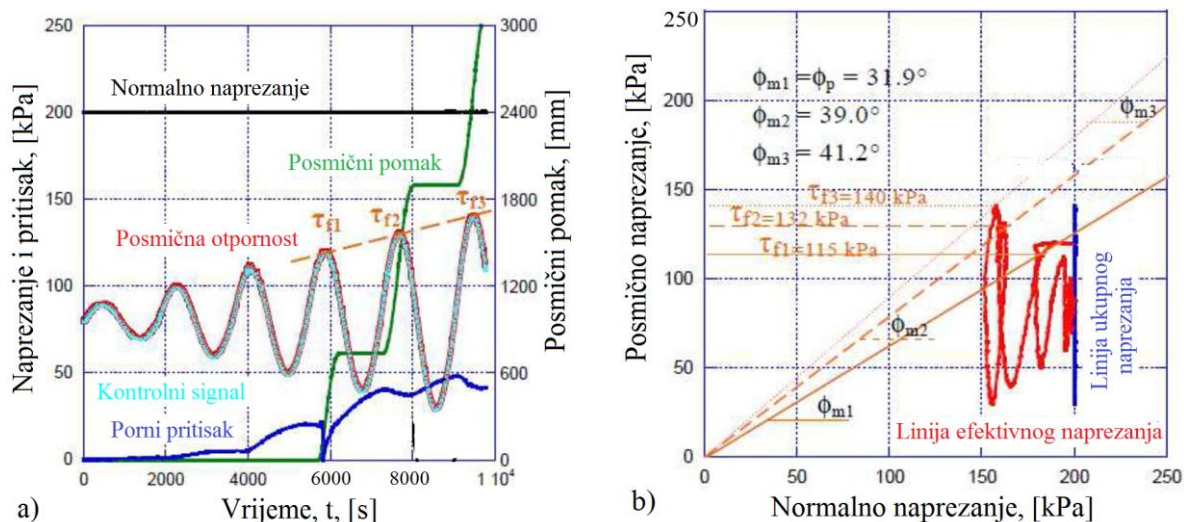


**Tablica 6.1.** Geotehnički parametri dobiveni laboratorijskim ispitivanjem uzoraka na području klizišta Grohovo sa naznakom njihovog korištenja u SPH 2D i SOLFEC simulacijskim programima (Benac i sur., 2005a, 2014.)

GEOTEHNIČKI PARAMETRI DOBIVENI LABORATORIJSKIM ISPITIVANJEM UZORAKA			Ulazni parametri korišteni u modelu	
Parametri tla	Vrijednosti	Izvor	SPH 2D	SOLFEC
			Ukupna jedinična težina mase ( $\gamma_t$ )	20 kN/m <sup>3</sup>
Statička posmična otpornost u izvornom području ( $\tau_{ss}$ )	65 kPa	Izmjereni podatak, Oštrić i sur., 2012.		
Omjer bočnog pritiska ( $k = \sigma_h / \sigma_v$ )	0,7	Procjena na temelju izmjerenih podataka	√	
Kut trenja unutar klizne mase ( $\phi_t$ )	33°	Benac i sur., 2005a	√	√ (modif.)
Kut trenja tijekom gibanja mase ( $\phi_m$ )	26°	Izmjereni podatak, Oštrić i sur., 2012.	√	√ (modif.)
Vršni kut trenja na kliznoj površini ( $\phi_p$ )	34°	Benac i sur., 2005a		
Vršna kohezija na kliznoj površini ( $c_p$ )	7,5 kPa	Benac i sur., 2005a	√ (modif.)	√
Posmični pomak na početku smanjenja čvrstoće ( $DL$ )	30 mm	Izmjereni podatak, Oštrić i sur., 2012.		
Posmični pomak na kraju smanjenja čvrstoće ( $DU$ )	1000 mm	Izmjereni podatak, Oštrić i sur., 2012.		
Stopa generiranja pornog pritiska ( $B_{ss}$ )	0,7	Procjena	√	
Kohezija unutar mase ( $c_t$ )	0,0 kPa	Benac i sur., 2005a	√	√ (modif.)
Kohezija na kliznoj površini tijekom gibanja ( $c_m$ )	0,0 kPa	Benac i sur., 2005a	√	
Višak pornog pritiska ( $r_u$ )	0,0 - 0,6	Predpostavka	√	
Koeficijent konsolidacije ( $C_v$ )	$6 \cdot 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s	Procjena	√	

Za potrebe izrade numeričkog modela LS-Rapid i SPH 2D dubinski integriranog modela provedeno je dodatno ispitivanje flišnog uzorka sa klizišta Grohovo. Uzorak je podvrgnut početnom normalnom naprezanju od 200 kPa i početnom naprezanju uslijed trenja od 80 kPa primijenjenog prije cikličkog smicanja i učitan s korakom pojačavanja od 10 kPa/ciklusu pri 0,1 Hz. Sa slike 6.7.a) se jasno vidi da je do pomaka od 700 mm došlo nakon 6 s, te da je generiran porni tlak od približno 20 kPa.

Rezultati provedeni nedreniranim cikličkim testom su pokazali da je prema uzorku sa klizišta Grohovo došlo do porasta kuta trenja i posmične otpornosti. Stoga se može zaključiti da je tlo (uzorak) sa klizišta Grohovo sposoban podnijeti značajnu seizmičku aktivnost (opterećenje) prije nego što dođe do njegova sloma i formiranja pojave klizanja.



**Slika 6.7.** Nedrenirani test cikličkog opterećenja na saturiranom glinovitom uzorku sa klizišta Grohovo ( $B_D=0,96$ : početna suha gustoća materijala:  $1,51 \text{ g/cm}^3$ , specifična gravitacija,  $G_s=2,66$ ): a) vremenska serija podataka naprezanja, pritiska i posmičnih pomaka, b) krivulja naprezanja (modificirano prema Benac i sur., 2005b, 2006.)

#### 6.1.4. Hidrološke i hidrogeološke značajke uzoraka materijala na klizištu Grohovo

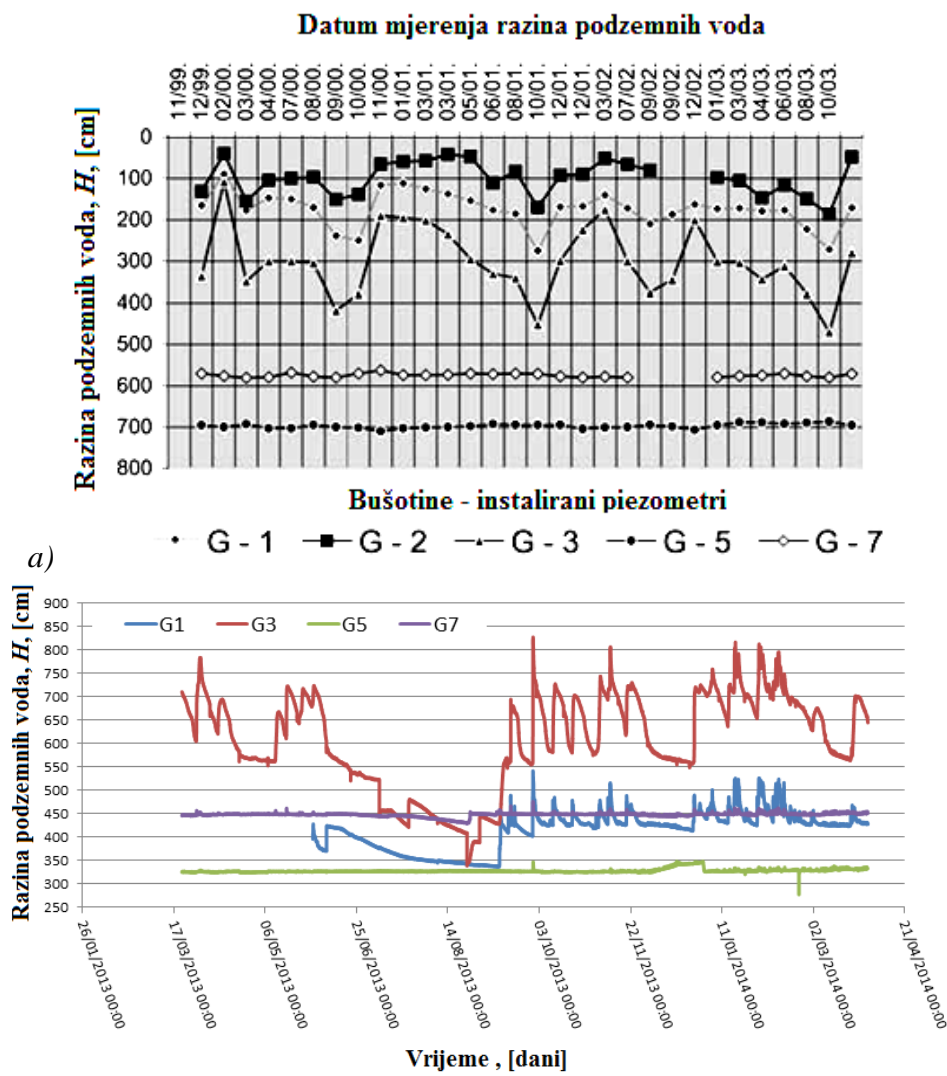
Tok podzemne vode u stijenskoj masi na području klizišta Grohovo znatno varira, od vrlo brzog do sporog kretanja, ovisno o prirodi depozitnog materijala. Količina vode u flišnoj zoni se mijenja ovisno o uvjetima oborina, tako da se tek nakon dan-dva formira značajni podzemni tok. Postoje dokazi o protoku vode na granici stijene u podlozi i poremećenog nestabilnog materijala uz liniju sa paleo-reljefom (Benac i sur., 2005b). Tok podzemnih voda se procjenjuje na kapacitet od 2 l/s u periodu suhostaja (period od travnja do kolovoza) i više od 20 l/s u kišnom razdoblju (period rane jeseni i kasne zime). U proljetnom periodu kapacitet vode može narasti na vrijednost od 30 l/s. Te količine vode izvire kroz šupljine u podnožju samog klizišta nakon razdoblja intenzivne oborine. U tablici 6.2. su dane vrijednosti određenih razina vode u pojedinim piezometrima instaliranim na području klizišta Grohovo (Slika 2.3.) mjerene u periodu od studenog 1999. do listopada 2003.

**Tablica 6.2.** Broj uzoraka i razine vode u pojedinim piezometrima na kojima su uzimani uzorci sa klizišta Grohovo (Benac i sur., 2005b.)

Broj uzorka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Piezometar	G-2	G-2	G-2	G-3	G-3	G-4	G-4	G-4	G-5	G-5
Dubina (m)	1,0	2,5	4,5	2,0	3,0	2,6	4,3	5,5	1,0	4,5
Broj uzorka	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Piezometar	G-5	G-4	G-3	G-1	G-3	G-3	G-4	G-6	G-7	
Dubina (m)	8,5	na površini	3,4	5,0	7,0	10,3	14,0	11,0	20,0	

Radi vizualne predodžbe, dani su grafički prikazi kolebanja razina podzemnih voda u pojedinim piezometrima na klizištu Grohovo u periodu od studenog 1999. do listopada 2003. (Slika 6.8.a)), te u periodu od siječnja 2013. do travnja 2014. godine (Slika 6.8.b)).

Razine podzemnih voda neznatno variraju za manje od 10 cm u gornjim bušotinama kliznog tijela (G-5 i G-7), dok su u nižim bušotinama (G-1, G-2 i G-3) oscilacije vrlo značajne i sežu do nekoliko metara. Najniže razine podzemnih voda zabilježene su na kraju sušnih razdoblja u ljeto 2000., 2001. i 2003., a najviše razine podzemnih voda u prosincu 1999., studenom 2000., ožujku 2001. i prosincu 2002. Međutim, treba napomenuti da je u proteklih 4-5 godina (2009.-2014.) tijekom razdoblja hidrološkog monitoringa zabilježeno nekoliko vrlo značajnih suhih i vlažnih razdoblja na području središnjeg dijela toka Rječine.



**Slika 6.8.** Oscilacije razina podzemne vode na klizištu Grohovo, a) u periodu od studenog 1999. do listopada 2003. (Benac i sur., 2005b), te b) u periodu od siječnja 2013. do travnja 2014. godine (Žic i sur., 2013b)

## 6.2. Simulacijski prikazi u SOLFEC simulacijskom programu (klizište Grohovo)

Primjenom SOLFEC simulacijskog programa (računalnog koda) izrađeno je nekoliko numeričkih simulacija za opis mogućeg nastanka klizanja, te formiranja tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na klizištu Grohovo. Napravljeno je nekoliko mogućih scenarija međudjelovanja dvaju ili više klizišta u blizini sela Grohova, te formiranje toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine. Na temelju SOLFEC simulacijskog programa izvršena je analiza horizontalnih  $\Delta x$  i  $\Delta y$  pomaka, određene su tangencijalne sile uslijed kretanja stijenske mase sa dnom padine, rezne sile, dan je prikaz kontaktnih sila među kamenim stijenskim blokovima koji se propagiraju nizvodno uz padinu, brzine napredovanja klizne mase kao i drugi fizikalni parametri koji definiraju kretanje takvog tipa klizanja. Simulacijski prikazi i analize proračuna za nekoliko mogućih scenarija dani su u nastavku rada.

### 6.2.1. Scenarij 1.

Kao posljedica mogućeg hazarda na području srednjeg dijela toka Rječine (blizina sela Grohovo) promatran je scenarij mogućeg klizanja mase i posljedično s time formiranje toka krupnozrnatog materijala koji se nizvodno propagira prema gradu Rijeci. Ulazni parametri koji su se pritom koristili u modelu bili su koeficijent trenja  $m=0,1$ , modul elastičnosti  $E=15 \cdot 10^9$  Pa, Poissonov koeficijent  $\nu=0,25$  gustoća materijala  $\rho=1800$  kg/m<sup>3</sup>, promjer krupnozrnatog materijala  $D=0,25$  m. Dimenzije inicirajuće (potencijalne) klizne zone uzete su sa vrijednosti 20\*20 m, dok je visina krupnozrnatog materijala u početnom trenutku, jednako raspoređena po cijeloj zoni, iznosila 10 m. Prostorna discretizacija je provedena na bazi ekvidistantne mreže dimenzija 10\*10 m, dok je vremenski inkrement u proračunu iznosio  $\Delta t=0,1$  s. Na temelju numeričkih simulacija (Slika 6.9.) dobivene su izlazne vrijednosti u modelu dane u Tablici 6.3.

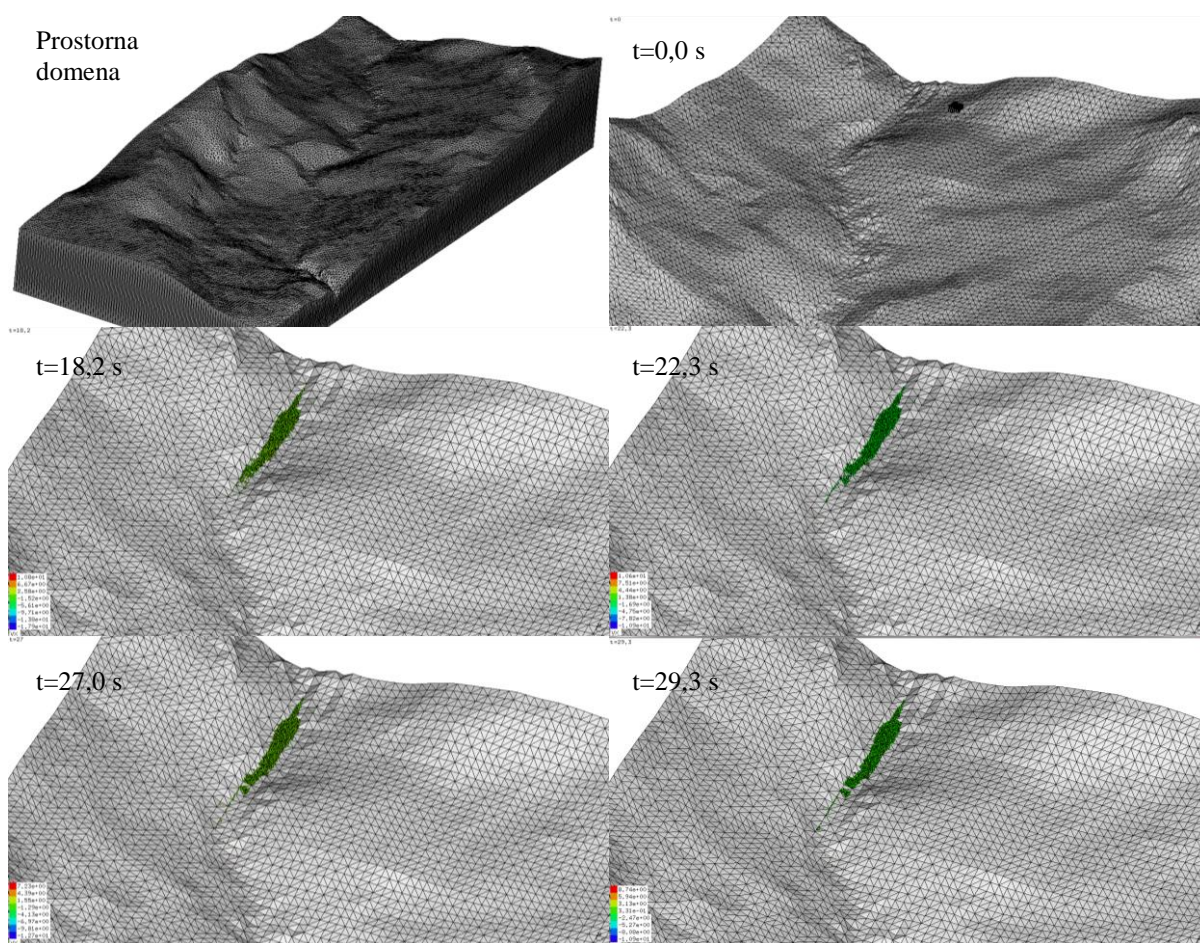
Tablica 6.3. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 1.

Maksimalna brzina toka krupnozrnatog materijala, $v$ , [m/s]	Doseg toka krupnozrnatog materijala, $L$ , [m]	Maksimalna dubina krupnozrnatog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupnozrnatog materijala, $A$ , [ha]
19,3	830	8,2	2,75

Maksimalna brzina toka krupnozrnatog materijala određena je kao brzina čela vala. Za određivanje dosega toka krupnozrnatog materijala korišten je AutoCad 2013 računalni program u kojem je za svaki scenarij (za određeni vremenski inkrement unutar simulacije)



importiran simulacijski prikaz. Na temelju skaliranja dobiveno je mjerodavno mjerilo u AutoCad programu, te se je izvršilo iscrtavanje putanje toka i njegov konačni doseg u odnosu na težište inicijalne klizne mase. Maksimalna dubina krupnozrnatog materijala odredila se direktno preko simulacijskih prikaza korištenjem GID 7.7.6. simulacijskog grafičkog procesora, dok je za potrebe određivanja zahvaćene površine terena uslijed propagacije krupnozrnatog materijala korišten AutoCad program. Ukupni početni volumen krupnozrnatog materijala određen je izravno u SOLFEC programu na temelju definiranog promjera i gustoće krupnozrnatog materijala.



**Slika 6.9.** Simulacijski prikaz klizanja i formiranja toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 1.

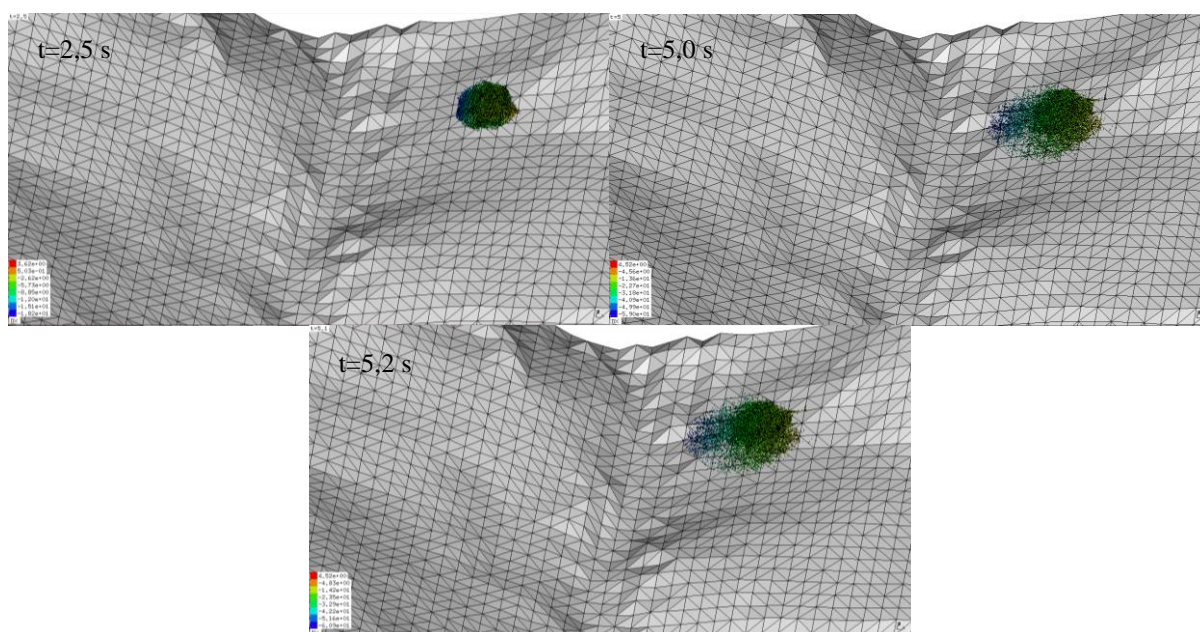
### 6.2.2. Scenarij 1.1.

U ovom scenariju se razmatrao identičan slučaj kao predhodni (Scenarij 1.) s naznakom da su dimenzije početne klizne zone uzete sa vrijednosti 30\*30 m, dok je visina krupnozrnatog materijala u trenutku pokretanja (jednako raspoređena po cijeloj početnoj kliznoj zoni) iznosila 20 m. Prostorna diskretizacija je provedena na bazi ekvidistantne mreže

dimenzija 10\*10 m, dok je vremenski inkrement u proračunu iznosio  $\Delta t=0,1$  s. Na temelju numeričkih simulacija (Slika 6.10.) dobivene su izlazne vrijednosti iz proračuna prikazane u Tablici 6.4.

Tablica 6.4. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 1.1.

Maksimalna brzina toka krupnozrnatog materijala, $v$ , [m/s]	Doseg toka krupnozrnatog materijala, $L$ , [m]	Maksimalna dubina krupnozrnatog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupnozrn. materijala, $A$ , [ha]
22,1	1108	8,7	2,26



**Slika 6.10.** Simulacijski prikaz klizanja i formiranja toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 1.1.

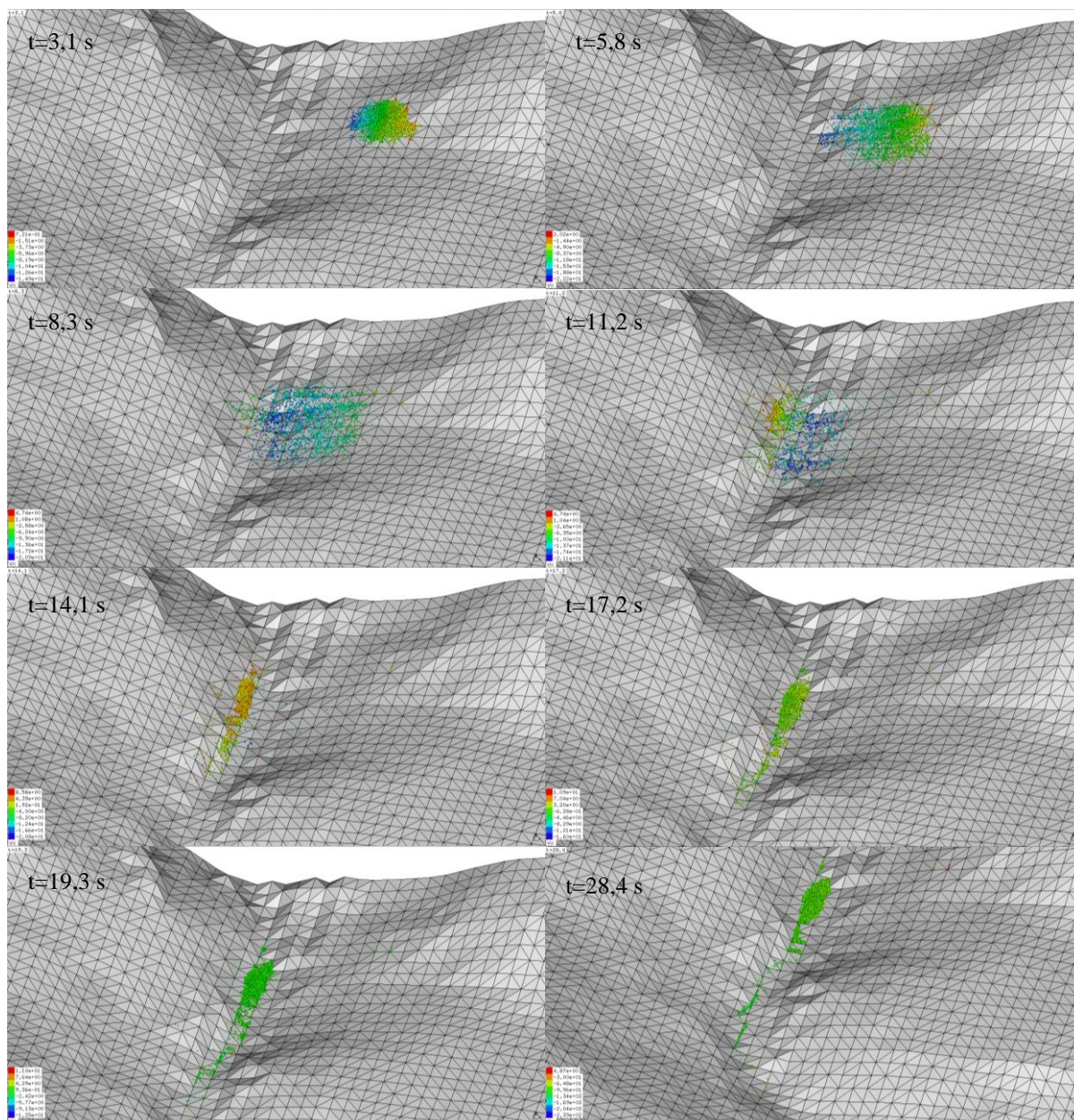
### 6.2.3. Scenarij 1.2.

U narednom scenariju promatrana je mogućnost formiranja toka krupnozrnatog materijala i njegova propagacija nakon pokretanja klizne mase s klizišta Grohovo. Ulazni parametri s kojima je kreirana numerička simulacija bili su koeficijent trenja  $m=0,2$ , modul elastičnosti  $E=15 \cdot 10^9$  Pa, Poissonov koeficijent  $\nu=0,25$  gustoća materijala  $\rho=1800$  kg/m<sup>3</sup>, promjer krupnozrnatog materijala  $D=0,2$  m. Dimenzije početne klizne zone uzete su sa vrijednosti 30\*30 m, dok je visina krupnozrnatog materijala u početnom trenutku (jednako raspoređena po cijeloj početnoj kliznoj zoni) iznosila 20 m. Ekvidistantna mreža dimenzija 10\*10 m korištena je za prostornu diskretizaciju, dok je vremenski inkrement u proračunu iznosio  $\Delta t=0,1$  s. Na temelju dobivenih numeričkih simulacija (Slika 6.11.) dobivene su izlzne vrijednosti prikazane u Tablici 6.5.



Tablica 6.5. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 1.2.

Maksimalna brzina toka krupnozrnatog materijala, $v$ , [m/s]	Doseg toka krupnozrnatog materijala, $L$ , [m]	Maksimalna dubina krupnozrnatog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupnozrn. materijala, $A$ , [ha]
21,8	1163	8,4	2,17



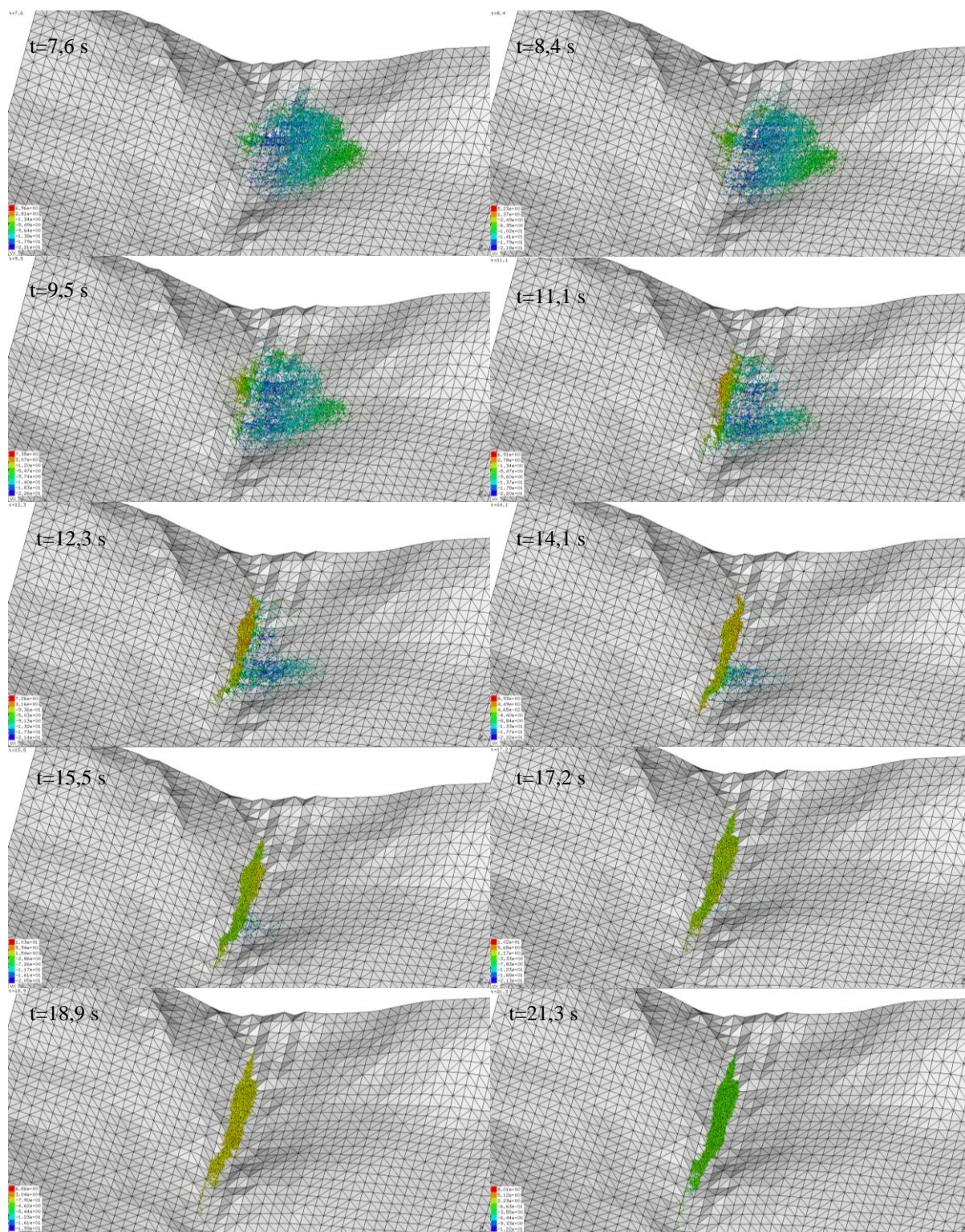
**Slika 6.11.** Simulacijski prikaz klizanja i formiranja toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 1.2.

#### 6.2.4. Scenarij 1.3.

Temeljem scenarija 1.2. dodatno je proveden numerički proračun na istom modelu, ali s promjenjenim ulaznim parametrima. U odnosu na predhodni scenarij koeficijent trenja je iznosio  $m=0,1$ , dok je gustoća materijala uzeta s vrijednosti  $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$ . Ostali parametri u



modelu se nisu mijenjali. Prostorna discretizacija je provedena na bazi ekvidistantne mreže dimenzija 10\*10 m, dok je vremenski inkrement u proračunu iznosio  $\Delta t=0,1$  s (Slika 6.12.).



**Slika 6.12.** Simulacijski prikaz klizanja i formiranja toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 1.3.



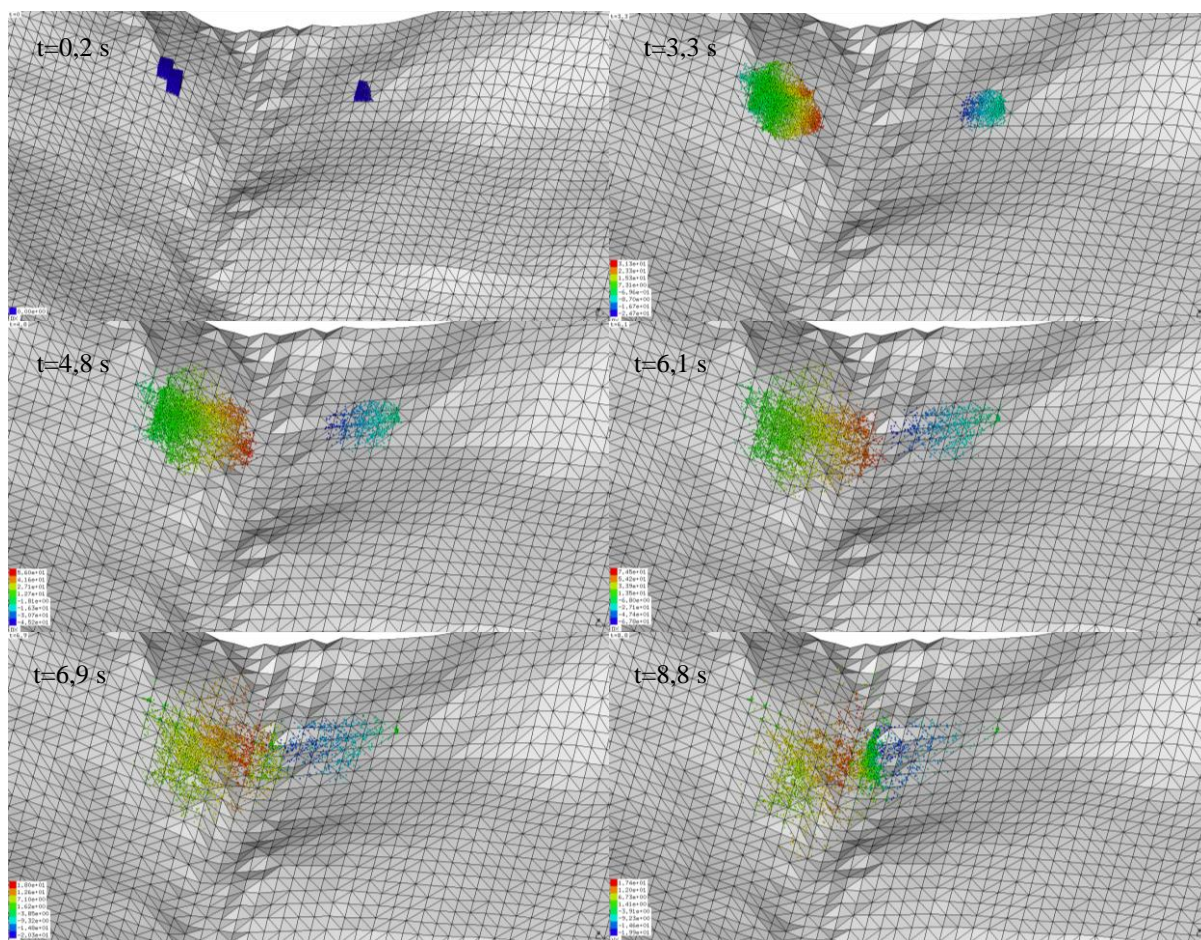
Na temelju numeričkih simulacija (Slika 6.12.) dobivene su izlazne vrijednosti (Tablica 6.6.).

Tablica 6.6. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 1.3.

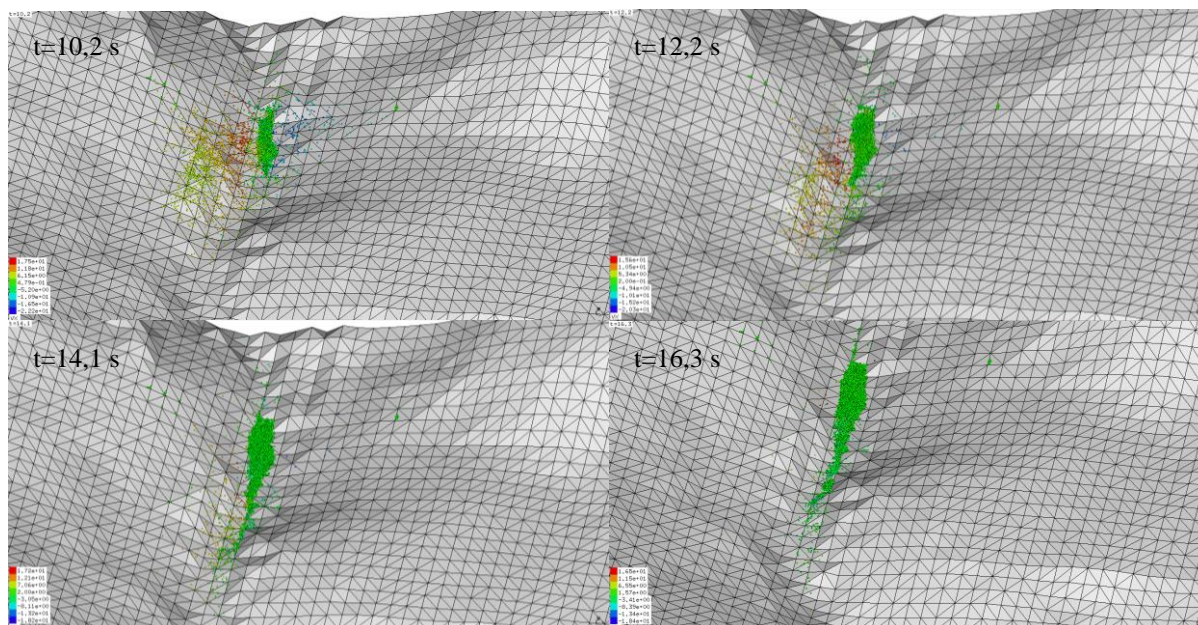
Maksimalna brzina toka krupnozrnatog materijala, $v$ , [m/s]	Doseg toka krupnozrnatog materijala, $L$ , [m]	Maksimalna dubina krupnozrnatog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupnozrnatog materijala, $A$ , [ha]
24,2	1235	9,1	2,37

### 6.2.5. Scenarij 2.

U ovom je scenariju promatrana mogućnost formiranja toka krupnozrnatog materijala koji nastaje odronom stijenske mase s dvije potencijalne klizne mase u blizini sela Grohovo. Manja klizna masa se nalazi na SI padini na poziciji klizišta Grohovo (volumena  $V_1=13500 \text{ m}^3$ ), dok je druga veća klizna masa (volumena  $V_2=36000 \text{ m}^3$ ) na SZ padini i ona sa svojim volumenom predstavlja većinski dio u propagacijskoj formi toka krupnozrnatog materijala (Slika 6.13.).



*Slika 6.13. Simulacijski prikaz klizanja s dvije klizne mase i formiranje toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 2.*



**Slika 6.13.** Simulacijski prikaz klizanja s dvije klizne mase i formiranje toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 2., nastavak

Ulazni parametri koji su primjenjeni u numeričkom modelu su koeficijent trenja  $m=0,1$ , modul elastičnosti  $E=15 \cdot 10^9$  Pa, Poissonov koeficijent  $\nu=0,25$ , gustoća materijala kliznih masa  $\rho=2000$  kg/m<sup>3</sup>, promjer krupnozrnatog materijala  $D=0,2$  m. Dimenzije početne klizne zone uzete su sa vrijednosti  $30 \cdot 30$  m, dok je visina krupnozrnatog materijala u početnom trenutku (linearno raspoređena po početnoj kliznoj zoni) iznosila od 10-20 m. Prostorna discretizacija je provedena na bazi ekvidistantne mreže dimenzija  $10 \cdot 10$  m, dok je vremenski inkrement u proračunu iznosio  $\Delta t=0,1$  s. Na temelju dobivenih numeričkih simulacija (Slika 6.13.) dobivene su izlazne vrijednosti prikazane u tablici 6.7.

Tablica 6.7. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 2.

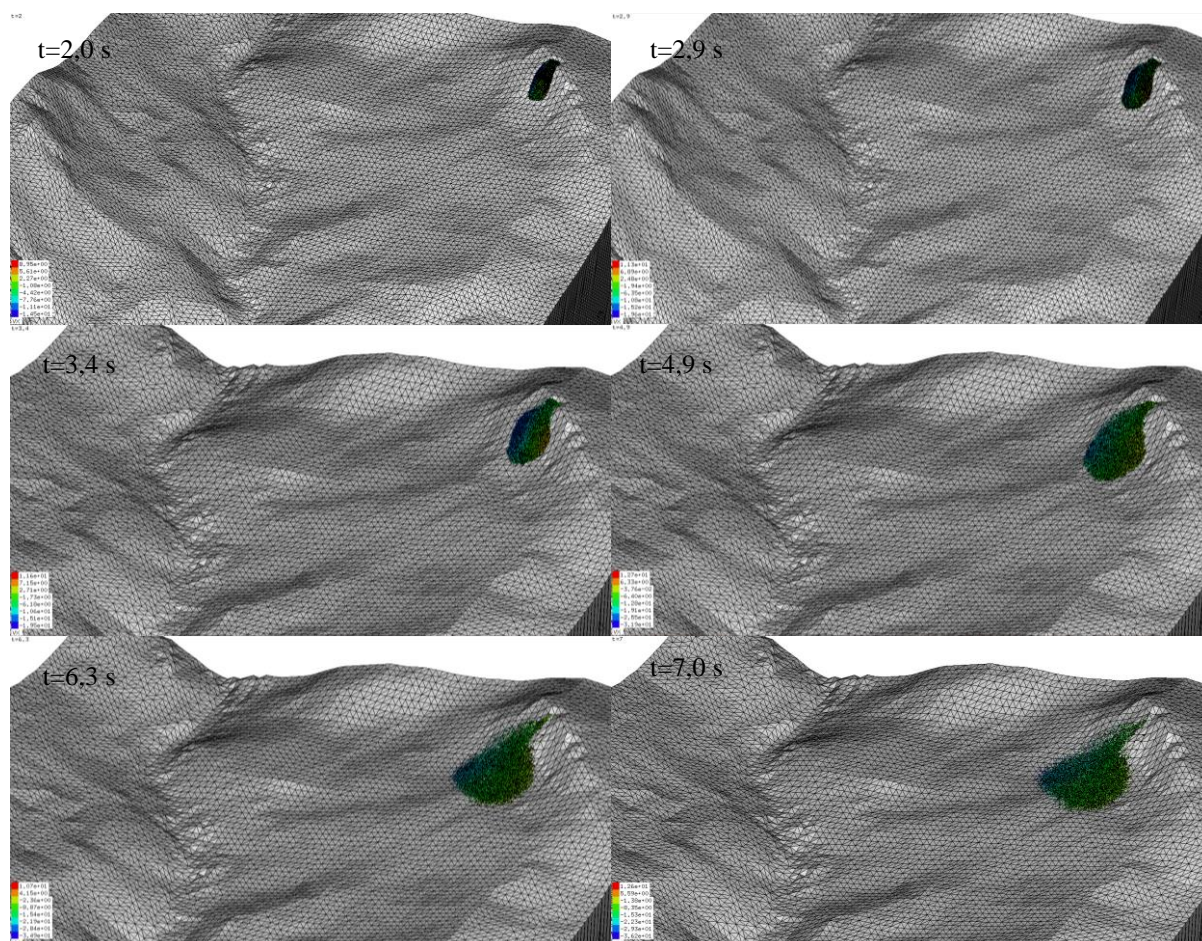
Maksimalna brzina toka krupnozrnatog materijala, $v$ , [m/s]	Doseg toka krupnozrnatog materijala, $L$ , [m]	Maksimalna dubina krupnozrnatog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupnozrn. materijala, $A$ , [ha]
18,6	1327	10,4	2,74

### 6.2.6. Scenarij 3.

U ovom scenariju se željelo odrediti i analizirati doseg toka krupnozrnatog materijala i njegova brzina koji nastaju pokretanjem klizne mase na području klizišta Grohovo (Slika 6.14.). Kao početni (inicijalni) volumen klizne mase odabrana je klizna ploha koja se nalazi na vrhu klizišta Grohovo. Kao ulazni podaci u numeričkom modelu korišteni su koeficijent trenja  $m=0,15$ , modul elastičnosti  $E=15 \cdot 10^9$  Pa, Poissonov koeficijent  $\nu=0,25$  gustoća



materijala  $\rho=1800 \text{ kg/m}^3$ , promjer krupnozrnatog materijala  $D=0,2 \text{ m}$ . Dimenzije početne klizne zone (mase volumena  $V=20000 \text{ m}^3$ ) uzete su s vrijednosti  $50*20 \text{ m}$ , dok je visina krupnozrnatog materijala u početnom trenutku (jednako raspoređena po cijeloj početnoj zoni) iznosila  $20 \text{ m}$ . Prostorna discretizacija je provedena na bazi ekvidistantne mreže dimenzija  $10*10 \text{ m}$ , dok je vremenski inkrement u proračunu iznosio  $\Delta t=0,1 \text{ s}$ . Izlazne vrijednosti u modelu za ovaj mogući scenarij dane su u Tablica 6.8.



**Slika 6.14.** Simulacijski prikaz odrona stijenske mase i formiranje lavine krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 3.

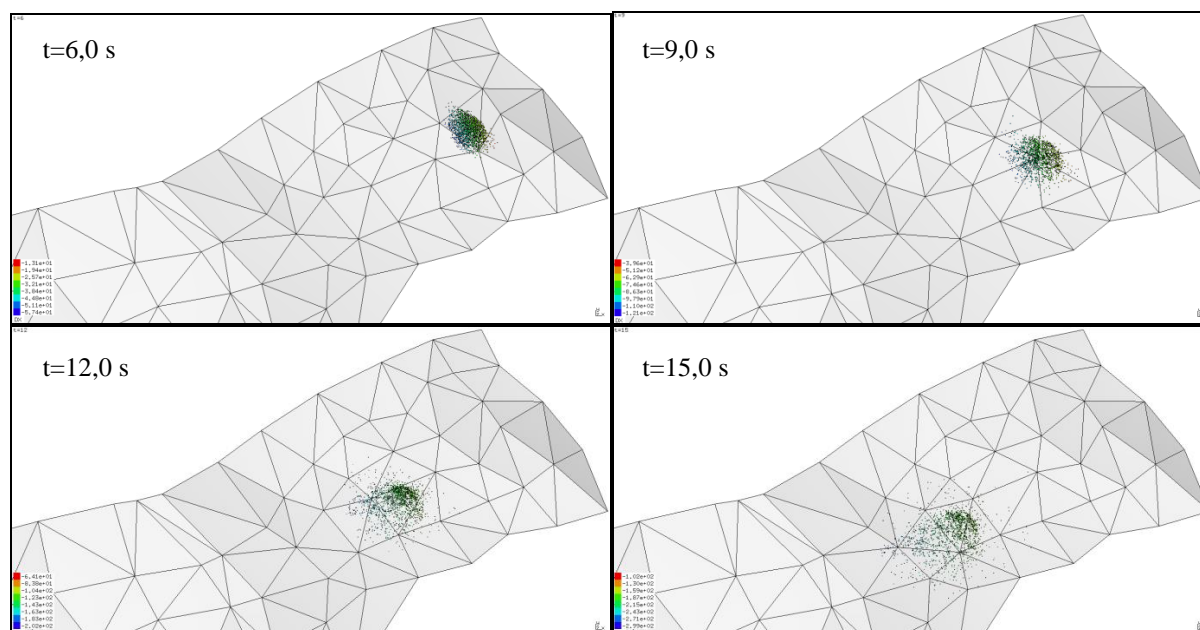
Tablica 6.8. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 3.

Maksimalna brzina toka krupnozrnatog materijala, $v$ , [m/s]	Doseg toka krupnozrnatog materijala, $L$ , [m]	Maksimalna dubina krupnozrnatog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupnozrn. materijala, $A$ , [ha]
23,8	620	8,4	1,36

### 6.2.7. Scenarij 4.

U narednom scenariju je promatrana propagacija krupnozrnatog materijala, odnosno klizanje formirane klizne zone na vrhu klizišta Grohovo dobivena na bazi postojećih izohipsi.

Dimenzije početne klizne zone uzete su sa vrijednosti 30\*20 m, dok je visina krupnozrnatog materijala u početnom trenutku (linearno raspoređena po kliznoj zoni) iznosila od 1-10 m (Slika 6.15.). Početna klizna masa ima volumen od  $V=1400 \text{ m}^3$ . Prostorna discretizacija je provedena trokutnom mrežom različitih elemenata, dok je vremenski inkrement u proračunu iznosio  $\Delta t=0,1 \text{ s}$ . Ulazni parametri koji su se pritom koristili u modelu bili su koeficijent trenja  $m=0,15$ , modul elastičnosti  $E=15 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ , Poissonov koeficijent  $\nu=0,25$  gustoća materijala  $\rho=2100 \text{ kg/m}^3$ , promjer krupnozrnatog materijala  $D=0,2 \text{ m}$ . Iz numeričkih simulacija (Slika 6.15.) dobivene su izlazne vrijednosti iz proračuna (Tablica 6.9.).

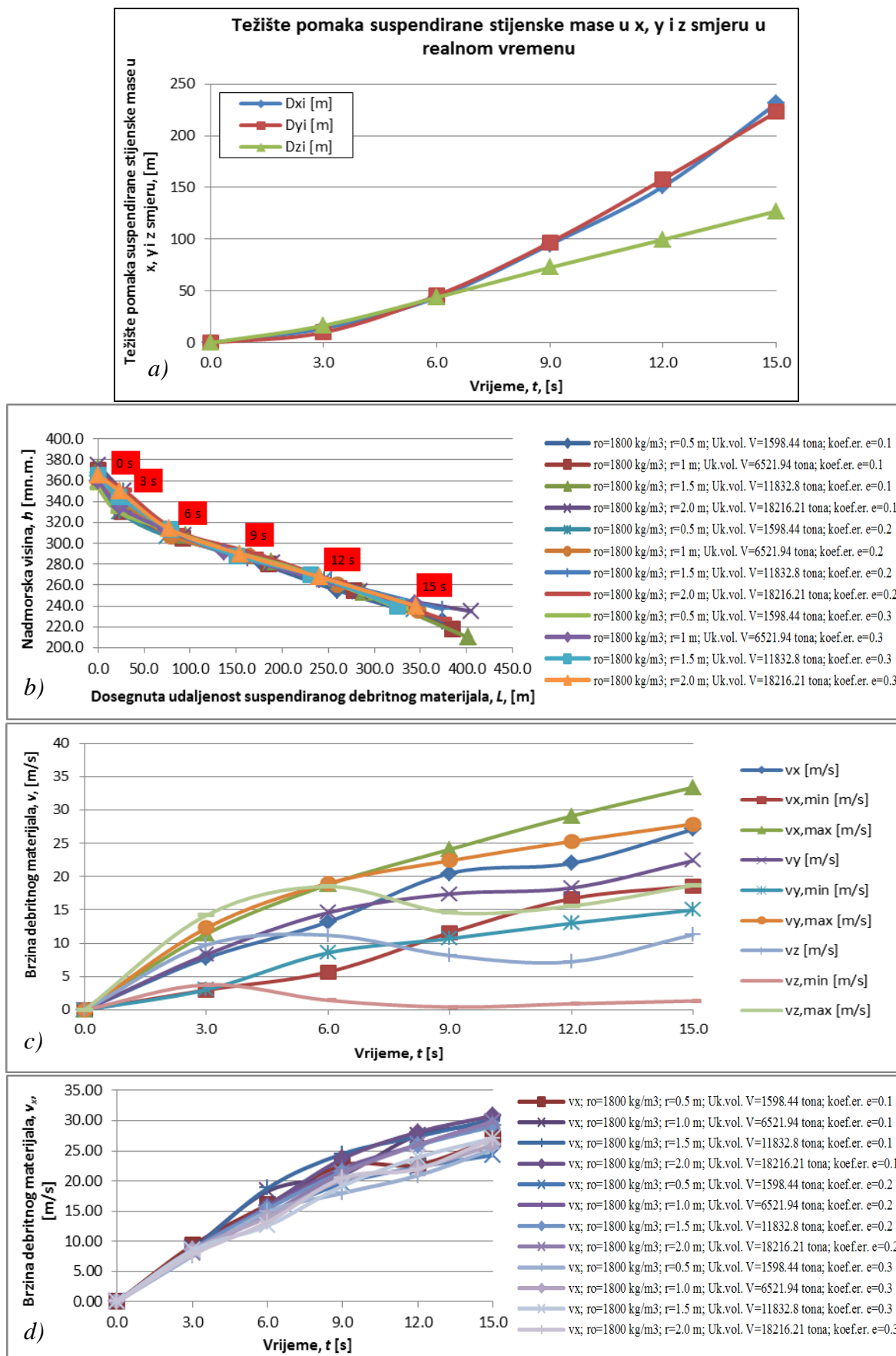


**Slika 6.15.** Simulacijski prikaz klizanja i formiranja lavine krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo izrađena SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 4.

Tablica 6.9. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 4.

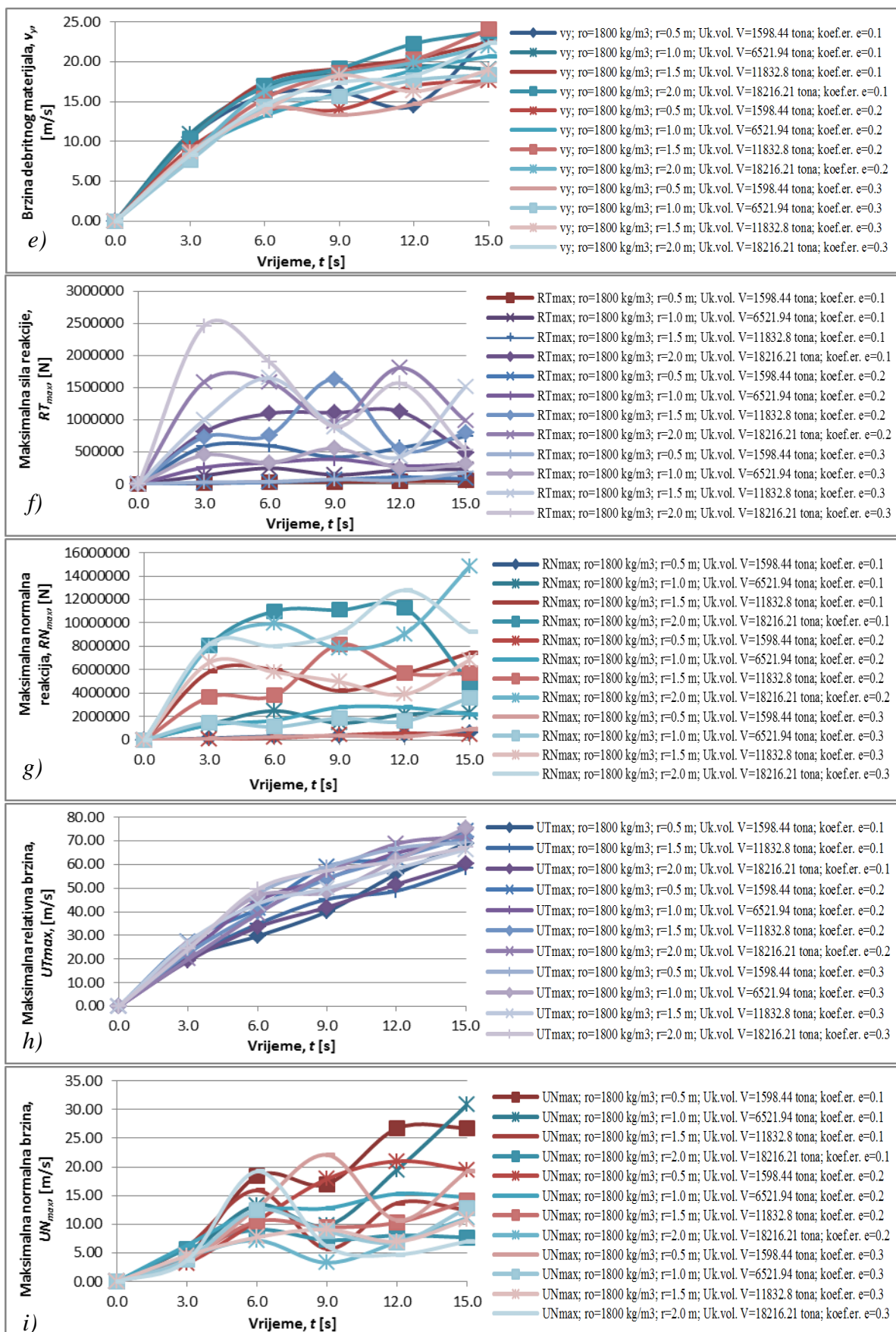
Maksimalna brzina toka krupnozrnatog materijala, $v$ , [m/s]	Doseg toka krupnozrnatog materijala, $L$ , [m]	Maksimalna dubina krupnozrnatog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupnozrnatog materijala, $A$ , [ha]
32,6	407	7,3	1,29

SOLFEC simulacijski program je korišten za oko 90-tak numeričkih simulacija mogućih scenarija formiranja tokova i lavina krupnozrnatog materijala na širem području klizišta Grohovo. Na temelju dobivenih simulacija provedena je analiza i usporedba pojedinih fizikalnih veličina toka krupnozrnatog (debritnog) materijala u ovisnosti o vremenu: doseg udaljenosti krupnozrnatog materijala, brzine toka  $v_x$ ,  $v_y$  i  $v_z$ , maksimalne normalne i posmične sile reakcije, te maksimalne normalne i posmične brzine (Slika 6.16.a-i).



Slika 6.16. Grafička analiza fizikalnih veličina toka (lavine) krupnozrnatog materijala s klizišta Grohovo određenih primjenom SOLFEC simulacijskog programa





Slika 6.16. Grafička analiza fizikalnih veličina toka (lavine) krupnozrnatog materijala s klizišta Grohovo određenih primjenom SOLFEC simulacijskog programa, nastavak



### **6.3. SPH 2D simulacije na klizištu Grohovo**

U ovom dijelu doktorskog rada promatra se posljedica nastalog toka sitnozrnatog materijala iz 1908. godine nedaleko sela Grohova i posljedice na središnji i donji dio toka vodotoka Rječine. Pritom je korišten SPH 2D po dubini integrirani model kako bi se istražile i utvrdile posljedice tog događaja. Geološke i hidrološke značajke područja na kojem se promatra tok sitnozrnatog materijala, kao i nestabilnost šireg područja oko klizišta Grohovo opisani su u trećem poglavlju rada. Ono što je poznato iz povijesnih dokumenata je to da je tok sitnozrnatog materijala pokrenut materijalom s klizišta Grohovo u blizini istoimenog sela u kojoj je početkom 20.-tog stoljeća živjelo nekoliko obitelji. Također je poznato da je tok sitnozrnatog materijala bio uzrokovan jakim kišama u kratkom vremenskom razdoblju (procijenjena vrijednost je oko 220 mm u 7 sati). Prema povijesnim zapisima (Hrvatski državni arhiv grada Rijeke, JU 49 (Prilog 13), JU 51 (Prilog 45)) tok sitnozrnatog materijala se zaustavio u srednjem kanjonskom dijelu toka Rječine, između mosta Pašac i sela Žakalj. Prema sadašnjoj konfiguraciji terena vodotoka Rječine (koji se nije u međuvremenu značajno promijenio), procjenjuje se da je doseg toka sitnozrnatog materijala iz 1908. godine dosegao udaljenost između 2300 i 2500 metara u odnosu na mjesto početnog pokretanja mase.

#### **6.3.1. Numeričke simulacije i analiza rezultata**

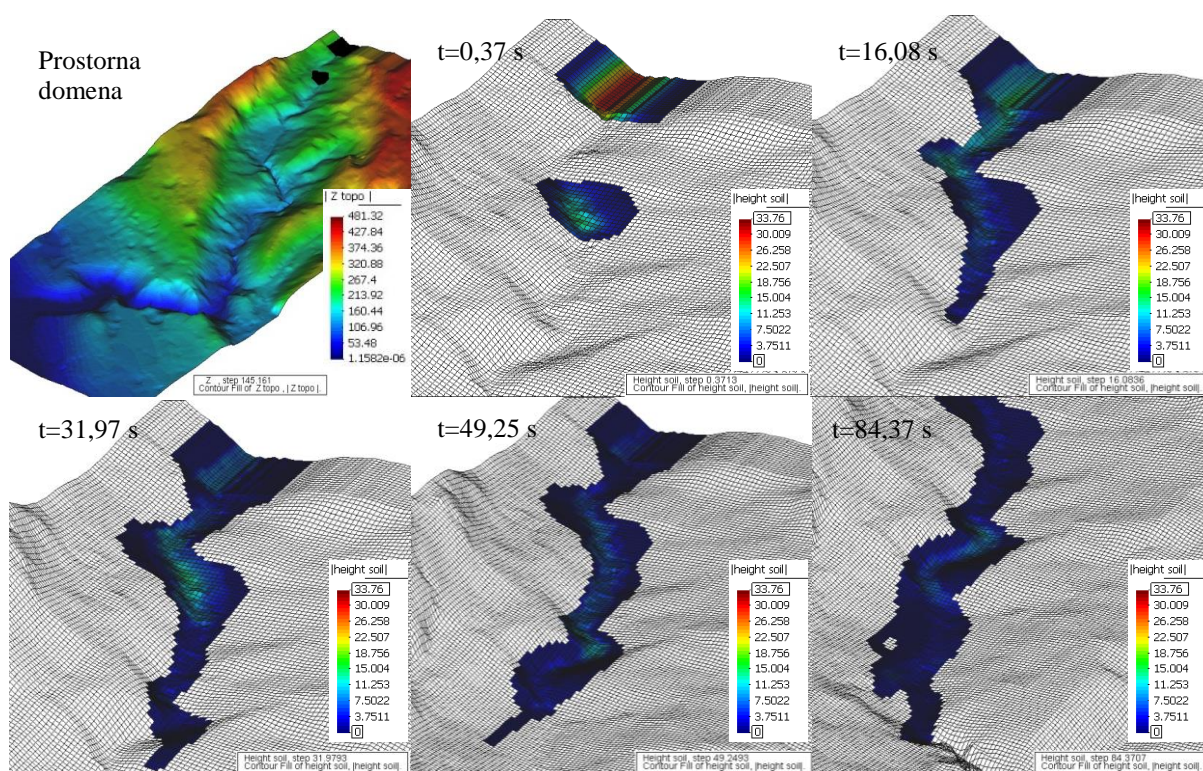
U nastavku su prikazane simulacije dobivene na temelju tri reološka modela koji se koriste za opis propagacije toka sitnozrnatog materijala. Unutar tih modela su primjenjeni erozijski zakoni po Hungru i Egashiri za erozijsko djelovanje tekućine po dnu korita, kao i implementacija novog predloženog erozijskog zakona opisanog u Poglavlju 5. Za potrebe izrade numeričkih simulacija kreiran je digitalni elevacijski model terena izrađen na temelju ArcGIS 10.1 računalnog programa s ekvidistantnom mrežom od 2, 5 i 10 m, Slika 2.7. Parametri tla korišteni u SPH 2D računalnim simulacijama (Tablica 6.1.) određeni su na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja na nedreniranim uzorcima (Benac i sur., 2005b). Relevantni parametar u simulacijama bio je koeficijent vezan uz porni tlak  $r_u$ . Povećanje razina podzemnih voda u numeričkom modelu se izražava vrijednošću odnosa pornog tlaka  $r_u=0,60$ . Vrijednost  $r_u=0,60$  odgovara razini podzemne vode na površini terena.

Prilikom proučavanja toka sitnozrnatog materijala na ispitivanom području uzeta je vrijednost gustoće materijala od  $2100 \text{ kg/m}^3$ . Reološki zakoni koji se koriste za simulaciju takvog tipa tečenja su Newtonov zakon tekućine u turbulentnom režimu (SIMULACIJA 1), Newtonov zakon tekućine u turbulentnom režimu s utjecajem erozijskog djelovanja (SIMULACIJA 2) i realan Binghamov zakon tekućine (SIMULACIJA 3), (Pastor i sur.,

2004., 2007., 2015.; Calvo i sur., 2014.). Kao ulazni parametri za opis rekonstrukcijskog događaja iz 1908. godine uzeti su koeficijent turbulencije s vrijednosti  $200\div 500 \text{ m/s}^2$ , kut trenja od  $27^\circ$  ( $\tan\phi=0,466$ ) i kohezija koja je uzeta s vrijednosti nula. U nastavku su prikazani rezultati dobiveni na temelju skupa parametara iz tablice 6.1., te nekoliko numeričkih simulacija koje proizlaze na temelju pretpostavke potpuno zasićenog tla.

Erozijski procesi su modelirani pomoću erozijskog zakona po Egashiri (SIMULACIJA 2) i Hungra (SIMULACIJA 3) sa sljedećim parametrima: koncentracija sedimenta protoka,  $c=0,64$ , koncentracija sedimenata dna korita,  $c_*=0,7$  i empirijskom konstantom,  $K=0,012$ .

Prvi SPH 2D numerički model koji je prikazan u nastavku vezan je za Newtonov zakon s turbulentnim režimom tečenja (Slike 6.17. i 6.18.).

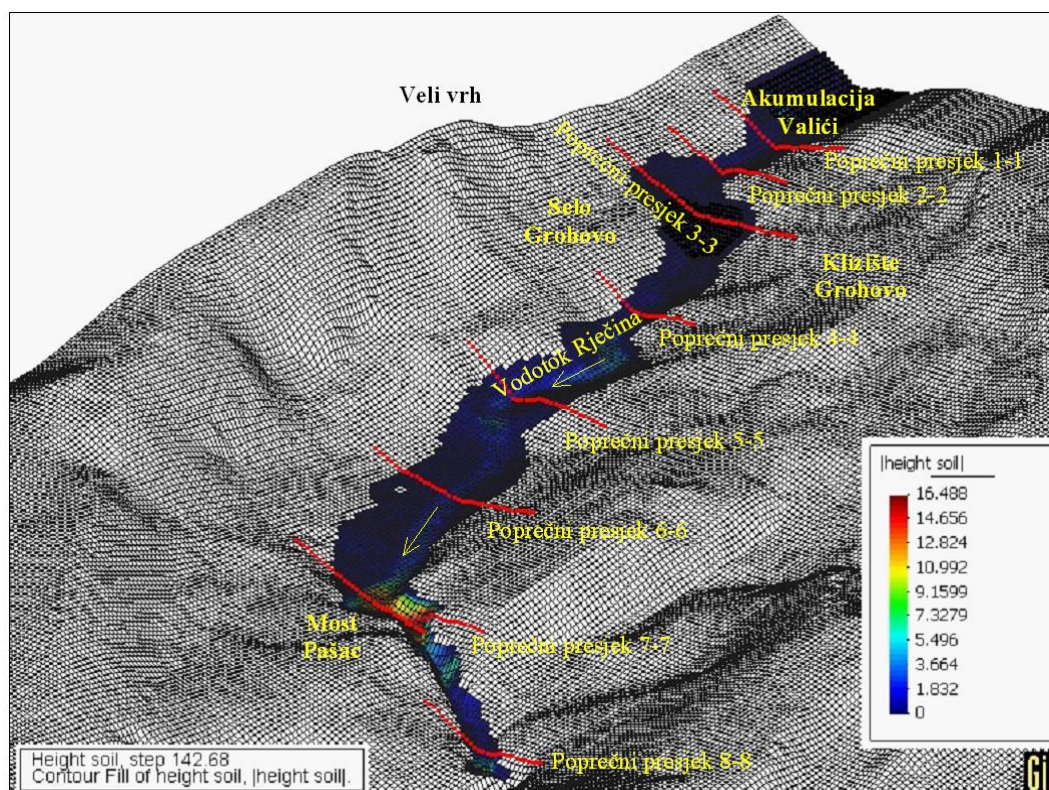


**Slika 6.17.** Simulacijski prikaz propagacije toka krupnozrnatog materijala na vodotoku Rječina, prikaz propagacije prirodno formiranog materijala (prirodne brane) ispod klizišta Grohovo i puknuća brane Valići, SIMULACIJA 1

Svrha simulacije je bila odrediti ukupan volumen deponiranog materijala, njegov doseg, dubine i brzine prilikom miješanja materijala iz prirodno formirane brane podno klizišta Grohovo i njegova miješanja s materijalom nastalim rušenjem brane Valići. Pritom je za gustoću materijala uzeta vrijednost od  $2100 \text{ kg/m}^3$ , dok su ostali ulazni parametri predhodno definirani. Na temelju SPH metode i GID pred i postprocesorskog grafičkog editora (Verzija



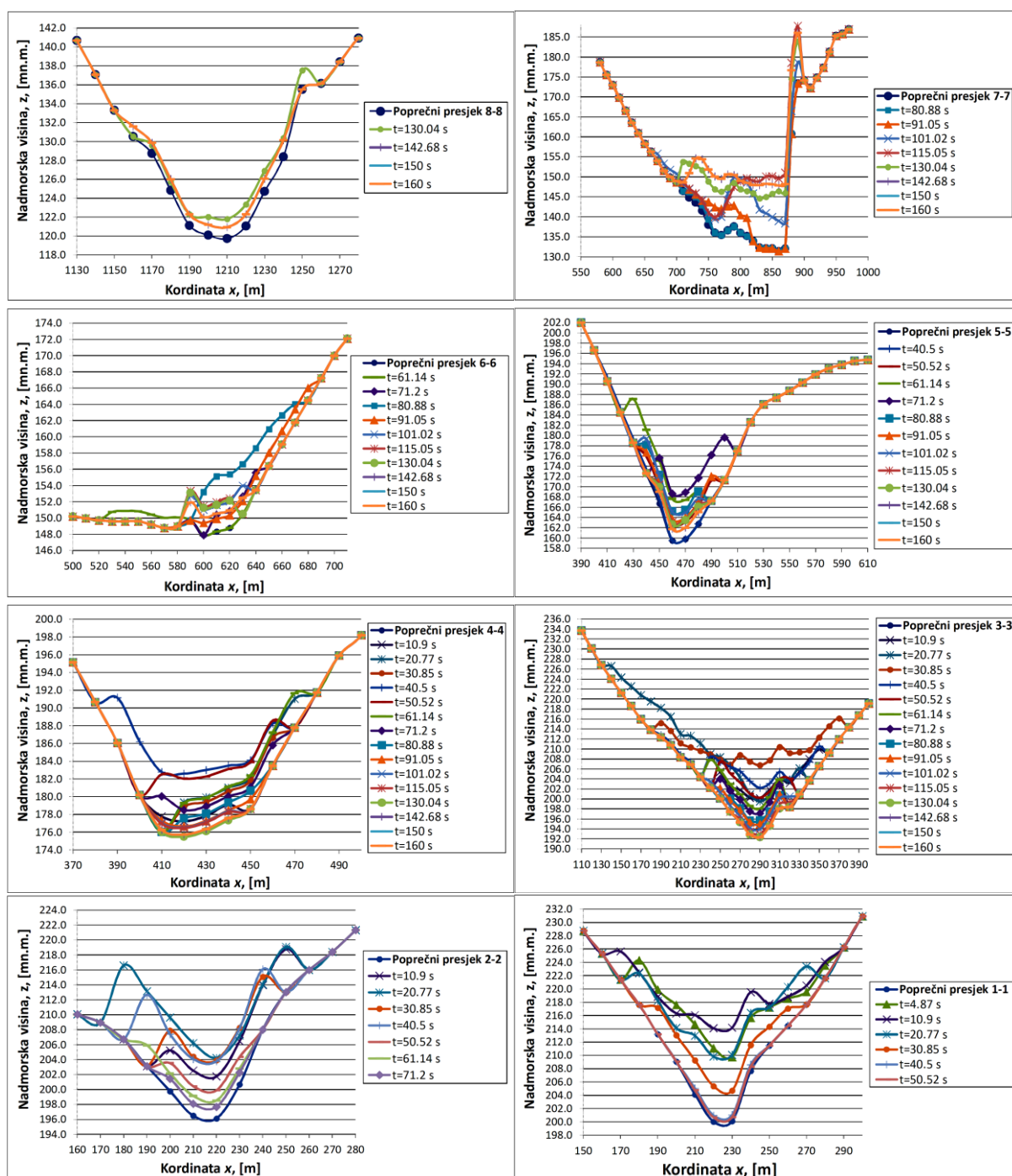
GiD 7.7.6.) dobivena je numerička simulacija propagacije toka sitnozrnatog materijala u koritu Rječine nizvodno od klizišta Grohovo.



Vrijeme	Udaljenost dosegata toka sitnozrnatog materijala	Brzina vala (čeona brzina toka)	Brzina vala (čeona brzina toka)	Obuhvaćena površina tokom sitnozrnatog materijala	Volumen toka sitnozrnatog materijala	Maksimalna visina deponiranog materijala za vrijeme toka sitnozrnatog materijala
$t$	$L$	$v$	$v$	$A$	$V$	$h_{max}$
[s]	[m]	[m/s]	[km/h]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m]
0,00	0,00	0,00	0,00	16526,2	743354,9	33,76
4,87	127,0	26,08	93,88	19002,8	750005,4	27,78
10,90	238,0	18,41	66,27	25085,9	773580,9	21,12
20,77	478,0	24,32	87,54	27486,5	799798,9	14,04
30,85	672,0	19,25	69,29	32733,0	802531,7	14,58
40,50	877,6	21,31	76,70	44765,6	804436,2	11,02
50,52	1057,0	17,90	64,46	38254,2	811143,2	14,58
61,14	1282,0	21,19	76,27	42091,0	811691,6	17,57
71,20	1481,2	19,80	71,28	44535,1	831476,5	13,00
80,88	1605,2	12,81	46,12	70790,1	837038,3	11,17
91,05	1701,2	9,44	33,98	66962,2	842210,9	9,86
101,02	1789,2	8,83	31,78	76652,4	854348,9	14,23
115,05	1896,2	7,63	27,46	70970,2	858035,5	18,94
130,04	1991,4	6,35	22,86	72316,8	867832,6	15,04
142,68	2033,1	3,30	11,88	73162,1	876832,6	16,48
150,00	2039,0	0,81	2,90	73164,3	876832,6	16,48
160,00	2039,0	0,00	0,00	73164,9	876832,6	16,47

**Slika 6.18.** Rezultati propagacije toka sitnozrnatog materijala na vodotoku Rječina, akumulacija Valići i klizni materijal s klizišta Grohovo, SIMULACIJA 1, (Newtonov zakon tekućine u turbulentnom režimu)

Ukupno trajanje propagacije toka sitnozrnatog materijala traje otprilike 160 sekundi. Maksimalni doseg toka iznosi 2039 m, a postignut je nakon 148,7 sekundi (Slika 6.19.).



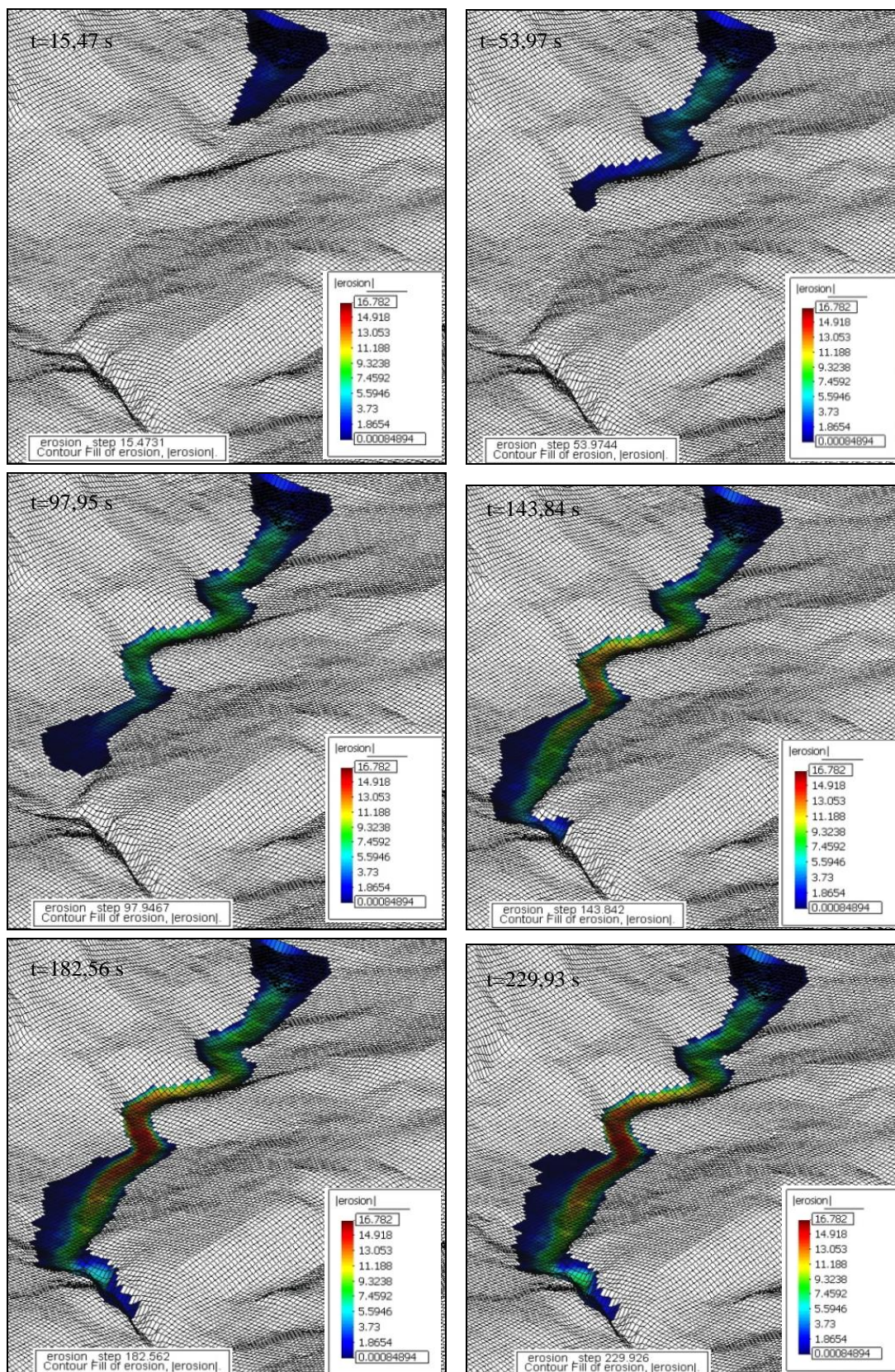
Slika 6.19. Visine deponiranog sitnozrnatog materijala na karakterističnim poprečnim profilima unutar vodotoka Rječine, Newtonov zakon tekućine u turbulentnom režimu tečenja, SIMULACIJA 1

Maksimalna brzina koja nastaje prilikom propagacije toka iznosi 26,1 m/s (~94 km/h). Maksimalna zahvaćena površina uslijed propagacije toka sitnozrnatog materijala iznosi 7,32 ha. Početni volumen pokrenutog materijala (definiran na temelju starih zapisa u prošlosti)

iznosi  $743355 \text{ m}^3$ , dok je završni (ukupni) volumen deponiranog sitnozrnatog materijala oko  $876833 \text{ m}^3$ . Pritom je jasno da je razlika u volumenu koja nastaje uzduž toka Rječine jednaka  $133478 \text{ m}^3$ . Maksimalna dubina deponiranog materijala iznosi 33,76 m, dok je minimalna dubina deponiranog materijala 9,86 m. Na slici 6.19. prikazane su promjene visina sitnozrnatog materijala uslijed propagacije toka na pojedinim karakterističnim poprečnim profilima unutar korita Rječine.

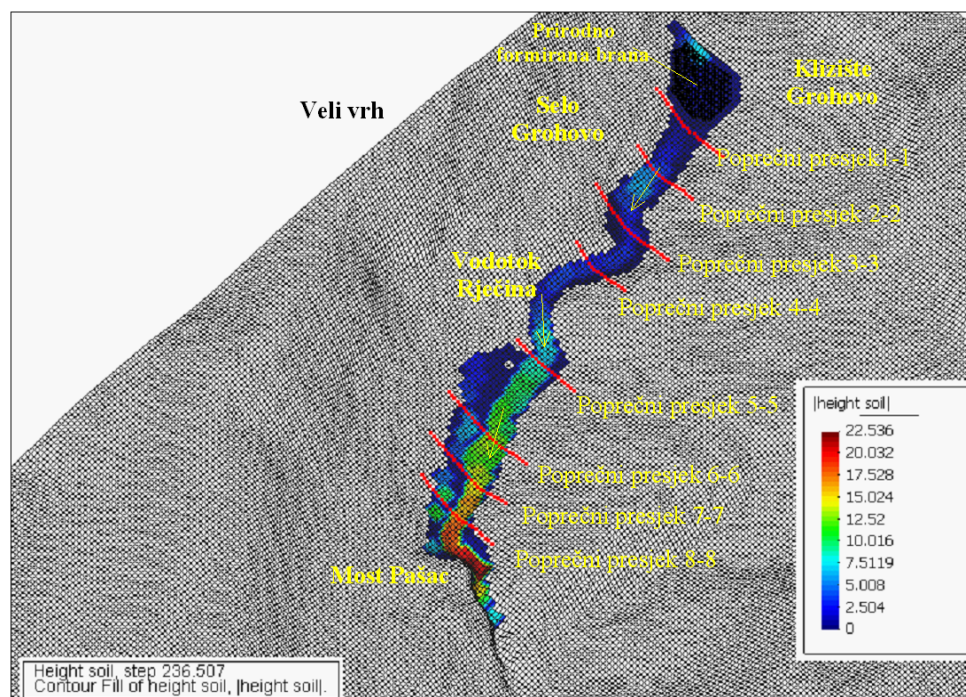
U drugom SPH 2D modelu (SIMULACIJA 2) primijenjen je Newtonov zakon tekućine sa turbulentnim režimom tečenja s utjecajem erozijskog djelovanja (Slike 6.20. i 6.21.). Namjera ovog modela je bila osigurati numeričku simulaciju propagacije toka sitnozrnatog materijala duž vodotoka Rječine koji je nastao stvaranjem sitnozrnatog deponiranog materijala s klizišta Grohovo, te se postupno saturirao vodama na razini koja odgovara maksimalnoj visini deponiranog materijala (potpuno zasićen materijal). Ukupan doseg toka sitnozrnatog materijala dobiven kroz SPH 2D model iznosi oko 1745 m, a postignut je nakon 236 sekundi u odnosu na početno stanje. Maksimalna brzina toka (čeona brzina vala) određena preko simulacije iznosila je oko 20 m/s (72 km/h), a maksimalna zahvaćena površina uslijed širenja toka sitnozrnatog materijala je 4,15 ha. Početni volumen sitnozrnatog materijala iznosio je  $132450 \text{ m}^3$ , dok je konačni volumen dosegao vrijednost od  $427550 \text{ m}^3$ . Uslijed propagacije toka sitnozrnatog materijala duž vodotoka Rječine volumen se povećao za  $295100 \text{ m}^3$ . Najveća dubina deponiranog materijala uslijed toka iznosila je 30,7 m (u kanjonskom dijelu vodotoka Rječine, u blizini mosta Pašac), dok je minimalna dubina deponiranog materijala oko 10,9 m.





Slika 6.20. Simulacijski prikaz propagacije toka sitnozrnatog materijala na vodotoku Rječina ispod klizišta Grohovo, SIMULACIJA 2

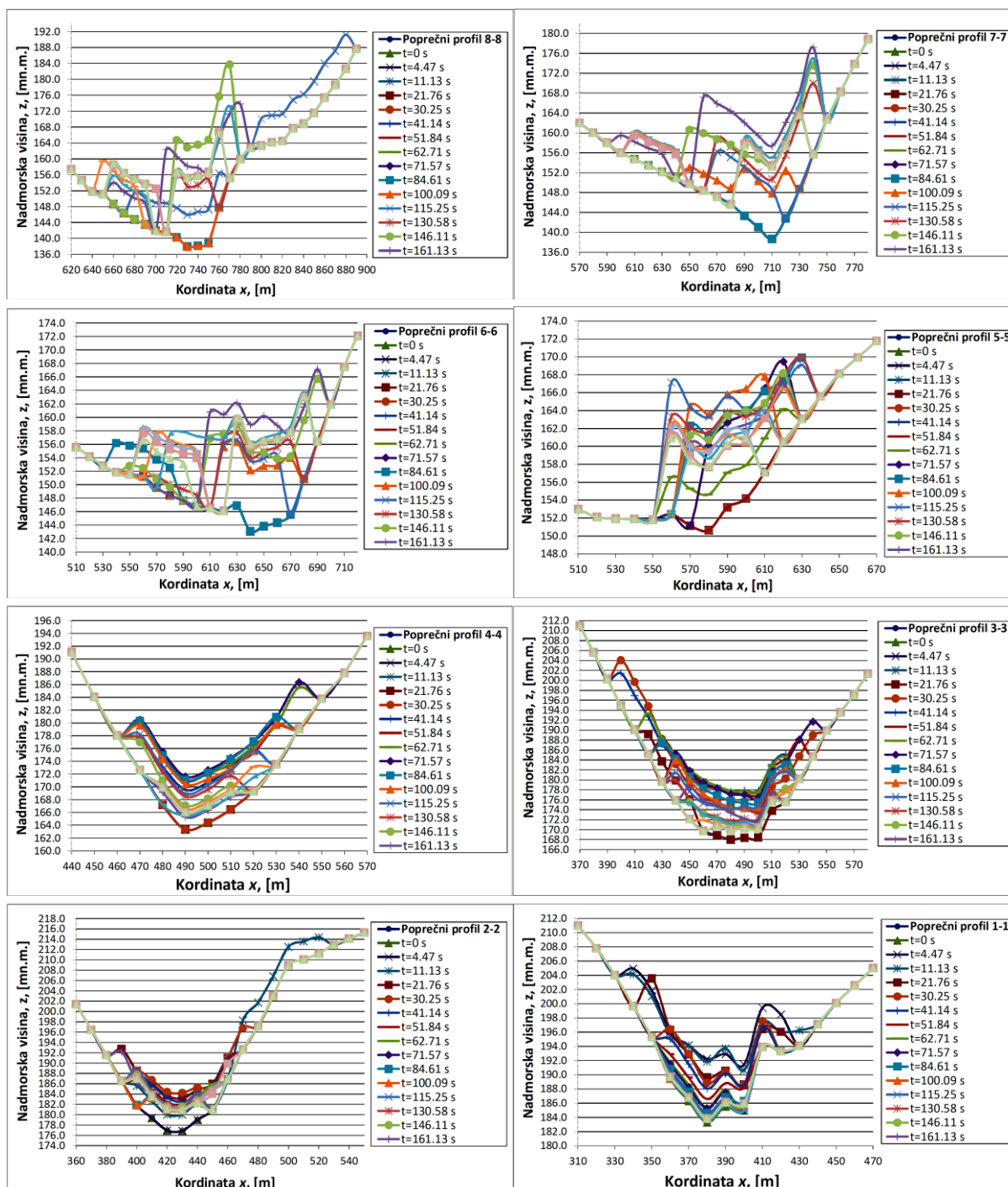




Vrijeme	Udaljenost dosegata toka sitnozrnatog materijala	Brzina vala (čeona brzina toka)	Brzina vala (čeona brzina toka)	Obuhvaćena površina tokom sitnozrnatog materijala	Volumen toka sitnozrnatog materijala	Maksimalna visina deponiranog materijala za vrijeme toka sitnozrnatog materijala
$t$	$L$	$v$	$v$	$A$	$V$	$h_{max}$
[s]	[m]	[m/s]	[km/h]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m]
0,00	0,0	0,00	0,00	6656,7	132452,1	21,42
4,47	157,0	20,10	72,36	7503,8	136654,7	14,36
11,13	262,0	15,77	56,76	8854,8	142749,3	10,89
21,76	423,0	15,15	54,52	13647,4	164362,8	12,79
30,25	517,9	11,18	40,24	14603,0	185557,1	11,18
41,14	634,9	10,74	38,68	15465,6	207588,8	13,44
51,84	780,5	13,61	48,99	17541,0	232188,8	11,54
62,71	922,5	13,06	47,03	18676,5	267724,9	12,06
71,57	1014,8	10,42	37,5	20842,3	291238,4	11,16
84,61	1167,8	11,73	42,24	24503,3	319546,5	13,35
100,09	1316,8	9,63	34,65	27089,7	352873,5	15,97
115,25	1552,8	15,57	56,04	34282,3	403368,5	14,68
130,58	1669,8	7,63	27,48	38854,5	422403,6	22,60
146,11	1682,8	0,84	3,01	39658,4	424346,7	30,70
161,13	1691,8	0,6	2,16	40223,4	424793,4	29,41
176,13	1732,8	2,73	9,84	41123,6	427416,3	27,66
188,98	1738,8	0,47	1,68	41328,4	427521,3	29,45
201,77	1741,3	0,2	0,7	41458,3	427547,9	28,52
215,03	1743,1	0,13	0,48	41534,3	427551,4	22,96
236,50	1743,4	0,02	0,06	41536,4	427552,0	22,53

**Slika 6.21.** Rezultati propagacije toka sitnozrnatog materijala na vodotoku Rječina ispod klizišta Grohovo, SIMULACIJA 2

Slika 6.22. prikazuje promjene visina materijala uslijed propagacije toka sitnozrnatog materijala na karakterističnim poprečnim profilima duž vodotoka Rječine u različitim vremenskim periodima.

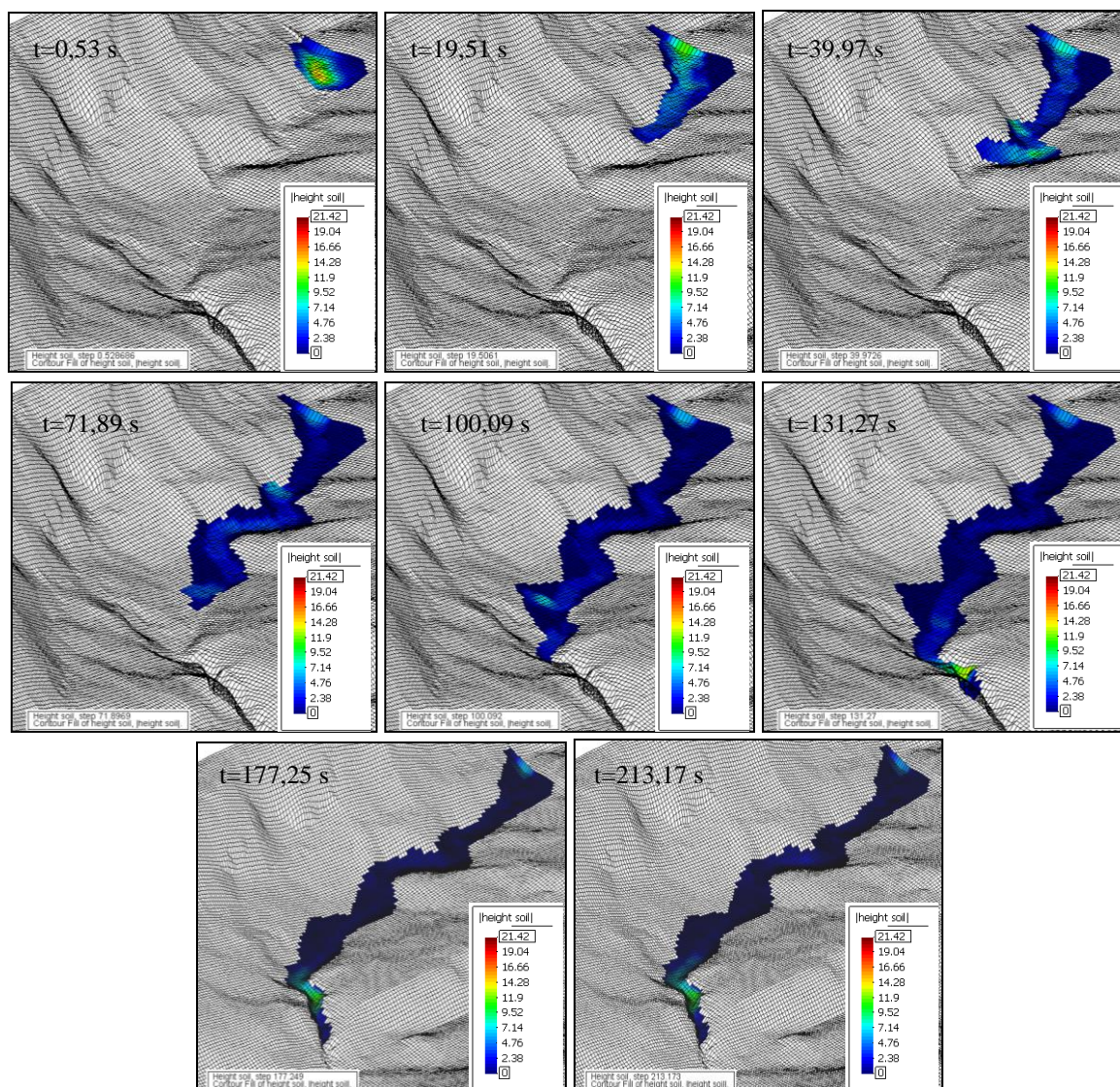


*Slika 6.22. Prikaz promjena visina materijala uslijed propagacije toka sitnozrnatog materijala na pojedinim karakterističnim poprečnim profilima unutar vodotoka Rječine, SIMULACIJA 2*

Treća SPH 2D numerička simulacija (SIMULACIJA 3) se temelji na realnom Binghamovom zakonu (Slike 6.23. i 6.24.). Kao i kod prve i druge SPH 2D numeričke simulacije, potrebno je bilo odrediti doseg toka sitnozrnatog materijala, njegovu maksimalnu brzinu toka i brzine na određenim poprečnim profilima, dubinu deponiranog materijala, površinu koja je



obuhvaćena tokom sitnozrnatog materijala kao i ukupni volumeni materijala u različitim vremenskim periodima propagacije toka.

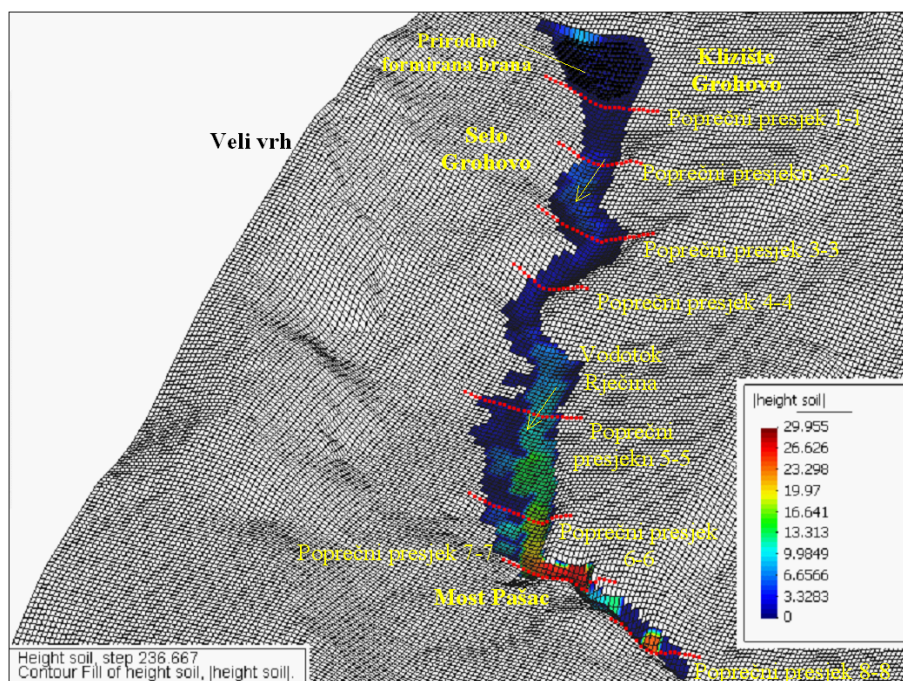


**Slika 6.23.** Simulacijski prikaz propagacije toka sitnozrnatog materijala na vodotoku Rječina ispod klizišta Grohovo, SIMULACIJA 3

U ovom SPH 2D numeričkom modelu, ukupno trajanje propagacije toka sitnozrnatog materijala traje oko 236 sekundi. Maksimalni doseg toka iznosi 1992 m, a postignut je nakon 221 sekunde. Maksimalna brzina toka (čeona brzina vala) u modelu iznosi oko 21 m/s (cca. 76 km/h), dok ukupna površina područja obuhvaćena tokom sitnozrnatog materijala iznosi oko 4,53 ha. Početni volumen deponiranog materijala iznosio je 132450 m<sup>3</sup>, dok je konačna vrijednost volumena deponiranog sitnozrnatog materijala otprilike 462122 m<sup>3</sup>. Razlika između dva gore navedena volumena daje ukupni volumen materijala koji je generiran (erodirao) tijekom procesa toka sitnozrnatog materijala i on iznosi 329672 m<sup>3</sup>. Najveća



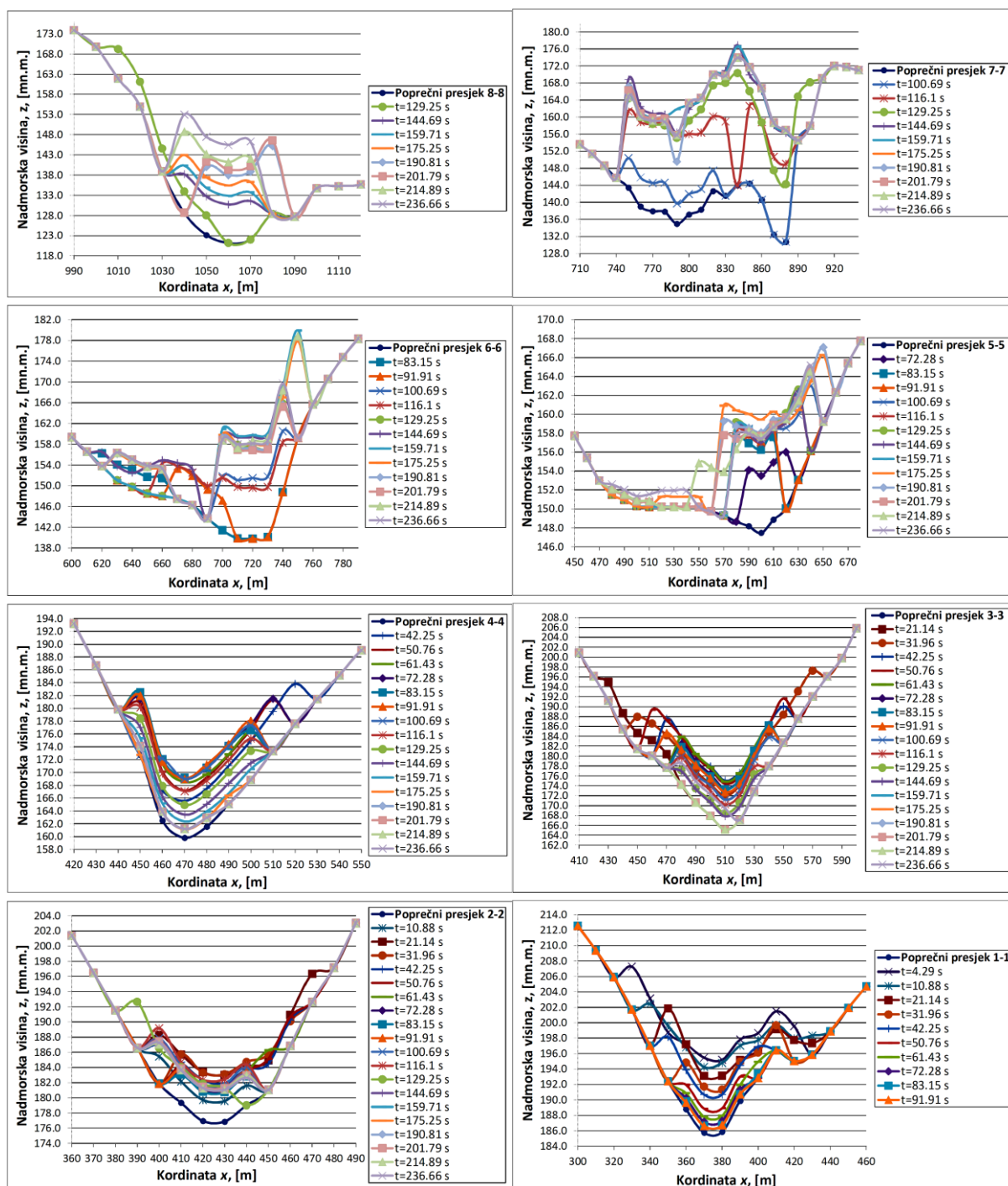
dubina toka koja se pojavila tijekom procesa propagacije je nešto manje od 33 m (u kanjonskom dijelu vodotoka Rječine, neposredno uzvodno od mosta Pašac).



Vrijeme	Udaljenost dosegata toka sitnozrnatog materijala	Brzina vala (čeona brzina toka)	Brzina vala toka sitnozrnatog materijala	Obuhvaćena površina tokom sitnozrnatog materijala	Volumen toka sitnozrnatog materijala	Maksimalna visina deponiranog materijala za vrijeme toka sitnozrnatog materijala
$t$	$L$	$v$	$v$	$A$	$V$	$h_{max}$
[s]	[m]	[m/s]	[km/h]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m]
0,00	0,0	0,00	0,00	5633,5	132452,1	21,42
4,29	144,0	21,3	76,68	7959,7	141235,5	14,84
10,88	258,0	17,3	62,28	9592,0	154762,9	10,98
21,14	441,0	17,84	64,21	14508,1	182497,6	12,99
31,96	565,0	11,46	41,26	15506,0	213995,5	10,94
42,25	708,0	13,9	50,03	17566,5	248296,7	13,75
50,76	840,0	15,51	55,84	23733,7	273049,0	13,67
61,43	1006,2	15,58	56,07	24569,6	306383,5	12,16
72,28	1200,2	17,88	64,37	27328,5	342786,8	11,13
83,15	1353,4	14,09	50,74	30320,3	363586,8	12,97
91,91	1495,4	16,21	58,36	35233,2	396425,2	14,48
100,69	1568,3	8,3	29,89	36121,2	410024,4	15,21
116,1	1687,7	7,75	27,9	38539,1	427849,4	21,86
129,25	1845,8	12,02	43,28	40577,6	448326,4	26,56
144,69	1968,8	7,97	28,68	42699,3	461319,3	32,96
159,71	1976,8	0,53	1,92	45172,1	461596,2	32,65
175,25	1983,2	0,41	1,47	45347,4	461849,3	30,18
190,81	1987,5	0,28	1,00	45381,4	462083,4	30,02
201,79	1990,5	0,27	0,98	45390,5	462118,5	30,02
214,89	1992,3	0,14	0,49	45392,1	462122,4	29,95
236,66	1992,4	0,01	0,02	45392,3	462122,6	29,95

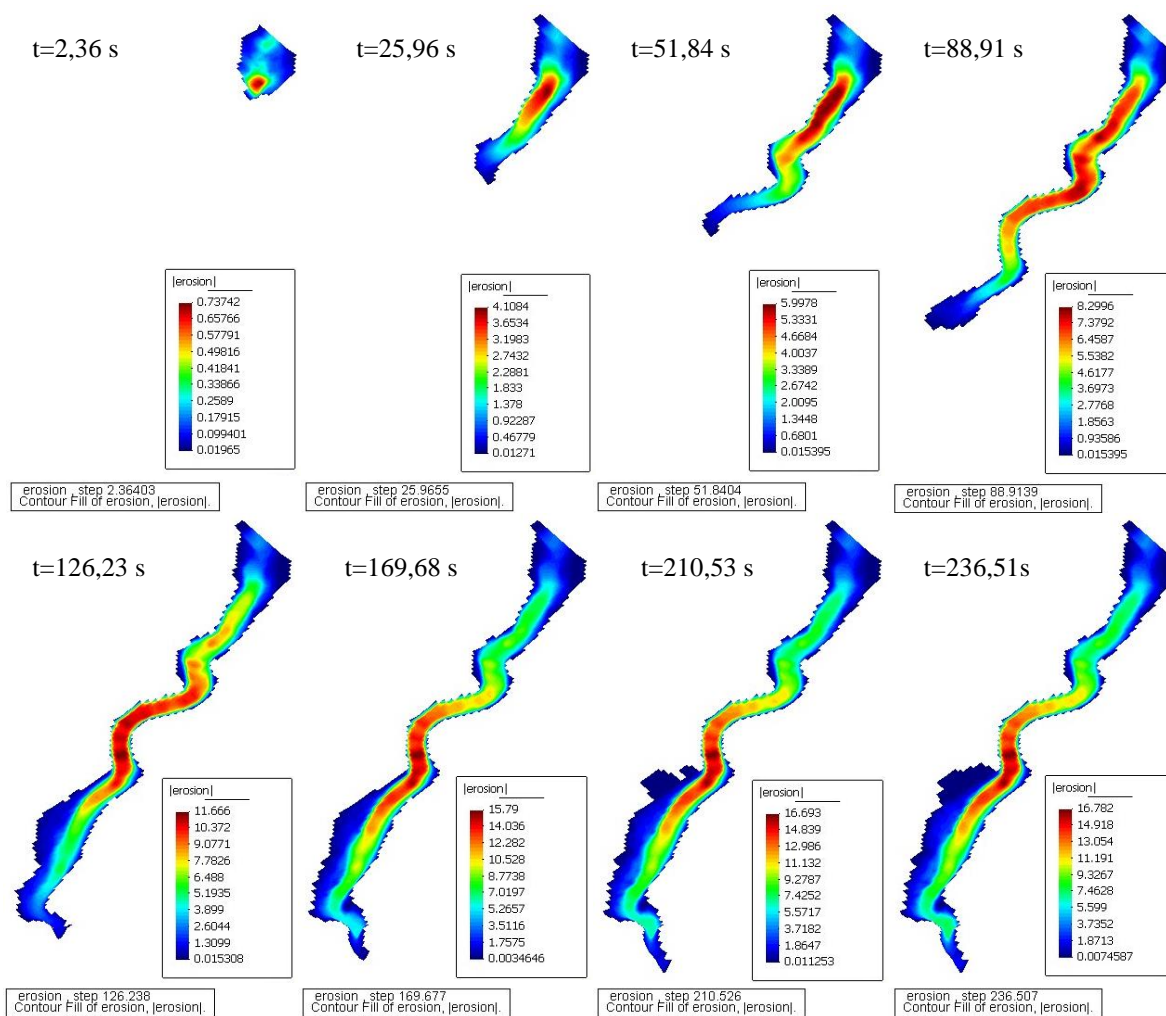
**Slika 6.24.** Rezultat propagacije toka sitnozrnatog materijala na vodotoku Rječina ispod klizišta Grohovo, SIMULACIJA 3

Na slici 6.25. prikazane su promjene visina materijala uslijed propagacije toka sitnozrnatog materijala na pojedinim karakterističnim poprečnim profilima unutar vodotoka Rječine.



*Slika 6.25. Prikaz promjena visina materijala uslijed propagacije toka sitnozrnatog materijala na karakterističnim poprečnim profilima unutar vodotoka Rječine, realan Binghamov zakon, SIMULACIJA 3*

Iz grafičkih simulacijskih prikaza se može zaključiti da u numeričkim modelima u kojima je korišten erozijski zakon po Hungru daju približne rezultate za visine (debljine) istaloženog materijala, volumen toka sitnozrnatog materijala i brzine toka (čeoone brzine vala) kao u slučaju primjene erozijskog zakona po Egashiri pri istoj prostornoj domeni. Na slikama 6.26. i 6.27. su prikazane razlike u rezultatima za dva primjenjena erozijska zakona, po Egashiri i Hungru.

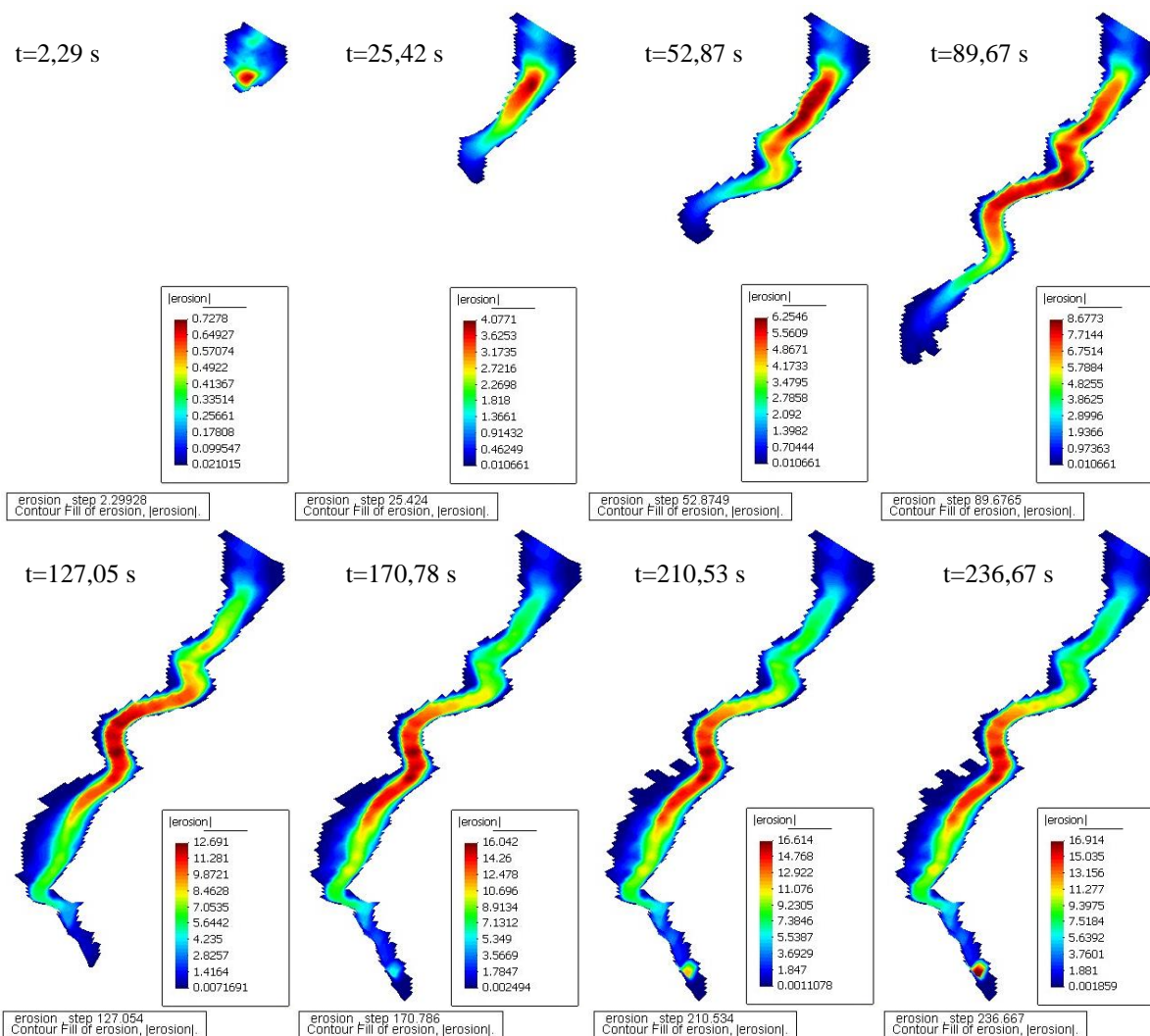


**Slika 6.26.** Simulacijski prikaz erozijskog djelovanja unutar vodotoka Rječine, primjena erozijskog zakona po Egashiri, SIMULACIJA 2

Volumen toka sitnozrnatog materijala uzduž korita Rječine brže se povećava pri erozijskom zakonu po Egashiri u odnosu na erozijski zakon po Hungru, ali je konačni izračunati volumen dobiven erozijskim zakonom po Hungru nešto veći. Iz simulacijskih prikaza se može konstatirati da je Egashirin erozijski zakon bolje prilagođen ovom ispitivanom problemu u odnosu na erozijski zakon po Hungru. Ta konstatacija proizlazi iz starih povijesnih dokumenata u kojima je opisano prirodna pojava koja se dogodila u okolici sela Grohova



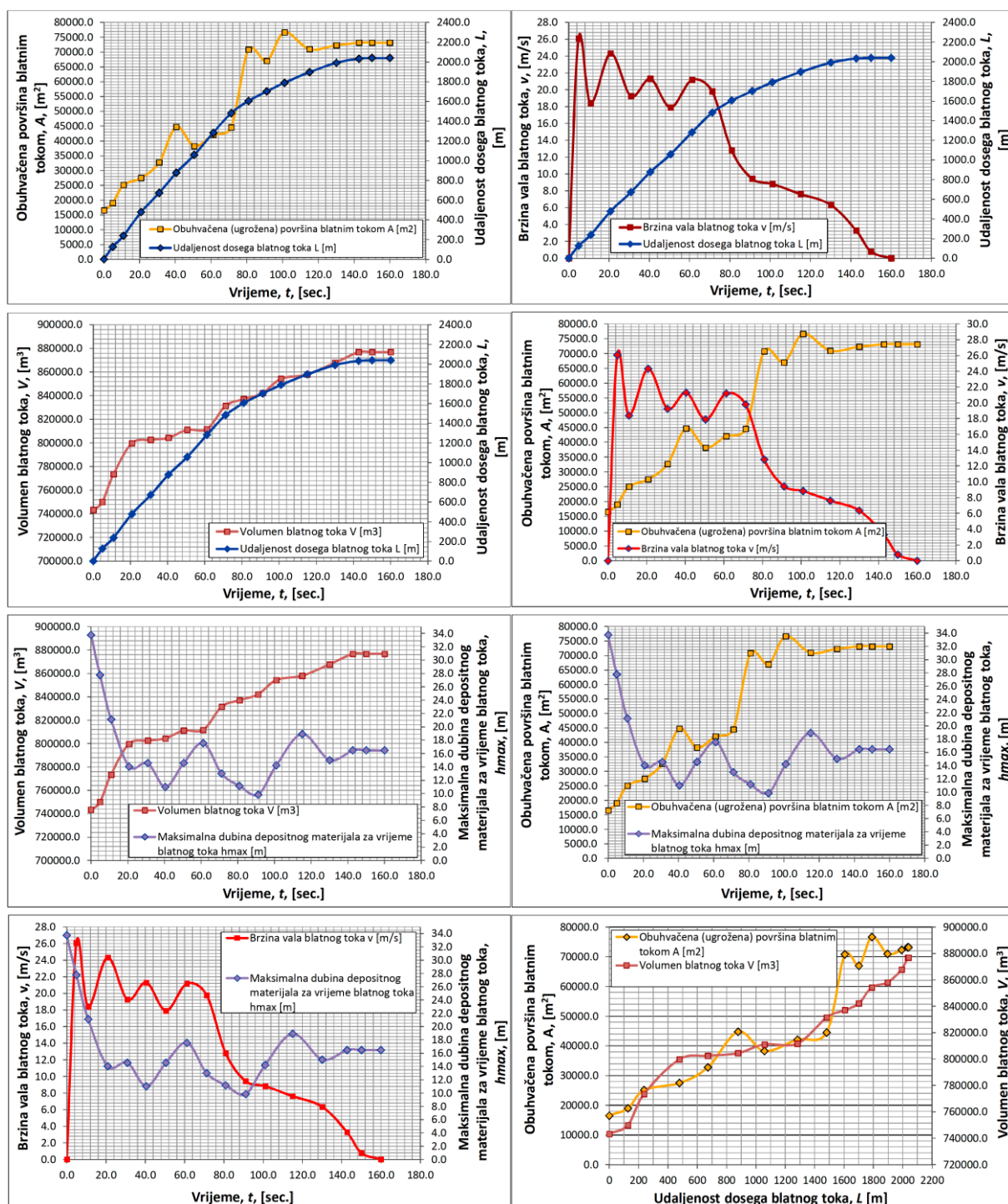
početkom 20. stoljeća. Iz tih se dokumenata može približno procijeniti doseg toka sitnozrnatog materijala. Suprotno, u dobivenim simulacijskim prikazima proizašlih na temelju erozijskog zakona po Hungru, linearna stopa erozije ima prilično veliku vrijednost, što ujedno objašnjava zašto volumen raste duž cijele putanje toka.



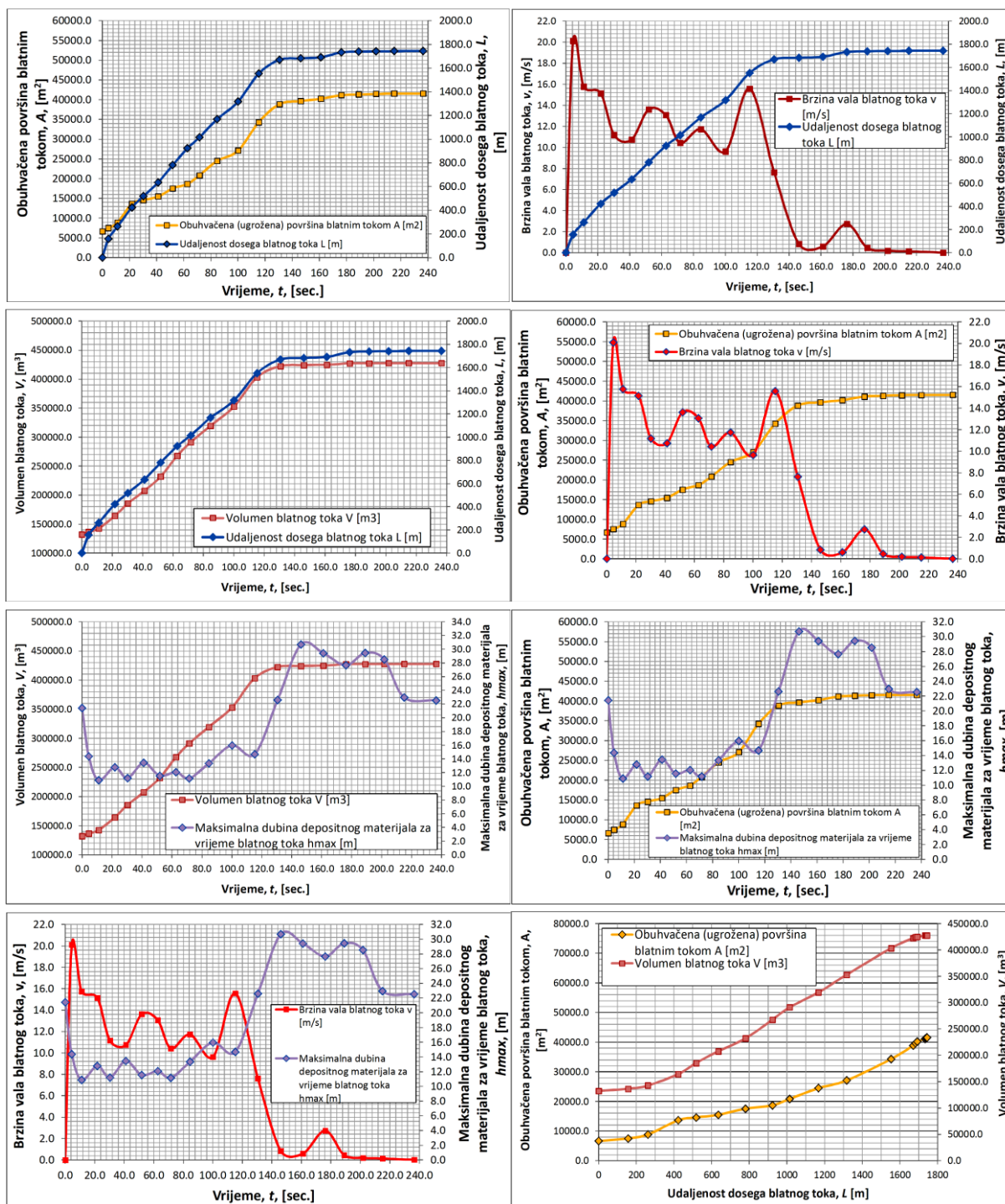
**Slika 6.27.** Simulacijski prikaz erozijskog djelovanja unutar vodotoka Rječine, primjena erozijskog zakona po Hungru, SIMULACIJA 3

Analiza erozijskog djelovanja pokazuje vrlo značajne oscilacije i varijacije erozijske aktivnosti duž vodotoka Rječine. Na temelju erozijskih zakona primjenjenih u ovom radu mogu se pobliže okarakterizirati svojstva toka sitnozrnatog materijala, točnije mjesta jačeg i slabijeg erozijskog djelovanja unutar korita Rječine, kao i funkcijska zavisnost brzine toka i dubine taloženja deponiranog materijala (npr. u taložnoj lepezi) u odnosu na erozijsko djelovanje (Slika 6.28. i 6.29.). Također je moguće sagledavanje rezultata erozijske stope i

povećanja volumena tijekom propagacije toka kod različitih primjena erozijskih zakona (Slike 6.28.-6.30.).

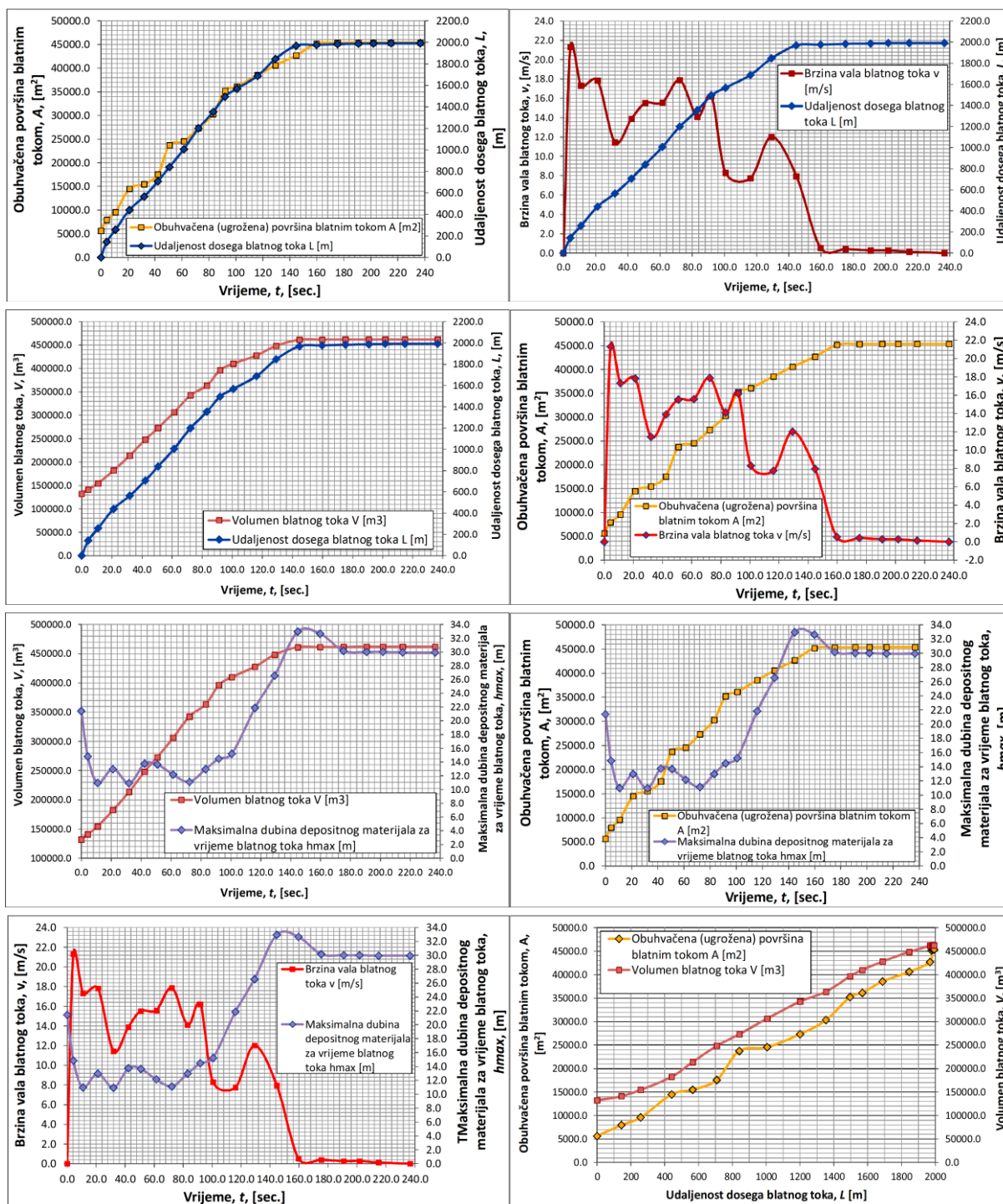


Slika 6.28. Vizualizacija ovisnosti pojedinih izlaznih vrijednosti modela u odnosu na vrijeme i doseg udaljenosti propagacije toka sitnozrnatog (blatnog) materijala, SIMULACIJA 1



Slika 6.29. Vizualizacija ovisnosti pojedinih izlaznih vrijednosti modela u odnosu na vrijeme i doseg udaljenosti propagacije toka sitnozrnatog (blatnog) materijala, SIMULACIJA 2, primjena erozijskog zakona po Egashiri





**Slika 6.30.** Vizualizacija ovisnosti pojedinih izlaznih vrijednosti modela u odnosu na vrijeme i doseg udaljenosti propagacije toka sitnozrnatog (blatnog) materijala, SIMULACIJA 3, primjena erozijskog zakona po Hungru

Gornja analiza omogućuje usporedbu učinka dvaju erozijskih zakona koji se ne temelje na istim parametrima. Erozijski zakon po Hungru se temelji na brzini i dubini toka, dok je erozijski zakon Egashire baziran na trenutnoj brzini i nagibu terena. Oba navedena erozijska zakona omogućuju povećanje početnog volumena nizvodno uzduž vodotoka do gotovo iste

vrijednosti konačnog (ukupnog) volumena toka sitnozrnatog materijala koji odgovara događaju koji se dogodio u prošlosti 1908. godine. Međutim, volumen se ne mijenja u vremenu na isti način kod ova dva erozijska zakona. Pri korištenju erozijskog zakona po Egashiri, volumen je sklon variranju koje više sličići stvarnom ponašanju toka sitnozrnatog materijala koji je vrlo grubo opisan u povijesnim dokumentima koji se nalaze u Hrvatskom državnom arhivu grada Rijeke (Benac i sur., 2006.; Žic i sur., 2014.). Dakle, primjena Egashirinog erozijskog zakona, odnosno rezultati modela proizašli na temelju tog zakona daju realnija rješenja i opis prirodne pojave toka sitnozrnatog materijala u odnosu na erozijski zakon po Hungru.

Istaknute karakteristike toka sitnozrnatog materijala su strogo povezane s mehaničkim i reološkim svojstvima primjenjenog materijala, i oni su odgovorni za maksimalne dosege i visoke brzine koje su postignute. Numeričke simulacije su vrlo osjetljive na izbor tih parametara. Predviđanje dosega toka sitnozrnatog materijala se bazira na dobroj procjeni početne klizne mase i odabranog reološkog zakona. Dobre procjene početne raspodjele pornog pritiska i njegove disipacije su od velike koristi. Usprkos tim nesigurnostima, predviđanje i procjena dosega toka sitnozrnatog materijala i brzina koje se pritom pojavljuju se mogu na vrlo jednostavan način promatrati putem matematičkog modeliranja, te se na taj način mogu smanjiti gubici zbog takvih tipova prirodnih pojava, pružajući sredstva za definiranje opasnih područja, procjenjivanje intenziteta hazarda, te prepoznavanje i oblikovanje odgovarajućih zaštitnih mjera.

Vezano za utjecaj prostorne diskretizacije, masa toka sitnozrnatog materijala je diskretizirana koristeći niz čvorova (materijalnih točaka). Točnost simulacije uvelike ovisi o broju čvorova. Rezultati analize su pokazali da primjena manjeg broja materijalnih točaka utječe na brzinu u većem omjeru u odnosu na putanju toka, a samim time, manji broj materijalnih točaka se može koristiti za davanje adekvatne procjene.

Pouzdana prognoza propagacije toka sitnozrnatog materijala i osjetljivost područja koja se pritom pojavljuju, kao i brzine propagacije takvog toka, ključna su pitanja za analize rizika. Međutim, nepravilna konfiguracija terena znatno utječe na kretanje i propagaciju toka sitnozrnatog materijala, pa je stoga kvalitetna rezolucija (prikaz) digitalnog elevacijskog modela terena od izuzetne važnosti za dobivanje realnih numeričkih simulacija i procjena toka takvog tipa tečenja.

U ovom radu je stvoreno nekoliko numeričkih simulacija s različitim prostornim diskretizacijama domene i ekvidistantnim mrežama veličina 2\*2, 5\*5 i 10\*10 m (Tablica 6.10.). Simulacijski prikaz propagacije toka sitnozrnatog materijala u slučaju ekvidistantne



mreže 10\*10 m bio je znatno različit u odnosu na primjenu ekvidistantnih mreža 5\*5 i 2\*2m. U slučaju mreže 10\*10 m, pojavilo se gibanje toka sitnozrnatog materijala u više smjerova po konfiguraciji terena, te je na kraju zaključeno da takva prostorna diskretizacija nije prihvatljiva i adekvatna za pružanje pouzdane procjene i simulacije toka sitnozrnatog materijala.

Brzina toka sitnozrnatog materijala, njegova putanja i doseg udaljenosti uvelike ovise o konfiguraciji terena. Za SPH 2D modele, strukturirane topografske mreže su pogodnije, jer je odmah moguće utvrditi koja materijalna točka pripada odgovarajućoj ćeliji. Na temelju iskustva, sugerira se da najmanje 10 točaka treba koristiti u proračunu za diskretizaciju kanjanskog dijela vodotoka Rječine, kao i za područja koja su karakteristična po složenoj promjeni konfiguracije terena (npr. strmi pokosi kanala, pojava aluvijalne erozije na pojedinoj strani vodotoka i sl.).

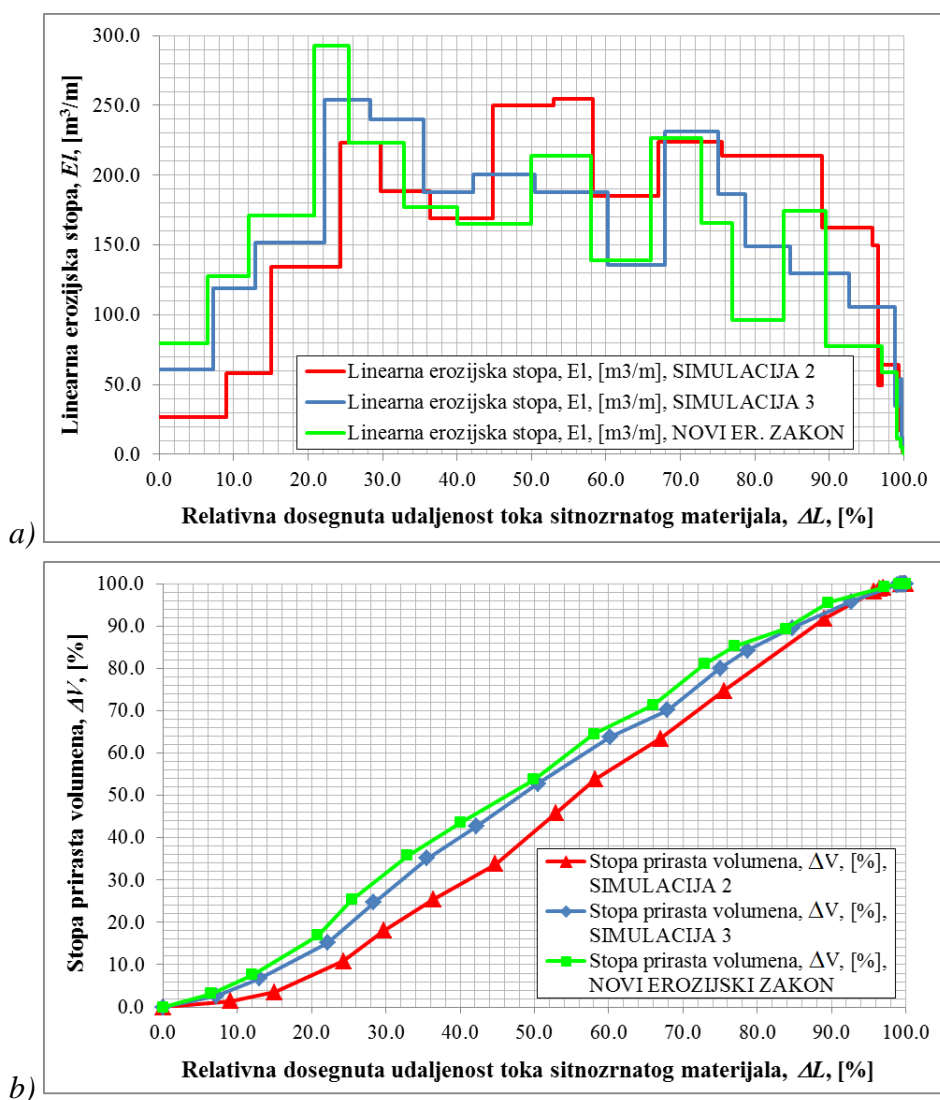
**Tablica 6.10.** Utjecaj prostorne diskretizacije domene na izlazne vrijednosti propagacije toka sitnozrnatog materijala, primjena erozijskog zakona po Egashiri, SIMULACIJA 2

Diskretizacija prostorne domene	Udaljenost doseg a toka sitnozrnatog materijala, $L$ , [m]	Maksimalna brzina vala toka sitnozrnatog materijala, $v_{max}$ , [m/s]	Ukupni volumen toka sitnozrnatog materijala, $V_{tot}$ , [m <sup>3</sup> ]	Ukupna zahvaćena površina tokom sitnozrnatog materijala, $A_{tot}$ , [m <sup>2</sup> ]
2*2 m	1618	18,8	421264	38273
5*5 m	1743	20,1	427552	41536
10*10 m	2154	23,2	442939	48348

Vežano za veličine ćelija u digitalnom elevacijskom modelu terena (DEM), postoje elementi s karakterističnim veličinama manjim od prostorne mreže DEM-a koje mogu utjecati na put propagacije toka sitnozrnatog materijala. Takve mreže se mogu primijeniti za prostorno opisivanje kaskada, mostova i velikih kamenih blokova koji najčešće preusmjeravaju tok sitnozrnatog materijala. Njihovo pravilno modeliranje zahtijeva uključivanje posebnih elemenata u analizi kao značajki koje mogu umjetno preusmjeriti tok.

Tokovi sitnozrnatog materijala obično nastaju na vrlo nestabilnim padinama gdje porni pritisci generirani u procesu pokretanja uvelike doprinose kolapsu stjenske mase, a usko su povezani sa prirastom razine podzemne vode u tlu. Visoka razina podzemnih voda (zasićena tla) uzrokuje naglo pokretanje sitnozrnatog materijala, što rezultira brzim i značajnim pokretanjem klizne mase niz kosinu i formiranje velikih brzina toka. Osim toga, veličina zrna i gustoća materijala, te omjer bočnog tlaka imaju veliki utjecaj na osjetljivost numeričkog

modela i propagacije toka sitnozrnatog materijala. Na temelju provedene numeričke analize izvršena je usporedba linearnih erozijskih stopa  $E_l$  i stopa prirasta volumena  $\Delta V$  u odnosu na relativne dosegnute udaljenosti toka sitnozrnatog materijala  $\Delta L$  na karakterističnoj provedenoj SIMULACIJI 2 i 3 koje opisuju pojavu toka koji se dogodio 1908. godine (Slika 6.31.). Radi usporedbe sa danim simulacijama, proveden je izračun linearne erozijske stope i stope prirasta volumena na temelju novog predloženog erozijskog zakona opisanog u podpoglavlju 5.4. Pritom je za potrebe proračuna uzeta vrijednost empirijskog koeficijenta  $K=0,015$ , dok su preostale ulazne vrijednosti odgovarale vrijednostima iz SIMULACIJE 2.



**Slika 6.31.** a) usporedba linearne erozijske stope i relativne dosegnute udaljenosti toka sitnozrnatog materijala, te b) usporedba stope prirasta volumena i relativne dosegnute udaljenosti toka sitnozrnatog materijala za događaj koji se dogodio 1908. godine nedaleko sela Grohovo

Prema slici 6.31. linearni erozijski omjer (stopa),  $El$ , odgovara erodiranom volumenu (u  $m^3$ ) po duljini prijeđenog puta toka sitnozrnatog materijala, a određuje se na temelju formule:

$$El = \frac{\text{erodirani volumen u dijelu } i}{\text{duljina dijela } i} \quad [m^3/s]. \quad (6-1)$$

Stopa prirasta volumena,  $\Delta V$ , je definirana na slijedeći način:

$$\Delta V = 100 * \frac{V_t - V_i}{V_f - V_i} \quad [\%] \quad (6-2)$$

pri čemu su  $V_t$  volumen u trenutku  $t$ , [ $m^3$ ],  $V_i$  početni (inicijalni) volumen, [ $m^3$ ], odnosno  $V_f$  konačni volumen toka sitnozrnatog materijala, [ $m^3$ ]. Relativna dosegnuta udaljenost toka,  $\Delta L$ , određuje se temeljem formule:

$$\Delta L = 100 * \frac{\text{dosegnuta udaljenost toka u trenutku } t}{\text{ukupna dosegnuta udaljenost toka}} \quad [\%]. \quad (6-3)$$

Radi usporedbe u odnosu na SIMULACIJU 2 i 3 dane su izlazne vrijednosti SPH 2D modela u kojem je primijenjen novi predloženi erozijski zakon (Tablica 6.11.).

**Tablica 6.11.** Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, primjena novog erozijskog zakon

Ukupno vrijeme trajanja procesa tečenja, $t$ , [s]	238,4
Maksimalna brzina toka sitnozrnatog materijala, $v$ , [m/s]	20,4
Doseg toka sitnozrnatog materijala, $L$ , [m]	2045,2
Maksimalna visina deponiranog materijala, $h$ , [m]	32,1
Zahvaćena površina uslijed propagacije toka sitnozr. materijala, $A$ , [ha]	4,5
Ukupni volumen toka sitnozrnatog materijala, $V$ , [ $m^3$ ]	461443,4

### 6.3.2. Konačna razmatranja

Računalna simulacija dobivena pomoću SPH 2D modela je u stanju procijeniti disipaciju pornog tlaka uslijed propagacije toka sitnozrnatog materijala. Pomoću SPH 2D modela je provedena analiza propagacije katastrofalnog toka sitnozrnatog materijala koji se dogodio u srednjem dijelu toka Rječine (nedaleko sela Grohovo) 1908. godine. Valjanost predloženog numeričkog modela je procijenjena pomoću tri reološka i tri erozijska zakona. U prva dva SPH 2D modela primijenjen je Newtonov zakon u turbulentnom režimu i Newtonov zakon u turbulentnom režimu sa utjecajem erozijskog djelovanja (SIMULACIJA 1 i 2), dok se treći numerički model za opis propagacije toka sitnozrnatog materijala temeljio na realnom Binghamovom zakonu (SIMULACIJA 3). Dobiveni rezultati naglašavaju sposobnost SPH metode za simuliranje i procjenu nastanka toka sitnozrnatog materijala i relevantnu ulogu reoloških svojstava za postizanje odgovarajuće realne simulacije. Pritom se svakako misli na temeljne attribute toka sitnozrnatog materijala, a oni su doseg udaljenosti toka, brzina i dubina

toka, zahvaćena površina terena kojom je djelovao tok, te ukupni deponirani volumen na kraju propagacije. Iz rezultata numeričkih simulacija i usporedbom sa zapisanim opažanjima na terenu može se zaključiti da model prema realnom Binghamovom zakonu tekućine najbolje odgovara realnoj prirodnoj pojavi toka sitnozrnatog materijala koja se dogodina u prošlosti, a temeljila se na danim ulaznim hidrogeološkim parametrima.

Cilj ovog istraživanja bila je primjena i provjera SPH 2D po dubini integriranog modela koja se temeljila na izrađenom digitalnom elevacijskom modelu terena, a u svrhu inverzne procjene događaja toka sitnozrnatog materijala koji se dogodio u prošlosti. Unutar numeričkih modela primjenjeni su erozijski zakoni po Hungru i Egashiri, kao i novi predloženi erozijski zakon. Temeljem provedene analize može se sa sigurnošću potvrditi da erozijski zakon po Egashiri daje bolja predviđanja za brzine toka i visine deponiranog sitnozrnatog materijala u odnosu na primjenjeni erozijski zakon po Hungru. S druge strane, oba primjenjena erozijska zakona daju dobru procjenu u pogledu konačnog volumena sitnozrnatog materijala. Također se vrlo dobro pokazao i novi primjenjeni erozijski zakon, koji u odnosu na dva predhodno rečena daje još realnije izlazne vrijednosti u vidu linearne erozijske stope i stope prirasta volumena (Slika 6.31.a) i b)). Kod primjene novog erozijskog zakona dolazi do većeg erozijskog djelovanja na početku i u srednjem dijelu procesa tečenja, te se pri kraju toka to djelovanje znatno smanjuje u odnosu na preostala dva promatrana slučaja erozijskih zakona (Slika 6.31.a)). Takve karakteristike tečenja su realne kod stvarnog procesa toka sitnozrnatog materijala u prirodi. Ujedno su kod novopredloženog erozijskog zakona izraženije i stope prirasta volumena uzduž toka koje se na pojedinim mjestima unutar toka razlikuju i do 14 % u odnosu na SIMULACIJU 2, odnosno 5 % u odnosu na SIMULACIJU 3 (Slika 6.31.b)).

Zbog vrlo oskudnih sačuvanih podataka o događaju toka sitnozrnatog materijala koji se dogodio 1908. godine verifikacija opisanog numeričkog modela je vrlo ograničena i uglavnom kvalitativna. Valja napomenuti da je dio numeričke simulacije kvalitativno potvrđen na temelju starih povijesnih slika, na temelju kojih je utvrđena visina sitnozrnatog materijala na određenim mjestima unutar vodotoka Rječine. Stare povijesne slike događaja toka sitnozrnatog materijala su evidentirane u crno-bijeloj tehnici, što je dodatno otežavalo provedbu verifikacije. Pojava toka sitnozrnatog materijala je zasigurno bila vrlo brza, te stoga nisu zabilježena stvarna (realna) terenska mjerenja. Jake oborine koje su se dogodile za vrijeme i nakon događaja dodatno su otežavale bilo kakve mogućnosti za mjerenjem debljine sitnozrnatog materijala, već se takav materijal brzo ispirao i nastavljao nizvodnim putem prema gradu Rijeci. Iz projektnih zapisa u starim dokumentima navodi se kako propagacija toka sitnozrnatog materijala nije došla do mlinova u selu Žakalj, koji tom prilikom nisu bili

oštećeni. U odnosu na izjave pojedinih inženjera projekatana mađarskog izvedbenog projekta regulacije srednjeg dijela toka Rječine (Žic i sur., 2014.), može se zaključiti da izvedene numeričke simulacije propagacije toka sitnozrnatog materijala predstavljaju razumnu rekonstrukciju događaja s početka 20.-tog stoljeća.

Kalibracija razmatranih erozijskih zakona treba biti dodatno ispitana u hidrauličkom laboratoriju pomoću hidrauličkog žlijeba. Kreirani numerički modeli mogu biti primijenjeni i na druge slučajeve propagacije toka sitnozrnatog materijala. Na taj način bi se dobili podaci potrebni za kalibraciju i određivanje kritičnih područja unutar sliva Rječine, kao i kritični hidrogeološki parametri za pokretanje toka sitnozrnatog materijala. Na temelju prikazanih računalnih simulacija može se zaključiti s velikom vjerojatnošću da propagacija toka sitnozrnatog materijala ne bi ugrozila urbani dio grada Rijeke, te da tom prilikom tok sitnozrnatog materijala i njegov negativni učinak ne bi izazvali značajna oštećenja na okoliš i stvorili velike materijalne i ljudske gubitke.

#### **6.4. SPH 2D simulacije mogućih scenarija na području klizišta Grohovo**

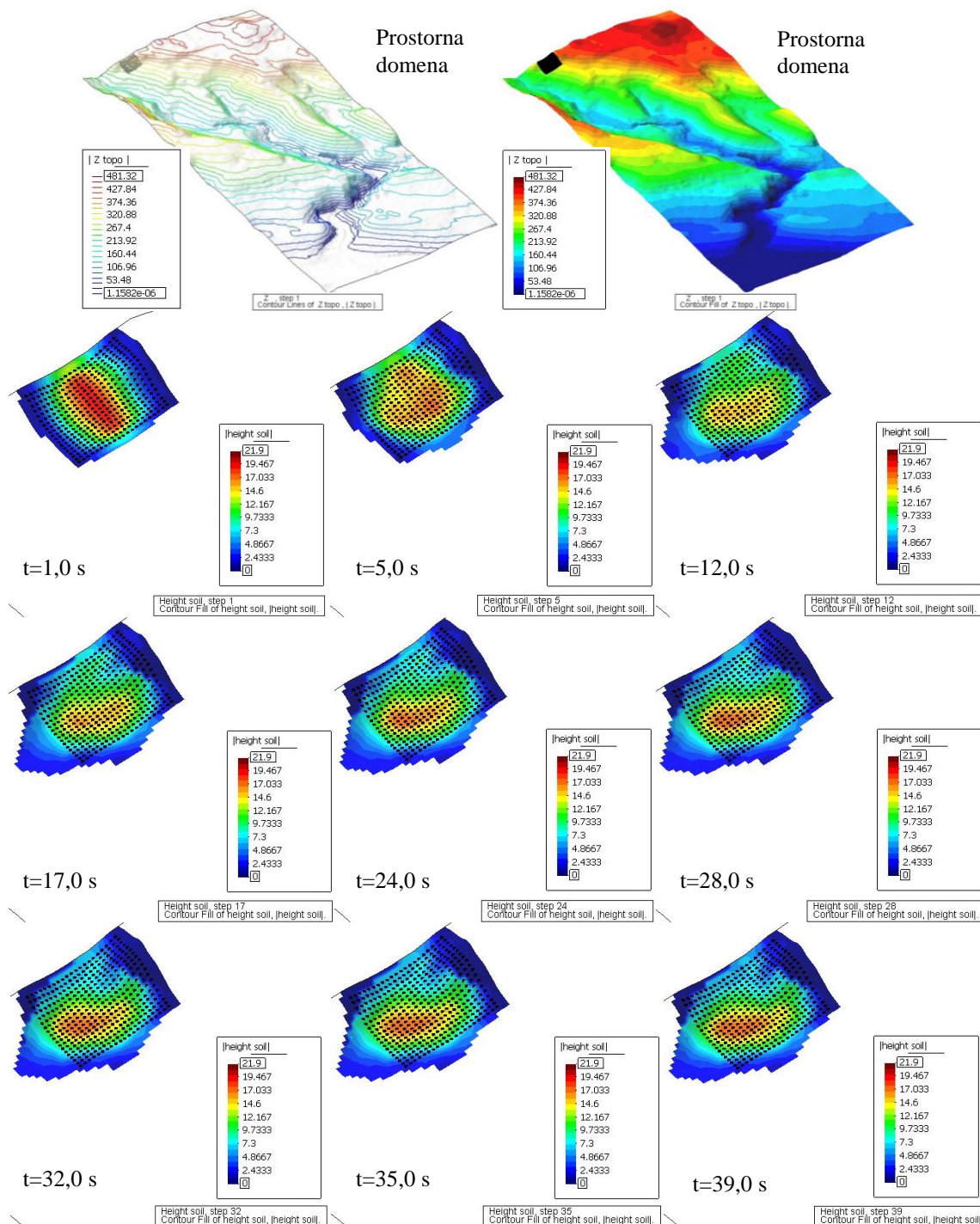
##### **6.4.1. Scenarij 1.**

U nastavku rada prikazuje se nekoliko mogućih scenarija pojave tokova i lavine krupnozrnatog materijala na području nizvodno od akumulacije Valići. U prvom scenariju se promatra klizanje mase s klizišta Grohovo i posljedično formiranje lavine krupnozrnatog materijala koja se propagira nizvodno u korito Rječine (Slika 6.32.). Za ovaj scenarij odabran je reološki zakon trenja pod utjecajem zakrivljenosti ( $nfriact=7$ ). Pored ovog zakona unutar SPH 2D modela postoji i odabir drugih reoloških zakona fluida: Newtonov fluid u turbulentnom režimu ( $nfriac=1$ ), Newtonov fluid u laminarnom režimu ( $nfriac=2$ ), model modificirane (poboljšane) Binghamove tekućine ( $nfriac=3$ ), realna (prava) Binghamova tekućina ( $nfriac=4$ ), model fluida s trenjem ( $nfriac=5$ ), model trenja tekućine s konsolidacijom koji primjenjuje disipaciju porednog tlaka u male debljine na površini klizanja ( $nfriac=6$ ), model trenja tekućine uz utjecaj konsolidacije i zakrivljenosti ( $nfriac=8$ ), te model Bagnoldove tekućine ( $nfriac=9$ ). Inicijalni volumen pokretne stijenske klizne mase procenjen je na vrijednost od 394770 m<sup>3</sup>. Na temelju SPH metode kreirana je klizna potencijalna ploha određene debljine. Podaci koji opisuju početni položaj izvornog materijala klizanja, nalaze se u zasebnoj datoteci („\*.pts“ datoteke). Unutar SPH 2D modela odabrana je vrijednost  $pa\_sph=2$  na temelju koje se aproksimacija tlaka određuje na temelju formule  $\frac{p(i)}{\rho(i)^2} + \frac{p(j)}{\rho(j)^2}$  (tzv. drugi oblik simetrizacije). Kao algoritam za izračunavanje duljine



izglađivanja u SPH 2D odabran je parametar  $sl=2$  u kojem zaglađivanje duljina varira u

ovisnosti o  $\frac{dh}{dt} = \left( \frac{-1}{\text{dim}} \right) * \left( \frac{h}{rho} \right) * \left( \frac{drho}{dt} \right)$  (detalje pogledati u Benz, 1990.).



**Slika 6.32.** Simulacijski prikaz klizanja mase i formiranja toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SPH metode (opcija: Contour fill), Scenarij 1.

Prilikom odabira SPH kernelove funkcije (parametar  $skf$ ) mogu se uzeti slijedeće cjelobrojne vrijednosti: 1 - kernel tipa kubične krivulje (Gingold i Monaghan, 1977.), 2 - Gaussov kernel (Monaghan i Gingold, 1983.), te 3 - kernelova krivulja 5. reda (Morris, 1996.). Za ovaj scenarij u simulaciji je uzeta vrijednost  $skf=1$ . Konstanta gravitacije u modelu uzeta je s vrijednosti  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ , gustoća materijala toka krupnozrnatog materijala  $\rho=2200 \text{ kg/m}^3$ , Manningov koeficijent hrapavosti  $n=0,03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ , a erozijski koeficijent po Hungru (1995.), konstanta  $c_4=0,00014$ . Erozijski koeficijent  $c_4 (E_s)$  se određuje na temelju izraza  $E_s = \frac{\ln(V_f/V_o)}{L}$ , gdje  $V_o$  predstavlja inicijalni volumen klizne mase,  $V_f$  je deponirani volumen nakon zaustavljanja toka krupnozrnatog materijala, a  $L$  je udaljenost putovanja toka tijekom propagacije. Površinska napetost tekućine je zanemarena, tj. parametar  $Tauy0$  je uzet s vrijednosti 0 Pa, dok je  $constK$  koja definira dinamičku viskoznost fluida uzeta s vrijednosti  $1,308 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$ , pri temperaturi vode od  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tangens kuta krajnjeg učinkovitog trenja (parametar  $tanfi8$ ) uzet je sa vrijednosti 0,466, dok je minimalna debljina sloja pod djelovanjem smicanja uslijed tečenja uzeta s vrijednosti  $hfriact0=1 \cdot 10^{-3}$ . Tangens kuta inicijalnog trenja (parametar  $tanfi0$ ) odabran je sa vrijednosti 0,466. Koeficijent  $B_{fact}$  predstavlja u SPH 2D eksponencijalni faktor prigušenja tangensa kuta trenja sa vremenom, a primjenjuje se kod reoloških zakona fluida sa trenjem i Bagnoldove tekućine. Kada se uzima u proračun konsolidacija, koeficijent  $B_{fact}$  se određuje preko formule  $B_{fact} = \frac{\pi^2 C_v}{4}$ , pri čemu  $C_v$  predstavlja koeficijent konsolidacije (uzet sa vrijednosti  $6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ). U ovom scenariju nije razmatrana konsolidacija, tj.  $B_{fact}=0$ .

Kontrolni parametar za porni tlak (parametar  $icpw$ ) može imati vrijednost 1 koji definira promjene u međuprostoru tlaka (smanjenje pornog tlaka), a vrijednost 0 ako ga nema (nedrenirani uvjet). Unutar ovog scenarija uzeta je vrijednost  $icpw=1$ . Omjer između pritiska  $P$  i likvefakcije predstavlja koeficijent  $pwprel=P/P_{likuef}$  na temelju kojeg se procjenjuje porni pritisak. Njegova vrijednost je između 0 i 1, a u ovom slučaju odabrana je vrijednost  $pwprel=0,6$  (vrijednost dobivena laboratorijskim ispitivanjima na uzorcima tla). Ovaj faktor je uključen samo kada je  $icpw=1$ . Početna klizna masa je određena pomoću GiD 7.7.6. pred i postprocesora na temelju ulaznih vrijednosti gustoće materijala i dimenzija potencijalne klizne zone, te iznosi  $394770 \text{ m}^3$ .

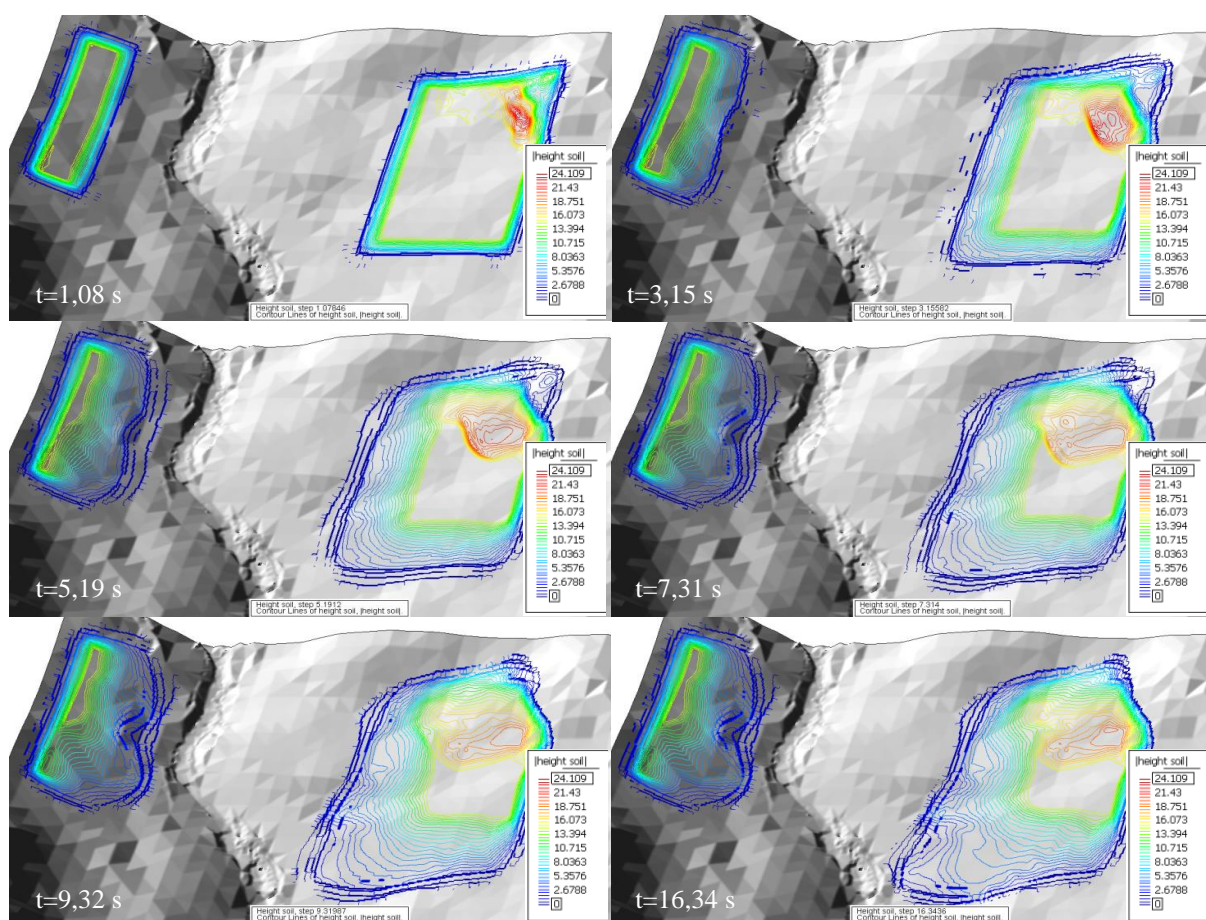
Na temelju numeričkog SPH 2D modela i popratne analize određene su najznačajnije izlazne vrijednosti za slučaj lavine krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo (Tablica 6.12.).

Tablica 6.12. Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 1., klizište Grohovo

Maks. brzina lavine krupnoz. materijala, $v$ , [m/s]	Doseg lavine krupn. mater., $L$ , [m]	Maks. visina deponiranog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije lavine krupn. mater., $A$ , [ha]	Ukupni volumen toka krupnozrnatog materijala, $V$ , [m <sup>3</sup> ]
5,2	163	21,9	5,92	419392

### 6.4.2. Scenarij 2.

U ovom scenariju analizirale su se posljedice nastanka toka krupnozrnatog materijala koji se formira nakon interakcije (sudara) dvaju klizišta na širem području u okolici sela Grohovo (Slika 6.33.). Reološki zakon koji je korišten za opis unutar ovog procesa je zakon trenja pod utjecajem zakrivljenosti ( $nfrict=7$ ). Jedna klizna masa je vezana za klizište Grohovo na SI strani (veća klizna masa,  $V_1=869275$  m<sup>3</sup>), dok je druga klizna masa (gotovo dvostruko manja,  $V_2=390545$  m<sup>3</sup>) vezana za klizište koje se formira podno Velog vrha, na suprotnoj strani vodotoka Rječine. Ulazni parametri korišteni u numeričkom modelu prikazani su u tablici 6.13.



Slika 6.33. Simulacijski prikaz interakcije dvaju klizišta u neposrednoj blizini sela Grohovo i mogućnost formiranja toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 2.

**Tablica 6.13.** Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 2., klizište Grohovo

Početni volumen, [m <sup>3</sup> ]	pa_sph	nnps	sle	skf	cgra	dens	cmanning	c4
1259820	2	2	2	1	9,8	2200	0,04	0,00014
nfriect	Tauy0	constK	visco	tanfi8	hfriect0	c11	tanfi0	Bfact
7	0	1,308*10 <sup>-3</sup>	-	0,466	1*10 <sup>-3</sup>	-	0,466	0
c14	c15	icpwp	pwprel					
-	1*10 <sup>-3</sup>	1	0,6					

Za prostornu diskretizaciju poslužila je ekvidistantna mreža dimenzija 2\*2 m. Nakon izvršenog proračuna i provedene analize dobivene su pojedine značajne izlazne vrijednosti (Tablica 6.14.). Iz simulacijskih prikaza (Slika 6.33.) vidi se da za dani reološki zakon dolazi do evidentnog pomaka klizne mase, međutim ne formira se tok krupnozrnatog materijala u koritu Rječine. Predpostavljeni reološki zakon stoga nije adekvatan za opis toka krupnozrnatog materijala na području klizišta Grohovo.

**Tablica 6.14.** Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 2., klizište Grohovo

Maksimalna brzina toka krupn. mater., $v$ , [m/s]	Doseg toka krupn. mater., $L$ , [m]	Maksimalna visina deponiranog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupn. mater., $A$ , [ha]	Ukupni volumen toka krupnozrnatog materijala, $V$ , [m <sup>3</sup> ]
Kl. ploha 1; 7,2 Kl. ploha 2; 6,7	Kl.ploha1;310 Kl.ploha2;163	Kl. ploha 1; 20,3 Kl. ploha 2; 18,1	Kl. ploha 1; 14,1 Kl. ploha 2; 6,7	Kl.ploha1;1061272 Kl.ploha2; 412717

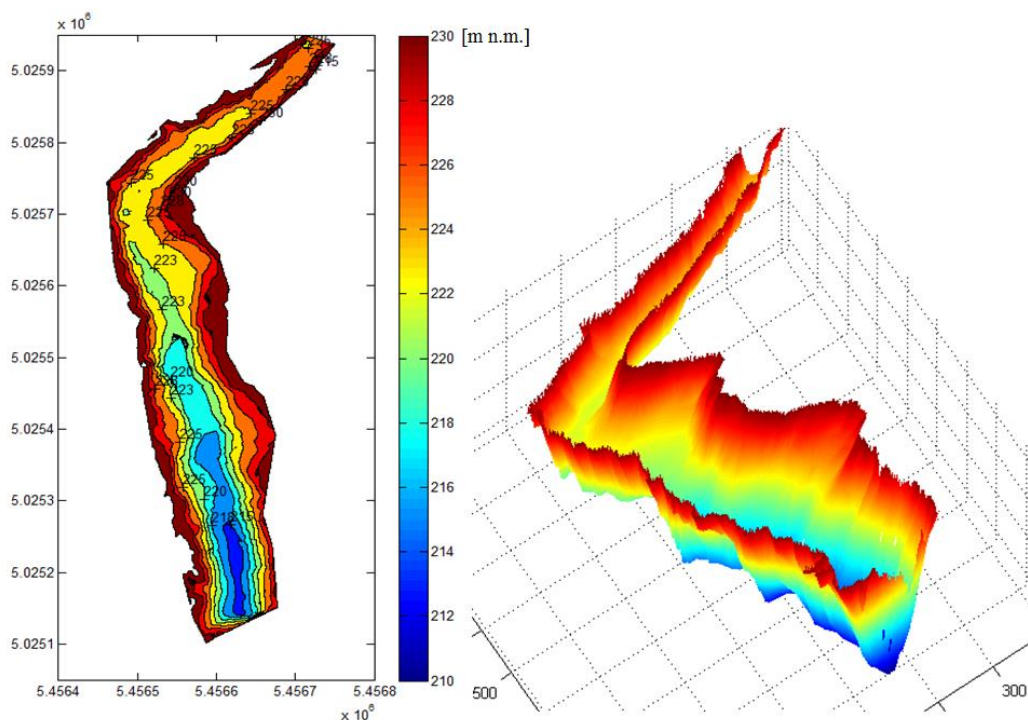
### 6.4.3. Scenarij 3.

Jedna od mogućih katastrofalnih posljedica unutar srednjeg dijela toka Rječine može biti vezana za puknuće (rušenje, prolom) brane i posljedično formiranje poplavnog vala s primjesama sitnozrnatih čestica iz akumulacije koji bi se nizvodno propagirao prema urbanom dijelu grada Rijeke. U cilju razvoja hidrološkog modela akumulacije Valići izvedeno je batimetrijsko snimanje pomoću ADCP instrumenta u svibnju 2012. godine (Slika 6.34.).

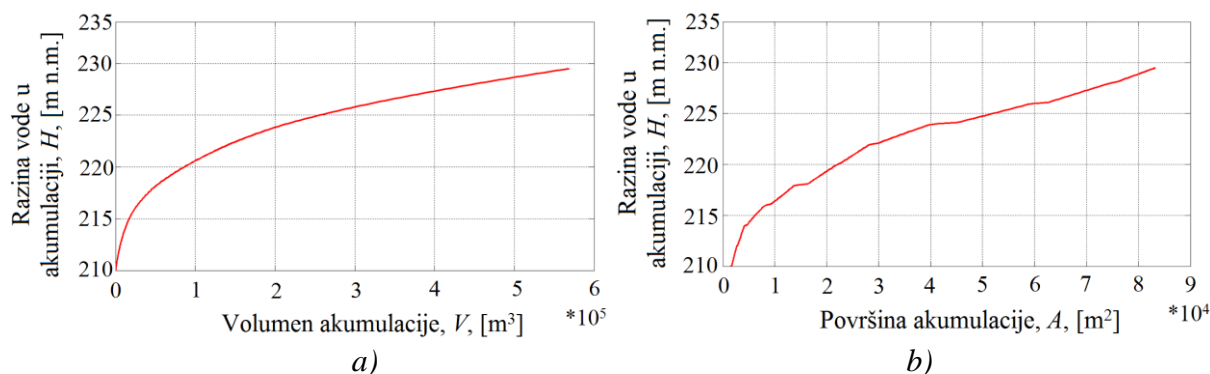
Značajnu ulogu u numeričkim SPH 2D modelima kao ulazni parametri imale su krivulja odnosa volumena akumulacije i razine vode u akumulaciji (temeljene na 3D prikazu batimetrije akumulacije Valići (Slika 6.35.a)), te krivulja koja daje odnos površine i razine vode u akumulaciji Valići (Slika 6.35.b)).

Reološki zakon koji je korišten za opis takvog tipa tečenja uzet je kao Newtonow fluid u turbulentnom režimu tečenja ( $nfriect=1$ ), dok je prostorna diskretizacija napravljena na ekvidistantnoj mreži 5\*5 m. Ulazni podaci korišteni u SPH 2D modelu dani su u tablici 6.15., dok su simulacijski prikazi dani na slici 6.36.





Slika 6.34. 3D prikaz batimetrije akumulacije Valići (Ružić i sur., 2012., nepublicirano)



Slika 6.35. a) odnos volumena i razine vode u akumulaciji Valići, b) odnos površine i razine vode u akumulaciji Valići (Ružić i sur., 2012., nepublicirano)

Tablica 6.15. Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 3., brana Valići

Početni volumen, [m <sup>3</sup> ]	pa_sph	nnps	sle	skf	cgra	dens	cmanning	c4
434899	2	2	2	1	9,8	1800/1000	0,007	0,00014
nfriact	Tauy0	constK	visco	tanfi8	hfriact0	c11	tanfi0	Bfact
1	0	1,308*10 <sup>-3</sup>	-	0,466	1*10 <sup>-3</sup>	2,33	0,466	0
c14	c15	icpwp	pwprel					
-	1*10 <sup>-3</sup>	1	0,6					

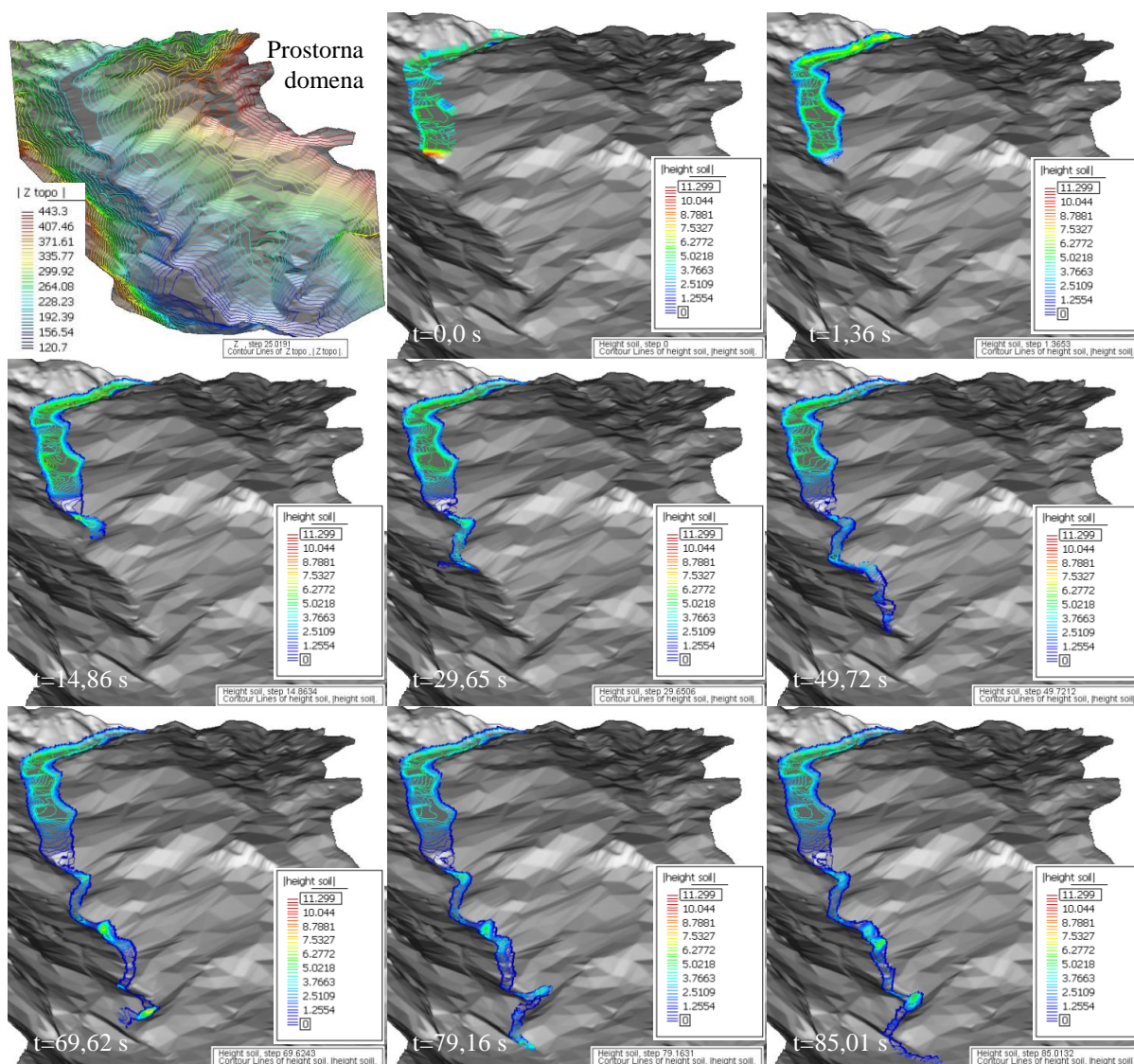
U samom numeričkom proračunu uzeta je gotovo potpuno ispunjena akumulacija Valići. Iz simulacijskih prikaza može se uvidjeti da se poplavni val vrlo brzo propagira nizvodno u koritu Rječine (Tablica 6.16.). Kako unutar akumulacije postoji određena količina



suspendiranog sitnozrnatog materijala, cjelokupni val se može promatrati kao tok sitnozrnatog materijala. Važno je napomenuti da zbog ograničenja pojedinih elemenata unutar GID 7.7.6. grafičkog pred i postprocesora nije u cjelosti mogla biti prikazana propagacija toka sitnozrnatog materijala, iako se na kraju propagacije vala (čelu vala) naslučuje smanjenje brzine toka i opadanje dubine (visine) deponiranog materijala. Izlazne vrijednosti za ovaj scenarij dane su u tablici 6.16.

**Tablica 6.16.** Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 3., brana Valiči

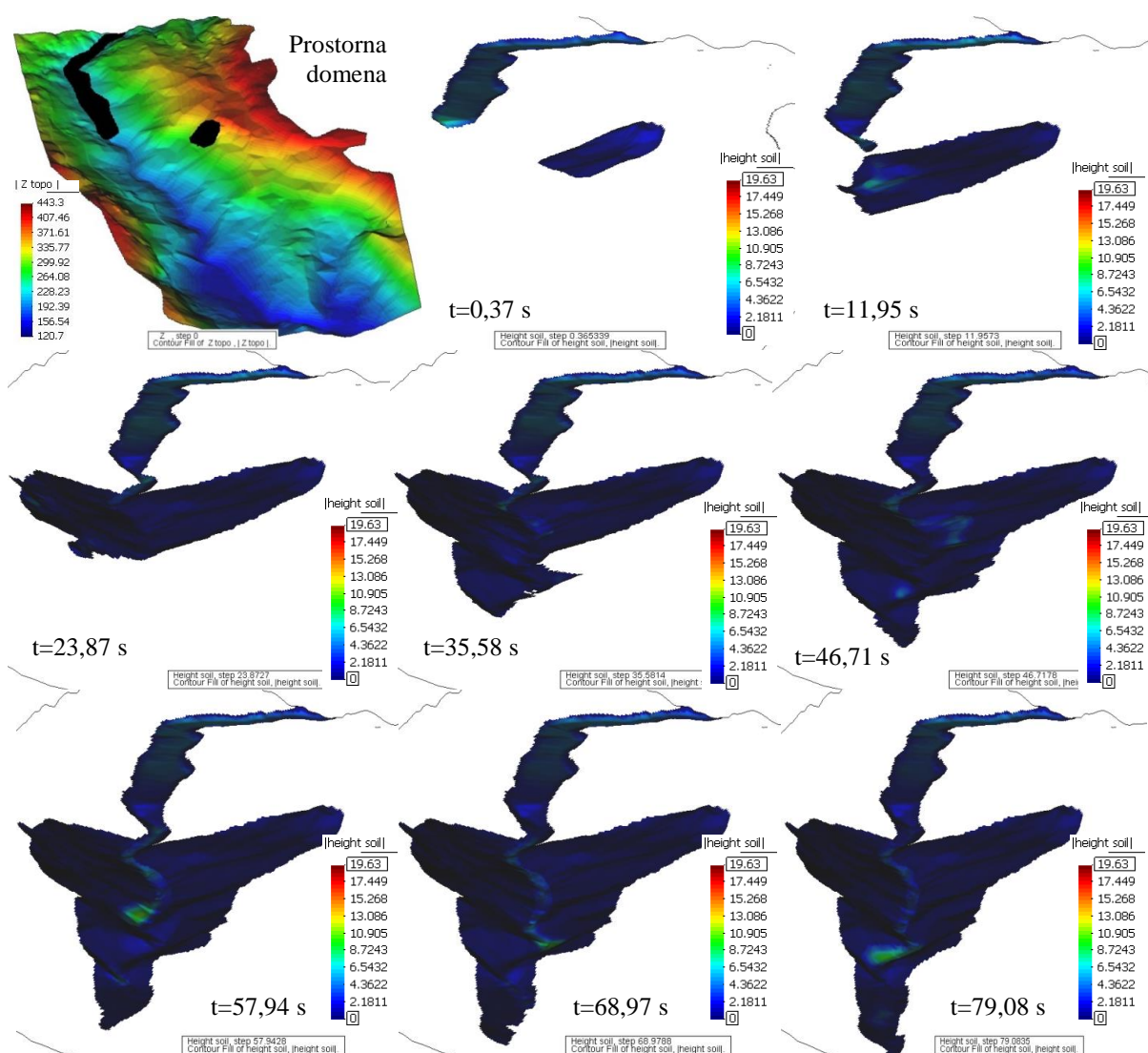
Maks. brzina toka sitnozr. materijala, $v$ , [m/s]	Doseg toka sitno. mater., $L$ , [m]	Maksimalna visina deponiranog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka sitnozrnatog materijala, $A$ , [ha]	Ukupni volumen toka sitnozrnatog materijala, $V$ , [m <sup>3</sup> ]
19,3	1660	7,0	11,9	593728



**Slika 6.36.** Simulacijski prikaz puknuća brane Valiči i formiranje toka sitnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 3.

#### 6.4.4. Scenarij 4.

Naredni simulacijski prikazi (Slika 6.37.) donose opis toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine koji nastaje interakcijom proloma brane Valići i mješanjem vode s krupnozrnatim materijalom nastalim na klizištu Grohovo. Početna klizna masa na klizištu iznosi  $394770 \text{ m}^3$ , dok je ukupni volumen akumulacije Valići uzet sa  $470000 \text{ m}^3$ . Prostorna diskretizacija za opis propagacije toka krupnozrnatog materijala napravljena je na temelju ekvidistantne mreže dimenzija  $5 \times 5 \text{ m}$ . Pojava koja je prikazana u nastavku opisana je Newtonovim zakonom fluida u turbulentnom režimu. Ulazni podaci za SPH 2D model dani su u tablici 6.17., dok su izlazne vrijednosti dane u tablici 6.18.



*Slika 6.37. Simulacijski prikaz puknuća brane Valići i klizanja krupnozrnatog materijala s klizišta Grohovo, te formiranje toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 4.*

**Tablica 6.17.** Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 4., akumulacija Valići i klizište Grohovo

Početni volumen, [m <sup>3</sup> ]	pa_sph	nnps	sle	skf	cgra	dens	cmanning	c4
394770/470000	2	2	2	1	9,8	1800/1000	0,01	0,00014
nfriact	Tauy0	constK	visco	tanfi8	hfriact0	c11	tanfi0	Bfact
1	0	1,308*10 <sup>-3</sup>	-	0,466	1*10 <sup>-3</sup>	2,33	0,466	1,47*10 <sup>-5</sup>
c14	c15	icpwp	pwprel					
-	1*10 <sup>-3</sup>	1	0,6					

Na slici 6.37. jasno se vidi da utjecaj vode i njenog miješanja s krupnozrnatim materijalom znatno doprinosi bržem kretanju toka. Također, zbog miješanja dolazi do odvajanja krupnozrnatog materijala od podloge terena, smanjuje se koeficijent trenja i dolazi do ubrzanja propagacije toka krupnozrnatog materijala nizvodno u koritu Rječine. Zbog sudara (miješanja) klizne mase i vode dolazi do mjestimičnog podizanja materijala u toku na više hipsometrijske kote, te se utjecajem gravitacije taj materijal povratno vraća u korito Rječine. Pritom, svakako treba sagledavati visinski (vertikalni) doseg toka krupnozrnatog materijala, kao i posljedice bočnih hidrodinamičkih udara uslijed njegovog povratnog djelovanja.

**Tablica 6.18.** Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 4., akumulacija Valići i klizište Grohovo

Maks. brzina toka krupnozr. materijala, $v$ , [m/s]	Doseg toka krupnoz. mater., $L$ , [m]	Maksimalna visina deponiranog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupnozr. mater., $A$ , [ha]	Ukupni volumen toka kupnozrnatog materijala, $V$ , [m <sup>3</sup> ]
23,1	1790	17,2	68,6	1163667

#### 6.4.5. Scenarij 5.

U petom mogućem scenariju se promatra identičan slučaj formiranja toka krupnozrnatog materijala nastalog miješanjem vode iz akumulacije Valići i klizne mase s klizišta Grohovo. Razlike su jedino u početnom (inicijalnom) volumenu koji je u ovom slučaju nešto manji u odnosu na predhodni, te u odabiru reološkog zakona. U ovom je scenariju odabran reološki zakon realne (nemodificirane) Binghamove tekućine. Ulazni podaci za opis ove pojave prikazani su u tablici 6.19. Na temelju tih podataka dobiveni su simulacijski prikazi propagacije toka unutar korita Rječine (Slika 6.38.).

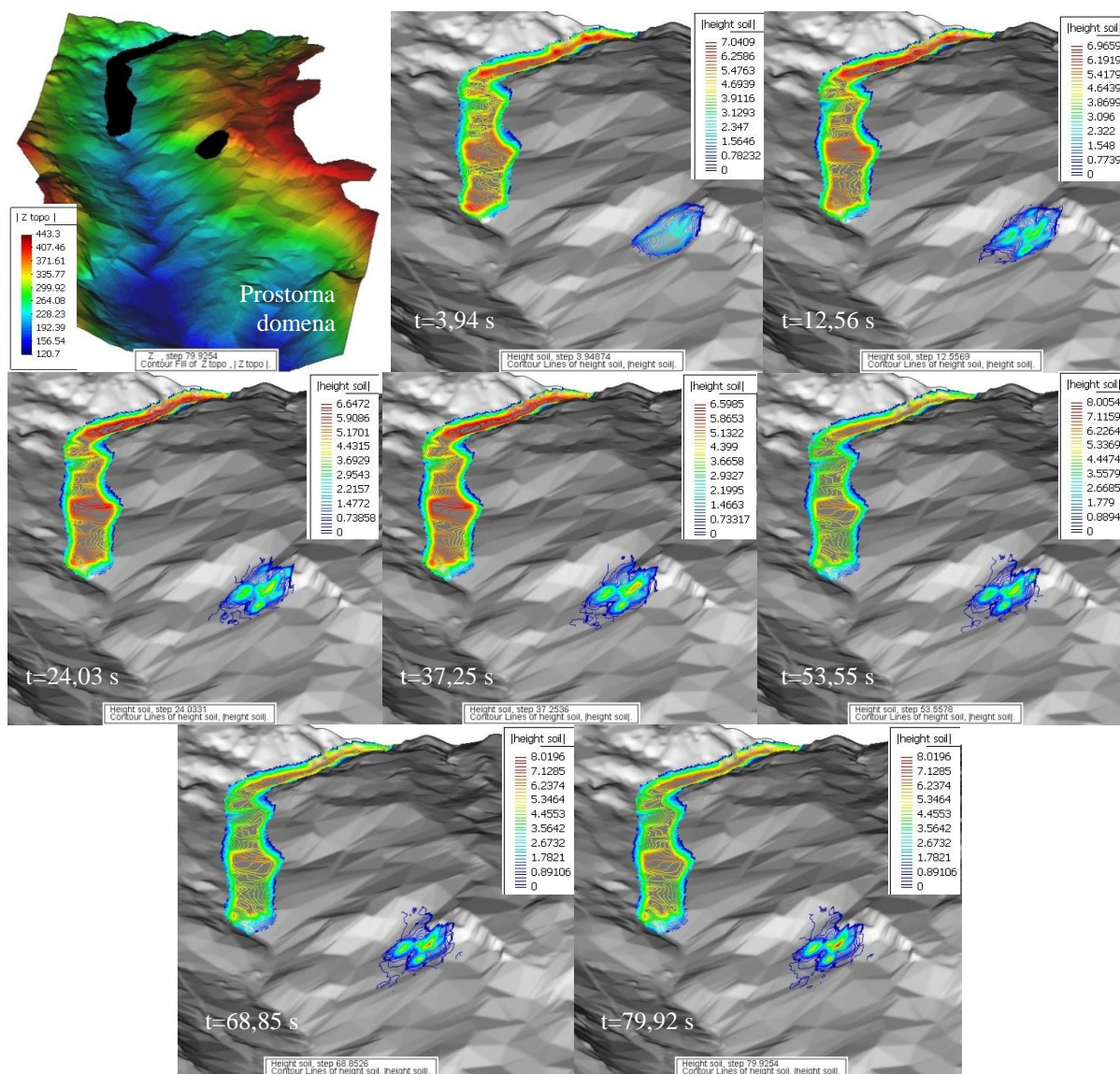
Kao što se iz numeričkih simulacija vidi (Slika 6.38.) na temelju reološkog zakona realne Binghamove tekućine nije moguće promatrati propagaciju toka krupnozrnatog materijala, kao ni adekvatno klizanje mase krupnozrnate strukture. Razlog tomu je što se reološki zakon Binghamove tekućine isključivo koristi kod opisa propagacije toka



sitnozrnatog materijala. Iako je vidljivo da su pomaci očiti, oni su zanemarivo mali u odnosu na prijašnje scenarije u kojima je promatrano formiranja toka krupnozrnatog materijala. Izlazne vrijednosti SPH 2D modela za ovaj mogući scenarij prikazane su u tablici 6.20.

**Tablica 6.19.** Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 5., akumulacija Valići i klizište Grohovo

Početni volumen, [m <sup>3</sup> ]	pa_sph	nnps	sle	skf	cgra	dens	cmanning	c4
394770/470000	2	2	2	1	9,8	1800/1000	0,01	0,00014
nfrict	Tauy0	constK	visco	tanfi8	hfriict0	c11	tanfi0	Bfact
4	10 <sup>5</sup>	1,308*10 <sup>-3</sup>	-	0,466	1*10 <sup>-3</sup>	-	0,466	1,47*10 <sup>-5</sup>
c14	c15	icpwp	pwprel					
-	1*10 <sup>-3</sup>	1	0,6					



**Slika 6.38.** Simulacijski prikaz proloma brane Valići i propagacija klizne mase s klizišta Grohovo, SPH metoda, Scenarij 5.

**Tablica 6.20.** Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 5., akumulacija Valići i klizište Grohovo

Maks. brzina toka krupnozr. materijala, $v$ , [m/s]	Doseg toka krupnozr. mater., $L$ , [m]	Maksimalna visina deponiranog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupn. mater., $A$ , [ha]	Ukupni volumen toka krupnozrnatog materijala, $V$ , [m <sup>3</sup> ]
2,74	219/55	7,8	23,2	985838

**6.4.6. Scenarij 6.**

Radi usporedbe s mogućim scenarijem 4. (Newtonov zakon fluida u turbulentnom režimu) kreiran je novi mogući scenarij kod kojega je za opis propagacije toka krupnozrnatog materijala uzet Newtonov zakon fluida u laminarnom režimu (Pastor, 2007.). Početni volumen klizne mase je nešto manji u odnosu na Scenarij 4., dok su preostali ulazni parametri ostali nepromijenjeni (Tablica 6.21.). Za opis toka krupnozrnatog materijala kreirana je ekvidistantna mreža konfiguracije terena dimenzija 5\*5 m. Zbog zanemarivanja koeficijenta turbulencije u ovom numeričkom modelu dolazi do nešto veće vrijednosti dosega udaljenosti toka krupnozrnatog materijala u odnosu na Scenarij 4. Simulacijski prikazi miješanja krupnozrnatog materijala nastalog klizanjem mase s klizišta Grohovo i vode nakon puknuća (rušenja) brane Valići prikazani su na slici 6.39., dok su izlazne vrijednosti SPH 2D modela dane u tablici 6.22.

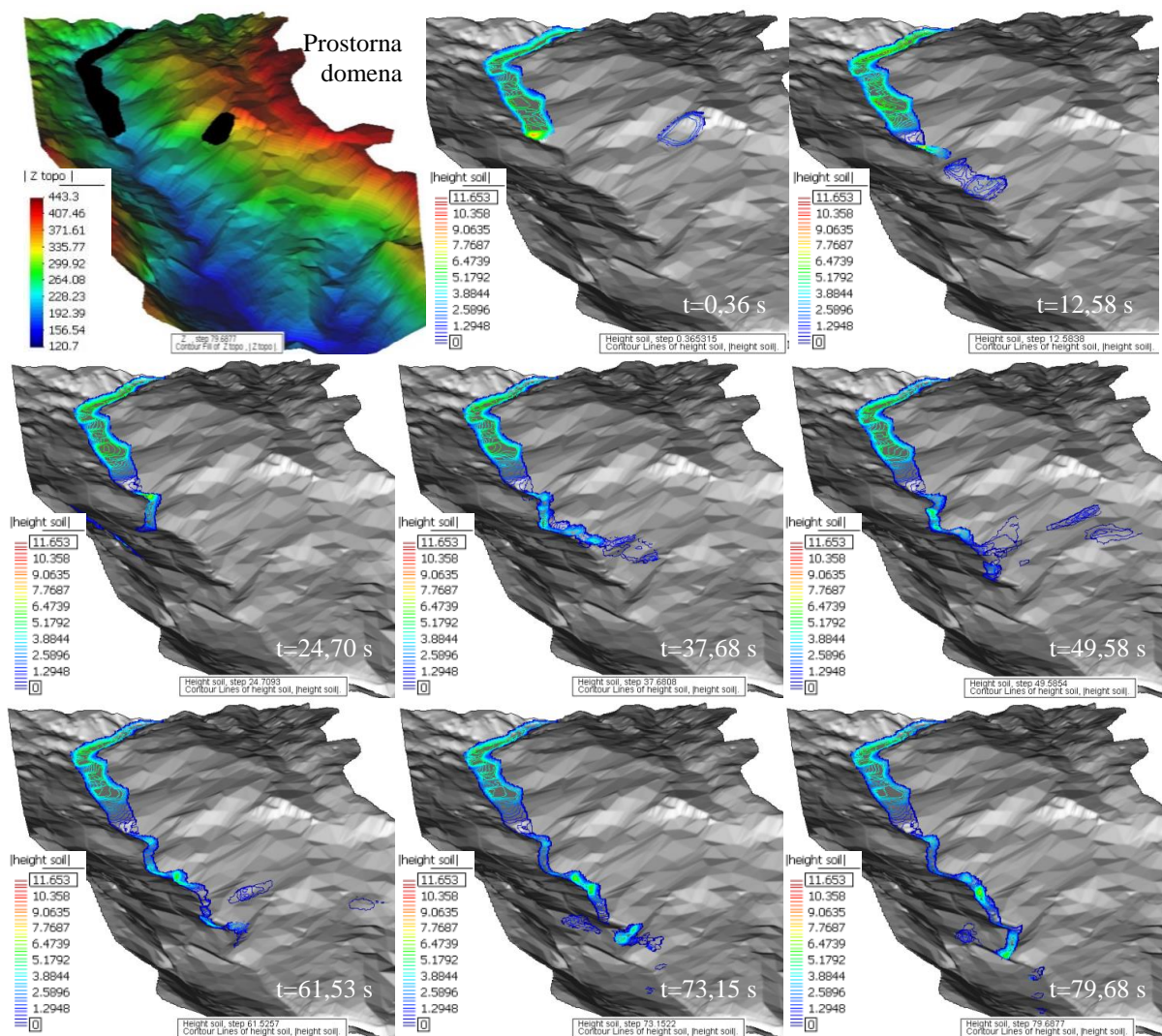
**Tablica 6.21.** Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 6., akumulacija Valići i klizište Grohovo

Početni volumen, [m <sup>3</sup> ]	pa_sph	nnps	sle	skf	cgra	dens	cmanning	c4
394770/470000	2	2	2	1	9,8	1800/1000	0,01	0,00014
nfriact	Tauy0	constK	visco	tanfi8	hfriact0	c11	tanfi0	Bfact
2	0	1,308*10 <sup>-3</sup>	-	0,466	1*10 <sup>-3</sup>	-	0,466	1,47*10 <sup>-5</sup>
c14	c15	icpwp	pwprel					
-	1*10 <sup>-3</sup>	1	0,6					

**Tablica 6.22.** Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 6., akumulacija Valići i klizište Grohovo

Maks. brzina toka krupn. materijala, $v$ , [m/s]	Doseg toka krupnozr. materijala, $L$ , [m]	Maksimalna visina deponiranog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupn. mater., $A$ , [ha]	Ukupni volumen toka krupnozrnatog materijala, $V$ , [m <sup>3</sup> ]
16,8	1340	7,23	44,53	1236621





**Slika 6.39.** Simulacijski prikaz puknuća brane Valići i klizanja krupnozrnatog materijala sa klizišta Grohovo, te formiranje toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 6.

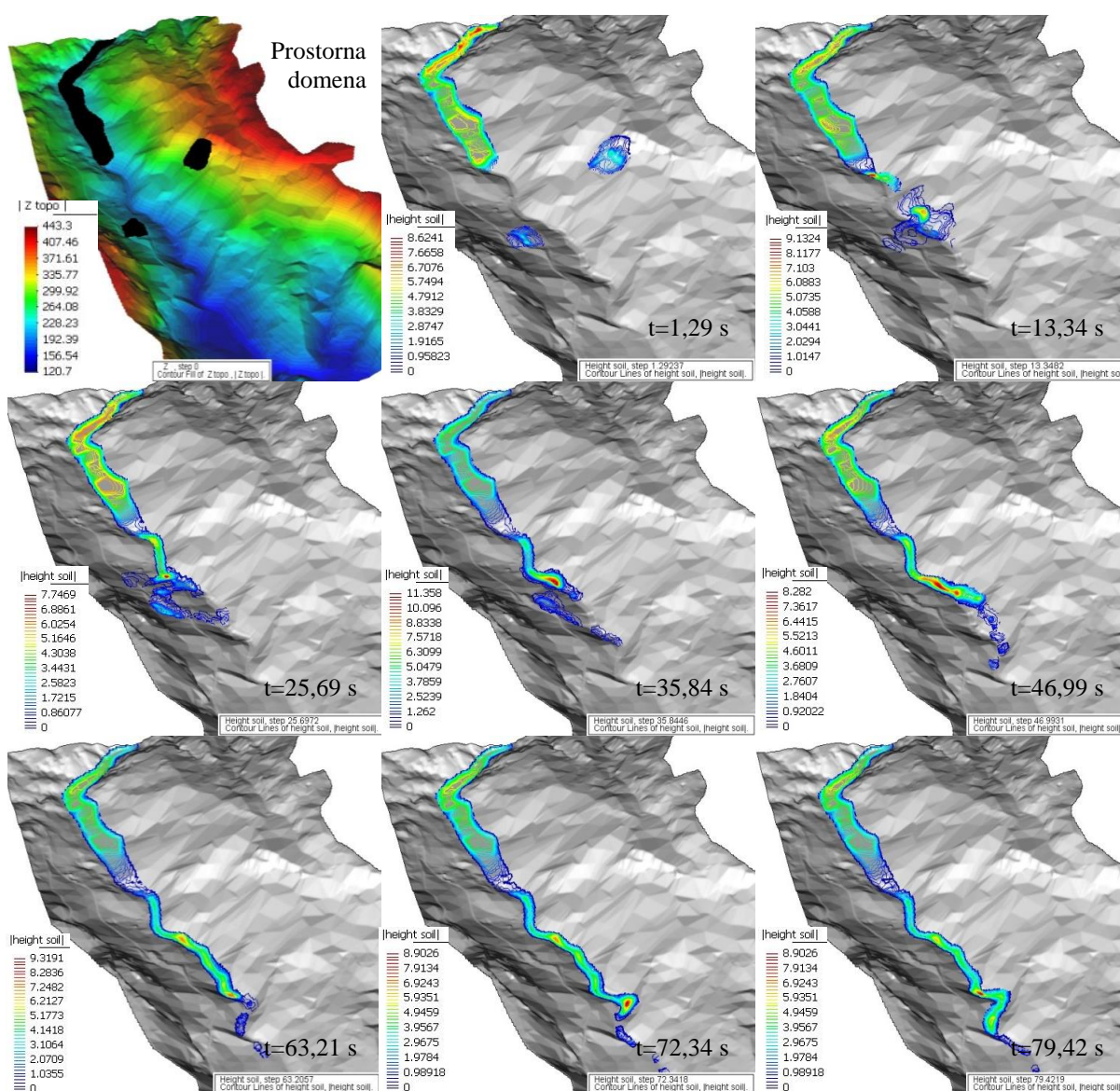
#### 6.4.7. Scenarij 7.

Dodatno se razmatrala mogućnost formiranja toka krupnozrnatog materijala uslijed miješanja vode iz akumulacije Valići nakon puknuća istoimene brane ( $V_{akum.} = 470000 \text{ m}^3$ ) i klizne mase s dviju kliznih ploha (ukupnog volumena  $V_{kl.mas.1} + V_{kl.mas.2} = 491493 \text{ m}^3$ ) u neposrednoj blizini sela Grohovo (Slika 6.40.). Karakteristično je u ovom scenariju da je interakcijsko djelovanje klizne mase s dviju kliznih ploha (njihovo mjesto sudara) nastupilo prije dolaska poplavnog vala nastalog puknućem brane Valići, te se tek naknadno formirao tok krupnozrnatog materijala. Sam proces propagacije traje otprilike 80-tak sekundi i unutar tog vremena tok krupnozrnatog materijala je nekoliko puta izašao iz samog korita Rječine (zbog međusobnog bočnog djelovanja dviju kliznih masa iz različitih smjerova). Za opis ovakvog scenarija odabran je Newtonov zakon fluida u turbulentnom režimu, a kao ulazne vrijednosti SPH 2D

modela uzete su one iz tablice 6.23. Vrijednosti izlaznih podataka dobivenih za ovaj tip scenarija dane su u tablici 6.24.

**Tablica 6.23.** Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 7., akumulacija Valiči i dvije klizne plohe u neposrednoj blizini

Početni volumen, [m <sup>3</sup> ]	pa_sph	nnps	sle	skf	cgra	dens	cmanning	c4
491493 / 470000	2	2	2	1	9,8	1800/1000	0,01	0,00014
nfrict	Tauy0	constK	visco	tanfi8	hfrict0	c11	tanfi0	Bfact
1	0	1,308*10 <sup>-3</sup>	-	0,466	1*10 <sup>-3</sup>	2,33	0,466	1,47*10 <sup>-5</sup>
c14	c15	icpwp	pwprel					
-	1*10 <sup>-3</sup>	1	0,6					



**Slika 6.40.** Simulacijski prikaz puknuća brane Valiči i klizanja krupnozrnatog materijala s dviju kliznih ploha u neposrednoj blizini klizišta Grohovo, te formiranje toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 7.

**Tablica 6.24.** Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 7., akumulacija Valiči i dvije klizne plohe u neposrednoj blizini

Maks. brzina toka krupn. mater., $v$ , [m/s]	Doseg toka krupn. mater., $L$ , [m]	Maksimalna visina deponiranog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupn. materijala, $A$ , [ha]	Ukupni volumen toka krupnozrnatog materijala, $V$ , [m <sup>3</sup> ]
22,7	1786	8,94	38,7	1567235

**6.4.8. Scenarij 8.**

U predposljednjem promatranom scenariju koji se potencijalno može dogoditi na području srednjeg dijela toka Rječine promatrano je formiranje toka krupnozrnatog materijala nastalog miješanjem vode iz akumulacije Valiči (nakon puknuća brane,  $V_{akum.}=470000 \text{ m}^3$ ) i klizne mase s triju po veličini različitih kliznih ploha (ukupnog volumena  $V_{kl.mas.1}+V_{kl.mas.2}+V_{kl.mas.3}=505918 \text{ m}^3$ ) u neposrednoj blizini sela Grohovo (Slika 6.41.). Kao i u predhodnom scenariju, klizne plohe su odabrane na temelju vizualne predodžbe mjesta sa strmim i nestabilnim nagibima padina, te geološkim činjenicama o mogućem nastanku klizanja na nestabilnom flišnom materijalu. Pojedina od tih tri klizišta su se dogodila u povijesti na mjestima koja su odabrana za ovaj scenarij. Kao i u predhodnom slučaju odabran je Newtonov zakon fluida u turbulentnom režimu, a za opis toka krupnozrnatog materijala u SPH 2D modelu uzete su ulazne vrijednosti dane u tablice 6.25. Izlazne vrijednosti (rezultati) dobivene u modelu prikazuje tablica 6.26. U slučaju sudaranja krupnozrnatog (ili sitnozrnatog) materijala nastalih na više kliznih ploha potrebno je uzeti u obzir invazivno djelovanje hidrodinamičkog udara takvog toka s bočnih strana, nakon povratnog gravitacijskog djelovanja sa strmih padina.

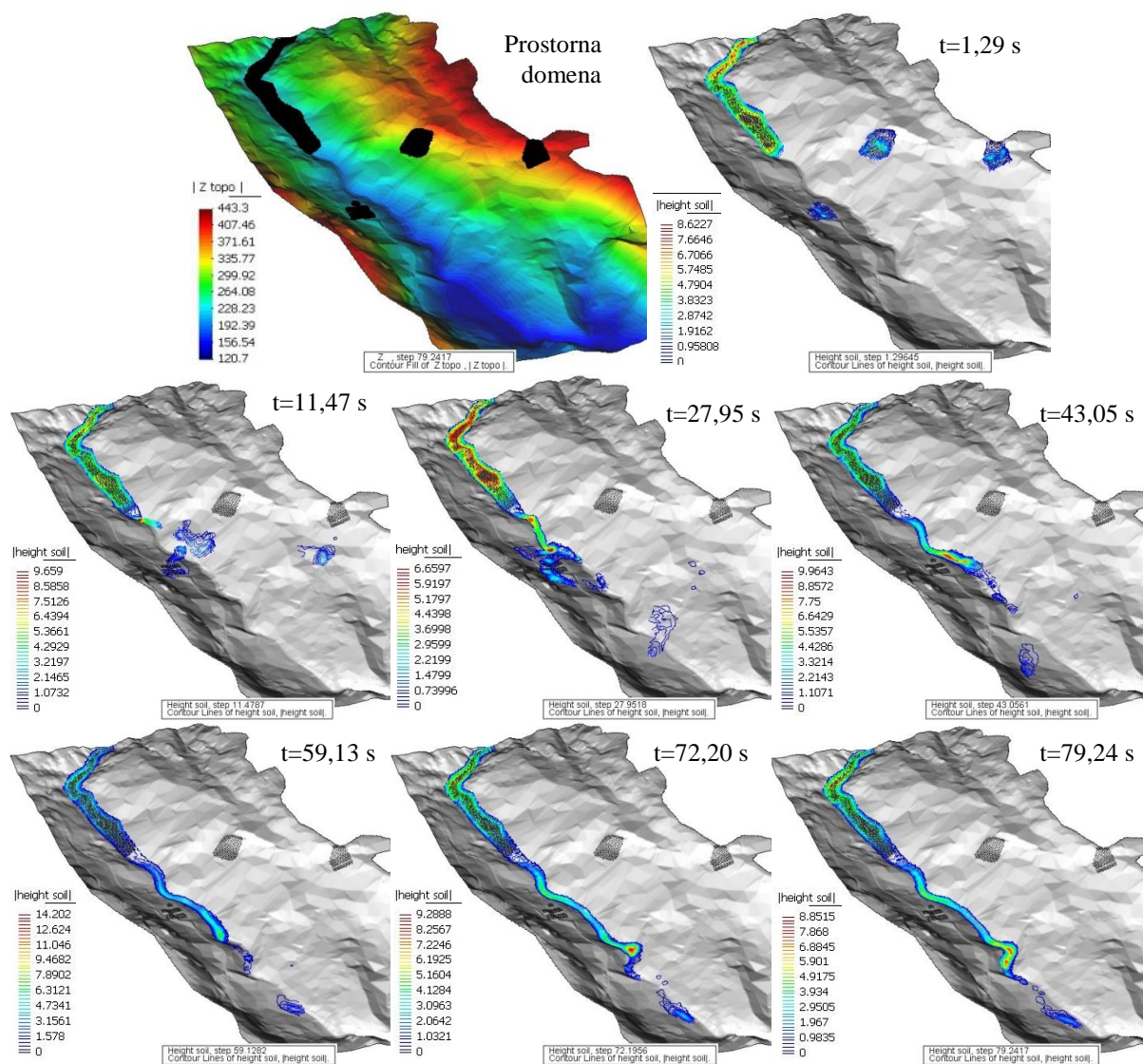
**Tablica 6.25.** Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 8., akumulacija Valiči i tri klizne plohe u neposrednoj blizini

Početni volumen, [m <sup>3</sup> ]	pa_sph	nnps	sle	skf	cgra	dens	cmanning	c4
505918 / 470000	2	2	2	1	9,8	1800/1000	0,01	0,00014
nfriect	Tauy0	constK	visco	tanfi8	hfriect0	c11	tanfi0	Bfact
1	0	$1,308 \cdot 10^{-3}$	-	0,466	$1 \cdot 10^{-3}$	2,33	0,466	$1,47 \cdot 10^{-5}$
c14	c15	icpwp	pwprel					
-	$1 \cdot 10^{-3}$	1	0,6					

**Tablica 6.26.** Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 8., akumulacija Valiči i tri klizne plohe u neposrednoj blizini

Maks. brzina toka krupn. mater., $v$ , [m/s]	Doseg toka krupn. mater., $L$ , [m]	Maksimalna visina deponiranog materijala, $h$ , [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka krupn. mater., $A$ , [ha]	Ukupni volumen toka krupnozrnatog materijala, $V$ , [m <sup>3</sup> ]
23,2	1846	8,85	57,9	1785932



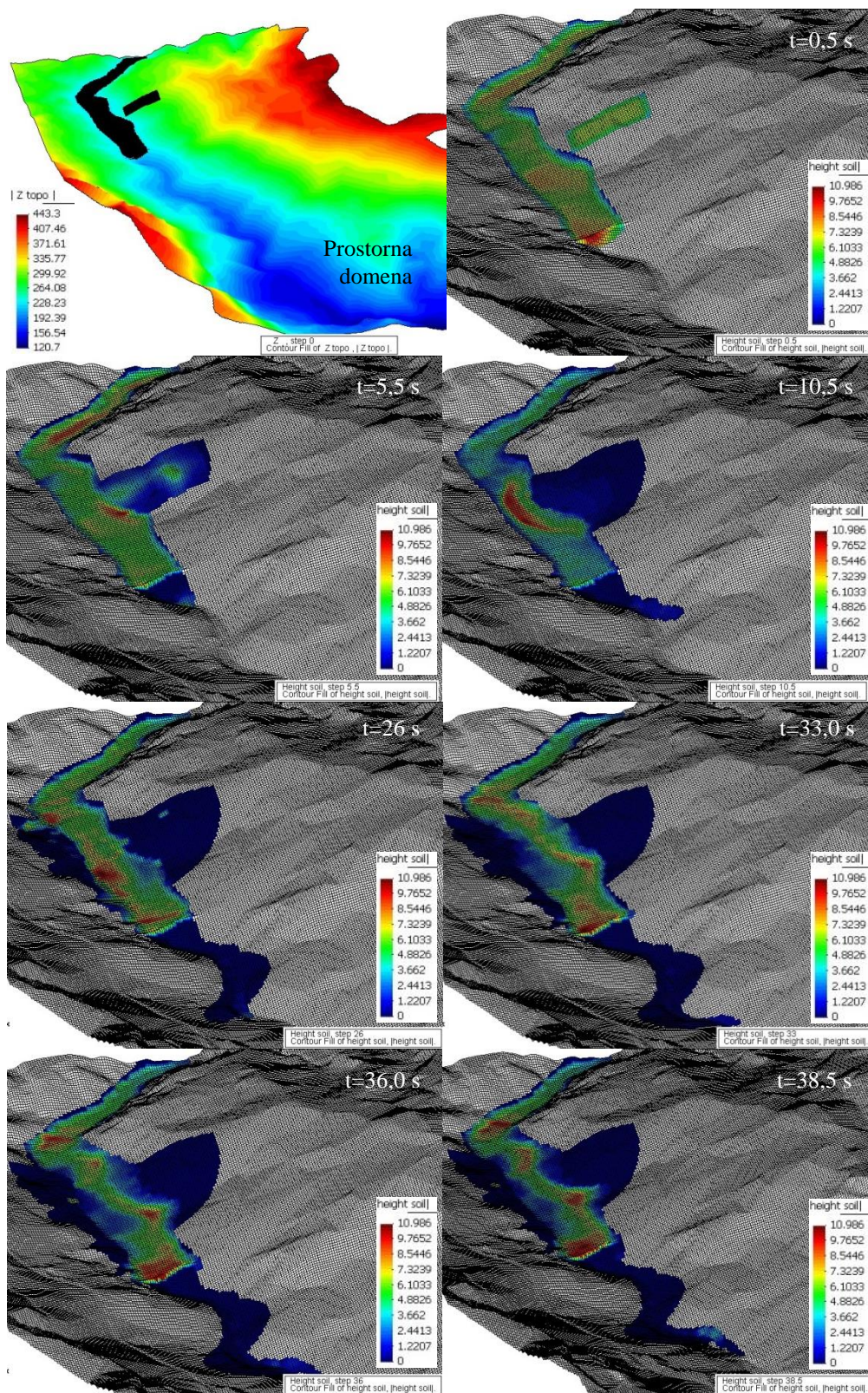


**Slika 6.41.** Simulacijski prikaz puknuća brane Valiči i klizanja krupnozrnatog materijala s triju kliznih ploha u neposrednoj blizini klizišta Grohovo, te formiranje toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 8.

#### 6.4.9. Scenarij 9.

Posljedni scenarij donosi prikaz formiranja plimnog vala unutar akumulacije Valiči ( $V_{akum.}=470000 \text{ m}^3$ ) koji nastaje uslijed klizanja (unosa) flišne klizne mase u akumulaciju. Uslijed takve pojave dolazi do podizanja razine vode u akumulaciji, te preljevanje vode preko krune brane i formiranje nizvodnog poplavnog vala u koritu Rječine (Slika 6.42.). U ovom scenariju je pretpostavljena u potpunosti ispunjena akumulacija Valiči (značajno za zimski period u godini). Za opis procesa primijenjen je Newtonov zakon fluida u turbulentnom režimu. Početni volumen flišne klizne mase koja ulazi u akumulaciju Valiči uzeta je s vrijednosti od  $491000 \text{ m}^3$ . Ostali ulazni podaci u SPH 2D modelu su prikazani u tablici 6.27.





**Slika 6.42.** Simulacijski prikaz klizanja materijala u akumulaciju Valići i formiranje poplavnog vala nakon preljevanja preko krune brane, SPH metoda, Scenarij 9.

Uslijed stvaranja plimnog vala i njegovih dugotrajnih oscilacija unutar akumulacije Valići može doći do formiranja velikih hidrodinamičkih udara na stijence brane (visine 35 m), te u



konačnici izazvati njeno djelomično ili potpuno urušavanje. U zadnjem slučaju došlo bi do formiranja poplavnog vala koji bi bio katastrofalne prirode s vrlo razornim djelovanjem za srednji i donji tok Rječine. Izlazne vrijednosti dobivene SPH 2D modelom za ovaj promatrani scenarij dane su u tablici 6.28.

**Tablica 6.27.** Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 9., klizanje materijala u akumulaciju Valiči i formiranje poplavnog vala nakon preljevanja preko krune brane

Početni volumen, [m <sup>3</sup> ]	pa_sph	nnps	sle	skf	cgra	dens	cmanning	c4
491000/470000	2	2	2	1	9,8	1800/1000	0,01	0,00014
nfriect	Tauy0	constK	visco	tanfi8	hfriect0	c11	tanfi0	Bfact
1	0	1,308*10 <sup>-3</sup>	-	0,466	1*10 <sup>-3</sup>	2,33	0,466	1,47*10 <sup>-5</sup>
c14	c15	icpwp	pwprel					
-	1*10 <sup>-3</sup>	1	0,6					

**Tablica 6.28.** Izlazne vrijednosti SPH 2D modela (iza krune brane), Scenarij 9., klizanje materijala u akumulaciju Valiči i formiranje poplavnog vala nakon preljevanja preko krune brane

Maks. brzina toka sitnozr. materijala, v, [m/s]	Doseg toka sitnozr. materijala, L, [m]	Maksimalna visina deponiranog materijala, h, [m]	Zahvaćena površina uslijed propagacije toka sitnozrnatog materijala, A, [ha]	Ukupni volumen toka sitnozrnatog materijala (iza preljeva na kruni brane), V, [m <sup>3</sup> ]
15,8	610	4,63	4,1	89166

Na temelju predhodno provedenih mogućih scenarija katastrofalnih pojava na srednjem dijelu toka Rječine može se vidjeti da su takve pojave praćene izuzetno velikim brzinama (do 23,1 m/s), te da zahvaćaju veliki dio oko samog korita Rječine. Uslijed takvih brzina nastaju i snažna erozijska djelovanja, kako u koritu Rječine, tako i na bočnim stranama pokosa u njegovoj blizini. Dobiveni simulacijski prikazi za pojedini scenarij mogu poslužiti kao karte hazarda za određivanje kritičnih točaka (područja) unutar srednjeg dijela toka Rječine. Oni ujedno prikazuju i poplavne linije (visinu dosezanja poplavnog vala), odnosno visinsko dosezanje toka krupnozrnatog ili sitnozrnatog materijala na padinama uz korito, što u konačnici može poslužiti za procjenu rušenja ili oštećenja građevina uslijed pojave takvih katastrofalnih događaja.

## **7. ANALIZA ELEMENATA RIZIKA - DISKUSIJA I SMJERNICE ZA BUDUĆI RAD**

U ovom poglavlju se daju osnove mogućih procjena hazarda, rizika, te opis mjera koje je potrebno provesti u slučaju pojave poplava i formiranja toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na području središnjeg i donjeg toka Rječine. Najčešći uzroci formiranja tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na ispitivanom području mogu biti posljedica klizanja ili odronjavanja stijenske mase u dolini Rječine. Stoga će se u ovom poglavlju prvo opisati mogući hazardi od posljedica klizišta, a zatim će biti opisan opći postupak upravljanja rizikom od mogućih poplava i formiranja tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Na početku poglavlja dani su osnovni pojmovi u području kvantitativne analize rizika (eng. *Quantitative Risk Analysis - QRA*) od posljedica klizišta zbog lakšeg praćenja teksta u nastavku.

Ključ za razumijevanje analize ranjivosti i rizika od posljedica prirodnih katastrofa je cjelokupno sagledavanje analize hazarda, odnosno multidisciplinarni pristup sagledavanja problematike upravljanja rizikom. Osnovna svrha upravljanja rizikom od mogućih posljedica prirodnih katastrofa je: 1. osigurati okvir za razumijevanje prirode i posljedica prirodnih i ljudski izazvanih hazarda na ljude, izgrađenu imovinu, infrastrukturu i okoliš, te 2. ispitati strategije koje mogu zaštititi pojedinca, organizacije, zajednicu, odnosno šire područje u svrhu smanjenja negativnih posljedica prirodnih hazarda i poticati održivost. Identifikacija hazarda daje konkretne informacije o prirodi i svojstvima opasnih događaja unutar zajednice.

Analiza ranjivosti je analiza kombinacija posljedica i s njima povezanih neizvjesnosti s obzirom na početni (hazardni) događaj. Analiza ranjivosti može biti usredotočena na fizičku, političku, ekonomsku i društvenu ranjivost. Ranjivost je stupanj osjetljivosti i otpornosti zajednice i okoliša od posljedica opasnosti (Pine, 2008.). Analiza ranjivosti identificira geografska područja koja mogu biti pod utjecajem hazarda, pojedinci koji mogu biti predmet ozljeda ili smrti, kao i građevine i okoliš koji mogu biti osjetljivi na prirodne katastrofe.

Procjena ranjivosti je procjena izloženosti ili osjetljivosti, odnosno elastičnosti zajednice od posljedica hazarda (Corominas i sur., 2013.). Analiza rizika predstavlja sistematično korištenje informacija da bi se odredio početni događaj, uzroci i posljedice početnog događaja, te izrazio rizik (Pine, 2008.). Analiza rizika pruža osnovu za evaluaciju, tretiranje i prihvaćanje rizika. Ona predstavlja utvrđivanje vjerojatnosti mogućih posljedica koje se mogu temeljiti na prethodnim povijesnim događajima, lokalnim iskustvima i najboljim trenutno dostupnim tehnološkim informacijama (Pine, 2008.). Bilo izravno ili

neizravno, definicija rizika jednoglasno predstavlja kombinaciju vjerojatnosti pojave hazarda i gubitaka:

- vjerojatnost da će se ostvariti opasnosti i vjerojatnost same štete (IPENZ, 1983.),
- stvarna izloženost ljudskih vrijednosti uslijed hazarda, često se smatra kombinacija vjerojatnosti i gubitka (Smith, 1996.), iako neki autori u koncept rizika dodatno uzimaju u obzir ranjivost stanovništva,
- funkcija vjerojatnosti određenog prirodnog događaja hazarda i ugroženosti kulturnih subjekata (Chapman, 1994.).

Organizacija *United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO)* donosi 1982. godine kvantitativnu definiciju rizika ( $R$ ) kao umnožak vjerojatnosti pojave hazarda ( $H$ ), osjetljivosti ( $V$ ) i socijalnih elemenata hazarda ( $E$ ):  $R=E*H*V$ . Prema odboru organizacije *Committee on Risk Assessment of the Working Group on Landslides of the International Union of Geological Sciences (IUGS)* 1997. godine je donesena definicija koja unutar kvantitativne procjene rizika uključuje rizik u funkciji hazarda, elemenata rizika i ranjivosti. U nastavku je radi lakšeg praćenja iznesene problematike dan popis pojmova koji se koriste prilikom kvalitativne i kvantitativne analize rizika (Tablica 7.1.).

**Tablica 7.1.** Terminološki pojmovi vezani za zoniranje klizišta, hazard, ranjivost i rizik od klizišta (prema Corominas i sur., 2013.; Dugonjić Jovančević, 2013.; Fell i sur. (2008b), TC32 (2004.) i UN-ISDR (2004.))

IZRAZ (eng.)	IZRAZ (hrv.)	DEFINICIJA
<i>Acceptable risk</i>	Podnošljivi rizik	Rizik unutar raspona u kojem društvo može živjeti kako bi se osigurala određena neto korist. To je raspon rizika koji se smatra nezanemarivim i potrebno ga je stalno preispitivati i dodatno smanjivati ukoliko je to moguće.
<i>Consequence</i>	Posljedica	Ishodi ili potencijalni ishodi koje proizlaze iz pojave klizišta, mogu se izraziti kvalitativno ili kvantitativno u smislu gubitka, štete ili dobitka; oštećenja, ozljeda ili gubitka života ljudi.
<i>Danger</i>	Opasnost	Prirodni fenomen koji bi mogao dovesti do oštećenja, a opisno je dan u pogledu njegove geometrije, te mehaničkim i drugim osobinama. Hazard može biti postojeći (kao što je puzanje materijala) ili potencijalni (kao što je odron). Karakterizacija hazarda ne uključuje predviđanje.
<i>Elements at risk</i>	Elementi rizika	U elemente rizika spadaju: stanovništvo, građevinski objekti i druge inženjerske konstrukcije, ekonomske aktivnosti, javne službe za održavanje, infrastruktura i okoliš u području koje je potencijalno ugroženo klizištem.
<i>Environmental risk</i>	Okolišni rizik	(a) mogućnost štetnog djelovanja na prirodni sustav (okoliš). (b) vjerojatnost prihvata mogućih oštećenja zbog izlaganja okoliša određenim okolnostima.
<i>Event</i>	Događaj	Nastanak uslijed konkretnih okolnosti.

**Tablica 7.1.** Terminološki pojmovi vezani za zoniranje klizišta, hazard, ranjivost i rizik od klizišta (prema Corominas i sur., 2013.; Dugonjić Jovančević, 2013.; Fell i sur. (2008b), TC32 (2004.) i UN-ISDR (2004.)), nastavak

IZRAZ (eng.)	IZRAZ (hrv.)	DEFINICIJA
<i>Exposure</i>	Izlaganje (izloženost)	Prisutnost ljudi, građevina, imovine, sustava ili drugih elemenata u zonama koje su pod utjecajem klizišta.
<i>Frequency</i>	Frekvencija (događaja)	Mjera vjerojatnosti izražena kao broj pojavljivanja nekog događaja u određenom vremenu.
<i>Hazard</i>	Hazard	Stanje s potencijalom za izazivanje nepoželjne posljedice. Karakterizacija uvjerljivog hazarda treba sadržavati mjesto, volumen (ili područja), klasifikaciju i brzinu potencijalnih klizišta i sve rezultate detektiranog materijala, kao i vjerojatnost njihova pojavljivanja u određenom vremenskom razdoblju.
<i>Hazard zoning</i>	Zoniranje hazarda	Parcelacija (podijela) terena u zone koje karakteriziraju vremenske vjerojatnosti pojave klizišta određenog intenziteta u određenom vremenskom razdoblju. Karte hazarda od klizišta trebaju sadržavati područja u kojima se može pojaviti klizište/klizišta, kao i zone sa maksimalnim dosegom klizne mase.
<i>Individual risk to life</i>	Individualni rizik za život	Životna opasnost ili ozljede na bilo koju identificiranu osobu koja je u zoni pod utjecajem klizišta, ili koji slijedi određeni način života na temelju kojeg bi ljudi bili podložni od posljedica klizišta.
<i>Landslide hazard</i>	Hazard klizanja	Hazard klizanja treba uključivati lokaciju, volumen (ili površinu), klasifikaciju i brzinu potencijalnog klizišta, kao i vjerojatnost njihovog pojavljivanja u određenom vremenskom periodu (razdoblju).
<i>Landslide hazard assessment</i>	Procjena hazarda klizišta	Procjena zone (područja) u kojima se klizišta određenog tipa, volumena, odstupanja i intenziteta mogu pojaviti u određenom vremenskom razdoblju.
<i>Landslide hazard map</i>	Karta hazarda klizišta	Karta prikazuje podjelu terena u zone koje karakteriziraju vjerojatnost pojave klizišta određenog intenziteta. Unutar karte hazarda klizišta treba biti navedena područja u kojima se mogu pojaviti klizišta, kao i područja s maksimalnim dosegom klizne mase.
<i>Landslide inventory</i>	Inventar klizišta	Zapis o svim zabilježenim klizištima na određenom području u kombinaciji sa atributnim informacijama. Ti atributi trebaju sadržavati podatke o vrsti klizišta, vremenu nastanka ili relativnoj starosti, veličini i/ili volumenu, trenutnoj aktivnosti i uzrocima. Unutar inventara klizišta mogu biti navedeni inicijalni pokretači klizanja poput oborina, seizmičkog djelovanja i slično.
<i>Landslide probability</i>	Vjerojatnost klizišta	U okviru hazarda od klizišta, važne su sljedeće vrste vjerojatnosti: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prostorna vjerojatnost: vjerojatnost da se na određenom području dogodilo klizište</li> <li>• Vremenska vjerojatnost: vjerojatnost da će inicijalni pokretači izazvati klizanja</li> <li>• vjerojatnost veličine/volumena: vjerojatnost da klizište ima određenu veličinu/volumen</li> <li>• vjerojatnost dosega klizne mase: vjerojatnost da će klizna masa dosegnuti određenu udaljenost.</li> </ul>

**Tablica 7.1.** Terminološki pojmovi vezani za zoniranje klizišta, hazard, ranjivost i rizik od klizišta (prema Corominas i sur., 2013.; Dugonjić Jovančević, 2013.; Fell i sur. (2008b), TC32 (2004.) i UN-ISDR (2004.)), nastavak

IZRAZ (eng.)	IZRAZ (hrv.)	DEFINICIJA
<i>Landslide risk map</i>	Karta rizika od klizišta	Karta prikazuje podjelu terena u zone koje karakteriziraju različite vjerojatnosti gubitaka koji mogu nastati zbog klizišta određenog tipa u određenom vremenskom razdoblju. Obično se određuju na temelju: <ul style="list-style-type: none"> <li>• očekivanih gubitaka u određenom području pogođenim klizištima određene veličine (intenziteta) u danj godini,</li> <li>• intervalom povratnog perioda, odnosno očekivanim gubicima u određenom području na temelju 100-godišnjeg događaja, ili</li> <li>• kumulativnim gubicima u promatranom vremenskom intervalu tijekom klizanja s različitim povratnim periodima.</li> </ul>
<i>Landslide susceptibility</i>	Podložnost (osjetljivost) klizanju	Kvantitativna ili kvalitativna procjena klasifikacije, volumena (ili površine) i prostorne distribucije klizišta koja postoje ili se potencijalno mogu dogoditi na području. Podložnost također može uključivati i opis brzine i intenziteta postojećih ili potencijalnih klizišta.
<i>Landslide susceptibility assessment</i>	Procjena osjetljivosti klizišta	Kvantitativna ili kvalitativna procjena klasifikacije, volumena (ili područja) i prostorne raspodjele klizišta koje postoje ili se mogu potencijalno dogoditi u prostoru.
<i>Landslide susceptibility map</i>	Karta osjetljivosti klizišta	Karta prikazuje podjelu terena na zone koje imaju različitu vjerojatnost pojave klizišta određenog tipa koji je nastao. Na karti bi trebala biti naznačena područja na kojima se mogu pojaviti klizišta, kao zone sa maksimalnim dosegom klizne mase.
<i>Parametric risk estimation</i>	Parametarska procjena rizika	Kvantitativni pristup pri procjeni neizvjesnosti kod kojih veća vjerojatnost pojavljivanja zahtijeva povećanje u vidu troškova i produžetke u planu smanjivanja.
<i>Population at risk</i>	Stanovništvo u opasnosti	Svi ljudi koji će biti izravno izloženi od posljedica klizišta.
<i>Qualitative risk analysis</i>	Kvalitativna analiza rizika	Analiza koja koristi opisni obrazac, opisne ili numeričke ljestvice kako bi opisala veličinu potencijalnih posljedica i vjerojatnost da će se te posljedice pojaviti.
<i>Quantitative risk analysis</i>	Kvantitativna analiza rizika	Analiza temeljena na brojčanim vrijednostima vjerojatnosti, ranjivosti i posljedicama, te rezultirajućim numeričkim vrijednostima rizika.
<i>Residual risk</i>	Preostali rizik	Stupanj rizika koji postoji s obzirom na prisutnost mjere za smanjenje rizika.
<i>Risk</i>	Rizik	Kombinacija posljedica aktivnosti i povezanih neizvjesnosti ishoda tih aktivnosti. Očekivani stupanj štete kod pojave nekog oblika hazarda u odnosu na gubitak ljudskih života, imovine kao i štetan utjecaj na okoliš. Rizik uključuje kvantifikaciju vjerojatnosti događaja nekog oblika hazarda koji može imati štetne posljedice. U praksi se procjenjuje prihvatljivi stupanj rizika (Benac, 2013.). Mjera vjerojatnosti i ozbiljnosti štetnog utjecaja na život i zdravlje ljudi, imovinu ili okoliš. Rizik od klizišta se često definira kao vjerojatnost kliznog događaja multipliciran posljedicama.



**Tablica 7.1.** Terminološki pojmovi vezani za zoniranje klizišta, hazard, ranjivost i rizik od klizišta (prema Corominas i sur., 2013.; Dugonjić Jovančević, 2013.; Fell i sur. (2008b), TC32 (2004.) i UN-ISDR (2004.)), nastavak

IZRAZ (eng.)	IZRAZ (hrv.)	DEFINICIJA
<i>Risk acceptance</i>	Prihvaćanje rizika	Odluka o prihvaćanju rizika koji ovisi o kriteriju prihvaćanja rizika.
<i>Risk analysis</i>	Analiza rizika	1. Korištenje raspoloživih podataka za izračunavanje rizika na pojedince, stanovništvo, imovinu i okoliš od posljedica hazarda. Analize rizika u pravilu sadrže sljedeće korake: definiranje opsega, identifikaciju hazarda, procjenu ranjivosti i procjenu rizika. 2. Sistematično korištenje informacija da bi se odredio početni događaj, uzroci i posljedice početnog događaja te izrazio rizik. Analiza rizika pruža osnovu za evaluaciju rizika, tretiranje rizika i prihvaćanje rizika.
<i>Risk assessment</i>	Procjena rizika	1. Proces izrade preporuka o tome da li su postojeći prihvatljivi rizici i trenutne mjere za kontrolu rizika adekvatni. Ukoliko nisu, pitanje je da li su alternativne mjere kontrole rizika opravdane i da li će se provoditi. Procjena rizika uključuje faze analize rizika i procjene rizika. 2. Cjelokupan proces analize i vrednovanja rizika. Odluka o neuključivanju ili aktivnosti za povlačenje iz rizične situacije.
<i>Risk avoidance</i>	Izbjegavanje rizika	Jedan rizik može kreirati drugi rizik koji može kreirati treći. Strategija smanjenja efekata ovakvih rizika jest utjecati na prekid lanca vezanih rizika u vidu smanjenja utjecaja.
<i>Risk control / risk treatment</i>	Kontrola rizika / obrada rizika	Proces odlučivanja za upravljanje rizikom, te provedba ili mjere izvršenja za smanjenje rizika i ponovna procjena djelotvornosti s vremena na vrijeme, koristeći rezultate procjene rizika kao jedan ulaz.
<i>Risk evaluation</i>	Vrednovanje rizika	Faza u kojoj vrijednosti i prosudbe ulaze u proces odlučivanja (eksplicitno ili implicitno), uključujući razmatranje važnosti procijenjenih rizika s povezanim društvenim, ekološkim i ekonomskim posljedicama, kako bi se identificirao niz alternativa za upravljanje rizicima.
<i>Risk management</i>	Upravljanje rizicima	Potpuni proces procjene rizika i kontrole rizika. Uključuje procjenu rizika, tretiranje rizika, prihvaćanje rizika i komunikaciju s rizicima.
<i>Risk mitigation</i>	Umanjenje rizika	Proces planiranja odgovora na specifičan rizik.
<i>Risk reduction</i>	Smanjenje rizika	Aktivnosti koje se poduzimaju da bi se smanjio rizik.
<i>Acceptable risk</i>	Podnošljivi rizik	Rizik unutar raspona u kojem društvo može živjeti kako bi se osigurala određena neto korist. To je raspon rizika koji se smatra nezanemarivim i potrebno ga je stalno preispitivati i dodatno smanjivati ukoliko je to moguće.
<i>Uncertainty</i>	Nesigurnost, neizvjesnost	Nedostatak znanja, poglavito u vidljivim količinama.
<i>Vulnerability</i>	Ranjivost	1. Stupanj gubitka određenog elementa ili skupa elemenata izloženih pojavi klizišta dane jačine/intenziteta. Ona se izražava na skali od 0 (nema gubitka) do 1 (totalna šteta). 2. Kombinacija posljedica i s njima povezanih neizvjesnosti s obzirom na početni događaj. Stupanj gubitka određenog elementa ili skupine elemenata rizika unutar područja ugroženog hazardom.

## 7.1. Kvantitativna analiza rizika

U nastavku rada su dane ključne komponente kvantitativne analize rizika (QRA) za opasnosti od posljedica klizanja i odrona koja omogućuje znanstvenicima i inženjerima kvantificiranje rizika na objektivni i ponovljiv način. Pristup QRA nije nužno točan u odnosu na kvalitativnu procjenu, čija se vjerojatnost može izračunati na temelju osobnih prosudbi.

Veliki i brojni ljudski gubici i materijalne štete koje su se događale kroz povijest dovele su do sadašnjih nacionalnih i međunarodnih potreba za smanjenjem hazarda od prirodnih nepogoda. Jedna od najznačajnijih prirodnih pojava su klizišta i poplave, unutar kojih pripada formiranje tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Na žalost, u mnogim dijelovima svijeta je upravljanje hazardom i rizikom od posljedica prirodnih nepogoda tek u ranoj fazi primjene (Brabb, 1991.).

Pojmovi podložnost klizanju (eng. *landslide susceptibility*) i hazard od klizanja (eng. *landslide hazard*) često se koriste kao sinonimi, iako predstavljaju različite elemente analiza hazarda (Fell i sur., 2008b). Podložnost klizanju je vjerojatnost pojave klizišta na određenom području uslijed karakterističnih lokalnih uvjeta terena (Brabb, 1984.), dok hazard klizanja predstavlja vjerojatnost događanja pojave klizišta koji može stvoriti potencijalnu štetu na određenom području u određenom vremenskom razdoblju. Prema definiciji koju su predložili Varnes i Komisija za klizišta i druge pokrete masa (eng. *Commission on Landslides and other Mass-Movements*) 1984. godine, unutar Međunarodnog društva za inženjersku geologiju i okoliš (eng. *International Association for Engineering Geology and the Environment - IAEG*) prihvaćena je definicija prirodnog hazarda kao vjerojatnost događanja potencijalno štetne pojave, unutar određenog vremenskog razdoblja, na određenom području. Hazard kao takav direktno uključuje (i) jačinu klizanja (veličinu i intenzitet), (ii) geografsku lokaciju klizanja, te (iii) učestalost događaja (Guzzetti i sur., 2005.).

Za adekvatnu analizu hazarda klizanja potrebno je sprovesti dobru geotehničku i inženjerskogeološku procjenu, geomorfološke i geografske analize, političku i gospodarsku perspektivu razvoja područja, kao i ekonomske i socijalne okolnosti u analiziranom području, te poznavati faktore koji utječu na prostorno i vremensko variranje prijetecćeg procesa (Dugonjić-Jovačević, 2013.). Točnost procjene hazarda klizišta ovisi o kvaliteti i količini dostupnih podataka, utrošenom vremenu za prikupljanje i obradu podataka, te provođenju potrebnih analiza, kao i financijskim sredstvima potrebnim za istraživanja elemenata potrebnih za dobivanje ulaznih parametara. Prilikom procjene (predviđanja) hazarda klizišta danas su na raspolaganju različite metode, razvijene tijekom posljednjih 40-ak godina (Carrara i sur., 1995.; Leroi, 1996.; Chung i Fabbri, 2003.; Zezere i sur., 2004.). Kao rezultat

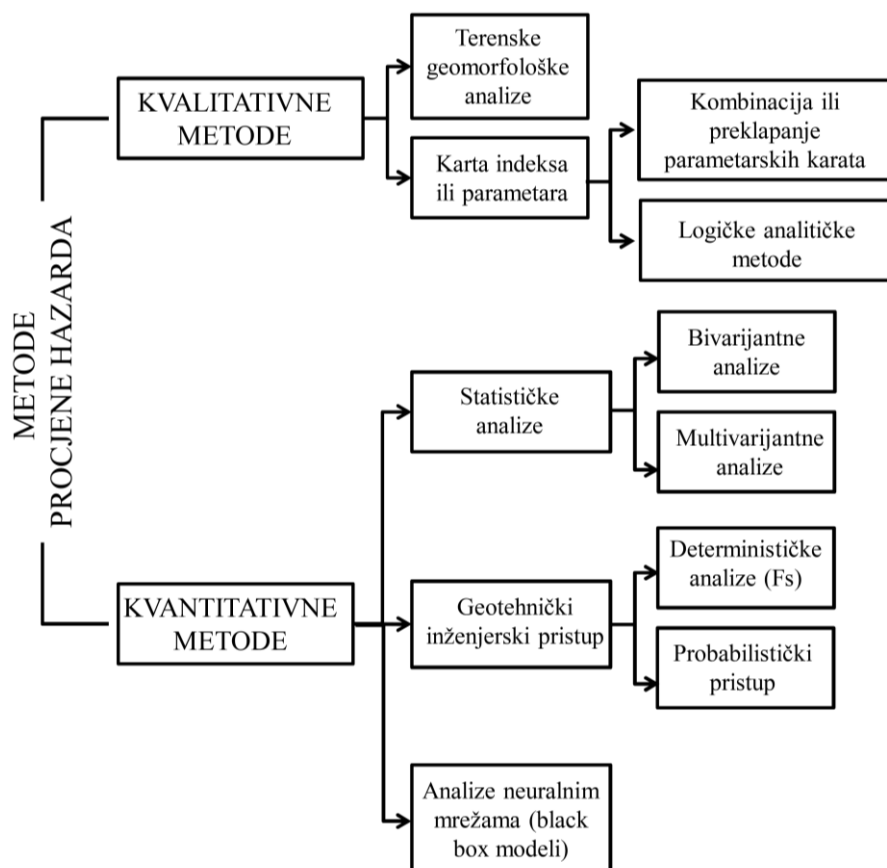
procjene hazarda klizanja izrađuje se karta hazarda klizišta. Ona prikazuje prostornu distribuciju različitih stupnjeva hazarda od klizišta, uključujući i informaciju o vjerojatnosti odnosno povratnom razdoblju pojave mogućih klizišta. Različiti pristupi u sagledavanju procjene hazarda klizišta dovele su do brojnih klasifikacijskih metoda procjene hazarda klizišta. Jednu od prvih takvih klasifikacija razvio je Hansen (1984.) koji je metode procjene hazarda klizišta podijelio na izravne i neizravne. Izravnom metodom geomorfološkog kartiranja identificiraju se prošla i trenutna klizišta, te se pritom stvaraju subjektivne pretpostavke o tome gdje bi se mogla pojaviti nova klizišta u budućnosti (Carrara, 1984.). Neizravne metode se sastoje od dodjeljivanja težinskih faktora uzrocima klizišta. U ove metode spadaju heurističke metode, iskustvene metode (eng. *knowledge based*), statističke i determinističke metode. Za određena područja u svijetu postoje vrlo detaljni predloženi koncepti, principi i metodologija za određivanje podložnosti i hazarda klizišta (van Westen, 1993.; Soeters i van Westen, 1996.; van Westen i sur., 1997.; Aleotti i Chowdhury, 1999.; Guzzetti i sur., 1999.; Crozier i Glade, 2005.).

Procjena hazarda pojave klizišta u Hrvatskoj do danas uglavnom nije provedena, za razliku od procjene podložnosti klizišta, koja je provedena na razini područja općina i gradova ili njihovih dijelova i to u svrhu urbanističkog planiranja tijekom izrade provedbenih i/ili generalnih planova prostornog uređenja (Dugonjić-Jovačević, 2013.). Zoniranje podložnosti i hazarda klizišta danas se najčešće financiraju od strane lokalne samouprave. Na žalost, u Republici Hrvatskoj ne postoji zakonska obaveza za njihovo provođenje, pa su te analize još uvijek na razini pojedinačnih primjera. Analiza i zoniranje hazarda klizišta podrazumijeva prostorne analize vjerojatnosti pojave klizišta i grafički prikaz rezultata u obliku zoniranja određenog područja s obzirom na relativan hazard od klizišta. Podložnost klizanju analizira pojave koje su se dogodile u prošlosti, dok se procjena hazarda klizišta sastoji u predviđanju onoga što će se dogoditi u budućnosti (Dugonjić-Jovačević, 2013.). Rizik predstavlja posljedice djelovanja hazarda na elemente rizika uzimajući u obzir vremensku i prostornu vjerojatnost i njihovu ranjivost (Roberds, 2005.; van Westen, 2004.; AGS, 2007.).

Karte hazarda klizišta mogu biti različite kvalitete, pouzdanosti i točnosti. One se izrađuju u različitim mjerilima, ovisno o namjeni procjene, veličini područja istraživanja i dostupnosti podataka. Najčešće se koriste slijedeće skupine karata (Luzi i Pergalani, 1996.): karte detaljnog mjerila (1:5000), velikog mjerila (1:5000-1:10000), srednjeg mjerila (1:25000-1:10000) i karte regionalnog mjerila (1:250000).

Na slici 7.1. prikazane su metode procjene hazarda klizišta temeljene na postavkama Carrare (1982.), Hansena (1984.), Leroia (1996.), Soetersa i van Westena (1996.). Metode

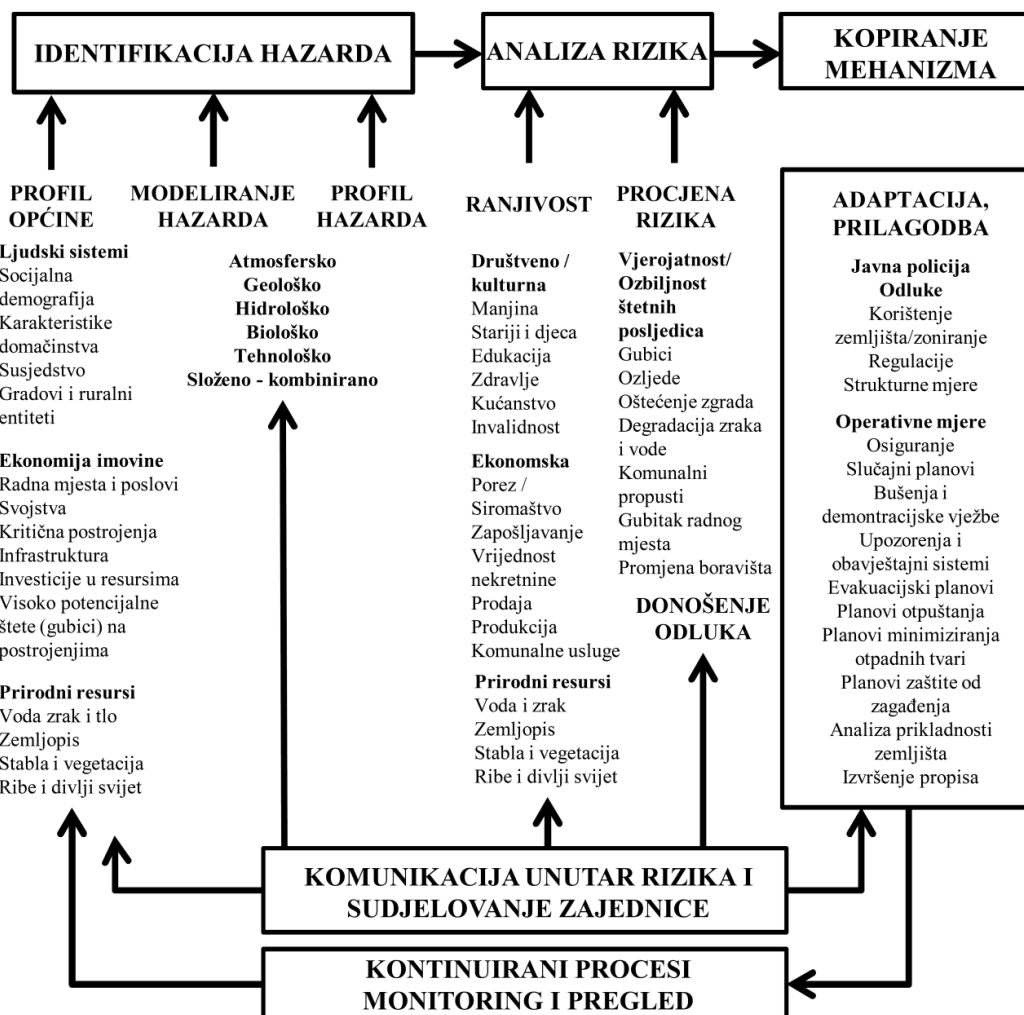
procjene hazarda klizišta se u širem pogledu mogu podijeliti na kvalitativne, polukvalitativne i kvantitativne metode. One se mogu razlikovati na osnovi načina definiranja kartografskih jedinica na kojima se provodi procjena: jedinice terena, jedinice kartiranja, homogene domene (eng. *terrain unit; mapping unit; homogenous domain*) ili na osnovi razlikovanja kategorija hazarda (Aleotti i Chowdhury, 1999.).



**Slika 7.1.** Metode procjene hazarda od pojave klizišta (Aleotti i Chowdhury, 1999.)

Osnovna značajka kvalitativne metodologije procjene hazarda je procjena znanstvenika da će se na nekom području dogoditi jedno ili više klizišta (Leroi, 1997.; Atkinson i Massari, 1998.; Guzetti i sur., 1999.; Fall i sur., 2006.). Osnovni nedostatak ovog pristupa se očituje u subjektivnosti istraživača u izboru ulaznih podataka i kreiranju rezultata (van Westen i sur., 1997.; Leroi, 1997.; Fall i sur., 2006.). S druge strane, takve procjene su se pokazale vrlo korisne u regionalnim procjenama hazarda klizišta (Soeters i van Westen, 1996.; Guzetti i sur., 1999.). Kvalitativna metodologija procjene hazarda uzima u obzir slijedeće faktore klizišta: geološku građu i strukturu, nagib kosine, korištenje zemljišta (pokrovnog sloja), vegetaciju, hidrogeološke uvjete (Slika 7.2.). Svi ti faktori utječu na prepoznavanje područja koja su podložna klizanju sličnih geoloških i geomorfoloških značajki (eng. *index methods*).

Terensko provođenje geomorfološke analize prvi je oblik kvalitativnog pristupa koji omogućuje brzu procjenu stabilnosti određenog područja, uzimajući u obzir veliki broj utjecajnih faktora (Bosi i sur., 1982.; Rupke i sur., 1988.).



*Slika 7.2. Proces analize hazarda i organizacijska otpornost zajednice (modificirano prema Pine, 2008.)*

Kvantitativna metodologija se zasniva na matematičkim izrazima i uspostavi korelacija uzročnih faktora i pojave klizišta. Dva najčešće korištena tipa kvantitativne metodologije su statistički i deterministički pristup (van Westen i sur., 1997.; Aleotti i Chowdhury, 1999.; Dai i sur., 2002.; Caniani i sur., 2008.). Statističke (probabilističke) metode su temeljene na povezanosti svakog faktora i distribucije klizišta u prošlosti, što uključuje kartiranje postojećih klizišta i kombinacije faktora koji su u izravnoj ili neizravnoj vezi sa stabilnosti kosina. Ove metode uključuju bivarijantne (Brabb i sur., 1972.), multivarijantne (Carrara i sur., 1978.; van Westen, 1993.), diskriminacijske metode (Carrara i sur., 1995.), tzv. Boolean pristup koji koristi logističku regresiju (Atkinson i Massari, 1998.; Dai i Lee, 2001.; Ayalew i



Yamagishi, 2005.), te tzv. Bayesovu metodu koja koristi neuralne mreže za utvrđivanje vjerojatnosti pojave klizišta (Gomez i Kavzoglu, 2005.; Lee i sur., 2006.). Primjena GIS-a može olakšati deterministički i statistički pristup kao dio metodologije procjene hazarda klizišta. Međutim, pritom treba biti oprezan, jer vrlo dobar prikaz terena pomoću GIS-a ne može nadoknaditi moguću veliku netočnost u dobivenoj procjeni vjerojatnosti sloma koja je posljedica pogrešnog odabira geotehničkog modela ili neodgovarajućeg mehanizma sloma.

### 7.1.1. Upravljanje rizikom od posljedica klizišta

Rizik od posljedica klizišta za pojedinu građevinu ili područje mora biti izračunat s obzirom na određeni vremenski period unutar kojeg se očekuje pojava nekog hazardnog događaja određenog intenziteta u odnosu na ocjenjene minimalne utvrđene vrijednosti. U tom pogledu, postoji sve veća potreba za provedbom kvantitativne analize rizika (QRA). U usporedbi s kvalitativnom analizom rizika, koja daje rezultate u smislu ponderiranih pokazatelja u određenim razredima ili broičano razvrstavanje, QRA kvantificira vjerojatnost određenog stupnja gubitka i povezane nesigurnosti. Za QRA potrebno je imati točan unos geoloških i geomehaničkih podataka i kvalitetan digitalni model terena za dobru procjenu mogućih scenarija, proračuna događaja i povratnog perioda (Lee i Jones, 2004.). Rizik za scenarij pojave klizišta se može izraziti analitički na slijedeći način:

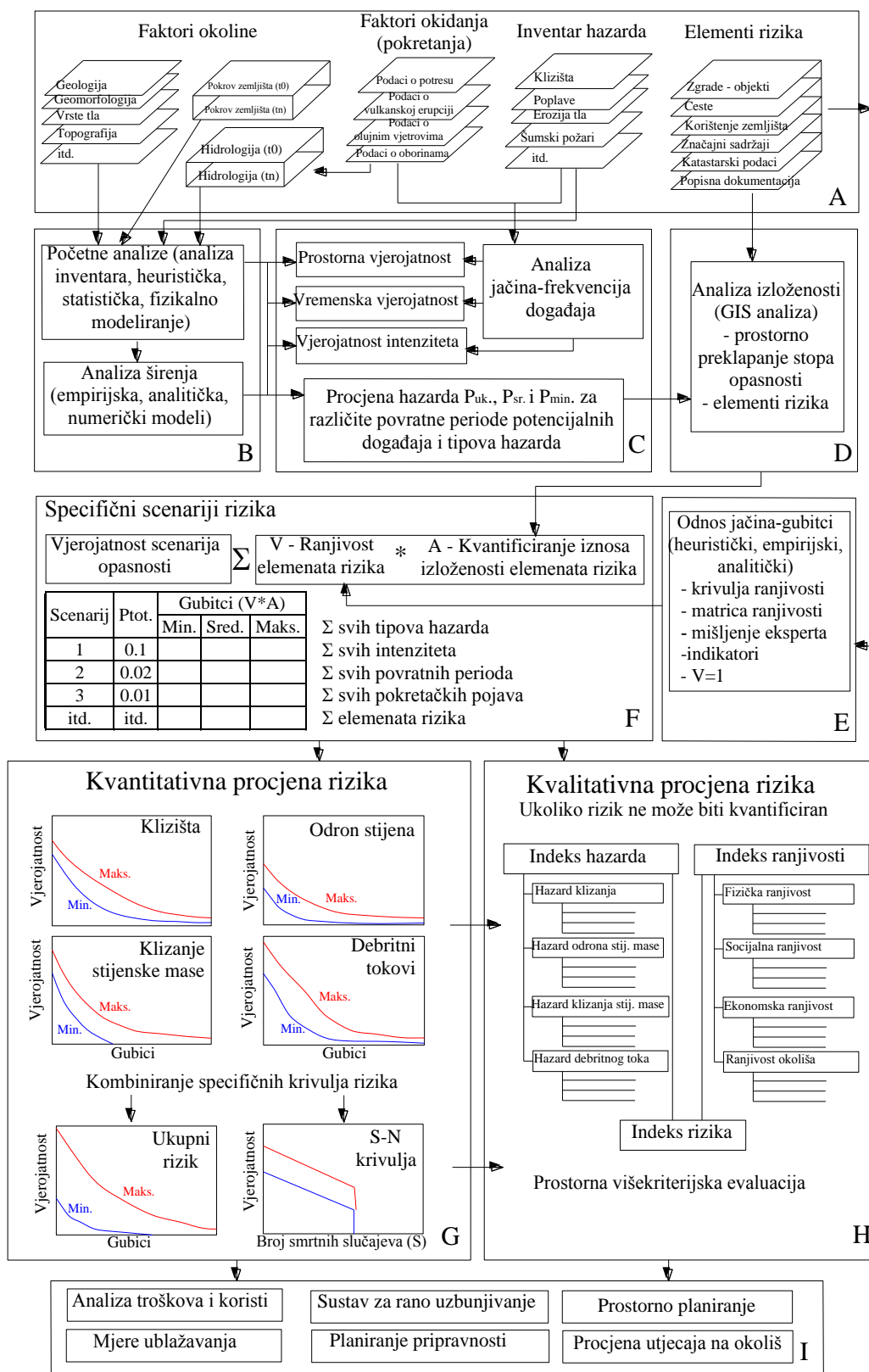
$$R=P(M_i)P(X_j|M_i)P(T|X_j)V_{ij}C \quad (7-1)$$

pri čemu je  $R$  rizik zbog pojave klizišta jačine  $M_i$  na element rizika koji se nalazi na udaljenosti  $X$  od izvora klizišta,  $P(M_i)$  je vjerojatnost pojave klizišta određene jačine  $M_i$ ,  $P(X_j/M_i)$  je vjerojatnost klizišta do točke koja se nalazi na udaljenost  $X$  od izvora pokretanja klizišta s intenzitetom  $j$ ,  $P(T/X_j)$  je vjerojatnost elementa na mjestu  $X$  u vrijeme nastanka klizišta,  $V_{ij}$  je ranjivost elementa klizišta jačine  $i$  i intenziteta  $j$ , dok je  $C$  vrijednost elementa hazarda. Tri osnovne komponente koje se pojavljuju u jednadžbi (7-1) moraju biti posebno uzete u obzir pri donošenju ocjene hazarda, izloženosti elemenata hazarda, te njihove ranjivosti. Elementi rizika su stanovništvo, građevine, ekonomske aktivnosti, uključujući i javne službe, ili bilo koje druge osobe koje su direktno izložene hazardu u određenom području (UN-ISDR, 2004.). Interakcija hazarda i elemenata rizika uključuje njihovo izlaganje i ranjivost. Izloženost pokazuje u kojoj mjeri se elementi rizika zapravo nalaze na putu klizanja mase.

Opći okvir QRA uključuje kompletan proces procjene rizika i upravljanje rizicima (ili tretman rizika). Procjena rizika uključuje proces analize rizika i procjenu rizika. Analiza rizika koristi raspoložive podatke za procjenu pojedinog rizika, stanovništva, imovine ili

okoliša od hazarda. Analiza rizika u pravilu sadrži sljedeće korake: procjenu identifikacije hazarda, popis elemenata rizika i izloženosti rizika, procjenu ranjivosti i procjenu rizika. Budući da svi ovi koraci imaju važnu prostornu komponentu, analiza rizika često zahtijeva upravljanje skupom prostornih podataka i korištenje GISa. Procjena rizika je stanje u kojem vrijednosti i prosudbe ulaze u proces odlučivanja, eksplicitno ili implicitno, uključujući razmatranja o važnosti procijenjenih rizika i pridružene socijalne, ekološke i ekonomske posljedice, kako bi se utvrdio niz alternativa za upravljanje rizicima.

Slika 7.3. koja se temelji na radu Van Westen i sur. (2005.) daje okvir procjene više hazarda rizika klizišta istovremeno, s naznakom različitih koraka (od A-H). Prvi korak (A) obuhvaća ulazne podatke potrebne za procjenu rizika od više hazarda istovremeno, s naglaskom na podacima potrebnim za generiranje karti osjetljivosti i dosega klizne mase, faktora pokretanja, viševremenskih inventara i elemenata hazarda. Drugi korak (B) se fokusira na procjenu osjetljivosti, a podijeljen je u dvije komponente. Prva, koja je najčešće korištena, bavi se modeliranjem potencijalnih pokretača određenog područja (inicijacija osjetljivosti), koja može koristiti različite metode (temeljene na inventaru klizišta, heurističke, statističke, determinističke). Karte koje se pritom kreiraju prikazuju područja za daljnje modeliranje dosega klizne mase (vjerojatnost dosega). Treći korak (C) obuhvaća procjenu opasnosti od klizišta, koja uvelike ovisi o dostupnosti tzv. inventara klizišta, koji se temelji na istim ili sličnim događajima klizišta koja su se pretežno pojavljivala u prošlosti. Povezujući distribucije klizišta na vremensku vjerojatnost aktiviranih događaja, moguće je provesti analizu opsega frekvencija. Inventar klizišta temeljen na prošlim događajima, pored drugih čimbenika, se također koristi za određivanje prostorne vjerojatnosti klizišta, odnosno njegova pokretanja i doseg klizne mase. Na taj način može se odrediti vjerojatnost veličine potencijalnih klizišta za određeni povratni period. Četvrti korak (D) je analiza izlaganja elemenata rizika koja uključuje izradu karata hazarda i elemenata pri riziku pomoću GIS okruženja. Korak (E) se fokusira na procjenu ranjivosti, te ukazuje na razne vrste ranjivosti i daje rješenja koja se mogu koristiti. Fokus je na korištenju stručnog mišljenja, empirijskim podacima i fizički temeljenim analitičkim i numeričkim modelima u definiranju ranjivosti, te primjeni dostupnih krivulja ranjivosti ili matrice ranjivosti. U većem dijelu je fokus na utvrđivanju fizikalne ranjivosti elemenata rizika. Ostale vrste ranjivosti (npr. socijalne, ekološke i ekonomske) se uglavnom analiziraju pomoću prostorne višekriterijske ocjene kao dio kvalitativne procjene rizika (korak H). Korak (F) integrira hazarde, ranjivosti, te prirodu i broj elemenata pod rizikom (bilo kao broj osoba, broj građevina, odnosno gospodarsku



**Slika 7.3.** Okvirni prikaz višehazardne procjene analize rizika od pojave klizišta  
 A - ulazni podaci za procjenu klizišta, B - procjena osjetljivosti, C - procjena hazarda klizišta,  
 D - analiza izlaganja elemenata rizika, E - procjena ranjivosti, F - integriranje hazarda,  
 ranjivosti, prirode i količine elemenata rizika, G - kvantitativni pristup procjene rizika,  
 H - kvalitativni pristup procjene rizika, I - korištenje informacija rizika pri upravljanju  
 rizicima (temeljeno na Van Westen i sur., 2005.)

vrijednost). Rizik za svaki pojedini element (specifični rizik) je određen na temelju mnogih različitih situacija, a odnosi se na tip klizišta, volumen, povratno razdoblje pokretanja događaja, tip elementa hazarda i slično. Integracija u koraku (G) prikazuje kvantitativni pristup procjene rizika u kojem su rezultati prikazani u vidu krivulja hazarda koje planiraju očekivane gubitke prema vjerojatnosti pojavljivanja za svaki tip pojedinog klizišta, a izražavaju se preko nesigurnosti i neizvjesnosti ulaznih podataka u analizi rizika. To se može ilustrirati generiranjem dviju krivulja gubitaka koje izražavaju minimalne i maksimalne vrijednosti za svaki pokretački događaj za različite povratne periode, odnosno povezanu godišnju vjerojatnost. Pojedinačne krivulje rizika se mogu integrirati u ukupne krivulje rizika za određeno područje, a gubitak stanovništva može biti izražen preko S-N krivulje (IUGS, 1997.) (Slika 7.3.). Krivulje rizika mogu biti kreirane za različite osnovne jedinice kao što su pojedinačni pokosi, ceste, naselja, općine, regije ili županije. Korak (H) daje prikaz metoda za kvalitativnu procjenu rizika, koja se temelje na integraciji indeksa hazarda i indeksa ranjivosti korištenjem prostorne višekriterijske procjene. Posljednji korak (I) se odnosi na korištenje informacija rizika u različitim fazama upravljanja rizicima od prirodnih katastrofa.

### **7.1.2. Ulazni podaci za analizu rizika klizišta**

U nastavku je dan pregled ulaznih podataka potrebnih za analizu rizika. Glavni podaci potrebni za definiranje analize rizika mogu se podijeliti u četiri skupine: podaci inventara klizišta, okolišni faktori, pokretački faktori i elementi rizika (Soeters i Van Westen, 1996.; Van Westen i sur., 2008.). Od svih navedenih, inventar klizišta je najvažniji jer daje uvid na lokacije pojava proteklih klizišta, kao i njihove mehanizme sloma, uzročne faktore, učestalost pojava, količine i štete koje su izazvali.

Popis mogućih faktora koji kontroliraju pojavu klizišta dan je u Tablici 7.2., a temeljen je na raznim mehanizmima klizišta. Postoji relativno malo radova koji pružaju pregled izvornih ulaznih podataka za kvantitativnu analizu hazarda i rizika (Van Westen i sur., 2008.; Springman i sur., 2011.). Corominas i Moya (2008.) daju pregled podatkovnih metoda koje se koriste u studijama za opis klizanja, a Cepeda i sur. (2012.) daju pregled metoda za korištenje meteoroloških podataka u analiziranju pragova oborina za kvantitativnu procjenu hazarda. Pitalakis i sur. (2011.) prikazuju u svom radu sveobuhvatan pregled podataka koje treba prikupiti za karakterizaciju i fizičku procjenu elemenata ranjivosti pri hazardu, kao što su građevine, ceste, cjevovodi i slično. Dobar pregled korištenja daljinskih istraživanja za analizu hazarda klizišta i analizu rizika može se naći u radovima Soeters i van Westen (1996.), Singhroy (2005.), Michoud i sur. (2010.), te Stumpf i sur. (2011.).

**Tablica 7.2. Pregled faktora koji kontroliraju pojavu klizišta i njihov značaj u procjeni osjetljivosti i hazarda za različite mehanizme klizišta (O=odroni, PK=plitka klizišta i tokovi krupnozrnatog materijala, SK=velika spora klizišta), (modificirano prema Corominas i sur., 2013.)**

Grupa	Parametri	Značajke osjetljivosti klizišta i procjena hazarda	Tip faktora		Mehanizmi klizišta		
			UF	PF	O	PK	SK
Topografija	Uzvisine, unutarnji reljef	Razlike u visini rezultiraju potencijalnom energijom u pogledu gibanja stijenske mase.	•		V	P	V
	Nagib kosine	Nagib padina je prevladavajući čimbenik kod klizišta.	•	•	P	P	P
	Smjer nagiba kosina	Mogu se odraziti na razlike u vlažnosti tla i vegetaciji, te igraju važnu ulogu u odnosu na diskontinuitete.	•		P	U	U
	Duljina nagiba, oblik, zakrivljenost, hrapavost	Pokazatelj nagiba u hidrologiji, važan parametar kod modeliranja dosega udaljenosti.	•		P	V	V
	Smjer tečenja i akumuliranja	Potrebno poznavati nagib kosine kod hidrološkog modeliranja, npr. kod indeksa vlage.	•		U	P	V
Geologija	Tipovi stijena	Određuje inženjerska svojstva vrsta stijene.	•		P	V	P
	Vremenska prognoza	Vrste vremenske prognoze (fizikalne/kemijske), dubinsko prognoziranje, pojedinačne vremenske zone i godišnji prosjeci dobne kao važni čimbenici.	•		P	V	V
	Diskontinuiteti	Skup diskontinuiteta i karakteristika, odnos smjera nagiba kosine i inklinacije.	•		P	U	V
	Strukturni aspekti	Geološka struktura u odnosu na nagib (kut) padine i njezin smjer.	•		V	V	V
	Rasjedi	Udaljenost od aktivnih rasjeda ili širine rasjednih zona.	•		V	V	V
Tlo	Tipovi tla	Podrijetlo tla određuje njegova svojstva i izgled.	•		M	P	V
	Dubina tla	U površnim formacijama, dubina određuje potencijalni pokretni volumen.	•		M	P	V
	Geotehnička svojstva	Veličina zrna, kohezija, kut trenja, gustoća.	•		M	P	V
	Hidrološka svojstva	Volumen pora, zasićena konduktivnost, PF krivulja.	•		M	V	V
Hidrologija	Podzemna voda	Prostorne i vremenske varijacije u razini podzemne vode, smještaj podzemne vode, vlažne fronte, pritisak porne vode, usisno tlo.	•	•	M	V	V
	Vlaga u tlu	Prostorne i vremenske varijacije u sadržaju vlage u tlu.	•	•	M	V	V
	Hidrološke komponente	Intercepcija, evapotranspiracija, preljevanje, površinski tok, infiltracija, procijeđivanje itd.	•	•	U	V	V
	Mreža vodotoka i gustoća dreniranja	Tampon zone oko vodotoka. U maloj razmjernoj procjeni, gustoća odvodnje može se koristiti kao pokazatelj za vrstu terena.	•		M	V	V
Geomorfologija	Geomorfološki okoliš	Alpski, ledeni, periglacialni, denudacijski, obalni, tropski, itd.	•		V	V	V
	Stara klizišta	Materijal i karakteristike terena se mijenjaju što su mjesta sklonija reaktivacijama.	•		U	V	P
	Aktivna klizišta u prošlosti	Povijesni podaci o aktivnostima klizišta često su presudna za utvrđivanje hazarda i rizika od klizišta.	•		P	P	P
Korištenje zemljišta i antropogeni faktori	Sadašnja upotreba zemljišta	Vrsta korištenja zemljišta / pokrova zemljišta, vrsta vegetacije, krošnja, dubina korijenja, povezanost korijena, težina.	•		V	V	V
	Promjene u korištenju zemljišta	Vremenske razlike u korištenju zemljišnog pokrova.	•	•	U	P	V
	Prometna infrastruktura	Odbojnici na cestama u kosim područjima sa zasjecima u prometu.	•		U	V	V
	Građevine i objekti	Nagib zasjeka napravljenih za visokogradnju.	•	•	U	V	V
	Kanalizacijski sustavi i sustavi za navodnjavanje	Istjecanje iz takvih mreža može biti važan uzrok klizanju.	•	•	M	V	V
	Vađenje i rudarenje	Ove aktivnosti mijenjaju geometriju nagiba i distribuciju naprezanja. Vibracije zbog miniranja mogu izazvati klizišta.	•	•	V	V	V
	Brane i akumulacije	Akumulacije mijenjaju hidrološke uvjete. U nožici brane može doći do sloma brane.	•	•	M	V	V

Napomena: Važnost je označena kao P (presudna), V (vrlo važna), U (umjereno važna), i M (manje važna). Vrsta faktora je navedena kao UF (utjecajni faktor) ili PF (pokretački faktor).



**Tablica 7.2.** Pregled faktora koji kontroliraju pojavu klizišta i njihov značaj u procjeni osjetljivosti i hazarda za različite mehanizme klizišta (O=odroni, PK=plitka klizišta i tokovi krupnozrnatog materijala, SK=velika spora klizišta), (modificirano prema Corominas i sur., 2013.), nastavak

Grupa	Parametri	Značajke osjetljivosti klizišta i procjena hazarda	Tip faktora		Mehanizmi klizišta		
			UF	PF	O	PK	SK
Potresi i vulkani	Seizmičnost	Odnos jačina/frekvencija potresa, karte povijesnih intenziteta potresa u vezi sa kartama inventara klizišta.		•	P	P	P
	Mehanizmi sloma	Mjesta sloma stijenske mase, tip sloma, duljina pukotine sloma, izložena rasjedna zona, udaljenost od sloma, krovinski ili podinski zid.	•	•	V	V	V
	Tip vulkana	Visina i sastav vulkanske strukture, stabilnost magmatske komore.	•	•	U	V	V
	Tip erupcije vulkana	Bočne eksplozije, kolaps magmatske komore, piroklastični tokovi, piroklastični materijal.	•	•	U	V	V
Meteorološki uvjeti i klima	Oborine	Dnevni ili kontinuirani podaci, vremenski obrasci, odnosi jačina/frekvencija, ITP krivulje, kišni pragovi, prethodne kiše, krivulje otjecanja.		•	P	P	P
	Temperatura	Važan utjecaj na hidrologiju i stanje vegetacije. Nagle promjene temperature, snijega, otapanja mraza, permafrosta.	•	•	V	V	V

Napomena: Važnost je označena kao P (presudna), V (vrlo važna), U (umjereno važna), i M (manje važna). Vrsta faktora je navedena kao UF (utjecajni faktor) ili PF (pokretački faktor).

Kako bi se izradila pouzdana karta hazarda i rizika od posljedica klizišta na određenom području, koja je ključna za uvid u prostornu i vremensku frekvenciju klizišta, svaka studija hazarda i i/ili rizika treba započeti sa što potpunijim inventarom klizišta u prostoru i vremenu (IAEG komisija za klizišta, 1990.) prema Tablici 7.3.

**Tablica 7.3.** Pregled izvora ulaznih podataka i njihove relevantnosti za kvantitativnu analizu hazarda i rizika za različite mehanizme klizišta (O=odroni, PK=plitka klizišta i tokovi krupnozrnatog materijala, SK=velika, spora klizišta), (modificirano prema Corominas i sur., 2013.)

Osnovni izvor	Grupa podataka	Primjeri	M	N	Mjerilo			Relevantnost, značajnost		
					R	L	S	O	PK	PS
Laboratorijske analize	Svojstva tla	Raspodjela veličine zrna, saturirana i nesaturirana posmična čvrstoća tla, krivulje zadržavanja vode u tlu, hidraulička vodljivost saturiranog tla, minerali glina, osjetljivost, viskoznost, gustoća.	Ps	x	x	○	•	M	P	V
	Svojstva stijene	Neograničena tlačna čvrstoća, posmična čvrstoća, mineralogije.	Ps	x	x	○	•	P	M	P
	Svojstva vegetacije	Vlačna čvrstoća korijenja, čvrstoća povlačenja korijenja, evapotranspiracija.	Ps	x	x	○	•	M	V	U
	Procjena starosti	Radiokarbonsko C-14 ispitivanje, peludne analize.	Pf	○	○	○	•	M	M	V

Napomena: Važnost je označena kao P (presudna), V (vrlo važna), U (umjereno važna), i M (manje važna). Potencijal za ove informacije se prikupljaju na različitim razinama, te se prikazuju kao: • = moguće, ○ = teško moguće, x = nije moguće. Mjerila su N (nacionalna razina), R (regionalna razina), L (lokalna razina) i S (mjestimična specifična razina). M označava metodu koja se koristi za prostorno prikupljanje podataka, pri čemu vrijedi: Pf = točkasti (mjestimični) podaci vezani uz pojedine specifičnosti (npr. klizišta), Ps = uzorak točaka koje karakteriziraju prostorne jedinice (npr. vrste tla, vrste vegetacije), Pn = točke u mreži koje trebaju biti interpolirane, Af = podaci temeljeni na značajkama površine (npr. poligoni klizišta, zgrade), Ac = kompletna pokrivenost površine, L = linijski podaci.

**Tablica 7.3.** Pregled izvora ulaznih podataka i njihove relevantnosti za kvantitativnu analizu hazarda i rizika za različite mehanizme klizišta (O=odroni, PK=plitka klizišta i tokovi krupnozrnatog materijala, SK=velika, spora klizišta), (modificirano prema Corominas i sur., 2013.), nastavak

Osnovni izvor	Grupa podataka	Primjeri	M	Mjerilo				Relevantnost, značajnost		
				N	R	L	S	O	PK	PS
Terenska mjerenja	Starost klizišta	Dendrokronologija, metoda lišajeva za procjenu starosti klizišta, tefrokronologija, arheološki artefakti.	Pf	○	○	○	•	U	U	V
	Dubina tla	Bušotine, rovovi, jame, izdanci materijala, svrdla za uzimanje uzoraka materijala.	Ps	x	x	○	•	M	P	U
	Geofizika	Seizmička refrakcija valova, mikrosezmičko promatranje, električni otpor, elektromagnetska metoda, magnetska metoda, zemljišno-penetracijski radar, metode geofizičkog bušenja.	Ps	x	x	○	•	M	U	V
	Karakteristike tla	Standardni penetracijski testovi, terensko ispitivanje svrdlom.	Ps	x	x	○	•	M	P	U
	Karakteristike stijene	Litologija, diskontinuiteti (vrste, razmak, orijentacija, otvori, ispune), rangiranje stijenske mase.	Ps	x	x	○	•	P	M	V
	Hidrološke karakteristike	Kapacitet infiltracije, fluktuacija vodnog lica, upijanje tla, porni pritisak vode.	Ps	x	x	○	•	V	P	P
	Karakteristike vegetacije	Dubina korijena, gustoća korijena, vegetacijske vrste, faktor usjeva, gornji slojevi, omjer stijenskog pokrovnog materijala.	Ps	x	x	○	•	U	V	M
Promatračke mreže	Pomaci klizišta	Elektronički uređaji za određivanje udaljenosti, GPS sustavi, teodolit, terestički laserski skener, interferometrija itd.	Pf	x	x	○	•	V	V	V
	Podzemna voda	Piezometri, tenzometri, mjerne postaje za mjerenje protoka.	P	x	x	○	•	V	P	P
	Meteorološki podaci	Oborine, temperatura, vlaga, brzina vjetra.	Pn	•	•	•	•	V	V	V
	Seizmički podaci	Stanice za mjerenje seizmičke aktivnosti, stanica za jako očitovanje pomaka, mikrosezmičke studije.	Pn	•	•	•	•	V	V	V
Mapiranje područja	Klizišta	Tip, relativna starost, brzina kretanja, stanje aktivnosti, inicijacije, transport materijala, zone odstupanja, područje, dubina, volumen, posljedice, razvoj.	Af	○	•	•	•	P	P	P
	Geomorfologija	Karakterizacija oblika klizišta, procesi, površinski materijal.	Ac	○	○	•	•	M	V	V
	Vrste tla	Teksture, klasifikacija tla, mapiranje graničnog područja, pretvorba u inženjerske vrste tla.	Ac	○	○	•	•	M	P	V
	Litologija	Litološko mapiranje, meteorološke zone, mapiranje graničnog područja, formacije, članovi, pretvorba u inženjerske vrste stijena.	Ac	○	○	•	•	P	V	V
	Strukturalna geologija	Dubinska mjerenja pokrovne ravnine i diskontinuiteta, stratigrafske rekonstrukcije, kriva mapiranja, strukturalna rekonstrukcija.	Ac	○	○	•	•	V	M	V
	Vegetacija	Tip vegetacije, gustoća, indeks područja rasta listova.	Ac	○	○	•	•	M	V	U
	Korištenje zemljišta	Vrste korištenja zemljišta, karakterizacija vegetacije po korištenju zemljišta.	Ac	○	○	•	•	V	V	V
	Elementi rizika	Tipologija gradnje, strukturalni sustav, visina zgrada, sistemi temeljenja, klasifikacija cesta, klasifikacija cjevovoda.	Af L	○	○	•	•	V	V	V

Napomena: Važnost je označena kao P (presudna), V (vrlo važna), U (umjereno važna), i M (manje važna). Potencijal za ove informacije se prikupljaju na različitim razinama, te se prikazuju kao: • = moguće, ○ = teško moguće, x = nije moguće. Mjerila su N (nacionalna razina), R (regionalna razina), L (lokalna razina) i S (mjestimična specifična razina). M označava metodu koja se koristi za prostorno prikupljanje podataka, pri čemu vrijedi: Pf = točkasti (mjestimični) podaci vezani uz pojedine specifičnosti (npr. klizišta), Ps = uzorak točaka koje karakteriziraju prostorne jedinice (npr. vrste tla, vrste vegetacije), Pn = točke u mreži koje trebaju biti interpolirane, Af = podaci temeljeni na značajkama površine (npr. poligoni klizišta, zgrade), Ac = kompletna pokrivenost površine, L = linijski podaci.

**Tablica 7.3.** Pregled izvora ulaznih podataka i njihove relevantnosti za kvantitativnu analizu hazarda i rizika za različite mehanizme klizišta (O=odroni, PK=plitka klizišta i tokovi krupnozrnatog materijala, SK=velika, spora klizišta), (modificirano prema Corominas i sur., 2013.), nastavak

Osnovni izvor	Grupa podataka	Primjeri	M	Mjerilo				Relevantnost, značajnost		
				N	R	L	S	O	PK	PS
Arhivske studije i podaci iz prošlosti	Pojave klizišta u prošlosti	Povijesni podaci o mjestu, datum nastanka, mehanizmi pokretanja, veličina, volumen, dužina dosega stijenske mase.	Af Pf	○	○	•	•	V	V	P
	Podaci o štetama	Povijesni podaci o ekonomskim gubicima i pogodenoj populaciji s datumima, mjestu i karakterizaciji.	Pf	○	○	○	○	V	V	V
	Meteorološki podaci	Oborine (kontinuirane ili dnevne), temperatura, brzina vjetera, vlaga.	Pf	•	•	•	•	V	V	V
	Promjene u korištenju zemljišta	Povijesni zemljovid (karte) korištenja zemljišta / pokrova za različita razdoblja.	Pn	•	•	•	•	U	V	V
	Elementi rizika	Povijesni zemljovid (karte) građevina, prometne infrastrukture, gospodarskih djelatnosti i obilježja stanovništva.	Ac	•	•	•	•	V	V	V
	Digitalne vrijednosti visina	Topografske karte s slojnicama, digitalni modeli reljefa iz postojećih kataloga.	Af L	•	•	•	•	V	V	V
	Tematske karte	Geološke, geomorfološke, kanalske mreže i druge postojeće tematske karte.	Ac	•	•	•	•	V	V	V
Daljinska istraživanja	Zračne fotografije i visokorezolucijske satelitske slike	Tumačenje slika za mapiranje i karakterizaciju lokacija klizišta, geomorfologija, korištenje zemljišta/pokrova, mapiranje elemenata rizika.	Af Ac	○	•	•	•	P	P	P
	Višespektralne slike	Metode klasifikacija slika za mapiranje klizišta, korištenje zemljišta/pokrova, indeks normalizirane razlike vegetacije, indeks rasta lista za određeno područje.	Af Ac	•	•	•	•	U	V	U
	Digitalni podaci o visinama	Zračna stereofotogrametrija, svemirska stereofotogrametrija, LIDAR, InSAR - Interferometrijski sintetički radar uređaj.	Ac	•	•	•	•	P	P	P

Napomena: Važnost je označena kao P (presudna), V (vrlo važna), U (umjereno važna), i M (manje važna). Potencijal za ove informacije se prikupljaju na različitim razinama, te se prikazuju kao: • = moguće, ○ = teško moguće, x = nije moguće. Mjerila su N (nacionalna razina), R (regionalna razina), L (lokalna razina) i S (mjestimična specifična razina). M označava metodu koja se koristi za prostorno prikupljanje podataka, pri čemu vrijedi: Pf = točkasti (mjestimični) podaci vezani uz pojedine specifičnosti (npr. klizišta), Ps = uzorak točaka koje karakteriziraju prostorne jedinice (npr. vrste tla, vrste vegetacije), Pn = točke u mreži koje trebaju biti interpolirane, Af = podaci temeljeni na značajkama površine (npr. poligoni klizišta, zgrade), Ac = kompletna pokrivenost površine, L = linijski podaci.

### 7.1.3. Procjena opasnosti od klizišta

Cilj procjene opasnosti od posljedica klizišta je utvrditi prostorne i vremenske vjerojatnosti pojave klizišta na određenom području, zajedno s njihovim načinom širenja, veličinom i intenzitetom. Analiza mora uzeti u obzir moguće mehanizme sloma.

Bez obzira na mjerilo rada, procjena hazarda mora definirati vremenski okvir za pojavu potencijalnih vrsta klizanja i njihove intenzitete u razmotреноj lokaciji. Vremenska pojava klizišta je normalno izražena u smislu učestalosti, povratnog perioda ili prekoračenja vjerojatnosti. Povratno razdoblje (povratni period) je povratna inverzna godišnja vjerojatnost, a odnosi se na prosječni vremenski interval u kojem se očekuje da će se događaj određene veličine dogoditi.

#### **7.1.4. Predložene metode za kvantitativnu analizu rizika od posljedica klizišta**

Za provođenje kvantitativne analize rizika potrebno je poznavati sve parametre u jednadžbi (7-1) za pojedini tip klizišta, jer svako klizište ima specifičnu vjerojatnost pojave, intenzitet i vjerojatnost utjecaja. Globalni hazard područja se može odrediti prikupljanjem određenog rizika za različita klizišta i njihove intenzitete za sve izložene elemente hazarda. Za određivanje rizika primjenjuju se dvije alternativne vrste analiza: deterministička i probabilistička analiza. Deterministička analiza rizika koristi prosječne ili barem povoljne vrijednosti komponenti rizika (najgori mogući scenarij) što daje univarijantni rezultat izražen prosječnim ili maksimalnim rizikom. S druge strane, za probabilističku analizu, svi ili neki od komponenata rizika se pretpostavljaju da su u skladu s distribucijom vjerojatnosti tako da su rezultati predstavljeni u probabilističkim uvjetima, koristeći parove ili prikaze (kumulativne) vjerojatnosti i posljedica (Corominas i sur., 2013; Pine, 2008.).

#### **7.1.5. Analiza rizika**

Analiza rizik se može odnositi na jednu građevinu, značajku ili područje. Analiza područja je vrlo zahtjevan postupak u pogledu prikupljanja podataka potrebnih za određivanje rizika. Prostorna analiza se obično izvodi na regionalnoj razini i provodi na GIS platformi s kartama koje se koriste za ilustraciju rizika (Agliardi i sur., 2009.). Analiza ne zahtijeva nužno procjenu frekvencije u izvornom području, ali popis događaja koja dosežu infrastrukturu trebaju biti što potpunija. S druge strane, ukoliko se procjenjuje pojava klizišta na njegovu izvoru nastanka, potrebna je analiza propagacije (Roberds, 2005.). Analiza odrona se obično provodi pomoću analitičkih i/ili numeričkih modela, a uključuje izračun prostornih parametara koji utječu na vjerojatnost pojave odrona određene veličine ili dosegnute brzine izloženog elementa hazarda. Izračun izloženosti ovisi o mjerilu analiziranog područja i vrsti potencijalno izloženih elemenata hazarda. Kod izlaganja, postoji važna razlika između statičkih (građevine, ceste, ostala infrastruktura itd.) i pokretnih elemenata (vozila, osobe itd.). U slučaju odrona pogođeni elementi rizika se nalaze unutar putanje odrona tog materijala. Za fragmentirane odrone i za manja mjerila s niskom rezolucijom, svi elementi rizika uz odron mogu biti izloženi. Pri specifičnim prostornim i lokalnim mjerilima, te kada je putanja uključena u analizu, takav proces je ograničen samo na elemente rizika koji se nalaze na potencijalnoj putanji odrona. Za analize kod velikih mjerila, gdje su potrebne detaljne informacije o prostornoj vjerojatnosti dosegnutog bloka na građevinu, mogu se izračunati vjerojatnosti pojedinih putanja blokova. Tokovi krupnozrnatog materijala mogu utjecati na veća područja u odnosu na odrone stijenske mase, zbog njihove povećane mobilnosti,

odnosno utjecaja fluida kao sastavnog dijela. Prostorna izloženost površine može se izračunati kao omjer zahvaćenog područja u odnosu na ukupnu površinu. Prostorna izloženost se također može sagledavati kao funkcija kinematike toka, odnosno hidrodinamički udar koji utječe na pojedinu građevinu tijekom propagacije toka krupnozrnatog materijala. Za analizu rizika klizišta i usvajanje prostornog uređenja, potrebno je razumjeti mehanizme klizanja koji se mogu pojaviti u istraživanom području. Nekoliko scenarija hazarda klizišta se uzima u obzir (ne nužno najgori slučajevi), zajedno sa njihovim potencijalnim posljedicama, tako da se dotične komponente izravnog i neizravnog rizika mogu procijeniti kvantitativno. Ukupan rizik mora biti sažet u odnosu na rizik povezan s brojnim hazardima klizišta (Amatruda i sur., 2004.). Sumirajući različite vrijednosti rizika nekoliko scenarija podrazumijeva hipotezu da svaki scenarij promatramo samostalno.

## **7.2. Rizik od pojave toka krupnozrnatog materijala**

Kao dio procjene rizika na bujičnom slivu vodotoka Rječine, potrebno je utvrditi vjerojatnost pojave tokova krupnozrnatog materijala. Osnovni preduvjeti za pojavu tokova krupnozrnatog materijala su strme padine, dovoljne količine stijenskog (krupnozrnatog) materijala koji se može relativno lako mobilizirati, te dovoljno vode da se aktivira tečenje. Na temelju geomorfološke procjene bujičnog kanala i lepeze taloženja daljnja obilježja se mogu koristiti za procjenu vjerojatnosti pojave toka krupnozrnatog materijala (Aulitzky, 1980.; Rickenmann, 1995.). Prepoznavanje hazarda od pojave toka krupnozrnatog materijala je prvi korak, a može se temeljiti na sljedećim elementima (Jakob, 2005b): (i) geomorfološkim dokazima, uključujući i izgled aluvijalne ili kolvijalne lepeze taloženja, (ii) fotografijama iz zraka, satelitskim slikama, (iii) geomorfologiji i topografiji, te (iv) povjesnim spisima i dokumentima. Ti elementi daju informacije o prošlim događajima, primjerice na starim kanalima koji bi mogli utjecati na smjer kretanja toka krupnozrnatog materijala.

Snimanje i lokalizacija određenih mjesta unutar vodotoka sa značajnom količinom krupnozrnatog materijala s drvnim primjesama (balvanima, granjem i sl.) koji se pojavljuju tijekom poplava, mogu biti mapirani i kvalificirani prema intenzitetu svog djelovanja. To se provodi pomoću zračnih i satelitskih snimki, te terenskog istraživanja. U ovoj fazi, također je potrebno razmotriti moguće protumjere na hazarde u slučaju izvanrednog događaja, a posebice na prijetnje koje se generiraju na zaštitu građevina kada su prevladane kritične vrijednosti.

Visoka dostupnost lako erodibilnog materijala s kosina ili povećani unos materijala u vodotok nastao privremenim aktiviranjem i pokretima stijenske mase na kosinama preduvjet



su da se jedan ili više događaja toka krupnozrnatog materijala može jednom godišnje pojaviti u dužem vremenskom periodu (IRASMOS projekt, 2008). U određenom bujičnom slivu, mali i srednje veliki događaji hazarda (do nekoliko desetaka tisuća kubičnih metara) mogu se obično javljati s vremenskim razmacima od godine i desetljeća, dok se vrlo veliki događaj hazarda (veći od 100.000 m<sup>3</sup>) može dogoditi jednom ili dva puta tijekom razdoblja od jedne do sto godina. Vršni protok i dubina, te brzina strujanja su bitni parametri za utvrđivanje udarnih sila i procjene da li se tok krupnozrnatog materijala može prenijeti kroz postojeći vodotok/kanal ili će nadvišenje uzrokovati oštećenja na području lepeze taloženja (Hungar, 1997.; Raetzo i sur., 2002.; Zanchetta i sur., 2004.).

Određivanje vjerojatnosti pojave događaja toka krupnozrnatog materijala i njegovog intenziteta, kao i odlučnost njegove dinamike jedno je od najvažnijih zadataka tijekom procesa procjene hazarda (Jakob, 2005a). Neophodne informacije koje trebaju biti ucrtane na kartu procjene rizika su doseg toka krupnozrnatog materijala (točnije obuhvaćena površina uslijed propagacije), maksimalne dubine deponiranog materijala, te maksimalne brzine toka na promatranom području. Izbor adekvatne metode za opis i analizu propagacije toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala često predstavlja težak zadatak. Takve metode mogu biti podijeljene u empirijske i analitičke metode (Dai i sur., 2002.; Rickenmann, 2005.). One se klasificiraju s obzirom na dimenziju proračuna i svode na metode promatranja 1D tečenja, gdje se pojedine sile zanemaruju. U svijetu postoje različiti pristupi i smjernice za procjenu rizika i izradu karata hazarda od posljedica tokova krupnozrnatog materijala: Austrija (Aulitzky, 1994.; Fiebiger, 1997.), Švicarska (Raetzo i sur., 2002.), Hong Kong (Ng i sur., 2003.). Pojedine zemlje striktno uključuju procjenu rizika od tokova krupnozrnatog materijala i upravljanje njime kroz posebne odrednice i pravilnike (Fiebiger, 1997.; Besson i sur., 1999.).

Hazard od pojave toka krupnozrnatog materijala je određena kao vjerojatnost događaja unutar određenog vremenskog razdoblja i unutar danog potencijalno ugroženog područja (Varnes, 1984.). Vjerojatnosti događaja mogućih budućih tokova krupnozrnatog materijala se određuju na temelju različitih scenarija, koji se baziraju na odnosu intenzitet-frekvencija toka krupnozrnatog materijala (Jakob, 2005b.), dok proračun analize dosega određuje intenzitet upotrebljavajući jačinu događaja definiranu u svakom scenariju kao osnovni ulazni podatak. Intenzitet je općenito definiran s potencijalnim učinkom energije uslijed tečenja.

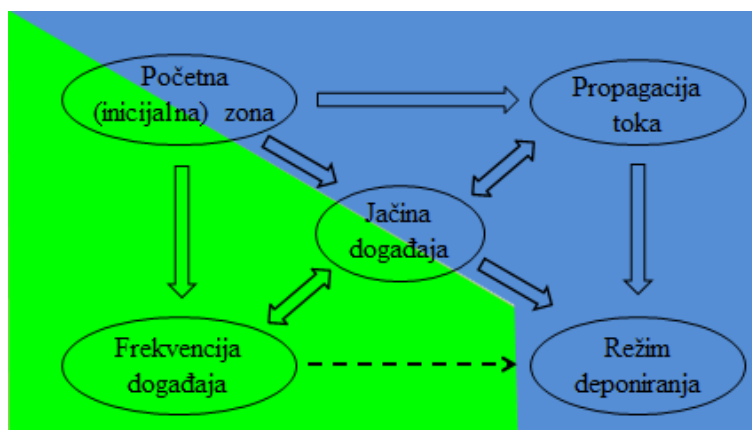
### **7.2.1. Doseg toka krupnozrnatog materijala**

Metoda za određivanje dosega toka krupnozrnatog materijala na temelju kojih se izrađuju karte hazarda mora zadovoljiti slijedeća tri uvjeta: 1. metoda mora specificirati

prostornu distribuciju i rezultati moraju pokriti cjelokupno promatrano područje, 2. metoda treba osigurati primijenu i importiranje različitih volumena kao ulazne podatke, te 3. izlazne vrijednosti u metodi bi trebale omogućiti davanje odlučnih intenziteta toka krupnozrnatog materijala. Prvi uvjet može biti izvršen samo kod 2D pristupa, bez mogućnosti primjene u 1D metodama. Ukoliko se primjenjuju 1D metode, ponajprije treba biti izabrana putanja toka i tada rezultati moraju biti ekstrapolirani preko promatranog područja kako bi se dobila karta hazarda. Drugi uvjet koji metoda mora zadovoljiti olakšava primjena geomorfološke i hidrauličke analize. Pritom se promatra odnos intenzitet-frekvencija događaja. Kako je procjena volumena mogućih budućih tokova krupnozrnatog materijala povezana s njegovom vjerojatnosti događaja, dinamička metoda mora biti sposobna simulirati različite volumene. Treći uvjet metode je direktno u vezi sa tipom izlaznih podataka.

### 7.2.2. Kriteriji mapiranja hazarda od posljedica toka krupnozrnatog materijala

Procjena vremenske i prostorne vjerojatnosti tokova krupnozrnatog materijala uključuje terenska istraživanja, interpretaciju zračnih fotografija, upite, arhivsko istraživanje i slično. Vremenska vjerojatnost se može dobiti na temelju povijesnih podataka, te bi krajnji rezultat trebao biti odnos između intenziteta i frekvencije događaja (Slika 7.4.).

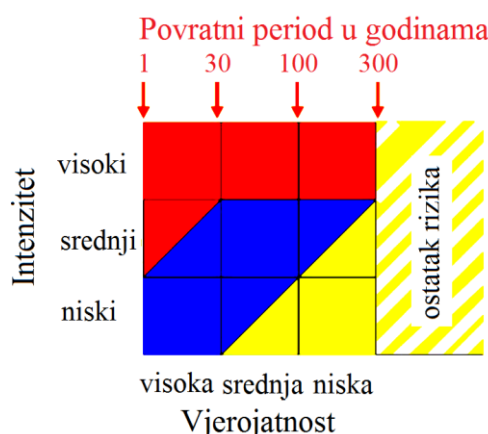


**Slika 7.4.** Glavni elementi koje treba uzeti u obzir u procjeni hazarda od tokova krupnozrnatog materijala. Zelenu boju pozadine imaju uglavnom elementi relevantni za frekvenciju i jačinu toka krupnozrnatog materijala, a oni za određivanje intenziteta i pogođenog područja tokovima krupnozrnatog materijala imaju plavu boju pozadine, (Rickenmann, 2001.)

Nakon utvrđivanja potencijalne inicijacije zona toka krupnozrnatog materijala, ponašanje dosega toka krupnozrnatog materijala se analizira kako bi se ograničilo produljenje ugrožene zone. Karta hazarda je podijeljena u različite stupnjeve hazarda, koji se mogu

definirati na temelju matrice hazarda. Temeljne komponente takve matrice trebaju biti intenzitet i vjerojatnost pojave procesa (Hungar, 1997.; Raetzo i sur., 2002.). Vjerojatnost pojave toka krupnozrnatog materijala može se izraziti na temelju frekvencije ili povratnog perioda procesa (Slika 7.5., Tablica 7.4.).

U procjeni potencijalnog hazarda od tokova krupnozrnatog materijala potrebno je analizirati dva aspekta: (1) pojavu toka krupnozrnatog materijala, i (b) značajke procesa tečenja/toka. Slike 7.4. i 7.5 prikazuju glavne elemente koje treba uzeti u obzir i njihov međuođnos (Rickenmann, 2001.).



**Slika 7.5.** Sustav ocjenjivanja hazarda korišten u Švicarskoj: crvena boja = visoki hazard, plava boja = srednji hazard, žuta boja = niski hazard, bijela boja = nema hazarda, (Rickenmann, 2001.)

**Tablica 7.4.** Kriteriji za podijelu klasa po intenzitetu za tečenje krupnozrnatog materijala i popratne procese; *P* - utjecaj pritiska (udara) lavine na prepreku, *D* - debljina taložne lepeze, *v* - brzina toka (poplave ili toka krupnozrnatog materijala), *h* - dubina toka, *hd* - deponirana dubina krupnozrnatog materijala, (\*) Švicarske preporuke (1997.), (\*\*) vrijednosti koje preporuča Rickenmann (2005.).

Proces	Niski intenzitet	Srednji intenzitet	Visoki intenzitet
Snježna lavina (*)	$P < 3 \text{ kN/m}^2$	$3 \text{ kN/m}^2 < P < 30 \text{ kN/m}^2$	$P > 30 \text{ kN/m}^2$
Tok krupnozrnatog materijala (*)	-	$D < 1 \text{ m}$ i $v < 1 \text{ m/s}$	$D > 1 \text{ m}$ i $v > 1 \text{ m/s}$
Dinamičko plavljenje (*)	$v h < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$	$0,5 < v h < 2 \text{ m}^2/\text{s}$	$v h > 2 \text{ m}^2/\text{s}$
Tok krupnozrnatog materijala, tečenje krupnozrnatog materijala na padini (**) (alternativni kriterij)	$hd < 0,4 \text{ m}$ i $v < 0,4 \text{ m/s}$	$hd < 1,0 \text{ m}$ i $0,4 \text{ m/s} < v < 1,5 \text{ m/s}$	$hd > 1,0 \text{ m}$ ili $v > 1,5 \text{ m/s}$

**Tablica 7.5. Metode koje se koriste za procjenu parametara toka krupnozrnatog materijala (Rickenmann, 2001.)**

Metoda	Osnova, ulazni podatak	Ograničenja, napomene
<b>Jačina (magnituda) događaja</b>		
Empirijski odnosi	Morfologija sliva	Nedovoljna točnost predviđanja
	Geologija/litologija	Poželjna daljnja istraživanja
	Erodibilnost (kombin. sa GISom)	Koristi za proizvodnju karti sa indeksom hazarda
Procjena prinosa sedimenata	Posljednja zapažanja, geomorfološka procjena (ulazni podaci sa pritoka i sloma kosina)	Vrijeme trajanja, uključuje subjektivnu prosudbu
<b>Frekvencija događaja</b>		
Prošli događaji	Datumi prošlih događaja (s procjenom jačine događaja)	Dobar pokazatelj i za režim (ponašanje) deponiranja materijala
Uvjeti kritičnih vrijednosti oborina	Učestalost uvjeta kritičnih vrijednosti oborina	Gruba pretpostavka, nema je ili je neograničeno povezana sa jačinom događaja
Metode na bazi vremena	Dendrokronologija, procjena starosti stijena na bazi lišajeva	Koristi se u istraživanju, često nije izvediva praktična primjena
<b>Inicirajući (pokretački) mehanizmi</b>		
Analiza nestabilnosti nagiba kosine	Oborine, tlo + hidrogeološki uvjeti	Mehanika tla, prijenos toka krupnozrnatog materijala; često prevladavaju heterogeni uvjeti; nedostaju terenska istraživanja
Kritične vrijednosti protoka u kanalu	Vršno otjecanje, opterećenje dna kanala i početak erozijskih djelovanja	Analogija sa transportom sedimenata
Drugi pokretački mehanizmi		Npr. topljenje snijega, izljev vode iz ledenjačkog jezera
<b>Propagacija toka</b>		
Zakoni otpornosti tečenja (jednoliko tečenje)	Jačina događaja, protok, dubina toka, nagib kanala	Empirijski, koeficijent otpornosti ovisi o sastavu materijala i sadržaju vode
„Hidrauličke“ simulacije s numeričkim modelima	Konstitutivne jednadžbe za različite "fluide", geometrija kanala, ulazni hidrogram	Ograničena provjera sa događajima koji su se do tada dogodili na terenu; kriteriji za primjenu vrste tečenja još uvijek nedostaju
<b>Deponiranje materijala (udaljenost dosega toka krupnozrnatog materijala)</b>		
Kut putovanja (općeniti nagib)	Uzdužni profil, površina sliva	Vrlo gruba procjena, Problemi sa konveksnim profilima
Empirijski odnosi	Jačina događaja, razlike u uzvisinama (visine reljefa)	Vrlo gruba procjena
Modeli temeljeni na GIS aplikaciji	Topografija, u kombinaciji sa većinom empirijskih modela za procjenu dosega toka krupnozrnatog materijala	Potrebna predkalibracija parametara
„Hidrauličke“ simulacije s numeričkim modelima	Konstitutivne jednadžbe za različite "fluide", geometrija lepeze taloženja, ulazni hidrogram	Ograničena provjera sa događajima koji su se do tada dogodili na terenu; kriteriji za primjenu različitih modela nije dobro poznata

Bitan element mapiranja hazarda od posljedica tokova krupnozrnatog materijala su kriteriji za razlikovanje različitih klasa intenziteta i vjerojatnosti. Pritom se može koristiti različiti pristupi za određivanje intenziteta procesa u ugroženim područjima, ovisno o potrebnoj razini detalja za kartu hazarda. Visoki intenzitet se definira kao utjecaj kada ljudski

život, čak i u građevini nije siguran, zbog toga što je građevina ili znatno potopljena ili ju može izazvati neki vanjski hazard. Srednji intenzitet definira hazard za život izvan građevine. Intenzitet utjecaja nije dovoljan da uništi čvrstu građevinu, ali može oštetiti dijelove građevine. To je dovoljno visok intenzitet da ugrozi život nezaštićene osobe izvana. Niski intenzitet je kada hazard za život nije značajan i nema velike štete građevine koja se može očekivati. Tipičan slučaj su plitke poplave s dubinom ispod 0,5 m. Klasifikacija slijedi princip da kod manje vjerojatnosti postoji veći dopušteni utjecajni intenzitet za istu skupinu (element rizika). Samo za visoke utjecaje intenziteta s hazardom po život, hazard se uvijek smatra visokim. Razvrstavanje u različite zone ima izravne posljedice na planiranje korištenja zemljišta.

Tablica 7.5. navodi niz metoda koje se mogu koristiti za procjenu hazarda toka krupnozrnatog materijala. Ovaj popis daje informacije o potrebnim ulaznim parametrima sa pojedinim ograničenjima unutar metoda, te prikladnosti metoda za proizvodnju indeksa hazarda na kartama na manje detaljnom mjerilu ili svojstva karata hazarda za detaljnija mjerila.

Važno je postojanje informacija o pretpostavkama različitih scenarija koje čine osnovu i daju preciznu formu razgraničenih zona hazarda, kako bi proces mapiranja hazarda bio transparentan, dokumentiran i imao nešto "subjektivnije" odluke koje se temelje na iskustvu stručnjaka odgovornih za mapiranje hazarda. Ukoliko se nekoliko procesa hazarda pojavi u istom području, konačna karta hazarda će biti rezultat preklapanja razina hazarda svih procesa, a najnepovoljniji stupanj hazarda će biti zadržan na karti.

### **7.3. O hazardu i riziku od klizišta i poplava na području srednjeg i donjeg toka Rječine**

Analizirano područje unutar sliva vodotoka Rječine nalazi se u njegovom srednjem dijelu, točnije razmatrane su posljedice mogućeg rizika na dijelu nizvodnije od akumulacije Valići do utoka vodotoka u Riječki zaljev. Geografske, geotehničke i hidrološke značajke danog područja su opisane u drugom poglavlju ovog rada (Slika 2.2. i 2.7.).

Područje klizišta Grohovo, kao i veći dio srednjeg i donjeg dijela doline Rječine sačinjavaju flišne naslage koje su podložne čestim pojavama klizanja ili odronjavanja. U starim povijesnim spisima i postojećoj dokumentaciji koje su pohranjene u Državnom arhivu grada Rijeke uglavnom su na području sliva vodotoka Rječine zabilježeni tipovi klizanja i odronjavanja stijenske mase, nekoliko katastrofalnih poplava, te jedna pojava formiranja toka sitnozrnatog materijala iz 1908. godine. Inicijalni uzrok pojavama nestabilnosti na većini istraženih lokacija je poremećaj prirodno uspostavljene ravnoteže unutar kosine izazvane



velikom količinom infiltriranih oborinskih voda (pretežno nastalih krajem zime i tijekom proljeća) koja prodire u deluvijalno-koluvijalni pokrivač izgrađen pretežno od čestica gline i praha te slojeva flišne stijenske mase različitog stupnja trošnosti.

Klizište Grohovo i akumulacija Valići predstavljaju značajne elemente potencijalnih hazarda na cjelokupnom području sliva Rječine, dijelom zbog krupnozrnatog materijala koji klizanjem ulazi u korito Rječine, djelom zbog velikih količina vode koje se prelivaju preko krune brane Valići. Popratne pojave na klizištu Grohovo i u njegovoj široj okolini brojna su klizišta (Benac i sur., 2005a). koja predstavljaju direktni hazard okolnim naseljima Grohovo, Lopača, Ilovik, Grobnik, kao i nizvodnim naseljima uz vodotok, prvenstveno gradu Rijeci. Također postoje velike moguće pojave hazarda za cestovnu infrastrukturu, te degradaciju okoliša koji u tom dijelu služi za rekreaciju i područje od velikog prirodnog interesa. Pojave klizanja i propagacije krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala niz vodotok predstavljaju jedan od glavnih uzroka promjena stanja na srednjem i donjem toku Rječine kao i na samom ušću vodotoka u Riječki zaljev. Promatrani lokalitet je zbog svoje problematike i jedinstvenih prirodnih pojava bio podložan brojnim istraživanjima, uglavnom geološke i hidrološke naravi. Tek krajem 20-tog i početkom 21. stoljeća su se počela izvoditi određena geomehanička i hidrogeološka istraživanja. O aktivnostima tla doline Rječine, naročito SI i SZ padine u blizini sela Grohovo, kao i o lokalnim klizištima u njegovoj neposrednoj blizini postoje saznanja zabilježena već sredinom 18. stoljeća. Sanacije koje su se izvodile početkom 20. stoljeća su bila početna rješenja u borbi s devastacijom okoliša, no klizanja i odroni stijenske mase (pretežito u flišnom dijelu) se još uvijek pojavljuju.

Obilježje flišnih padina u dolini Rječine je izmjena površina gdje pokrivač ima djelomično zaštitnu funkciju od erozijskog djelovanja, dok su matične stijene napadnute fluvijalnom erozijom. Jedan od razloga navedenih pojava je i smanjena obradivost površina koje imaju oblik terasa s mrežom odvodnih kanala radi smanjena štetnog erozijskog djelovanja i povećanja stabilnosti padina. Napuštanjem obrade zemljišta nastupila je gospodarska degradacija terena, urušavanje zidova terasa i zatrpavanje kanala. Tada se pojačalo erozijsko djelovanje, te ispiranje materijala koje poprima mjestimice drastične razmjere. Upravo takav primjer kombiniranog djelovanja erozije s pratećim pojavama klizanja je dolina vodotoka Rječine, a djelomice i podslivovi bujičnih tokova Sušice, Zale i Dubokog jarka. U protekle tri godine na opisanom području su se provodila različita hidrološka, geotehnička i geomehanička mjerenja i ispitivanja u sklopu hrvatsko-japanskog projekta. Prikupljeni podaci omogućili su izradu dobrog simulacijskog modela koji olakšava analizu

rizika od posljedica toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala prikazanom u predhodnom poglavlju rada.

### 7.3.1. Upravljanje rizicima na srednjem i donjem dijelu sliva Rječine

U nastavku se provodi pojednostavljena, gruba analiza rizika (eng. *Coarse Risk Analysis*) za potrebe identifikacije najvažnijih elemenata rizika. Kako je vodotok Rječina bujičnog karaktera s izrazito velikim varijacijama protoka tijekom godine moguće su veće poteškoće u njegovom donjem dijelu, točnije ulasku Rječine u urbani dio grada (područje tvornice papira, dio Školjića i Delte). Zbog svog aktivnog djelovanja tijekom prošlosti klizište Grohovo predstavlja značajan dio središnjeg dijela toka, na kojem je aktivno više manjih klizišta koja tvore vrlo nestabilno područje. Dodatan hazard u tom području predstavljaju i mnogobrojna manja aktivna i smirena klizišta u okolici akumulacije Valići. Glavni uzročnik problema u donjem toku Rječine je opisano formiranje toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala koritom Rječine za vrijeme velikih voda. Velike količine sitnozrnatog materijala ulaze u akumulaciju Valići pretežno iz pritoke Sušica, te se ispuštanjem količina akumulacijske vode propagiraju do samog ušća u gradu Rijeci. Krupnozrnati materijal se većim dijelom formira na području klizišta Grohovo i nekoliko manjih klizišta u njegovoj okolici. Radi detaljnije identifikacije hazarda područje je podijeljeno na četiri manja područja: 1. Područje klizišta Grohovo, 2. Područje akumulacije Valići, 3. Područje srednjeg i donjeg toka Rječine, te 4. Područje ušća Rječine u gradu Rijeci. Sažeti prikazi identificiranih hazarda na cjelokupnom promatranom području prikazani su u tablicama 7.6.-7.9.

**Tablica 7.6. Prikaz identificiranih hazarda na području klizišta Grohovo**

Br.	Inicirani događaj	Objekt utjecaja/uzrok	Posljedica	Elementi rizika
1.	Klizanje mase	Uništavanje i oštećenje cestovne infrastrukture (ceste, signalizacija, građevine)	• Oštećenje cestovne infrastrukture (ceste i signalizacija)	Cestovna infrastruktura
			• Oštećenje cestovne infrastrukture (objekti)	
			• Prekid cestovne komunikacije s okolinom	Ljudi
			• Sigurnost u prometu/ugrožavanje sudionika u prometu	
2.	Klizanje mase	Uništavanje i oštećenje javnih građevina u široj okolici klizišta Grohovo	• Nastala oštećenja	Građevine uz klizište Grohovo
			• Napuštanje građevina uslijed nastalih oštećenja	
			• Rušenje građevina uslijed nastalih oštećenja	Ljudi
			• Ugrožavanje života ljudi	
3.	Klizanje mase	Uništavanje flore i faune u široj okolici klizišta Grohovo	• Alokacija određenih životinjskih vrsta	Okoliš - sliv
			• Gubitak određenih životinjskih vrsta	
			• Gubitak određenih biljnih vrsta	
			• Mikroklimatske promjene	Ljudi
			• Smanjena kvaliteta života ljudi na širem području	
			• Smanjeni broj dolazaka turista i izletnika	
4.	Klizanje materijala u korito Rječine	Nekontrolirano taloženje materijala duž korita Rječine	• Uništavanje flore i faune sliva	Okoliš - sliv
			• Ostale promjene korita Rječine	

Na svakom području je identificirani inicirani događaj sa građevinom svog utjecaja, te posljedicom na element rizika. Sve posljedice su kategorizirane unutar sedam kategorija (elemenata rizika): cestovna infrastruktura (a), građevine uz klizište Grohovo (b), okoliš - sliv (c), vodotok (d), akumulaciju (e), građevine na ušću (f), okoliš - more (g), te ljudi (h).

**Tablica 7.7. Prikaz identificiranih hazarda na području akumulacije Valići**

Br.	Inicirani događaj	Objekt utjecaja/uzrok	Posljedica	Elementi rizika
1.	Klizanje materijala u akumulaciju Valići	Nekontrolirani unos materijala unutar akumulacije Valići	• Formiranje poplavnog vala	Akumulacija
			• Hidrodinamičko opterećenje brane i rušenje brane	
			• Promjena volumetrije akumulacije	
			• Promjena razine vodnoga lica	
			• Promjena batimetrije akumulacije	
			• preljevanje preko krune brane	Vodotok
			• Oštećenje cestovne infrastrukture na kruni brane	Cestovna infrastruktura
			• Uništavanje flore i faune u akumulaciji i njezinoj okolini	Okoliš - sliv
			• Alokacija određenih životinjskih vrsta	
			• Gubitak određenih životinjskih vrsta	
• Gubitak određenih biljnih vrsta				
• Mikroklimatske promjene	Ljudi			
• Smanjeni broj dolaska turista i izletnika				
2.			• Posljedice iste kao i kod nekontroliranog taloženja krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala duž korita Rječine	

**Tablica 7.8. Prikaz identificiranih hazarda na području srednjeg i donjeg toka Rječine**

Br.	Inicirani događaj	Objekt utjecaja/uzrok	Posljedica	Elementi rizika
1.	Prinos materijala srednjim i donjim tokom Rječine	Tečenje materijala u srednjem i donjem toku Rječine	• Pregrađivanje korita/formiranje prirodnih brana	Vodotok
			• Promjena smjera toka	
			• Promjena brzine toka	
			• Promjena poprečnog presjeka korita	
			• Promjena razine vodnoga lica	
			• Izlivanje vode iz korita	Cestovna infrastruktura
			• Oštećenje cestovne infrastrukture:	
			• Uništavanje flore i faune sliva	Okoliš - sliv
			• Alokacija određenih životinjskih vrsta	
			• Gubitak određenih životinjskih vrsta	
• Gubitak određenih biljnih vrsta				
• Mikroklimatske promjene	Ljudi			
• Smanjeni broj dolaska turista i izletnika				
2.	Prinos materijala srednjim i donjim tokom Rječine	Taloženje materijala u srednjem i donjem toku Rječine	• Pregrađivanje korita/formiranje prirodnih brana	Vodotok
			• Promjena smjera toka	
			• Promjena brzine toka	
			• Promjena poprečnog presjeka korita	
			• Promjena razine vodnoga lica	
			• Izlivanje vode iz korita	Cestovna infrastruktura
			• Oštećenje cestovne infrastrukture	
			• Uništavanje flore i faune sliva	Okoliš - sliv
			• Alokacija određenih životinjskih vrsta	
			• Gubitak određenih životinjskih vrsta	
• Gubitak određenih biljnih vrsta				
• Mikroklimatske promjene	Ljudi			
• Smanjeni broj dolaska turista i izletnika				

Tablica 7.9. Prikaz identificiranih hazarda na području ušća Rječine u gradu Rijeci

Br.	Inicirani događaj	Objekt utjecaja/uzrok	Posljedica	Kategorija posljedice
1.	Prinos materijala srednjim i donjim tokom Rječine	Tečenje materijala srednjim i donjim tokom Rječine do ušća u Riječki zaljev	• Pregrađivanje korita/formiranje prirodnih brana	Vodotok
			• Pregrađivanje ušća vodotoka u more	
			• Promjena smjera toka	
			• Promjena brzine toka	
			• Promjena poprečnog presjeka korita	
			• Promjena razine vodnoga lica	
			• Izlijevanje vode iz korita	Cestovna infrastruktura
			• Oštećenje cestovne infrastrukture (ceste i signalizacija)	
			• Oštećenje cestovne infrastrukture (građevine)	
			• Prekid cestovne komunikacije s okolinom (djelomični i potpuni)	Ljudi
			• Sigurnost u prometu/ugrožavanje sudionika u prometu	Građevine na ušću
			• Nastala oštećenja privatnih i javnih građevina neposredno uz vodotok	
			• Napuštanje građevina uslijed nastalih oštećenja	Ljudi
			• Rušenje građevina uslijed nastalih oštećenja	
			• Ugrožavanje života ljudi	Okoliš - more
			• Uništavanje flore i faune unutar sliva	
			• Alokacija određenih životinjskih vrsta	
• Gubitak određenih životinjskih vrsta				
• Gubitak određenih biljnih vrsta				
• Mikroklimatske promjene				
• Smanjeni broj dolazaka turista i izletnika	Ljudi			
2.	Prinos materijala srednjim i donjim tokom Rječine	Taloženje materijala u srednjem i donjem toku Rječine do ušća u Riječki zaljev	• Pregrađivanje korita/formiranje prirodnih brana	Vodotok
			• Pregrađivanje ušća vodotoka u more	
			• Promjena smjera toka	
			• Promjena brzine toka	
			• Promjena poprečnog presjeka korita	
			• Promjena razine vodnoga lica	
			• Izlijevanje vode iz korita	Cestovna infrastruktura
			• Oštećenje cestovne infrastrukture (ceste i signalizacija)	
			• Oštećenje cestovne infrastrukture (građevine)	
			• Prekid cestovne komunikacije s okolinom (djelomični i potpuni)	Ljudi
			• Sigurnost u prometu/ugrožavanje sudionika u prometu	Građevine na ušću
			• Nastala oštećenja privatnih i javnih građevina neposredno uz vodotok	
			• Napuštanje građevina uslijed nastalih oštećenja	Ljudi
			• Rušenje građevina uslijed nastalih oštećenja	
			• Ugrožavanje života ljudi	Okoliš - more
			• Uništavanje flore i faune unutar sliva	
			• Alokacija određenih životinjskih vrsta	
• Gubitak određenih životinjskih vrsta				
• Gubitak određenih biljnih vrsta				
• Mikroklimatske promjene				
• Smanjeni broj dolazaka turista i izletnika	Ljudi			
3.	Prinos materijala srednjim i donjim tokom Rječine	Tečenje materijala kroz urbani dio grada Rijeke (do ušću u Riječki zaljev)	• Pregrađivanje korita u urbanom dijelu grada Rijeke	Vodotok
			• Pregrađivanje ušća Rječine	
			• Promjena smjera toka	
			• Promjena brzine toka	
			• Promjena poprečnog presjeka korita	
			• Promjena razine vodnoga lica	
			• Izlijevanje vode iz korita Rječine	Cestovna infrastruktura
			• Oštećenje cestovne infrastrukture (ceste i signalizacija)	
			• Oštećenje cestovne infrastrukture (građevine)	
			• Prekid cestovne komunikacije s okolinom (djelomični i potpuni)	Ljudi
			• Sigurnost u prometu/ugrožavanje sudionika u prometu	Građevine na ušću
			• Nastala oštećenja privatnih i javnih građevina neposredno uz vodotok	
			• Napuštanje građevina uslijed nastalih oštećenja	Ljudi
			• Rušenje građevina uslijed nastalih oštećenja	
			• Ugrožavanje života ljudi	Okoliš - more
			• Uništavanje flore i faune unutar sliva	
			• Alokacija određenih životinjskih vrsta	
• Gubitak određenih životinjskih vrsta				
• Gubitak određenih biljnih vrsta				
• Mikroklimatske promjene				
• Smanjen broj dolazaka turista i izletnika	Ljudi			

Tablica 7.9. Prikaz identificiranih hazarda na području ušća Rječine u gradu Rijeci, nastavak

Br.	Inicirani događaj	Objekt utjecaja/uzrok	Posljedica	Kategorija posljedice
4.	Prinos materijala srednjim i donjim tokom Rječine	Taloženje materijala na ušću u Riječki zaljev	• Pregrađivanje korita u urbanom dijelu grada Rijeke	Vodotok
			• Pregrađivanje ušća Rječine	
			• Promjena smjera toka	
			• Promjena brzine toka	
			• Promjena poprečnog presjeka korita	
			• Promjena razine vodnoga lica	
			• Izlijevanje vode iz korita	
			• Oštećenje cestovne infrastrukture (ceste i signalizacija)	Cestovna infrastruktura
			• Oštećenje cestovne infrastrukture (građevine)	
			• Prekid cestovne komunikacije s okolinom (djelomični i potpuni)	Ljudi
			• Sigurnost u prometu/ugrožavanje sudionika u prometu	
			• Nastala oštećenja privatnih i javnih građevina neposredno uz vodotok	Građevine na ušću
			• Napuštanje građevina uslijed nastalih oštećenja	
			• Rušenje građevina uslijed nastalih oštećenja	Ljudi
			• Ugrožavanje života ljudi	
			• Uništavanje flore i faune unutar sliva	Okoliš - more
			• Alokacija određenih životinjskih vrsta	
• Gubitak određenih životinjskih vrsta				
• Gubitak određenih biljnih vrsta				
• Mikroklimatske promjene	Ljudi			
• Smanjeni broj dolazaka turista i izletnika				
5.	Prinos materijala srednjim i donjim tokom Rječine	Unos sitnozrnatog materijala u Riječki zaljev	• Unos sitnozrnatog materijala u more i njegova propagacija	Okoliš - more
			• Uništavanje flore i faune mora	
			• Alokacija određenih životinjskih vrsta	
			• Gubitak određenih životinjskih vrsta	
			• Gubitak određenih biljnih vrsta	
			• Mikroklimatske promjene	Ljudi
			• Širenje blatnog nanosa i drugih primjesa po industrijskoj i turističkoj zoni	
• Smanjeni broj dolazaka turista i izletnika				
6.	Prinos materijala srednjim i donjim tokom Rječine	Taloženje sitnozrnatog materijala u Riječki zaljev duž obale	• Uništavanje flore i faune mora	Okoliš - more
			• Alokacija određenih životinjskih vrsta	
			• Gubitak određenih životinjskih vrsta	
			• Gubitak određenih biljnih vrsta	
			• Mikroklimatske promjene	
			• Deformacija obalne linije	
			• Promjena smjera obalne morske struje	
			• Promjena intenziteta obalne morske struje	
• Smanjeni broj dolazaka turista i izletnika	Ljudi			

### 7.3.2. Analiza mogućih elemenata pri riziku

Na temelju analize elemenata hazarda i rizika može se konstatirati da je jedan od glavnih pokretača svih rizika klizanje klizišta Grohovo i unos krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala u korito Rječine, te njegova propagacija prema urbanom dijelu grada Rijeke. Iz danih tablica može se primijetiti da događaj klizanja reflektira moguće formiranje tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Također su prikazani i elementi rizika s pripadajućim posljedicama događaja. Na području klizišta Grohovo posljedice klizišta i unosa krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala u korito Rječine su kategorizirane unutar cestovne infrastrukture (a), građevina uz klizište Grohovo (b) te okoliš – sliv (c) i ljude (g). Pri definiranju problema uočeno je da je upravo to područje ključno u cijelom srednjem i donjem toku Rječine. Najveća posljedica od pojave hazarda karakteristična je za elemente rizika koji se nalaze uz samo klizište Grohovo (b) i vezana je za nastala oštećenja (mala, srednja i velika)



privatnih i javnih građevina koje se nalaze u neposrednoj blizini žarišta problema. Osim privatnih i javnih građevina uočen je veliki rizik za cestovnu infrastrukturu šire okolice (posljedice oštećenja kolnika i različitih građevina cestovne infrastrukture).

Na području akumulacije Valići javljaju se elementi rizika inicirani unosom flišnog materijala u akumulaciju s okolnih nestabilnih padina. Na području akumulacije Valići uz glavni problem unosa materijala s njene pritoke Sušice mogu nastati različiti hazardi koji se odražavaju na srednji i donji tok Rječine. Prvenstveno se tu misli na formiranje plimnog vala unutar akumulacije nastalog unosom klizne mase s okolnih nestabilnih padina uslijed čega može doći do preljevanja vode (i sitnozrnatog materijala) preko krune brane nizvodno u korito Rječine, kao i mogućnost potpunog rušenja brane nakon jakih hidrodinamičkih sila uzrokovanih oscilacijama plimnog vala unutar akumulacije. Elementi rizika su kategorizirani unutar cestovne infrastrukture (a), okoliš – sliv (c), vodotoka (d), akumulacije (e) te ljudi (h). Moguća posljedica pojave hazarda vezana je uz formiranje plimnog vala unutar akumulacije Valići i rušenja istoimene brane, te preljevanja vode i sitnozrnatog materijala. Unos materijala u akumulaciju utječe i na cestovnu infrastrukturu (prilazne ceste, šumske puteve, cestu na kruni brane), ali i na sami okoliš u srednjem i donjem toku Rječine koji je interesantan brojnim planinarima i izletnicima.

Na području srednjeg i donjeg toka Rječine kao glavni problem su identificirana mjestimična klizanja, te formiranje tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala što daje za posljedicu tečenje i taloženje krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala duž korita Rječine i na ušću Rječine u Riječki zaljev. Tok Rječine u srednjem dijelu je reguliran, kao i dio koji je vezan za urbani dio grada (od tvornice papira do ušća), dok dio vodotoka od mosta Pašac do urbanog dijela grada predstavlja kanjonski dio sliva vrlo strmih nagiba padina u vapnenačkoj stijenskoj masi. U ovom području posljedice od rizika su kategorizirane unutar cestovne infrastrukture (a), okoliš – sliv (c), vodotoka (d) te ljudi (h). U ovom području su nešto značajnije pojave oštećenja cestovne infrastrukture i promjene geometrijskih karakteristika vodotoka Rječine. Za istaknuti je da je najvjerojatnija posljedica pojave nekontroliranog taloženja suspendiranog materijala promjena poprečnog presjeka korita i velike brzine koje uzrokuju moguće izbacivanje krupnozrnatog materijala iz korita. Samim time dolazi do promjena razine vodnog lica.

Na području ušća vodotoka Rječine u Riječki zaljev u centru grada Rijeke kao jedan od problema je identificiran prinos krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala srednjim i donjim tokom Rječine. Samo područje ušća je delikatno zbog miješanja riječne i morske vode, odnosno struje prinosa suspendiranog materijala (većim dijelom sitnozrnatog) iz gornjih

dijelova toka sa obalnom strujom mora. Iz tog razloga detaljno je analizirano područje srednjeg i donjeg dijela toka Rječine, područje ušća Rječine i mora. Iako se tečenje i taloženje krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala javlja na cijelom području, kritična točka je urbani dio grada (područje izvora Zvir1, Školjića, Delte, područje Korza) na kojem uslijed formiranja toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala mogu nastati velike štete. Procjena je da u tom dijelu grada živi oko 3000-5000 ljudi koji bi tom prilikom mogli biti ugroženi. Također postoji vjerojatnost oštećenja privatnih i društvenih građevina uz sami vodotok, pretežno na desnoj strani vodotoka Rječine. Dodatnu pojavu hazarda treba tražiti na spoju vodotoka Rječine sa morem (Riječkim zaljevom) gdje se zbog suprotstavljenih strujanja riječne i morske mase može pojaviti izrazito taloženje sitnozrnatog materijala. Time se znatno narušava flora i fauna danog područja, te alokacija određenih životinjskih vrsta. Elementi rizika u ovom području su kategorizirani unutar cestovne infrastrukture (a), vodotoka (d), građevina na ušću (f), okoliša – mora (g) te ljudi (h).

Najveća očekivana posljedica hazarda je uočena na području samog ušća Rječine vezana uz taloženje i pregrađivanje korita sitnozrnatom materijalom. Talozenje materijala utječe na mogućnost pregrađivanja vodotoka (formiranje prirodne brane), kao i na promjenu razina vode, poprečnog profila korita i skretanje samog toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Takve moguće posljedice bi direktno utjecale na cestovnu infrastrukturu, te građevine na ušću Rječine u gradu Rijeci. Navedeno upućuje na hazard od poplava i formiranje tokova krupnozrnatog materijala, no pri tome treba voditi računa o pojavi visokog mora i juga istovremeno s velikom količinom nataloženog materijala na samom ušću Rječine i velikim prinosom putem srednjeg i donjeg toka.

Prinos suspendiranog materijala srednjim i donjim tokom Rječine, slobodna propagacija u Riječki zaljev i taloženje materijala duž obale daje najveće moguće posljedice na hazarde kategorizirane okolišem – morem (g) i ljudima (h). Unos i propagacija velikih količina sitnozrnatog materijala pri djelovanju jakih obalnih morskih struja dovodi do izrazitog uništavanja flore i faune mora, te djelomične degradacije obalne linije i širenja blatnog nanosa i drugih primjesa po dijelu turističke zone Pećine. Pritom je djelomično ugrožen i prometni terminal u Riječkoj luci, kao i Ro-Ro terminal za prekrcaj kontejnera na Brajdici. Takav proces i pojava direktno utječe na smanjeni broj dolazaka turista i indeks turizma u turističko orijentiranom području.

Kako je teško utjecati na glavni pokretač rizika, klizište Grohovo, treba se usmjeriti na njegovu direktnu posljedicu, tečenje krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala i posljedica koje oni povlače za sobom. Posljedice tečenja suspendiranog materijala su svrstane u osnovne

kategorije: cestovna infrastruktura (a), građevine uz klizište Grohovo (b), okoliš - sliv (c), vodotok (d), građevine na ušću (f), okoliš - more (g) te ljudi (h). Iz grube analize identifikacije hazarda na području srednjeg i donjeg toka Rječine može se vidjeti da je pojava rizika najizraženija kod građevina koje se nalaze neposredno uz samo klizište Grohovo, te građevina u urbanom dijelu grada Rijeke. Navedene građevine (prvenstveno u selu Grohovo) su do sada u prošlosti već pretrpjele određena oštećenja, no klizanjem i propagacijom tog materijala prijeti im mogući kolaps. Osim navedenih građevina visoki rizik je izražen kod cestovne infrastrukture i vodotoka. Ove dvije kategorije su direktno povezane, jer cestovna mreža prati vodotok i na nekoliko mjesta prelazi preko njega. Odgovor na ovaj rizik, uz regulaciju samog vodotoka u donjem dijelu Rječine treba tražiti i u kvalitetnijem uređenju kanjonskog dijela vodotoka, kao i izgradnji nekoliko taložnih bazena za sakupljanje krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Izvedba kvalitetnog prihvata krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala uz mjestimično uređenje toka Rječine, te njezino održavanje ključ je održivosti cijelog srednjeg i donjeg toka Rječine. Kvalitetnim reguliranjem vodotoka kao jednim od ključnih rizika u slivu sprečava se uništavanje cestovne infrastrukture. Djelovanjem na njega mogu se smanjiti svi ostali rizici.

Kategorija okoliša u srednjem i donjem toku Rječine od srednjeg je značaja i direktno ovisi o uređenosti vodotoka. S druge strane, predio uz more je od iznimnog značaja zbog izrazito gospodarske i turistički orijentirane okoline. Unos sitnozrnatog (pretežito blatnog i pješčanog) materijala u more i njegova propagacija, kao i deformacija obalne linije stvaranjem pješčanih nanosa uslijed djelovanja morskih struja izravno utječe na gospodarski razvoj, te kvalitetu i konstantu turističke ponude (indeks turizma). Spomenutim djelovanjem na srednjem i donjem dijelu Rječine, izgradnjom dodatnih kaskada i taložnika, direktno bi se utjecalo na količinu prinosa suspendiranog materijala, a time i njegovo unošenje u more i propagaciju koja za sobom formira zamućeno more koje je turistima i ljubiteljima prirode neprihvatljivo.

Povećani rizik se javlja kod građevina na samom ušću vodotoka (oštećenja uzrokovana podizanjem razine vode) zbog djelomično postojeće uređenosti vodotoka. Pritom postoji hazard ukoliko dođe do istovremenog djelovanja juga i visoke razine mora, u koincidenciji sa velikom količinom prinosa suspendiranog materijala i visokih voda sa sliva. U tom slučaju postoji hazard od izlivanja vode iz vodotoka i utjecaja na cestovnu infrastrukturu, te privatne i javne građevine.

Provedena analiza elemenata rizika zasnovana je na verifikaciji 2D numeričkih modela izrađenih SPH metodom na temelju različitih mogućih scenarija na srednjem dijelu vodotoka

Rječine (Poglavlje 6.). Na žalost, zbog velikog broja matematičkih operacija unutar proračuna koje djelomično proizlaze iz većeg broja ulaznih parametara i detaljnog prikaza prostorne diskretizacije (2\*2 i 5\*5 m), nije se mogla obuhvatiti cjelokupna dionica donjeg dijela Rječine. Stoga analiza rizika u buduću treba biti obuhvaćena simulacijskim modelom i prikazima za cjelokupni promatrani sliv vodotoka Rječine.

### 7.3.3. Sustav za rano uzbunjivanje

Izraz monitoring i sustav ranog uzbunjivanja (eng. *Early warning system*) se često shvaćaju kao istoiznačnice, iako se oni znatno razlikuju (ClimChAlp, 2008.). Tijekom monitoringa podaci se prikupljaju kontinuirano, te analiziraju kroz određene (jednake) vremenske inkremente (Slika 7.6.). Monitoring se pritom može sastojati od skupine uređaja koji u osnovi omogućuju određivanje dubine i oblika klizne mase koja formira pojavu toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, određivanje kretanja toka krupnozrnatog materijala, praćenje aktivnosti marginalno stabilnih kosina korita uslijed propagacije, te praćenje razine površinskih i podzemnih voda (pornog tlaka). S druge strane, sustav za rano uzbunjivanje je sustav praćenja u kojem se podaci kontinuirano prikupljaju i analiziraju, odnosno ukoliko je neka granica premašena, aktiviraju se neki predefimirani postupci civilne zaštite.



**Slika 7.6.** Predloženi opći tok aktivnosti sustava za rano uzbunjivanje od pojave hazarda klizišta i formiranja krupnozrnatog toka na području srednjeg i donjeg toka Rječine (modificirano prema ClimChAlp, 2008.)

Uspješan sustav za rano upozoravanje (uzbunjivanje) mora biti orijentiran na ljude i mora integrirati sljedeća četiri elementa: 1. znanje o riziku s kojim se suočavamo, 2. tehničku službu za monitoring i uzbunjivanje, 3. širenje smislenih upozorenja onima koji su izloženi riziku, te 4. stvaranje javne svijesti i spremnosti na djelovanje. Neuspjeh u bilo kojem od gore navedenih segmenata može značiti neuspjeh cijelog sustava za rano upozoravanje. Sustavi za rano upozoravanje od pojave klizišta i posljedično s time formiranja tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala mogu pomoći da se rizik drastično smanji. Takav sustav je važan segment u civilnoj zaštiti. Preduvjet svemu tome je jasno definiranje plana za zaštitu okoliša (ClimChAlp, 2008.).

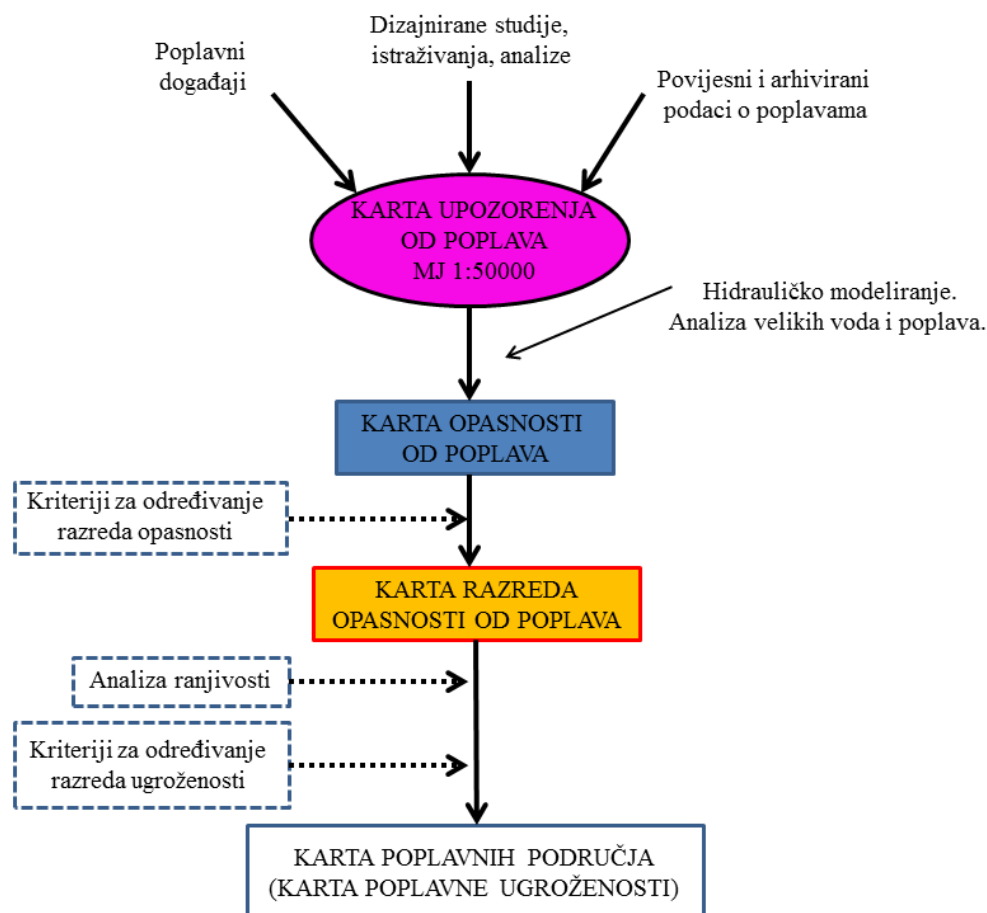
## **7.4. Promatranje poplava i poplavnih zona**

### **7.4.1. Karta upozorenja od poplava**

Područja od mogućih poplava temelje se na procjeni situacije prikazane na kartama upozorenja od poplava. Karte upozorenja sadrže topografiju i korištenje zemljišta, graničnu crtu (liniju) potencijalnog doseg poplava, linije voda koje stoje (vode stajačice), mjesta pojedinačnih poplava, te oznake svih vodnih građevina koje mogu ugroziti velike poplave (ili dovesti do njihova rušenja), tekstualni dio koji obuhvaća opis poplava, posebno onih koji bi se mogli ponoviti u budućnosti. Karte upozorenja također uključuju procjene budućih poplava i njihov utjecaj na život ljudi, okoliš, razvoj ekonomskih i ne-ekonomskih aktivnosti, uzimajući u obzir dugoročni planirani razvoj i klimatske promjene. Takve se karte izrađuju za područja gdje se očekuju veći mogući rizici od posljedica poplava, a temeljene su na modeliranju i analizi hidroloških, geoloških, geomorfoloških i geodetskih podataka, podataka o korištenju i pokrovu zemljišta.

Opasnosti od poplava na nekom području trebaju biti prikazane u grafičkom obliku koji sadrži informacije o granicama područja opasnosti od poplava u toku  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  i  $Q_{500}$  i podataka o granicama područja od opasnosti pri brzini toka koji odgovara protoku sa 100-godišnjim povratnim periodom,  $Q_{100}$  (Senić, 2010.). Za potrebe procjene ugroženosti od poplava potrebno je da se za svako područje opasnosti izradi procjena ugroženosti, koja mora uključiti sljedeće elemente: procjenu broja stanovnika, određivanje vrsti i broja izloženih komercijalnih i nekomercijalnih aktivnosti, prikazati mjesta i opis važnih infrastrukturnih građevina koja mogu biti oštećena, utvrditi mjesta i opis osjetljivih građevina, prikaz i opis područja posebnih uvjeta u skladu s propisima koji određuju način pripreme Plana upravljanja vodama (zone sanitarne zaštite, zaštićena staništa i životinjske vrste, izvori pitke vode i

kupališta i sl.), te sprovesti detaljnu analizu korištenja zemljišta i procjenu mogućih posljedica svih vrsta gubitaka (Tablica 7.10., Slika 7.7.).



*Slika. 7.7. Postupak za određivanje poplava na srednjem i donjem dijelu vodotoka Rječine (modificirano prema Sodnik, 2009.)*

*Tablica 7.10. Mjerila za određivanje razreda ranjivosti od posljedica poplava (modificirano prema Sodnik, 2009.)*

RAZRED	ELEMENTI UGROŽENOSTI (RIZIKA)
Vrlo niska ranjivost	Gustoća naseljenosti: do 10 stanovnika po km <sup>2</sup> ; Manje promjene ekonomskih i neekonomskih aktivnosti lokalnog značaja, osjetljive građevine.
Niska ranjivosti	Gustoća naseljenosti: 11 do 100 stanovnika po km <sup>2</sup> ; Promjene ekonomskih i neekonomskih aktivnosti lokalnog značaja; osjetljive građevine; kulturna baština lokalnog značaja; područja s posebnim potrebama u skladu s pravilima koja određuju način izrade planova upravljanja vodama.
Srednja ranjivost	Gustoća naseljenosti: 101-300 stanovnika po km <sup>2</sup> ; Promjene ekonomskih i neekonomskih aktivnosti od značaja za cijelu samoupravnu lokalnu zajednicu; osjetljive građevine; postrojenja i opreme, koji mogu dovesti do kontaminacije područja s posebnim potrebama u skladu s pravilima koja određuju način izrade planova upravljanja vodama; kulturna baština od regionalnog značaja.
Velika ranjivost	Gustoće naseljenosti: više od 500 stanovnika po km <sup>2</sup> ; promjene ekonomskih i neekonomskih aktivnosti nacionalne važnosti; postrojenja i opreme, koja mogu dovesti do kontaminacije velikog opsega, posebno u odnosu na područja s gustoćom naseljenosti od 101 do 500 stanovnika po km <sup>2</sup> ili područja s posebnim potrebama u skladu s pravilima koja određuju način izrade planova upravljanja vodama; kulturna baština od nacionalnog i globalnog značaja; osjetljive građevine.



Prema elementima ugroženosti (rizika) za središnji dio vodotoka Rječine možemo usvojiti razred „niske do srednje ranjivosti“ po pitanju gustoće naseljenosti i značajkama upravljanja vodama, dok za donji tok (prvenstveno urbani dio grada Rijeke) treba sagledavati mogućnost prisustva „velike ranjivosti“.

#### **7.4.2. Sustavni pristup problematici upravljanja rizicima od poplava**

Pojava poplava ovisi o klimatskim karakteristikama područja i drugim različitim faktorima, a najčešće nastaju kao posljedica pojave intenzivnih kiša ili topljenja snijega i leda. Do poplava može doći i usljed rušenja brane, nasipa ili nekog drugog hidrotehničkog objekta, usljed potresa, nepravilnim rukovanjem sustavima obrane, zatvaranjem riječnog toka nagomilavanjem leda, odronima, naplavinama drveća i granja, nanosom i slično. Iako je nemoguće s potpunom sigurnošću predvidjeti trend klimatskih promjena, oborine mogu znatno utjecati na rizike od poplava i kao takve se trebaju uzeti u razmatranje u upravljanju rizicima od poplava na razini sliva. Sustavni pristup upravljanja rizicima od poplava predstavlja interdisciplinarnu znanstvenu metodu primjenjivu na različitim promatranim područjima. Takav pristup je nastao iz koncepta u kojem se sve promatra na način da je međusobno povezano, kroz holističku, teoriju cjeline. Često se primjenjuje eksperimentiranje s matematičkim ili fizikalnim modelima.

U sklopu definiranja i ostvarivanja ciljeva primjenjuje se izbor kriterija kao mjera vrednovanja rješenja i kvalitete upravljanja rizicima od poplave (Senić, 2010.). Neki od značajnijih kriterija su: (i) ekonomski pokazatelji kroz financijsku dobit, korist, uštede, štete, (ii) kvantitativni pokazatelji u smislu količina, dubine i brzine vode, trajanja poplave, (iii) probabilistički pokazatelji kroz stupanj ostvarene zaštite od poplava, te (iv) nemjerljivi pokazatelji poput pogodnosti izgradnje pojedine građevine prilikom mjera sanacije od posljedica poplava, interakcija s okolinom kroz utjecaj zahvata na okoliš.

Poplave se mogu pojaviti kao bujične poplave koje nastaju naglim nadolascima poplavnih voda u povremenim ili stalnim vodotocima čija su slivna područja zahvaćena erozijskim procesima (primjer bujičnog vodotoka Slani potok), uslijed kratkotrajnih kiša visokih intenziteta. Takve pojave sa sobom donose cijeli niz drugih problema i posljedica kao što su erozija i odnošenje materijala u gornjem dijelu bujičnog toka i njegovo taloženje nizvodno. Urbana područja (u ovom slučaju grad Rijeka) su najčešće izložena najvećim rizicima od poplava.

Zbog sve veće koncentracije stanovništva u priobalnom području, te zbog povećane izgrađenosti i urbaniziranosti područja poplave mogu izazvati velike štete, gubitak i

ugroženost velikog broja ljudskih života. Manji vodotoci, poput Rječine i njenih pritoka, mogu za vrijeme pojave ekstremnih oborina kratkog trajanja i jakog intenziteta nabujati u kratkom vremenu izazivajući velike štete zbog neadekvatnog cjelokupnog sustava odvodnje, propusta i drugih građevina koje nisu projektirane za takve ekstremne situacije. Povećana urbanizacija u gradovima smanjuje infiltriranje oborinske vode u tlo, čime se povećava površinsko otjecanje, a samim time i opasnost od poplava unutarnjim vodama.

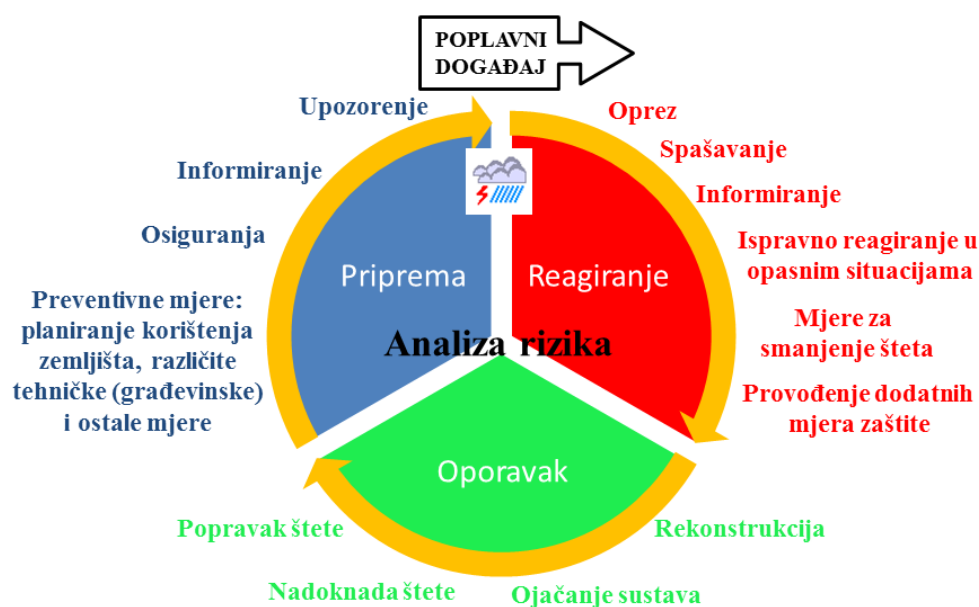
### **7.4.3. Upravljanje rizicima od poplava**

Suvremeno upravljanje rizicima od poplava zahtjeva integralni pristup kroz upravljanje vodnim resursima s ciljem smanjivanja rizika od poplava uz istovremeno očuvanje ekosustava i iskoristivost poplavnih površina. Takav pristup podrazumijeva ravnotežu između količina i kvalitete vode (površinske i podzemne), upravljanja korištenjem zemljišta, ekonomije, pa sve do poštivanja ekoloških i okolišnih zahtjeva. Problematika upravljanja rizicima od poplave treba sagledavati na razini sliva bez obzira na administrativne i državne granice. Ona predstavlja dinamičan proces, cikličnog karaktera koji uključuje prevenciju, zaštitu od poplava, pripravnost, reagiranje nakon poplave i oporavak od štetnih posljedica poplave.

Upravljanje rizicima od poplave se provodi u tri faze (Slika 7.8.). Pripremna faza uključuje cijeli niz pripremnih i preventivnih mjera kojima će se smanjiti poplavni rizik i mjere s kojima će se uspješno nositi s preuzetim rizikom. Tu spadaju različite građevinske i negrađevinske mjere, planiranje gradnje van poplavnih područja, planiranje korištenja zemljišta, prilagodba postojećem riziku od poplava, osiguranja imovine, informiranje stanovništva o riziku od poplava i o pravilima ponašanja u slučaju poplavnog događaja, pravovremeno informiranje i upozoravanje, provođenje dodatnih mjera zaštite od poplava, evakuacija i slično. Druga faza predstavlja reagiranje (upozoravanje) za vrijeme ili neposredno nakon poplavnog događaja, dok je treća faza vezana za oporavak od nastale štete (WMO/GWP, 2008.). Analiza rizika ima vrlo važnu ulogu u cijelom procesu upravljanja rizicima. Nakon njene provedbe i određivanja rizika od poplava, te nakon što se odredi prihvatljiva razina rizika kreće se u izradu plana mjera kojima će se rizik smanjiti ili održavati na prihvatljivoj razini. Nakon toga slijedi ponovna analiza rizika na osnovu koje se, ukoliko je potrebno, revidira novi plan mjera.

U Europskoj Uniji je od 2007. godine na snazi Direktiva o poplavama (*Directive 2007/60/EC*) koja obvezuje zemlje članice da izvrše preliminarnu procjenu poplavnih rizika do kraja 2011. godine na temelju kojih se definiralo područja za koja se smatralo da postoje značajni rizici od poplava za koja je bilo potrebno izraditi karte hazarda i rizika od poplava do

kraja 2013. godine. Direktiva o poplavama također obvezuje izradu planova upravljanja rizicima od poplava do kraja 2015. godine. Planovi upravljanja rizicima od poplava trebaju biti integralni, odnosno usklađeni s planovima upravljanja vodnim područjima i europskom Okvirnom direktivom o vodama, s ciljem smanjenja štetnih posljedica poplava za ljude, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarstvo (Senić, 2010.). Oni su bazirani na mjerama prevencije, pripravnosti i zaštite, uključujući prognozu poplava i sustave ranog upozoravanja. Javnost mora biti uključena u njihovu izradu i sve analize, a izrađene karte i planovi moraju biti javno dostupni svima. Predviđeno je ažuriranje svih procjena, izrađenih karata i planova upravljanja rizicima od poplava svakih šest godina.



*Slika 7.8. Procesne faze upravljanja rizicima od poplava (modificirano prema WMO/GWP, 2008.)*

Republika Hrvatska je u srpnju 2008. godine donijela Strategiju upravljanja vodama (NN, br. 91/08) koja predstavlja dugoročni planski dokument Republike Hrvatske kojim se utvrđuju vizija, misija, ciljevi i zadaće državne politike u upravljanju vodama. U Strategiji je Republika Hrvatska okarakterizirana kao iznimno ranjiva od poplava, jer se znatnim dijelom prostire kroz brdsko-planinsko područje u kojima su česte pojave oborina velikih intenziteta. Veliki gradovi i ostala vrijedna dobra smješteni su uz velike rijeke (Sava, Drava, Dunav) i zbog nedovršenog ili nedovoljno održavanog sustava zaštite od štetnog djelovanja voda izloženi su povećanom riziku od poplava (primjer sela Gunje u Slavoniji 2014. godine). U Hrvatskoj se najčešće pojavljuju riječne poplave, bujične poplave od kiša kratkog trajanja i velikog intenziteta, krške poplave, poplave unutarnjih voda i ledene poplave. Prema Procjeni

ugroženosti Republike Hrvatske od prirodnih i tehničko-tehnoloških katastrofa ocjenjeno je da je Republika Hrvatska u visokom stupnju ugrožena od poplava (oko 15% kopnenog područja), od čega je veći dio zaštićen različitim mjerama i razinama sigurnosti. Operativno upravljanje rizicima od poplava provode Hrvatske vode, u skladu s Državnim planom obrane od poplava (NN, 84/2010). U upravljanju rizicima od poplave svoju ulogu imaju Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) koji je zadužen za dostavljanje svih raspoloživih podataka u realnom vremenu, prognoze i upozorenja o hidrometeorološkim pojavama, Državna uprava za zaštitu i spašavanje koja izrađuje i nadzire provedbu Plana zaštite i spašavanja Republike Hrvatske pogotovo prilikom poplava većeg opsega, te druga nadležna tijela državne uprave, jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave i pravnih osoba u sustavu zaštite i spašavanja.

#### **7.4.4. Procjena rizika od poplava**

Prvi korak u provedbi analize rizika je identifikacija početnog događaja. Kako je u ovom radu fokus na probleme hazarda i mogućih prijetnji može se govoriti o identifikaciji hazarda ili prijetnji od strane velikih poplava i tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. U provedbi procjene rizika (eng. *Risk assesment*) potrebno je što prije identificirati hazarde i prijetnje kako bi ih mogli prepoznati i na vrijeme smanjiti (najpoželjnije ukloniti!). Za svaki inicirajući događaj provodi se analiza koja obuhvaća analizu uzroka i analizu posljedica. Unutar analize uzroka proučava se što je to potrebno da se inicirajući događaj pojavi. Prilikom analize uzorka koristi se nekoliko tehnika (npr. proces generiranja novih ideja (tzv. *brainstorming*), sistematična metoda analize sustava (tzv. *Fault tree analysis – FTA*), te Bayesove mreže koje predstavljaju probabilistički usmjereni grafički model temeljen na skupu slučajnih varijabli i njihovih uvjetnih ovisnosti (eng. *Bayesian networks*)).

Na žalost, često puta tek katastrofalne poplave većih razmjera potaknu rješavanje ugroženosti od poplava tog područja, pa se započinje s planiranjem izgradnje zaštitnih građevina, izradom projektne dokumentacije i drugim aktivnostima i mjerama (npr. katastrofalna poplava na vodotoku Rječine iz 1898.). Nakon uočavanja problema ugroženosti od poplava i potreba za njegovim rješavanjem i namjera ostvarenja većeg stupnja zaštite od poplava, mogu se definirati ciljevi koji se žele postići. Pritom je zadovoljenje međusobno konfliktih zahtjeva i traženje kompromisnog ili optimalnog rješenja jedan od glavnih ciljeva kvalitetnog sustavnog pristupa problematici upravljanja rizicima od poplave.

Upravljanje sustavom podrazumijeva cijeli niz aktivnosti, prije svega planiranje, a zatim i kontrolirano utjecanje na konačne ciljeve ponašanja sustava, uz različite početne uvjete.

Osnovna prostorna jedinica na kojoj se provodi upravljanje rizicima od poplava je sliv nekog vodotoka koji predstavlja zaseban podsustav. Da bi se mogli procijeniti poplavni rizici i donijeti mjere za smanjenje tih rizika potrebno je definirati ekstremne poplavne događaje na određenom profilu vodotoka. Određivanje mjerodavnih velikih voda predstavljaju podlogu i smjernice za projektiranje zaštitnih građevina (nasipa, brana, mostova, propusta, kanala i dr.). Često se definira najveća poplava koja se može pojaviti na nekom području ili se traži podatak o povratnom periodu velikih poplavnih valova.

Razlikuju se deterministički (određeni, parametarski) i probabilistički (slučajni, statistički) pristupi određivanju velikih voda (Baecher, 2009.; Senić, 2010.). Primjena pojedinih metoda ovisi o tome da li se radi o proračunu velikih voda na hidrološki izučanim ili neizučanim vodotocima (slivovima). Probabilističke metode igraju veliku ulogu u interpretaciji slučajnih događaja kao što su maksimalni protoci i u definiranju poplavnih rizika. Analiza rizika od poplava ne uključuje posljedice samo jednog poplavnog događaja, nego razmatra ukupni poplavni rizik poplavnih događaja različite vjerojatnosti pojave na određenom razmatranom području u određenom vremenskom razdoblju. Takve analize uključuju hidrološke analize s veličinama velikih voda određene vjerojatnosti pojave, primjenjene na hidraulički model promatranog područja na osnovu čega se mogu procijeniti očekivane štetne posljedice koje ovise o osjetljivosti i karakteristikama područja pod poplavom. Time se definira krivulja odnosa vjerojatnosti poplavnog događaja i očekivanih (potencijalnih) štetnih posljedica, a površina ispod krivulje vjerojatnosti poplavnog događaja i očekivanih štetnih posljedica predstavlja ukupne (prosječne) očekivane godišnje štete od poplava u jednoj godini.

Unutar procesa upravljanja rizicima od poplave vrlo važan korak predstavlja izrada Plana upravljanja rizicima od poplave. To je dokument koji prikazuje rezultate provedenih analiza, planiranih mjera i način njihove primjene i financiranja (Senić, 2010.). Dio planova upravljanja rizicima od poplave su karte hazarda i karte rizika od poplave kojima će se odrediti i zonirati rizična područja. Takve karte daju jasniju sliku o rizicima od poplave, ugroženim područjima i predstavljaju podlogu za prostorno planiranje i osiguranja od poplava. Za uspješnije provođenje i izradu karata danas se koriste numerički 2D i 3D modeli za opis poplavnih događaja. S obzirom da je upravljanje rizikom kompleksan proces koji zahtjeva određena sredstva, znanja i vrijeme da se provede, opisane analize i izrada pojedinih karata od rizika zahtjevaju određeno duže vremensko razdoblje promatranja i analiziranje nastalih promjena.

#### **7.4.5. Analiza rizika**

Svrha analize rizika (eng. *Risk analysis*) je u opisivanju rizika tj. izradi informativne slike rizika. Uz pomoć analize rizika može se identificirati svaki relevantan početni događaj i razviti njegova usputna i posljedična slika. To se postiže pravovaljanim odabirom metode i načinom korištenja rezultata analize. Kvalitativnom analizom rizika se procjenjuju prioriteta među identificiranim rizicima, a radi uspješnog upravljanja rizicima. Za svaki rizik se procjenjuje vjerojatnost njegova nastanka, kao i potencijalni efekti ukoliko dođe do pojave pojedinog rizika. U tu se svrhu izrađuju matrice vjerojatnosti i utjecaja, analizira se kvaliteta prikupljenih podataka o pojedinom riziku, kategoriziraju se rizici prema izvoru rizika, kao i procjene hitnosti rješavanja rizika (PMI, 2004.).

Kvantitativna analiza rizika odnosi se na analizu utjecaja onih rizičnih događaja, koji su prethodnom kvalitativnom analizom definirani kao potencijalno najutjecajni na ostvarenje ciljeva. Unutar takve analize primjenjuju se odgovarajuće tehnike i alati kao što su: analiza osjetljivosti, procjene očekivanih troškova, kao i kvantitativne metode odlučivanja u uvjetima nesigurnosti (stablo odlučivanja, tehnike modeliranja i simulacije) (Senić, 2010.).

Proces planiranja predstavlja iscrpnu izradu programa aktivnosti za upravljanje rizicima kako bi se razvila i dokumentirala organizirana, sveobuhvatna i interaktivna strategija upravljanja rizicima, te odredile metode za provođenje strategije. Sama identifikacija rizika se odvija u drugoj fazi procesa upravljanja rizicima. Neke od temeljnih metoda koje se mogu koristiti pri analizi rizika su gruba/preliminarna analiza rizika (eng. *Coarse/preliminary risk analysis*), *Failure modes and effects analysis (FMEA)*, Strukturirana „što-ako“ tehnika (*SWIFT*), te Monte Carlo simulacija. Detaljan opis svake od ovih metoda može se naći u radu Senić (2010.).

#### **7.4.6. Štetne posljedice od poplava**

Štete koje poplave izazivaju se mogu podijeliti na materijalne štete nastale na kućama, građevinama, infrastrukturi, poljoprivrednim kulturama i sl., kao i ljudske štete (izgubljeni životi ili teške ozljede) kao rezultat direktne izloženosti poplavnoj vodi. Kakve će posljedice poplava izazvati ovisi o prisutnosti ljudi, naselja, tvornica, tvrtki, kulturne baštine, prirodnih vrijednosti i slično u poplavnom području. Upravo stoga se štetne posljedice poplava mogu sagledati kroz nekoliko važnih komponenti, a to su: gubitak i ugrožavanje ljudskih života, štete u gospodarstvu, te negativan utjecaj na okoliš. Najčešće se štetne posljedice od poplava kategoriziraju kao direktne (nastale na građevinama, infrastrukturi i sl. u direktnom kontaktu s vodom), te indirektne (uzrokovane poplavom, ali ne direktno, primjerice prekid prometa,



gubici u gospodarstvu i sl.). Za potpunu procjenu rizika od poplava ili tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala potrebno je uzeti u obzir:

1. ugroženost i gubitak ljudskih života – uzeta kao najgora posljedica. U ovu skupinu spadaju ljudi koji su ostali zatočeni u kućama (bez vode, hrane, struje i plina) ili u prometnom kolapsu, ljudi koji su izgubili sentimentalne vrijednost stvari uništenih u poplavi ili ljudi kojima je nužno potrebna evakuacija ili zbrinjavanje.

2. štete u gospodarstvu – koje direktno uključuju štete nastale na građevinama (kućama, zgradama, namještaju, industrijskim postrojenjima, strojevima, opremi, vozilima, infrastrukturi i ostaloj privatnoj i društvenoj imovini), štete na poljoprivrednim posjedima i sl. Takve štete uključuju onemogućavanja obavljanja gospodarskih aktivnosti na ugroženim industrijskim postrojenjima, poljoprivrednim posjedima i sl.

3. utjecaj na okoliš – koji može biti pozitivan i negativan. Pozitivan utjecaj je vezan za područja koja su pod režimom prirodnih, sezonskih ciklusa plavljenja (npr. Lonjsko polje, Kopački rit i sl.), gdje poplave podržavaju razvoj močvarnih staništa. Negativan utjecaj na okoliš je vezan za područja koja inače nisu izložena prirodnim ciklusima plavljenja i gdje primjerice povećanje dubine vode i brzine tečenja prilikom poplave može uzrokovati uništenje pojedinih vrsta. Pritom mogu nastati dodatne štete u vidu erozijskog djelovanja, nanošenja materijala, izljevanja septičkih jama, onečišćenja uslijed poplave postrojenja za pročišćavanje vode ili neke kemijske tvornice, ispiranje kemijskih sredstava s poljoprivrednih površina, uništenje staništa (alohtonih ili autohtonih vrsta), smanjenje pojedinih vrsta i drugo.

## **8. ZAKLJUČAK**

Predmet istraživanja ovoga doktorskog rada bila je analiza tečenja nevezanog krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na srednjem i donjem toku vodotoka Rječine. Takve analize su izuzetno važne zbog procjene rizika i ograničavanja ranjivih područja u kojima su potrebne mjere ublažavanja. Tokovi krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala koji su razmatrani u radu predstavljaju proces disipacije mase nevezanog krupnozrnatog (nekoherentnog) i sitnozrnatog (koherentnog) materijala sa izuzetno brzim protokom u strmom ograničenom kanalu koji se deponira na rubu toka. Ta činjenica je i dokazana kroz niz izrađenih numeričkih simulacija na danom području. Hidrodinamički udari takvih tipova tečenja su iznimno jaki, jer u sebi sadrže mješavinu vode, krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, kamenih blokova i drvnih primjesa koji znaju propagirati brzinama od 20-25 m/s, pa i više.

U cilju opisivanja pojave tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala u radu je dan detaljan opis, značajke, geomehaničke vrijednosti koje ih karakteriziraju kao i pregled 2D i 3D numeričkih modela koji se koriste u praksi za opis propagacije takvih prirodnih (katastrofalnih) pojava.

Rad sadrži niz numeričkih simulacija za različite moguće scenarije formiranja klizanja mase, tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, te poplavnih pojava temeljenih na pristupu SPH i SOLFEC simulacijskih programa. Numerički modeli su izrađeni za središnji i donji dio toka Rječine, uključujući područje klizišta Grohovo i akumulacije Valići. U tom pogledu uspoređeno je nekoliko mogućih scenarija pojave toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala nakon klizanja mase s klizišta Grohovo i miješanja kliznog materijala s vodom u koritu Rječine. Pritom je sagledano zasebno klizanje mase s klizišta Grohovo, kao i interakcija dviju ili više kliznih masa sa pojedinačnih klizišta koja nastaju u različitim vremenskim periodima. Također je promatrana moguća posljedica rušenja (puknuća) brane Valići nakon klizanja (ulaska) velikih količina kliznog materijala u akumulaciju i formiranje poplavnog vala koji se tom prilikom može propagirati nizvodno do urbanog dijela grada Rijeke (područje Delte i Školjića). Napravljene su i numeričke simulacije uzajamnog djelovanja klizanja krupnozrnatog materijala s klizišta Grohovo i propagacija poplavnog vala nakon potpunog ili djelomičnog rušenja brane. Temeljem hidroloških i geotehničkih parametara za srednji tok Rječine, te izradom numeričkih modela u SPH i SOLFEC simulacijskim programima može se zaključiti da uslijed klizanja mase s klizišta Grohovo i formiranja toka krupnozrnatog materijala nakon miješanja sa vodom iz Rječine neće doći do znatnog narušavanja okoline u urbanom dijelu grada Rijeke. Međutim, treba imati u vidu da u

interakciji s rušenjem brane Valići i materijalom dospjelim s klizišta Grohovo ili susjednih manjih klizišta može biti znatnih oštećenja na nizvodnom dijelu vodotoka Rječine, prvenstveno na dionici od početka kanjonskog dijela do utoka vodotoka u Riječki zaljev. Razlog tomu je uski kanjonski dio vodotoka na poziciji mjesta Pašac (neposredno iza mosta Pašac) gdje dolazi do dodatnog povećanja brzine i porasta dubine toka krupnozrnatog ili sitnozrnatog materijala, a time i povećanja hidrodinamičkog udara takvog tipa vala. Primjenom numeričkog SPH 2D (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) po dubini integriranog modela koji je opisan i primijenjen u radu određeni su dosezi toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, brzine toka, konačni deponirani volumeni krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala kao i površine koje su pod utjecajem djelovanja takvog toka za različite moguće scenarije pri različitim vremenskim inkrementima.

Primjenom novog modificiranog erozijskog zakona danog u doktorskom radu postignute su poboljšane i realnije vrijednosti visina deponiranog materijala i njegova dosega u odnosu na erozijske zakone koje opisuju Egashira i Hungr.

Pojedini dobiveni scenariji propagacije toka krupnozrnatog materijala na danom istražnom području su uspoređeni sa rezultatima dobivenim upotrebom SOLFEC simulacijskog programa, koji je djelomično poslužio i kao verifikacijski model. Za određene ulazne geomehaničke parametre koji su se koristili u numeričkim modelima proveden je fizikalni (eksperimentalni) model propagacije toka krupnozrnatog materijala u Japanu (Ujigawa Open Laboratory, Sveučilište u Kyotu). Na temelju nekoliko izvršenih pokusnih mjerenja s različitim granulacijama materijala došlo se do novih spoznaja o propagaciji toka krupnozrnatog materijala i njegovih značajki, prvenstveno u pogledu pridnenih i površinskih vrijednosti brzina toka.

Provedena simulacijska analiza temeljena na numeričkim modelima omogućila je učinkovitu procjenu ulaznih parametara koji definiraju nastanak i pokretanje tečenja nevezanog zemljanog materijala na ispitivanim područjima. U radu su dane kvantificirane vrijednosti svih ulaznih parametara i izlaznih vrijednosti (rezultata) za kvalitetan opis i analizu tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Osnovni znanstveni doprinos ovog rada je proširenje saznanja i bolje razumijevanje fizike procesa nastanka tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na flišnom stijenskom kompleksu unutar srednjeg i donjeg toka vodotoka Rječine, kao i bolje razumijevanje pojava uzrokovanih tečenjem nevezanog materijala u interakciji sa fluidom. Znanstveni doprinos ovog rada je i dodatno znanstveno sagledavanje pojave i analize toka krupnozrnatog materijala implementiranjem novog erozijskog zakona. U radu su na temelju sustavne simulacijske analize propagacije

nevezanog krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala izrađene smjernice za primjerenu metodologiju procjene rizika na području srednjeg i donjeg toka Rječine, te preporuke za sigurnu i racionalnu procjenu pojave tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na istraženom lokalitetu klizišta Grohovo i akumulaciji Valići. Uočeni su i pokazani najznačajniji elementi rizika za srednji i donji tok Rječine. Na temelju trogodišnjeg monitoringa i mjerenja meteoroloških, geoloških i hidroloških parametara, te izradi numeričkih simulacijskih modela, omogućena su nova saznanja za uspostavu mjera za ublažavanje rizika od mogućih pojava poplava. Upotrebom ArcGIS 10.1 programa izvršena je prostorna analiza srednjeg i donjeg dijela toka Rječine, te je njime ujedno kreiran model stabilnosti kosina u odnosu na intenzitet oborina izrađen pomoću TRIGRS programskog paketa. Diseminacija rezultata istraživanja i njihova praktična primjena predstavljati će značajan doprinos lokalnoj i regionalnoj zajednici koja je izravno ili neizravno ugrožena poplavama rijeka i bujica, te mogućim tečenjem nevezanog krupnozrnatog ili sitnozrnatog materijala.

Iako je simulacijski okvir SPH 2D po dubini integrirani model u određenoj mjeri poboljšan implementiranjem novog erozijskog zakona potrebno je dodatno istražiti predloženi erozijski zakon na fizikalnom modelu za analizu propagacije toka krupnozrnatog materijala. Obradeni SPH 2D numerički modeli koji opisuju tokove krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala mogu biti primijenjeni na druge slične događaje vezane za sličan materijal u cilju dobivanja podataka potrebnih za kalibraciju modela. Svakako bi bio zanimljiv razvoj nadogradnje SPH 2D modela u tri dimenzije, čiji bi rezultati zasigurno bili točniji od dvodimenzionalnog modela, jer 3D model omogućuje da za svaku točku veličine različitih parametara variraju duž vertikalne osi, a što pridonosi realnijem opisivanju tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala.



## 9. LITERATURA

### 9.1. Popis objavljenih radova

- [1] Abbott, J.; Mondy, L.A.; Graham, A.L.; Brenner, H., 1993. Techniques for analyzing the behaviour of concentrated suspensions. In: *Particulate Two-Phase Flow*, edited by M.C. Roco, Butterworth-Heinemann, Newton, Mass, pp. 3-32.
- [2] Agliardi, F.; Crosta, G., 2003. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, pp. 455-471.
- [3] Agliardi, F.; Crosta, G.B.; Frattini, P., 2009. Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, pp. 1059-1073.
- [4] AGS, 2007. Guideline for Landslide Susceptibility, *Hazard and Risk Zoning for Land Use Management*. Australian Geomechanics Society, Australian Geomechanics, 42 (1).
- [5] Aleotti, P.; Chowdhury, R., 1999. Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives, *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 58, pp. 21-44.
- [6] Alonso, E.E.; Pinyol, N.M., 2010. Criteria for rapid sliding I: A review of the Vaiont case. *Engineering Geology*, Vol. 114, pp. 198-210.
- [7] Amatruda, G.; Bonnard, C.; Castelli, M.; Forlati, F.; Giacomelli, M.; Morelli, M.; Paro, L.; Piana, F.; Pirulli, M.; Polino, R.; Prat, P.; Ramasco, M.; Scavia, C.; Bellardone, G.; Campus, S.; Durville, J.L.; Poisel, R.; Preh, A.; Roth, W.; Tentschert, E.H., 2004. A key approach: the IMIRILAND project method. In: Bonnard, C.; Forlati, F.; Scavia, C. (eds), Identification and mitigation of large landslide risks in Europe-advances in risk assessment. *European Commission Fifth Framework Program*, Balkema, Rotterdam, pp. 13-44.
- [8] Anderson, H.; Jackson, J., 1987. Active tectonics of the Adriatic region. *Geophysics Journal* 91, pp. 937-983.
- [9] Antoine, P.; Giraud, A. 1995. Typologie des Mouvements de Versants dans un Contexte. *Bulletin IAEG*, 51, pp. 57-62.
- [10] Arai, M.; Takahashi, T., 1986. The Karman constant of the flow laden with high sediment in *Proceeding of the 3rd International Symposium on River Sedimentation University of Mississippi*, pp. 824-833.
- [11] Arattano, M.; Franzi, L., 2003. On the evaluation of debris flows dynamics by means of mathematical models. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, pp. 539-544.
- [12] Arbanas, Ž.; Jagodnik, V.; Ljutić, K.; Dugonjić, S.; Vivoda, M., 2011. Establishment of the Grohovo Landslide monitoring system. *Proceeding of the 2nd Workshop of the Project Risk identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia*, 15-17 December 2011. Rijeka, Croatia.
- [13] Arbanas, Ž.; Mihalić, S., 2012a. Progress in the Croatian-Japanese joint research project on landslides. *Proceedings of the IPL Symposium*, Sassa, K.; Takara, K.; He, B. (ed.). Kyoto: ICL, pp. 38-46.
- [14] Arbanas, Ž.; Sassa, K.; Marui, H.; Mihalić, S. 2012b. Comprehensive monitoring system on the Grohovo landslide, Croatia. *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding. Proceedings of the 11th international and 2nd North American symposium on landslides*, Eberhardt, E.; Froese, C.; Turner, K.; Leroueil, S. (eds.). Vancouver: CRC press, pp. 1441-1447.
- [15] Arbanas, Ž.; Grošić, M.; Udovič, D.; Mihalić, S., 2012c. Rockfall Hazard Analyses and Rockfall Protection along the Adriatic Coast of Croatia. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 6, 3, pp. 344-355.
- [16] Atkinson, P.M.; Massari, R., 1998. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in Central Apennines, Italy. *Computers and Geosciences*, 24, pp. 373-385.
- [17] Attaway, S.W.; Heinstejn, M.W.; Swegle, J.W., 1994. Coupling of smooth particle hydrodynamics with the finite element method. *Nuclear Engineering and Design*, 150(2/3), pp. 199-205.



- [18] Aulitzky, H., 1980. Preliminary two-fold classification of torrents. *Proc. Int. Symp. Interpraevent*, Bad Ischl, Austria, Bd. 4, pp. 285-310.
- [19] Aulitzky, H., 1994. Hazard mapping and zoning in Austria: methods and legal implications. *Mountain Research and Development*, 14(4), pp. 307-313.
- [20] Ayalew, L.; Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65, pp. 15-31.
- [21] Bagnold, R.A., 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society of London*, 225, pp. 49-63.
- [22] Bathurst, J.C.; Burton A.; Ward, T.J., 1997. Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests. *J. Hydr. Eng.*, 123, 5, pp. 410-419.
- [23] Baum, R.L.; Savage, W.Z.; Godt, J.W., 2008, TRIGRS - A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0, *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 2008-1159, 75 p.
- [24] Begueria, S.; van Asch, Th.W.J.; Malet, J.P.; Grondahl, S., 2009. A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci*, 9, pp. 1897-1909.
- [25] Belytschko, T.; Lu, Y.Y.; Gu, L., 1994. Element-free Galerkin methods. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37, pp. 229-256.
- [26] Belytschko, T.; Krongauz, Y.; Organ, D.; Fleming, M.; Krysl, P., 1996. Meshless methods: an overview and recently developments. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139, pp. 3-47.
- [27] Benac, Č.; Arbanas, Ž., 1990. Sedimentacija u području ušća Rječine. *Pomorski zbornik*, Rijeka, 28, str. 593-609.
- [28] Benac, Č.; Arbanas, Ž.; Jardas, B.; Kasapović, S.; Jurak, V., 1999. Složeno klizište u dolini Rječine, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 11, str. 81-90.
- [29] Benac, Č.; Arbanas, Ž.; Jurak, V.; Kasapović, S.; Dujmić, D.; Jardas, B.; Pavletić, Lj., 2000., Klizište Grohovo - složeno klizanje u dolini Rječine, *Zbornik radova*, Zagreb: *Institut za geološka istraživanja*, str. 517-523.
- [30] Benac, Č.; Arbanas, Ž.; Jardas, B.; Jurak, V.; Kovačević, M.S., 2002. Complex landslide in the Rječina River Valley (Croatia): results and monitoring, *Proceedings of the 1st European Conference on Landslides*, Prag, Czech Republic, 24-26 June 2002, pp. 487-492.
- [31] Benac, Č.; Arbanas, Ž.; Jurak, V.; Oštrić, M.; Ožanić, N., 2005a. Complex landslide in the Rječina valley (Croatia): origin and sliding mechanism. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 4, pp. 361-371.
- [32] Benac, Č.; Jurak, V.; Oštrić, M., 2005b. Qualitative assessment of geohazard in Rječina Valley, Croatia. *Geophysical Research Abstract*, Vol. 7, pp. 1-6.
- [33] Benac, Č.; Jurak, V.; Oštrić, M.; Holjević, D.; Petrović, G., 2005c. Pojava prekomjerne erozije u području Slanog potoka (Vinodolska dolina), U: Velić, I.; Vlahović, I.; Biondić, R.: *Knjiga sažetaka 3. hrvatskog geološkog kongresa*, Zagreb, str. 173-174.
- [34] Benac Č.; Jurak, V.; Oštrić, M., 2006. Qualitative assessment of geohazard in the Rječina Valley, Croatia. *Proceedings of the 10th IAEG International Congress: IAEG Engineering geology for tomorrow's cities*, The Geological Society of London, 658, pp. 1-7.
- [35] Benac, Č.; Dugonjić, S.; Arbanas, Ž.; Oštrić, M.; Jurak, V., 2009. The origine of instability phenomena along the karst-flysch contacts. *Proceedings of the regional symposium of the International Society for Rock Mechanics, Eurock 2009*, Rock Engineering in Difficult Ground Conditions - Soft Rock and Karst, Taylor and Francis Group, pp. 757-762.
- [36] Benac, Č.; Dugonjić, S.; Oštrić, M.; Arbanas, Ž.; Đomlija P., 2010. Complex landslide in the Rječina River valley: monitoring results. In: Horvat, M. (ed.). *Proceedings of the 4th Croatian geological congress*, Šibenik, 14-15 October, Zagreb, Croatian Geological Survey, pp. 157-158.
- [37] Benac, Č., 2013. Rječnik pojmova u primijenjenoj geologiji i geološkom inženjerstvu, *Sveučilište u Rijeci*, Rijeka, 112 str., ISBN: 978-953-6953-33-2.

- [38] Benac, Č.; Oštrić, M.; Dugonjić Jovančević, S., 2014. Geotechnical properties in relation to grain-size and mineral composition: The Grohovo landslide case study (Croatia). *Geologica Croatica*, 67(2), pp. 127-136.
- [39] Benz, W., 1990. Smooth particle hydrodynamics: a review. In: *The Numerical Modelling of Nonlinear Stellar Pulsations*, Buchler J.R. (ed.). Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, pp. 269-288.
- [40] Bingham, E.C.; Green, H. Paint, 1919. A plastic material and not a viscous liquid; the measurement of its mobility and yield value. *Proceedings of American Society of Testing Materials*, 19, pp. 640-664.
- [41] Biondić, B.; Goatti, V.; Vulić, Ž., 1978. Hidrogeološka istraživanja u slivu izvora Rječine, Grobničkog polja, Zvira i Martinšćice. *Zbornik radova Simpozijuma o istraživanju, eksploatiranju i gospodarenju podzemnim vodama*, 29.-31.3.1978., Zagreb, str. 61-69.
- [42] Biot, M.A., 1941. General theory of three-dimensional consolidation. *J.Appl. Phys.*, 12, pp. 155-164.
- [43] Biot, M.A., 1955. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. *J. Appl. Phys.*, 26, pp. 182-185.
- [44] Blanc, T.; Pastor, M.; Drempeć, M.; Haddad, B., 2011. Depth integrated modelling of fast landslide propagation, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 15, pp. 51-72.
- [45] Blašković, I., 1997. The helicoidal fault system of Vinodol (Croatia) and their genesis. *Geologica Croatica*, 50(1), pp. 49-56.
- [46] Bardou, E.; Boivin, P.; Pfeifer, H., 2007. Properties of debris flow deposits and source materials compared: implications for debris flow characterization. *Sedimentology*, 54(2), pp. 469-480.
- [47] Bosi, C.; Dramis, F.; Gentili, B., 1982. Carte geomorfologiche di dettaglio e carte di stabilità: esempi nel territorio marchigiano, *Geol Appl ed Idrogeol.*, 20, pp. 53-62.
- [48] Božičević, S., 1974. Morfologija vodenih kanala Izvora Rječine. *Geološki vjesnik*, Zagreb, 27, pp. 273-281.
- [49] Brabb, E.E.; Pampeyan, E.H.; Bonilla, M.G., 1972. Landslide susceptibility in San Mateo County, California. Misc. Field Studies, map MF-360 (scale 1:62,500). *US Geological Survey*, Reston
- [50] Brabb, E.E., 1984. Innovative approaches to landslide hazard mapping. In: *4th International Symposium on Landslides*, Toronto, Canada, 16-21 Sept. 1984, 1, pp. 307-324.
- [51] Brabb, E.E., 1991. The World Landslide Problem. *Episodes*, 14(1), pp. 52-61.
- [52] Brufau, P.; Garcia-Navarro, P.; Ghilardi, P.; Natale, L.; Savi, F., 2000. ID mathematical modeling of debris flow. *Journal of Hydraulic Research*, 38(6), pp. 435-446.
- [53] Bulmer, M.H.; Barnouin-Jha, O.S.; Peitersen, M.N.; Bourke, M., 2002. An empirical approach to studying debris flows: Implications for planetary modeling studies. *Journal of Geophysical Research*, 107 (E5): 10.1029/2001JE001531.
- [54] Caine, N., 1980. The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, Wiley Article Stable, 62(1/2), pp. 23-27.
- [55] Calvetti, F.; Crosta, G.; Tatarella, M., 2000. Numerical Simulation of dry granular flows: from the reproduction of small-scale experiments to the prediction of rock avalanches. *Rivista Italiana di Geotecnica (April)*, pp. 21-38.
- [56] Calvo, L.; Haddad, B.; Pastor, M.; Palacios, D., 2014. Runout and deposit morphology of Bingham fluid as a function of initial volume: implication for debris flow modelling, *Natural Hazards*, Springer Netherlands, 2014.
- [57] Caniani, D.; Pascale, S.; Sdao, F.; Sole, A., 2008. Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza. *Nat Hazards*, 45, pp. 55-72.
- [58] Cannon, S.H.; Savage, Z.S., 1988. A mass-change model for the estimation of debris-flow runout, *Journal of geology*, 96, pp. 221-227.
- [59] Cannon, S.H., 1989. An approach for estimating debris flow runout distances. In: *Proceedings Conference XX, International Erosion Control Association*, Vancouver, B.C., pp. 457-468.

- [60] Cannon, S.H., 1993. An empirical model for the volume-change behavior of debris flows. In: Shen, H. W.; Su, S. T.; Wen, F., (eds.). *Hydraulic Engineering*, ASCE, New York, 2, pp. 1768-1773.
- [61] Carrara, A., 1978. Considerazioni sulla cartografia applicata alla stabilita dei versanti, *Seminario Sottoprogetto Fenomeni Franosi*, March 1978, Bari, 11 p.
- [62] Carrara, A., 1982. Cartografia tematica, stoccaggio ed elaborazione dati, Atti del Convegno Conclusivo P.F. Conser. Suolo, Sottopr. Fenomeni Franosi, *Relazione Generale*, 9-10 giugno 1982, Roma, pp. 265-281.
- [63] Carrara, A., 1984. Landslide hazard mapping; aims and methods, *Coil. Mouvement de Terrain. Caen, Doc. B.R.G.M.*, 83.
- [64] Carrara, A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F., 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC-Journal*, 2, pp. 172-183.
- [65] Carrara, A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F.; Reichenbach, P., 1995. GIS technology in mapping landslide hazard. Carrara A.; Guzzetti, F., (eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publishers, pp. 135-175.
- [66] Cepeda, J.; Colonnelli, S.; Meyer, N.K.; Kronholm, K., 2012. SafeLand Deliverable D1.5: statistical and empirical models for prediction of precipitation-induced landslides. Dostupno na web stranici: <http://www.safeland-fp7.eu/>
- [67] Chapman, D., 1994. *Natural Hazards*, Oxford University Press, 174 pp.
- [68] Chen, C.; Ling, C., 1996. Granular-flow rheology: role of shear-rate number in transition regime. *J. Engng. Mech.*, 122, pp. 469-480.
- [69] Chen, C.L.; Ling, C.H., 1997. Resistance formulas in hydraulics based models for routing debris flow. In: *Debris Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Eds. Chen, New York, pp. 360-372.
- [70] Chen, H.; Lee, C.F., 2000. Numerical simulation of debris flows. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, pp. 146-160.
- [71] Chen, H.; Crosta, G.B.; Lee, C.T., 2006. Erosional effects on runout of fast landslides, debris flows and avalanches: a numerical investigation. *Geotechnique*, 56(5), pp. 305-322.
- [72] Chen, H.; Lee, C.F., 2007. Landslide mobility analysis using MADFLOW. *Proc. of the 2007 International Forum on Landslide Disaster Management*, 2, pp. 857-874.
- [73] Christen, M.; Kowalski, J.; Bartelt, P., 2010. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Sci. Technol.*, 63, pp. 1-14.
- [74] Chung, C.F.; Fabbri, A.G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Nat. Hazards*, 30(3), pp. 451-472.
- [75] Corominas, J., 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 260-271.
- [76] Corominas, J.; Moya, J., 2008. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Eng. Geol.*, 102, pp. 193-213.
- [77] 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.; Hervás, J.; Smith, J.T., 2013. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2); pp. 209-263.
- [78] Costa, J.E., 1984a. *Physical of Geomorphology of debris flow*. In *Developments and application of geomorphology*. Edited by Costa, J.E. and Fleisher, P.J., Springer - Verlin Heidelberg, pp. 268-317.
- [79] Coussot, P., 1994. Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel, *Journal of Hydraulic Research*, 32(4), pp. 535-559.
- [80] Coussot, P.; Meunier, M., 1995a. Recognition, Classification and Mechanical description of debris flows, *Earth Sciences Reviews*, 40, pp. 209-227.
- [81] Coussot, P.; Piau, J.M., 1995b. The effects of an addition of force-free particles on the rheological properties of fine suspensions. *Can. Geotechn. J.*, 32, pp. 263-270.
- [82] Coussot, P., 1995c. Structural similarity and transition from Newtonian to non-Newtonian behavior for water-clay suspensions. *Phys. Rev. Letter*, 74, pp. 3971-3974.

- [83] Crosta, G.B.; Cucchiaro, S.; Frattini, P., 2003. Validation of semi-empirical relationships for the definition of debris-flow behavior in granular materials. In: Rickenmann, D. and Chen, C.L. (eds.), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings 3rd International DFHM Conference*, Davos, Switzerland, Millpress, Rotterdam, pp. 821-831.
- [84] Crosta, G.B., 2004. Introduction to the special issue on rainfall triggered landslides and debris flow. *Engineering Geology*, 73, pp. 191-192.
- [85] Crowe, C.T.; Sharma, M.P.; Stock, D.E., 1977. The particle source in cell (PSI-CELL) model for gas droplet flows. *J. Fluid Eng.*, 99(2), pp. 325-332.
- [86] Crozier, M.J., 1984. *Field assessment of slope instability*. In: Brunsen, D., Prior, D.B. (eds.) *Slope instability*, John Wiley and Sons, New York, pp. 103-142.
- [87] Crozier, M.J.; Glade, T., 2005. *Landslide hazard and risk: Issues, Concepts and Approaches, Landslide Hazard and Risk*. Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J. (eds.), John Wiley & Sons, New York, pp. 1-40.
- [88] Cruden, D.M.; Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes. In: Turner, A.K.; Schuster, R.L., (eds.), *Landslides investigation and mitigation. Transportation research board, US National Research Council*, Special Report 247, Washington, pp. 36-75.
- [89] D'Agostino, V.; Cerato, M.; Coali, R., 1996. Extreme events of sediment transport in the eastern Trentino torrents. *Atti del Convegno Interpraevent*, Band 1, pp. 377-386.
- [90] D'Agostino, V.; Marchi, L., 2001. Debris flow magnitude in the Eastern Italian Alps: data collection and analysis. *Physics and Chemistry of the Earth (C)*, 26(9), pp. 657-663.
- [91] D'Ambrosio, D.; Di Gregorio, S.; Iovine, G., 2003. Simulating debris flows through a hexagonal cellular automata model: SCIDDICA S3-hex. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, pp. 545-559.
- [92] Dai, C.F.; Lee, C.F., 2001. Terrain based mapping of landslide susceptibility using a geographic information system: a case study, *Can. Geotechnical Journal*, 38, pp. 911-923.
- [93] Dai, F.C.; Lee, C.F.; Ngai, Y.Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64(1), pp. 65-87.
- [94] Davies, T.R.; Phillips, C.J.; Pearce, A.J.; Zhang, X.B., 1992. Debris flow behaviour - an integrated overview. In *Erosion, debris flow and environment in mountain regions (Proceedings of Chengdu Symposium, June 1992)*, IAHS Publication, No.209.
- [95] Dent, J.D.; Lang, T.E., 1983. A biviscous modified Bingham model of snow avalanche motion. *Annals of Glaciology*, 4, pp. 42-46.
- [96] Duarte, C.A.; Oden, J.T., 1996. An HP adaptive method using clouds. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139, pp. 237-262.
- [97] Dubravić, E., 2001. *Riječka luka: povijest, izgradnja, promet*. Muzej grada Rijeke, Rijeka, 349. str.
- [98] Egashira, S., 1993. Mechanism of sediment deposition from debris flow (part 1). *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 46(1), 186, pp. 45-49.
- [99] Egashira, S.; Honda, N.; Itoh, T., 2001. Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow. *Physics and chemistry of the Earth (C)*, 26(9), pp. 645-650.
- [100] Elkner, J.; Downey, A.B.; Meyers, C., 2006. *Learning with Python 2nd Edition*. Open Book Project.
- [101] Erisman, T.H.; Abele, G., 2001. *Dynamics of Rockslides and Rockfalls*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 307 pp.
- [102] Evans, S.G.; Hungr, O., 1993. The assessment of rockfall hazards at the base of talus slopes. *Canadian Geotech. J.*, 30, pp. 620-636.
- [103] Evans, S.G.; Hungr, O.; Clague, J.J., 2001. Dynamics of the 1984 rock avalanche and associated distal debris flow on Mount Cayley. British Columbia, Canada; Implications for the landslide hazard assessment on dissected volcanoes. *Eng. Geology*, 61, pp. 29-51.
- [104] Fall, M.; Azam, R.; Noubactep, C., 2006. A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping. *Engineering Geology* 82(4), pp. 241-263.
- [105] Fannin, R.J.; Wise, M.P., 2001. An empirical-statistical model for debris flow travel distance. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, pp. 982-994.

- [106] Fell, R.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W., 2008a. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102. pp. 99-111.
- [107] Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W.Z. (on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes), 2008b. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning, *Engineering Geology*, 102, pp. 85-98.
- [108] Fiebigler, G., 1997. Zonage des risques naturels en Autriche. *Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rockfall Engineering*, 61(134), pp. 155-163.
- [109] Fink, J.H.; Malin, M.C.; D'Alli, R.E.; Greenley, R., 1981. Rheological properties of mudflows associated with the spring 1980 eruptions of Mount St. Helens volcano, Washington. *Geophys. Res. Letter*, 8, pp. 43-46.
- [110] Fraccarollo, L.; Papa, M., 2000. Numerical simulation of real debris-flow events. *Physics and Chemistry of the Earth*, B, 25(9), pp. 757-763.
- [111] Fread, D.L.; Jin, M., 1997. One-dimensional Routing of Mud/Debris flows using NWS FLDWAV Model. In: *Proceeding of the First International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, San Francisco, California, 7-9 August 1997.
- [112] Ghilardi, P.; Natale, L.; Savi, F., 2000. Debris flow propagation and deposition on urbanized alluvial fans, *Excerpta*, 14, pp. 7-20.
- [113] Gingold, R.A.; Monaghan, J.J., 1977. Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, pp. 375-389.
- [114] Gomez, H.; Kavzoglu, T., 2005. Assessment of sh allow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa river basin. *Venezuela, Engineering Geology*, 78, pp. 11-27.
- [115] Gu, Y.T.; Liu, G.R., 2001. A coupled element free Galerkin/Boundary element method for stress analysis of two-dimensional solids, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(34), pp. 4405-4419.
- [116] Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M.; Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study. Central Italy, *Geomorphology*, 31, pp. 181-216.
- [117] Guzzetti, F.; Reichenbach, P.; Cardinali, M.; Galli, M.; Ardizzone, F., 2005. Landslide hazard assessment in the Staffora basin, northern Italian Apennines, *Geomorphology*, 72, pp. 272-299.
- [118] Hampel, R., 1977. Geschiebewirtschaft in Wildbächen. *Wildbach und Lawinverbau*, 41(1), pp. 3-34.
- [119] Hansen, A., 1984. *Landslide hazard analysis, Slope instability*. Brunsten, D., Prior, D.B. (eds.), John Wiley and Sons Ud, pp. 523-602.
- [120] Harp, E.L.; Keefer, D.K.; Sato, H.P.; Yagi, H., 2010. Landslide inventories: the essential parts of seismic landslide hazard analyses. *Engineering Geology*, doi: 10.1016/j.enggeo.2010.06.013
- [121] Herak, M.; Herak, D.; Markušić, S., 1996. Revision of the Earthquake Catalogue and Seismicity of Croatia 1902-1992. *Terra Nova*, 8, pp. 86-94.
- [122] Hirano, M.; Hasada, T.; Banihabib, M.E.; Kawahasa, K., 1997. Estimation of hazard area due to debris flow. In: *Debris Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Eds. Chen, New York, pp. 697-706.
- [123] Holjević, D., 1999. Značajke vodotoka Rječine i problem obrane od poplava. *U ediciji „Rječina i Zvir - regulacija i revitalizacija“*, Državni arhiv Rijeka, str. 34-36.
- [124] Honda, N.; Egashira, S., 1997. *Prediction of debris flow characteristics in mountain torrents in Debris Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Eds. Chen, New York, pp. 707-716.
- [125] Hungr, O.; Morgan, G.C.; Kellerhals, R., 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*, 21, pp. 663-677.
- [126] Hungr, O., 1990a. Momentum transfer and friction in rock avalanches: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 27, p. 687.

- [127] Hungr, O., 1990b. *Mobility of rock avalanches*. Report of the National Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 46. pp. 11-20.
- [128] Hungr, O., 1995. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32, pp. 610-623.
- [129] Hungr, O., 1997. Some methods of landslide hazard intensity mapping. In: Cruden, D., Fell, R. (eds.), *Int. Workshop on Landslide Risk Assessment*, Balkema, pp. 215–226.
- [130] Hungr, O.; Evans, S.G.; Bovis, M.; Hutchinson, J.N., 2001. Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, VII, pp. 221-238.
- [131] Hungr, O.; Corominas, J.; Eberhardt, E., 2005. *Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity*. In: Hungr, O.; Fell, R.; Couture, R.; Eberhardt, E., (eds.), *Landslide Risk Management*. Taylor and Francis Group, Vancouver, pp. 99-128.
- [132] Hungr, O.; McDougall, S., 2009. Two numerical models for landslide dynamic analysis. *Computers and Geosci.*, 35, pp. 978–992.
- [133] Hungr, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, pp. 167-194.
- [134] Hunter, G.; Fell, R., 2003. Travel distance angle for rapidlandslides in constructed and natural soil slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), pp. 1123-1141.
- [135] Hutchinson, J.N., 1986. A sliding-consolidation model for flow slides. *Canadian Geotechnical Journal*, 23, pp. 115-126.
- [136] Hutchinson, J.N., 1988. General Report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: Bonnard, C. (ed.), *Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides*, A.A.Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 3-36.
- [137] IAEG, 1990. Suggested nomenclature for landslides. *Bulletin IAEG*, 41, pp. 13-16.
- [138] IUGS, 1997. Quantitative Risk Assessment for Slopes and Landslides - the State of the Art, IUGS Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment, in *Landslide Risk Assessment*, Cruden and Fell (eds.), Balkema, Rotterdam, pp. 3-12.
- [139] Iverson, R.M.; Reid, M.E.; LaHusen, R.G., 1997a. Debris flow mobilization from landslides. *Annual review Earth Planet Sci.*, 25, pp. 85-138.
- [140] Iverson, R.M., 1997b. The physics of debris flows. *Review of Geophysics*, 35(3), pp. 245-296.
- [141] Iverson, R.M.; Delinger, R.P., 2001a. Mechanics of debris flows and debris-laden flash floods. In *Proceedings of the seventh federal interagency sedimentation conference*, Reno, Nevada, pp. IV-1 - IV-8.
- [142] Iverson, R.M.; Denlinger, R.P., 2001b. Flow of variably fluidized granular masses across threedimensional terrain. 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research* 106, 81, pp. 537-552.
- [143] Jakob, M., 2005a. A size classification for debris flows, *Engineering Geology*, vol. 79, pp. 151-161.
- [144] Jakob, M., 2005b. *Debris-flow hazard analysis*. In: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, Berlin, pp. 411-443.
- [145] Jitousono, T.; Shimokawa, E.; Tsuchiya, S.; Haryanto Djama, H., 1996. Debris flow following the 1984 eruption with pyroclastic flows in Merapi volcano, Indonesia. In: *Proceeding of the Workshop on Erosion Control through Volcanic Hydrological Approach (WECVHA)*, Sabo Technical Center, Yogyakarta, 10-11 January, pp. 131-149.
- [146] Johnson, A.M., 1970. *Physical processes in geology*. Freeman Ed., San Francisco, 577 pp.
- [147] Johnson, G.R., 1994. Linking of Lagrangian particle methods to standard finite element methods for high velocity impact computations. *Nuclear Engineering and Design*, 150(2/3), pp. 265-274.
- [148] Julien, P.Y.; O'Brien J.S., 1985. Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. In: *Proceeding Spec. Conference on Delineation of Landslides, Flash Flood and Debris Flow*, Utah, USA, pp. 260-279.
- [149] Keaton, J.R.; Degraff, J.V., 1996. Surface observation and geologic mapping. In: Turner, A.K.; Schuster, R.L. (eds.). *Landslides: investigation and mitigation*. Special report 247. National Academy Press, Washington, DC, p. 195.
- [150] Kelfoun, K.; Druitt, T.H., 2005. Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche. Chile, *J. Geophys. Res.*, 110, doi:10.1029/2005JB003758



- [151] Knežević, R., 1992. Kvaliteta prirodne sredine u planiranju razvoja turizma Gorskog kotara. *Zbornik Hotelijerskog fakulteta, Opatija*, 86-95.
- [152] Knežević, R., 2001. Osnovne značajke režima poriječja Rječine. *Acta Geographica Croatica*, 34, 73-88.
- [153] Koziara, T.; Bićanić, N., 2009. Smoothed variational inequality formulation of dynamic multibody frictional contact problems. *International Conference on Particle-Based Methods, Barcelona*, 2009, dostupno na web stranici:  
URL: <http://congress.cimne.com/particles2009/frontal/default.asp>
- [154] Kronfellner-Kraus, G., 1984. Extreme Feststofffrachten und Grabenbildungen von Wildbächen. *Internationales Symposium Interpraevent*, Villach, Tagungspublikation, Band 2, pp. 109-118.
- [155] Kronfellner-Kraus, G., 1987. Zur Anwendung der Schätzformel fuer extreme Wildbach-Feststofffrachten im Süden und Osten Oesterreichs. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 51(106), pp. 187-200.
- [156] Krvavica, N.; Ružić, I.; Yamashiki, Y.; Ožanić, N., 2013. Performance analysis of X-band radar rainfall measurements in the Kvarner region. *4th Workshop of the Croatian-Japanese Project „Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia*, Book of abstracts. Vlastelica, G., Andrić, I., Salvezani, D. (ur.), Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, Split, pp. 48.
- [157] Kwan, J.S.H.; Sun, H.W., 2006. An improved landslide mobility model. *Canadian Geotechnical Journal*, 43, pp. 531-539.
- [158] Laigle, D.; Coussot, P., 1997. Numerical modelling of mudflows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123, pp. 617-623.
- [159] Lee, E.M.; Jones, D.K.C., 2004. Landslide risk assessment. Thomas Telford, London, p. 454.
- [160] Lee, J.; Cowin, S.C.; Templeton, M.J.S., 1974. An experimental study of the kinematics of flow through hoppers. *Trans. Soc. Rit.*, 18, pp. 247-269.
- [161] Lee, S.; Ryu, J.H.; Lee, M.J.; Won, J.S., 2006. The application of artificial neural networks to landslide susceptibility mapping at Janghung, Korea, *Mathematical Geology* 38, pp. 199-220.
- [162] Leine, R.I.; Van de Wouw, N., 2008. *Stability and Convergence of Mechanical Systems with Unilateral Constraints*. Volume 36 of Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Springer Verlag
- [163] Leroi, E., 1996. Landslide Hazard-Risk Maps at Different Scales: Objectives, Tools and Development, *Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, Landslides-Glislements de terrain*, Sennezet, K. (ed.), Trondheim-Rotterdam, pp. 35-51.
- [164] Leroi, E., 1997. Landslide risk mapping: problems, limitation and developments. In: Cruden, Fell (ed.) *Landslide risk assessment*. Balkema, Rotterdam, pp. 239-250.
- [165] Li, S.; Liu, W.K., 2002. Meshfree and particle methods and their applications. *Applied Mechanics Review*, 55(1), pp. 1-34.
- [166] Liu, G.R.; Gu, Y.T., 2002. A truly meshless method based on the strongweak form, in Liu G.R. (Ed.) *Advances in Meshfree and X-FEM Methods*, pp. 259-261.
- [167] Liu, G.R., 2002a. *Mesh Free Methods: moving beyond the finite element method*. CRC Press, Boca Raton.
- [168] Liu, M.B.; Liu, G.R.; Lam, K.Y., 2002b. Coupling meshfree particle method with molecular dynamics - a novel approach for multi-scale simulations. In: Liu, G.R. (ed.) *Advances in Meshfree and X-FEM Methods*, pp. 211-216.
- [169] Liu, G.R.; Liu, M.B., 2003. *Smoothed Particle Hydrodynamics - a meshfree particle method*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 473 pp.
- [170] Lorenzini, G.; Mazza, N., 2004. *Debris flow. Phenomenology and Rheological Modelling*. WIT Press, Ashurst Lodge, Southampton, UK
- [171] Lucy, L.B., 1977. Numerical approach to testing the fission hypothesis. *Astronomical Journal*, 82, pp. 1013-1024.
- [172] Luzi, L.; Pergalani, F., 1996. Application of statistical and GIS techniques to slope instability zonation (1:50000 Fabriano geological map sheet), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15, pp. 83-94.

- [173] Major, J.J.; Iverson, R.M., 1999. Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 111, pp. 1424-1434.
- [174] Major, J.J., 2000. Gravity-driven consolidation of granular slurries - implication for debris flows deposition and deposit characteristics. *Journal of sedimentary research*, vol. 70, n° 1, pp. 64-83.
- [175] Matejčić, R., 1988. *Kako čitati grad: Rijeka jučer, danas*. Izdavački centar Rijeka, str. 495.
- [176] McDougall, S.D.; Hungr, O., 2003. Objectives for the development of an integrated three-dimensional continuum model for the analysis of landslide runout. In: Rickenmann, D.; Chen, C.L. (eds), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of the 3rd International DFHM Conference*, Millpress, Rotterdam, Davos, Switzerland, pp. 481-490.
- [177] Medina, V.; Hurlimann, M.; Bateman, A., 2008. Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula. *Landslides*, 5, pp. 127-142.
- [178] Michoud, C.; Abellan, A.; Derron, M.H.; Jaboyedoff, M. (eds.), 2010. SafeLand Deliverable D4.1: review of techniques for landslide detection, fast characterization, rapid mapping and long-term monitoring. Dostupno na web stranici: <http://www.safeland-fp7.eu/>
- [179] Mihalić, S.; Arbanas, Ž., 2012. The Croatian–Japanese Joint Research Project on Landslides: Activities and Public Benefits. *Landslides: Global Risk Preparedness*. Sassa, K.; Rouhban, B.; Briceno, S.; He, B., (eds.). *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, (ISBN 978-3642220869), pp. 345-361.
- [180] Mihalić, A.S.; Arbanas, Ž.; Abolmasov, B.; Mikoš, M.; Komac, M., 2012a. Regional cooperation in the frame of the ICL Adriatic-Balkan Network. *Zbornik radova IX Simpozija iz geologije i geotehnike*, Sunarić, D.; Jevremović, D. (ur.), Beograd: Društvo geoloških inženjera i tehničara Srbije, str. 43-56.
- [181] Mizuyama, T.; Kobashi, S.; Ou, G., 1992. Prediction of debris flow peak discharge. *Internationales Symposium Interpraevent*, Bern, Switzerland, Tagungspublikation, Band 4, pp. 99-108.
- [182] Monaghan, J.J.; Gingold, R.A., 1983. Shock simulation by the particle method SPH. *Journal of Computational Physics*, 52, pp. 374-389.
- [183] Moreau, J.J., 1988. *Unilateral Contact and Dry Friction in Finite Freedom Dynamics*. volume 302 of *Non-smooth Mechanics and Applications*, CISM Courses and Lectures. Springer, Wien
- [184] Naef, D.; Rickenmann, D.; Rutschmann, P.; McArdeell, B.W., 2006. Comparison of flow resistance relations for debris flow using a one-dimensional finite element simulation model., *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, pp. 155-165.
- [185] Nayroles, B.; Touzot, G.; Villon, P., 1992. Generalizing the finite element method: diffuse approximation and diffuse elements. *Computational Mechanics*, 10, pp. 307-318.
- [186] Nicoletti, P.G.; Sorriso-Valvo, M., 1991. Geomorphic controls of the shape and mobility of rock avalanches. *Geological Society of America Bulletin*, 103, pp. 1365-1373.
- [187] Nitsche, L.C.; Zhang, W.D., 2002. Atomistic SPH and a link between diffusion and interfacial tension. *Fluid Mechanics and Transport Phenomena*, 48(2), pp. 201-211.
- [188] Norem, H.; Locat, J.; Schieldrop, B., 1990. An approach to the physics and the modelling of the submarine flowslides. *Marine Geotechnical*, 9, pp. 93-111.
- [189] O'Brien, J.S.; Julien, P.Y.; Fullerton, W.T., 1993. Twodimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 119(2), pp. 244-261.
- [190] Okuda S.; Suwa H.; Okunishi K.; Yokoyama K.; Nakano M., 1980. Observations on the motion of a debris flow and its geomorphological effects. *J. Geomorphol.*, 35, pp. 142-163.
- [191] Onate, E.; Idelsohn, S., 1998. A mesh free finite point method for advective–diffusive transport and fluid flow problems. *Computational Mechanics*, 21, pp. 283-292.
- [192] Oštrić, M.; Yamashiki, Y.; Takara, K.; Takahashi, T., 2011. Possible Scenarios for Rječina River Catchment - on the Example of Grohovo Landslide. *Annuals of Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto University, No. 54B, 7 pp.

- [193] Oštrić, 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, pp. 47-52.
- [194] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1996. Problemi praćenja stanja i gospodarenja vodnim resursima na primjeru sliva Rječine, *Hrvatska vodoprivreda*, 50/5, str. 41-45.
- [195] Palinić, N., 1999. Rječina kroz povijest. U ediciji „Rječina i Zvir - regulacija i revitalizacija“, Državni arhiv Rijeka, str. 6-33.
- [196] Pastor, M.; Quecedo, M.; González, E.; Herreros, I.; Fernández Merodo, J.A.; Mira, P., 2004. A simple approximation to bottom friction for Bingham fluid depth integrated models. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 130(2), pp. 149-155.
- [197] Pastor, M.; Blanc, T.; Pastor, M.J.; Sánchez, M.; Haddad, B.; Mira, P.; Fernández Merodo, J.A.; Herreros, I.; Drempeć, V., 2007. A SPH Depth integrated model with pore pressure coupling for fast landslides and related phenomena. In: Ho, L.; Li, V. (eds.). *The 2007 International Forum on Landslide Disaster Management*, Geotechnical Eng. Division, The Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong, pp. 987-1014.
- [198] Pastor, M.; Haddad B.; Sorbino G.; Cuomo S., 2008. A depth integrated coupled SPH model for flowlike landslides and related phenomena. *Int.J.Num.Anal.Meth.Geomech.*, 33, pp. 143-172
- [199] Pastor, M.; Blanc, T.; Pastor, M. J., 2009. A depth-integrated viscoplastic model for dilatant saturated cohesive-frictional fluidized mixtures: application to fast catastrophic landslides. *J. Non-Newton. Fluid*, 158, pp. 142-153.
- [200] Pastor, M.; Blanc, T.; Haddad, B.; Drempeć, V.; Sanchez Morles, M.; Dutto, P.; Martin Stickle, M.; Mira, P.; Fernández Merodo, J.A., 2015. Depth Averaged Models for Fast Landslide Propagation: Mathematical, Rheological and Numerical Aspects, *Archives of Computational Methods in Engineering*, Springer, Vol. 22, Issue 1, pp. 67-104.
- [201] Perić, M., 2007. *Englesko hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina*. Sveučilišni priručnik Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta u Zagrebu, Izdavač: INA Industrija nafte d.d. - Sektor korporativnih komunikacija, Tisak: Grafocolor d.o.o. Zagreb, Zagreb, 1038 str.
- [202] Pierson, T.C., 1986. Flow behavior of channellized debris flows, Mount St. Helens, Washington. In: *Abrahams, A.D. (ed.). Hillslope processes*. Allen and Unwin, Boston, pp. 269-296.
- [203] Pine, J.C., 2008. *Natural Hazards Analysis - Reducing the Impact of Disasters*. Auerbach Publications, Taylor & Francis Group, 314 pp.
- [204] Pinyol, N.M.; Alonso, E.E., 2010. Criteria for rapid sliding II.: Thermo-hydro-mechanical and scale effects in Vaiont case. *Engineering Geology*, Vol. 114, pp. 211-227.
- [205] Pirulli, M.; Mangeney, A., 2008. Results of Back-Analysis of the Propagation of Rock Avalanches as a Function of the Assumed Rheology. *Rocks Mechanics and Rock Engineering*, 41(1), pp. 59-84.
- [206] Pitolakis, K.; Fotopoulou, S.; Argyroudis, S.; Pitolakis, D.; Senetakis, K.; Treulopoulos, K.; Kakderi, K.; Riga, E., (eds), 2011. *SafeLand Deliverable D2.5: physical vulnerability of elements at risk to landslides: methodology for evaluation, fragility curves and damage states for buildings and lifelines*. Dostupno na web stranici: <http://www.safeland-fp7.eu/>
- [207] Pitman, B.E.; Lê, L., 2005. A two-fluid model for avalanche and debris flow. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 363, pp. 1573-1601.
- [208] Popescu, M.E., 1994. A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin IAEG* 50. pp. 71-74.
- [209] Preh, A.; Poisel, R., 2007. 3D modelling of rock mass falls using the Particle Flow Code PFC3D. *Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisbon, July 9-13, Specialized Session S01, Rockfall – Mechanism and Hazard Assessment.
- [210] Prelogović, E.; Kuk, V.; Jamičić, D.; Aljinović, B.; Marić, K., 1995. Seizmotektonska aktivnost Kvarnerskog područja. *Zbornik radova I. Hrvatskog geološkog kongresa*, Institut za geološka istraživanja Zagreb, Opatija, 2, str. 487-490.
- [211] Project Management Institute, 2004. *A Guide to the Body of Knowledge*. 3rd edition, PMI, Pennsylvania, USA, 309 pp.

- [212] Pudasaini, S.P.; Wang, Y.; Hutter, K., 2005. Modelling debris flows down general channels. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, pp. 799-819.
- [213] Quecedo, M.; Pastor, M.; Herreros, M.I.; Fernández Merodo, J.A., 2004. Numerical modelling of the propagation of fast landslides using the Finite Element Method. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 59(6), pp. 755-794.
- [214] Raetzo, H.; Lateltin, O.; Bollinger, D.; Tripet, J.P., 2002. Hazard assessment in Switzerland-codes of practice for mass movements. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61, pp. 263-268.
- [215] Rickenmann, D.; Zimmermann, M., 1993. The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis, *Geomorphology*, vol. 8, pp. 175-189.
- [216] Rickenmann, D., 1995. Beurteilung von Murgängen. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 48, pp. 1104-1108.
- [217] Rickenmann, D., 1999. Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, 19, pp. 47-77.
- [218] Rickenmann, D.; Weber, D., 2000. Flow resistance of natural and experimental debris flows in torrent channels. In: *G.F. Wieczorek and N.D. Naeser (eds.), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment; Proceedings 2nd International DFHM Conference*, Taipei, Taiwan, August 16-18, 2000, Rotterdam, Balkema, pp. 245-254.
- [219] Rickenmann, D., 2001. Murgänge in den Alpen und Methoden zur Gefahrenbeurteilung. In: *Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Band 124, pp. 51-77.
- [220] Rickenmann, D.; Weber, D.; Stepanov, B., 2003. Erosion by debris flows in field and laboratory experiments. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Rickenman, D. and Chen L.C. (Editors), Millpress, Rotterdam, pp. 883-893.
- [221] Rickenmann, D.M.; Laigle, D.; McArdell, B.W.; Hübl, J., 2005a. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences*, doi: 10.1007/s10596-005-9021-3 (online).
- [222] Rickenmann, D., 2005b. Runout prediction methods. In: *Jakob, M.; Hungr, O. (eds.), Debris-Fow Hazards and Related Phenomena*, Praxis-Springer, pp. 263-282.
- [223] Ridanović, J., 1975. *Vode*. Geografija SR Hrvatske knjiga V, Školska knjiga, Zagreb, str.. 35-42.
- [224] Roberds, W., 2005. *Estimating temporal and spatial variability and vulnerability, Landslide Risk Management*. Hungr, O.; Fell, R.; Couture, R.; Eberhardt, E. (eds.), Taylor and Francis, London, pp. 129-158.
- [225] Rubinić, J.; Sarić, M., 2005. Hidrologija vodnih resursa u slivu Rječine. *Zbornik radova „Prošlost, sadašnjost i budućnost vodoopskrbe i odvodnje - Iskustva i izazovi“*, Linić A. (ur.). Opatija, Vodovod i kanalizacija Rijeka, Rijeka, str. 199-207.
- [226] Rupke, J.; Cammeraat, E.; Seijmonsbergen, A.C.; van Westen, C.J., 1988. Engineering geomorphology of Widentobel Catchment, Appenzell and Sankt Gallen, Switzerland: a geomorphological inventory system applied to geotechnical appraisal of slope stability, *Engineering Geology*, 26, pp. 33-68.
- [227] Ružić, I.; Sušanj, I.; Ožanić, N.; Žic, E., 2011. Otjecanja sa sliva Slanog potoka i izvora rijeke Dubračine na području Vinodolske doline. 5. *Hrvatska konferencija o vodama, Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena*, Biondić, D.; Holjević, D.; Tropan, Lj. (ur.), Zagreb, str. 226-237.
- [228] Sakai, T.; Mizutani, T.; Tanaka, H.; Tada, Y., 1987. Numerical simulation of breaking wave on slope. In: *Bulletin of 34 Coastal Engineering Symposium, JSCE (Japan Society of Civil Engineers)*, Japan, pp. 71-75.
- [229] Sassa, K.; Fukuoka, H.; Wang, G.; Ishikawa, N., 2004. Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics. *Landslides*, 1(1), pp. 7-19.
- [230] Savage, S.B.; Hutter, K., 1989. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of Fluid Mechanics*, 199, pp. 177-215.
- [231] Savage, S.B.; Hutter, K., 1991. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis, *Acta Mechanica*, 86, pp. 201-223.

- [232] Sharpe, C.F.S., 1938. *Landslides and Related Phenomena*. Columbia University Press, New York.
- [233] Shieh, C.L.; Jan, C.D.; Tsai, Y.F., 1996. A numerical simulation of debris flow and its applications. *Nat. Hazards*, 13, pp. 39-54.
- [234] Singhroy, V., 2005. *Remote sensing of landslides, Landslide risk assessment*. Glade, T.; Anderson, M.G.; Crozier, M.J. (eds.), John Wiley, pp. 469-492.
- [235] Sivathayalan, S.; Vaid, Y. P., 2002. Influence of generalized initial state and principal stress rotation on the undrained response of sands. *Can. Geotech. Jou.*, 39, pp. 63-76.
- [236] Skempton, A.W.; Hutchinson, J.N., 1969. Stability of natural slopes and embankment foundations. In: *Proceedings of the 7th International conference of soil mechanics and foundation engineering*, Mexico, State of the Art volume, pp. 291-340.
- [237] Smith, K., 1996. *Environmental Hazards - Assessing Risk and Reducing Disaster*, Routledge, 2nd ed., 389 pp.
- [238] Soeters, R.; van Westen, C.J., 1996. Slope instability recognition, analysis and zonation, In: Turner, A.K.; Schuster, R.L. (eds.). *Landslide investigation and mitigation*, National Research Council, *Transportation Research Board Special Report 247*, pp. 129-177.
- [239] Springman, S.; Seward, L.; Casini, F.; Askerinejad, A.; Malet, J.P.; Spickerman, A.; Travelletti, J. (eds.), 2011. *SafeLand Deliverable D1.3: analysis of the results of laboratory experiments and of monitoring in test sites for assessment of the slope response to precipitation and validation of prediction models*. Dostupno na web stranici: <http://www.safeland-fp7.eu/>
- [240] Stiny, J., 1910. *Die Muren*. Verlag der Wagner'shen Universitätsbuchhandlung, Innsbruck (Debris flows, English translation by Jakob, M.; Skermer, N., 1997, *EBA Engineering Consultants*, Vancouver, Canada, 106 pp.
- [241] Stock, J.D.; Dietrich, E.W., 2006. Erosion of steepland valleys by debris flow, *Geological Society of America*, vol. 118, No. 9/10, p. 1125-1148.
- [242] Stražičić, N., 1999. *Riječki izvori i vodotoci*. Biblioteka Fluminensia, Rijeka.
- [243] Stumpf, A.; Malet, J.P.; Kerle, N., 2011. *SafeLand Deliverable D4.3: creation and updating of landslide inventory maps, landslide deformation maps and hazard maps inputs for QRA using remote-sensing technology*. Dostupno na web stranici: <http://www.safelandfp7.eu/>
- [244] Takahashi, T., 1978. Mechanical characteristics of Debris Flow. *J. Hydr. Division, ASCE*, Vol. 104, No. HY8, pp. 1153-1169.
- [245] Takahashi, T., 1991. *Debris flow*. IAHR Monograph Series, A.A. Balkema Rotterdam Brookfield, 165 pp.
- [246] Takahashi, T.; Nakagawa, H.; Harada, T.; Yamashiki, V., 1992. Routing debris flows with particle segregation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(11), pp. 1490-1507.
- [247] Takahashi, T.; Nakagawa, H., 1994. Flood/debris flow hydrograph due to collapse of a natural dam by overtopping. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, 12, pp. 41-49.
- [248] Takahashi, T., 2000. Initiation of flow of various types of debris flow. *Proceeding of the 2nd International Conference on Debris Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Eds. Wieczorak and Naeser, Rotterdam, pp. 15-25.
- [249] Takahashi, T., 2007. *Debris flow: Mechanics, Prediction and Counter Measures*. Taylor and Francis, 448 pages.
- [250] Takei, A., 1984. Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system. *Internationales Symposium Interpraevent*, Villach, Tagungspublikation, Band 2, 35-48.
- [251] Takemoto, Y., 1983. A computer code for time-dependent, viscous, incompressible fluid flows using the third-order upwind finite-difference scheme called "QUICK 132 y0/QMAC2D". *J. Super Computer*, 17(6).
- [252] UNDRRO, Office of the United Nations Disaster relief Co-ordinator, 1982. *Shelter after Disaster - Guidelines for Assistance*, United Nations, New York, p. 20.
- [253] UN-ISDR, 2004. *Terminology of disaster risk reduction*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva. Dostupno na web stranici: <http://www.unisdr.org/eng/library/lib-terminology-eng%20home.htm>

- [254] van Westen, C.J.; Rengers, N.; Terlien, M.T.J.; Soeters, R., 1997. *Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation*, Geol Rundesh, 86, Springer- Verlag, pp. 404-414.
- [255] van Westen, C.J., 2004. Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments. *Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides*. Lacerda, W.; Erlich, M.; Fontoura, S.A.B.; Sayao, A.S.F. (eds.), Rio de Janeiro, Balkema, pp. 39-56.
- [256] Van Westen, C.J.; Van Asch, T.W.J.; Soeters, R., 2005. Landslide hazard and risk zonation; why is it still so difficult?. *Bull Eng. Geol. Environ.*, 65(2), pp. 167-184.
- [257] Van Westen, C.J.; Castellanos, E.; Kuriakose, S.L., 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview, *Engineering Geology*, 102(3-4), pp. 112-131.
- [258] Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: *Schuster RL, Krizek RJ (eds) Landslides, analysis and control, special report 176: Transportation research board*, National Academy of Sciences, Washington, DC., pp. 11-33.
- [259] Varnes, D.J., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural hazard*, 3, Ed. Unesco, 63 pp.
- [260] Vivoda, M.; Benac, Č.; Žic, E.; Domlija, P.; Dugonjić Jovančević, S., 2012. Geohazard u dolini Rječine u prošlosti i sadašnjosti. *Hrvatske vode*. 20, 81, str. 105-116.
- [261] Watanabe, M.; Ikeya, H., 1981. Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima. Japan. Erosion sediment transport measurement. *International Association on Hydrol. Florence*. Science Publication, 133, pp. 245-256.
- [262] Yamashiki, Y.; Mohd Remy Rozainy, M.A.Z.; Matsumoto, T.; Takahashi, T.; Takara, K., 2012a. Simulation and Calibration of Hydro-Debris 2D Model (HD2DM) to Predict the Particle Segregation Processes in Debris Flow. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 6(6), Serial No. 55, pp. 690-698.
- [263] Yamashiki, Y.; Mohd Remy Rozainy, M.A.Z.; Matsumoto, T.; Takahashi, T.; Takara, K., 2012b. Experimental study of debris particles movement characteristics at low and high slope. *J. Global Environment Engineering*, 17, pp. 9-18.
- [264] Zanchetta, G.; Sulpizio, R.; Pareschi, M.T.; Leoni, F.M.; Santacroce, R., 2004. Characteristics of May 5–6, 1998 volcanoclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): relationships to structural damage and hazard zonation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133, (1-4), pp. 377-393.
- [265] Zeller, J., 1985. Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten. *Wasser, energie, luft*, 77(7/8), pp. 246-251.
- [266] Zezere, J.L.; Reis, E.; Garcia, R.; Oliveira, S.; Rodrigues, M.L.; Vieira, G.; Ferreira, A.B., 2004. Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, pp. 133-146.
- [267] Zimmermann, M.; Mani, P.; Gamma, P.; Gsteiger, P.; Heiniger, O.; Hunziker, G., 1997. Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz. *Schlussbericht NFP 31*, vdf-ETH, Zürich, Switzerland, 161 pp.
- [268] Žic, E.; Vivoda, M.; Benac, Č., 2012a. Causes and consequences of the River Rječina regulation. In: *Proceedings of the 5th International conference on industrial heritage thematically related to Rijeka and the industrial building heritage - architecture and civil engineering heritage: Collection of summaries*, Rijeka, Croatia, 25-26 May 2012, pp. 771-797.
- [269] Žic, E.; Bičanić, N.; Koziara, T.; Ožanić, N.; Ružić, I., 2012b. Application of the Solfec program for the Numerical Modeling of suspended sediment propagation in small torrents. *2nd Project Workshop, Monitoring and analyses for disaster mitigation of Landslides, Debris flow and Floods, Book of Proceedings*. Ožanić, N.; Arbanas, Ž.; Mihalić, S.; Marui, H.; Dragičević, N. (eds.), University of Rijeka, Rijeka, pp. 98-101.
- [270] Žic, E.; Bičanić, N.; Koziara, T.; Ožanić, N., 2012c. Numerical Modeling of suspended sediment propagation in small torrents. *People, Buildings and Environment 2012*. Hanák, T.; Adlofová, P.; Kozumplíková, L.; Peštuková, M. (eds.), Lednice: Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering. pp. 661-670.



- [271] Žic, E.; Sušan, I.; Ružić, I.; Ožanić, N.; Yamashiki, Y., 2013a. Hydrologic data analysis for the Grohovo landslide area. *1st Regional Symposium on Landslides in Adriatic-Balkan Region, 3rd Workshop of the Croatian-Japanese Project „Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia“*, Arbanas Ž.; Arbanas Mihelić S. (eds.), Zagreb, 07.-09.03.2013. (u fazi objavljivanja).
- [272] Žic, E.; Cuomo, S.; Ožanić, N.; Bićanić, N., 2013b. Application of SPH method to create numerical models of Debris flow propagation. *4th Workshop of the Croatian-Japanese Project „Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia, Book of abstracts*. Vlastelica, G.; Andrić, I.; Salvezani, D. (eds.), Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, Split, pp. 52.
- [273] Žic, E.; Yamashiki, Y.; Kurokawa, S.; Fujiki, S.; Ožanić, N.; Bićanić, N., 2013c. Validation study of debris flow movement—laboratory experiments and numerical simulation. *1st Regional Symposium on Landslides in Adriatic-Balkan Region, 3rd Workshop of the Croatian-Japanese Project „Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia“*, Arbanas Ž.; Arbanas Mihelić S. (eds.), Zagreb, 07.-09.03.2013. (u fazi objavljivanja).
- [274] Žic, E.; Yamashiki, Y.; Kurokawa, S.; Fujiki, S.; Ožanić, N., 2013d. Physical modelling of debris flow movement - laboratory research. *4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on "Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia", Book of abstracts*. Vlastelica, G.; Andrić, I.; Salvezani, D. (ur.), Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, Split, pp. 53-54.
- [275] Žic, E.; Bićanić, N.; Koziara, T.; Ožanić, N., 2014. The numerical modelling of suspended sediment propagation in small torrents with the application of the Contact Dynamics Method. *Tehnicka Gazette*, 21(5), pp. 939-952.
- [276] Žic, E.; Arbanas, Ž.; Bićanić, N.; Ožanić, N., 2015. A model of Mudflow propagation downstream from the Grohovo Landslide near the City of Rijeka (Croatia). *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, (u fazi objavljivanja).

## 9.2. Ostala neobjavljena dokumentacija

- [1] Babuska, I.; Melenk, J., 1995. *The partition of unity element method*. Technical Report BN-1185, Institute for Physical Science and Technology, University of Maryland, Maryland, U.S.A.
- [2] Baecher, G.B., 2009. *Quantifying flood risk, ASFPM* (The Association of State Floodplain Managers) Foundation's Symposium 1: Defining and Measuring Flood Risks and Floodplain Resources, 24. pp.
- [3] Besson, L.; Durville, J.L.; Garry, G., 1999. *Plans de prévention des risques naturels prévisibles*. Ministère de l'environnement. 72 pp.
- [4] Biondić, B., 1981. *Hidrogeologija Like i južnog dijela Hrvatskog primorja*. Disertacija, PMF Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- [5] Blanc, T., 2008. *Numerical simulation of debris flows with the 2D - SPH depth integrated model*. Master's thesis, Escuela Superior de Ingeniera Informatica (ESII), Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, 115 pp.
- [6] ClimChAlp, 2008. *Slope Monitoring Methodes A State of the Art Report*. The ClimChAlp partnership, Work Package 6 Munich, 28.2.2008.
- [7] Costa, J.E.; Williams, G.P., 1984b. *Debris-flow dynamics (videotape)*. U.S. Geol. Surv. Open-File Rep., 84-6606, Duration: 22,5 min.
- [8] Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks (OJL 288, pp. 27), 2007.
- [9] Državni arhiv Rijeka - A: Kraljevski gubernij za Rijeku i Ugarsko-Hrvatsko primorje, fond JU 5, B. 581: *Radovi oko reguliranja Rječine*.
- [10] Državni arhiv Rijeka - B: Kotarski građevinski ured Sušak, fond JU 49, kutija 13: *Regulacija rijeka i potoka*.

- [11] Državni arhiv Rijeka - C: Tehnički uredi grada Rijeke, fond JU 51, kutija 45: *Regulacija Rječine*.
- [12] Dugonjić-Jovančević, S., 2013. *Procjena hazarda pojave klizišta u flišu*, Doktorski rad, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 218 str.
- [13] Gotoh, H., 1992. *Study of sediment particle dynamics and its application for movable bed*. PhD Dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- [14] Hrvatski državni arhiv grada Rijeke, JU 49 (Prilog 13), JU 51 (Prilog 45)
- [15] Hrvatske vode VGO Rijeka, 2002. *Vodnogospodarska osnova Hrvatske*, Hidrološka obrada za vodno područje primorsko-istarskih slivova, knjiga 1 (voditelj zadatka Rubinić J.), Rijeka,
- [16] IGH Rijeka, 2000. *Rekonstrukcija klizišta uz vodotok Rječine*. Druga faza istražnih radova, Geotehničko izvješće, Rijeka.
- [17] IGI, 1997. *Izvor Rječine - hidrogeološka istraživanja*. (voditelji zadatka Biondić, B.; Dukarić, F.; Kuhta, M.), Zagreb.
- [18] IGI, 2004. *Granični vodonosnici Hrvatske i Slovenije između Kvarnerskog i Tršćanskog zaljeva*. Izvješće II faze istraživanja (voditelji projekta Biondić, B.; Biondić, R.), Zagreb.
- [19] IPENZ, 1983. Engineering Risk, report of the President's task committee on Professional Practice and Risk 1983, *Institution of Professional Engineers New Zealand*, 95 pp.
- [20] IRASMOS (Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements), 2008. *Deliverable D3.1 Hazard mapping of extremely rapid mass movements in Europe State of the art methods in practice, D3.1 - Technical evaluation report of current methods of hazard mapping of debris flows, rock avalanches, and snow avalanches*, Project No. 018412, Specific Targeted Research Project (Edited by: Massimiliano Barbolini)
- [21] Keefer, D.K.; Johnson, A.M., 1983. *Earth Flows: Morphology, Mobilisation and Movement*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1264: U.S. Geological Survey, Denver, CO.
- [22] Koziara, T., 2008. *Aspects of computational contact dynamics*. PhD thesis, University of Glasgow, <http://theses.gla.ac.uk/429/>
- [23] Koziara, T., 2010. *Solfec User Manual*. University of Glasgow, pp. 55.
- [24] Lorenz, J., 1860. *Die Rečina Hydrographische Skizze*. Programm des k.k. Obergymnazium in Fiume, Fiume.
- [25] Mihalić, S., 2007. *Osnove inženjerske geologije*. Interna skripta Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- [26] MKKuI.O, Mađarsko kraljevsko kulturnoinženjerski ured I. Okruga, 1905. *Izvedbeni projekt regulacije srednjeg toka Rječine*. (voditelj zadatka: Béla Péch), Rijeka, (prijevod E. Kolar, 1998.).
- [27] Morris, J.P., 1996. *Analysis of smoothed particle hydrodynamics with applications*. Ph. D. thesis, Monash University.
- [28] Ng, K.C.; Parry, S.; King, J.P.; Franks, C.A.M.; Shaw, R., 2003. Guidelines for Natural Terrain Hazard Studies. *Geotechnical Engineering Office*, Hong Kong, 138 pp.
- [29] Ožanić, N., 1999. *Hidrotehnička istraživanja na području sliva Rječine*. Elaborat Vodoprivrede-Rijeka, Rijeka.
- [30] Pastor, M., 2007. *Manual and instructions for SPH code* (Pastor Code, version from 2007), (Manual del usuario, aplicaciones del programa), unpublished manuscript.
- [31] Petričić, G., 2013. *Analiza rezultata monitoringa klizišta Grohovo u periodu 2011.-2013.*. Diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 106. str.
- [32] Rickenmann, D., 2005. *Hangmuren und Gefahrenbeurteilung*. Kurzbericht für das Bundesamt für Wasser und Geologie. Universität für Bodenkultur, Wien, und Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- [33] Rubinić, A., 2009. *Hidrologija sliva Dubračine*. Diplomski rad, 71 str.
- [34] Rubinić, J., 1997. *Prirodne hidrološke značajke površinskih vodnih pojava*. Elaborat Vodoprivrede - Rijeka, Rijeka.
- [35] Ružić, I.; Žic, E.; Krvavica, N.; Sušan, I.; Dragičević, N.; Ožanić, N.; Yamashiki, Y., 2012. *Mjerenje poprečnih profila i iscertavanje batimetrije akumulacije Valići primjenom ADCP uređaja*. Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka.

- [36] SafeLand Project, 2012. *Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies*. Sub-Activity 6.1.3 Natural Hazards, D1.7 Landslide runout: Review of models Date, Rev. No. 2, 340 pp.
- [37] Senić, A., 2010. *Sustavni pristup upravljanju rizicima od poplava*. Magistarski rad, Građevinski Fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 165. str.
- [38] Sodnik, J., 2009. *Matematično modeliranje drobirskih tokov in priprava podrobnih kart nevarnosti (Mathematical modeling of debris flow and preparing of hazard maps)*. Magistarski rad, Fakultet za gradbeništvo in geodezijo, Univerzitet u Ljubljani, Ljubljana, 237. str.
- [39] *Strategija upravljanja vodama*. Narodne novine br. 91/08, 2008.
- [40] Šerman, N., 2002. *Dinamika i regulacija procesa, Poglavlje: Osnove matematičkog modeliranja i simulacije dinamičkih sustava*. Radni tekst za inernu skriptu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- [41] Šikić, D.; Pleničar, M.; Šparica, M., 1972. *Basic geological map 1:100.000, sheet Ilirska Bistrica*. Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.
- [42] Šikić, D., 1975. *Osnovna geološka karta 1:100.000, tumač za list Ilirska Bistrica*. Savezni geološki zavod, Beograd.
- [43] Šikić, D.; Pleničar, M., 1975. *Osnovna geološka karta 1:100.000, tumač za list Ilirska Bistrica*. Savezni geološki zavod, Beograd.
- [44] Štargel, K., 2006. *Vizualizacija simulacije dinamike plinovitih fluida*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, Diplomski rad, 82. str.
- [45] TC32-Technical Committee 32, 2004. *Engineering Practice of Risk Assessment and Management of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, 2004. Risk assessment-glossary of terms.
- [46] Van Westen, C.J., 1993. *Application of geographic information systems to landslide hazard zonation*. Doctoral dissertation. ITC publ. no. 15. ITC, Enschede, p. 245.
- [47] Velić, I.; Vlahović, I., 2009. *Geološka karta Republike Hrvatske 1:300.000*. Hrvatski geološki institut, Zagreb.
- [48] Vlada Republike Hrvatske, 2010. *Državni plan obrane od poplava*, Narodne novine (84/2010).
- [49] Vodotok d.o.o., 2008., *Analiza hidroloških stanica u PP HE Zapad*. za potrebe Hrvatske elektroprivrede Zagreb, Zagreb, 155. str.
- [50] WMO/GWP, 2008. *Urban flood risk management, A Tool for Integrated Flood management*. Associated programme on flood management.

**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Prosječne godišnje količine oborina na pojedinim mjernim postajama u okolini grada Rijeke (Knežević, 1992.)	.....	20
Tablica 2.2. Srednji ( <i>SQ</i> ), srednji najniži ( <i>SNQ</i> ) i srednji najviši ( <i>SVQ</i> ) protoci ( $m^3/s$ ) na mjernim profilima vodotoka Rječine (Knežević, 1992., Vodoprivreda-Rijeka, 1945.-1997.)	.....	21
Tablica 2.3. Tipovi otjecanja na pojedinim mjernim profilima vodotoka Rječine (Knežević, 1992.; Vodoprivreda-Rijeka, 1945.-1997.)	.....	21
Tablica 2.4. Karakteristične godišnje razine voda i protoka u period od 1947. do 2006. godine, mjerna stanica Grohovo-Rječina (6011) (modificirano prema Vodotok d.o.o., 2008.)	.....	26
Tablica 2.5. Godišnje meteorološke vrijednosti za 2012. godinu, Meteorološka stanica MS1 Valići (Žic i sur., 2013a)	.....	38
Tablica 2.6. Geometrijske i hidrauličke karakteristike za kanalski profil na poziciji instaliranih Mini Diver instrumenata, klizište Grohovo (Žic i sur., 2013a)	.....	39
Tablica 2.7. Ukupni mjesečni volumen vode za period od srpnja 2011. do prosinca 2012. godine, Mini Diver instrumenti 1, 2 i 3, klizište Grohovo (Žic i sur., 2013a)	.....	42
Tablica 3.1. Tipovi klizanja prema Varnesu iz 1978. godine	.....	48
Tablica 3.2. Podijela klizišta prema tipu materijala koji ga formira (Hungri i sur., 2014.)	.....	49
Tablica 3.3. Empirijski odnosi za procijenu veličine događaja tokova krupnozrnatog materijala i/ili bujičnih poplava s nanosom (IRASMOS projekt, 2008.)	.....	56
Tablica 3.4. Empirijske formule koje daju odnose za izračun vršnog protoka za tok krupnozrnatog materijala $Q_p$ i jačine događaja $M$ (Rickenmann, 1999.; Jakob, 2005b)	.....	57
Tablica 3.5. Ponašanje toka sitnozrnatog (blatnog) materijala kao funkcija koncentracije sedimenata (O'Brien i sur., 1993.)	.....	61
Tablica 3.6. Pregled potresa i nestabilnosti padina u dolini Rječine kroz prošlost (Žic i sur., 2012a)	.....	64
Tablica 3.7. Najznačajnije poplave na području sliva vodotoka Rječine (Žic i sur., 2012a)	.....	67
Tablica 4.1. Eksperimentalni uvjeti na fizikalnom modelu (Žic i sur., 2013a)	.....	77
Tablica 4.2. Mjerenje specifične težine svakog uzorka i brojanje čestica u uzorcima na individualnim mjernim točkama unutar deponirane ploče (Žic i sur., 2013a)	.....	79
Tablica 4.3. Visine deponiranog materijala na deponiranoj (taložnoj) ploči – drugo mjerenje (nagib žlijeba $25^\circ$ ), Ujigawa Open Laboratory (Žic i sur., 2013a)	.....	83
Tablica 4.4. Rezultati srednjih vrijednosti brzina toka krupnozrnatog materijala u različitim vremenskim inkrementima, Ujigawa Open Laboratory, Sveučilište Kyoto (Žic i sur., 2013a)	.....	84
Tablica 4.5. Prikaz 2D dinamičnih numeričkih modela za određivanje dosega toka krupnozrnatog materijala	.....	87
Tablica 4.6. Modeli površinskog materijala u SOLFEC programu (Koziaara, 2010.)	.....	92
Tablica 4.7. Vrste konfiguracija u SOLFEC programu (Koziaara, 2010.)	.....	93
Tablica 4.8. Sheme vremenskih integracija u SOLFEC programu (Koziaara, 2010.)	.....	93
Tablica 4.9. Varijante paralelnog Gauss-Seidelova ažuriranja u SOLFEC programu (Koziaara, 2010.)	.....	94
Tablica 4.10. Konsumpcijska (protočna) krivulja na poprečnom profilu vodotoka Slani potok (MD No.7) neposredno uzvodno od gornje taložnice (Žic i sur., 2014.)	.....	107
Tablica 4.11. Verifikacija numeričkog modela izrađenog u SOLFEC programu. Usporedba proračunatih (SOLFEC program) i izmjerenih (terensko mjerenje) vrijednosti broja prolaznih kamenih oblutaka na primjeru gornje i donje taložnice na bujičnom vodotoku Slani potok, Sliv Dubračine, Vinodolska dolina (Žic i sur., 2014.)	.....	108

Tablica 5.1. Parametri koji opisuju proces tečenja krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala u SPH 2D modelu	.....	132
Tablica 6.1. Geotehnički parametri dobiveni laboratorijskim ispitivanjem uzoraka na području klizišta Grohovo sa naznakom njihovog korištenja u SPH 2D i SOLFEC simulacijskim programima (Benac i sur., 2005a, 2014.)	.....	141
Tablica 6.2. Broj uzoraka i razine vode u pojedinim piezometrima na kojima su uzimani uzorci sa klizišta Grohovo (Benac i sur., 2005b.)	.....	142
Tablica 6.3. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 1.	.....	144
Tablica 6.4. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 1.1.	.....	146
Tablica 6.5. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 1.2.	.....	147
Tablica 6.6. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 1.3.	.....	149
Tablica 6.7. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 2.	.....	150
Tablica 6.8. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 3.	.....	151
Tablica 6.9. Izlazne vrijednosti dobivene SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 4.	.....	152
Tablica 6.10. Utjecaj prostorne diskretizacije domene na izlazne vrijednosti propagacije toka sitnozrnatog materijala, primjena erozijskog zakona po Egashiri, SIMULACIJA 2	.....	172
Tablica 6.11. Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, primjena novog erozijskog zakon	.....	174
Tablica 6.12. Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 1., klizište Grohovo	.....	179
Tablica 6.13. Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 2., klizište Grohovo	.....	180
Tablica 6.14. Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 2., klizište Grohovo	.....	180
Tablica 6.15. Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 3., brana Valići	.....	181
Tablica 6.16. Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 3., brana Valići	.....	182
Tablica 6.17. Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 4., akumulacija Valići i klizište Grohovo	.....	184
Tablica 6.18. Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 4., akumulacija Valići i klizište Grohovo	.....	184
Tablica 6.19. Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 5., akumulacija Valići i klizište Grohovo	.....	185
Tablica 6.20. Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 5., akumulacija Valići i klizište Grohovo	.....	186
Tablica 6.21. Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 6., akumulacija Valići i klizište Grohovo	.....	186
Tablica 6.22. Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 6., akumulacija Valići i klizište Grohovo	.....	186
Tablica 6.23. Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 7., akumulacija Valići i dvije klizne plohe u neposrednoj blizini	.....	188
Tablica 6.24. Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 7., akumulacija Valići i dvije klizne plohe u neposrednoj blizini	.....	189
Tablica 6.25. Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 8., akumulacija Valići i tri klizne plohe u neposrednoj blizini	.....	189
Tablica 6.26. Izlazne vrijednosti u SPH 2D modelu, Scenarij 8., akumulacija Valići i tri klizne plohe u neposrednoj blizini	.....	189
Tablica 6.27. Vrijednosti ulaznih parametara u SPH 2D modelu, Scenarij 9., klizanje materijala u akumulaciju Valići i formiranje poplavnog vala nakon preljevanja preko krune brane	.....	192
Tablica 6.28. Izlazne vrijednosti SPH 2D modela (iza krune brane), Scenarij 9., klizanje materijala u akumulaciju Valići i formiranje poplavnog vala nakon preljevanja preko krune brane	.....	192

Tablica 7.1. Terminološki pojmovi vezani za zoniranje klizišta, hazard, ranjivost i rizik od klizišta (prema Corominas i sur., 2013.; Dugonjić Jovančević, 2013.; Fell i sur. (2008b), TC32 (2004.) i UN-ISDR (2004.))	.....	194
Tablica 7.2. Pregled faktora koji kontroliraju pojavu klizišta i njihov značaj u procjeni osjetljivosti i hazarda za različite mehanizme klizišta, (modificirano prema Corominas i sur., 2013.)	.....	206
Tablica 7.3. Pregled izvora ulaznih podataka i njihove relevantnosti za kvantitativnu analizu hazarda i rizika za različite mehanizme klizišta, (modificirano prema Corominas i sur., 2013.)	.....	207
Tablica 7.4. Kriteriji za podijelu klasa po intenzitetu za tečenje krupnozrnatog materijala i popratne procese (Švicarska)	.....	214
Tablica 7.5. Metode koje se koriste za procjenu parametara toka krupnozrnatog materijala (Rickenmann, 2001.)	.....	215
Tablica 7.6. Prikaz identificiranih hazarda na području klizišta Grohovo	.....	218
Tablica 7.7. Prikaz identificiranih hazarda na području akumulacije Valići	.....	219
Tablica 7.8. Prikaz identificiranih hazarda na području srednjeg i donjeg toka Rječine	.....	219
Tablica 7.9. Prikaz identificiranih hazarda na području ušća Rječine u gradu Rijeci	.....	220
Tablica 7.10. Mjerila za određivanje razreda ranjivosti od posljedica poplava (modificirano prema Sodnik, 2009.)	.....	227



**POPIS SLIKA**

Slika 2.1. Situacijski prikaz sliva vodotoka Rječine sa naznačenim vodomjernim postajama u slivu (Knežević, 2001.)	.....	10
Slika 2.2. Pregledna geološka karta sliva vodotoka Rječine (modif. prema IGI, 2004.)	.....	11
Slika 2.3. Pojednostavljena inženjerskeološka karta doline vodotoka Rječine	.....	12
Slika 2.4. Inženjerskeološki presjek doline vodotoka Rječine (Benac i sur., 2005a, b)	.....	13
Slika 2.5. Granica sliva (prihranjivanja) vodotoka Rječine (Ožanić i Rubinić, 1996.)	.....	14
Slika 2.6. Kretanja srednjih godišnjih protoka karakterističnih hidroloških postaja na vodotoku Rječina (1948.-2010.) (Žic i sur., 2013a)	.....	16
Slika 2.7. Digitalni elevacijski model terena srednjeg i donjeg toka Rječine, primjena <i>GID 7.7.6.</i> simulacijskog pred i post procesora (Žic i sur., 2015.)	.....	18
Slika 2.8. Karta akumulacije toka (duljine riječne mreže) srednjeg i donjeg toka Rječine (Žic i sur., 2015.)	.....	19
Slika 2.9. Funkcionalni odnosi oborina i temperature, (Fosterov dijagram) (Knežević, 1992.)	.....	21
Slika 2.10. Režim protoka (Rječina - Sušak) i oborina (teorijska na nadmorskoj visini 578 m n.m.) u slivu Rječine (1961.-1990.) (Knežević, 1992.)	.....	22
Slika 2.11. Karta nagiba terena unutar srednjeg i donjeg toka Rječine	.....	23
Slika 2.12. Prikaz smjera nagnutosti padina na srednjem i donjem toku Rječine	.....	24
Slika 2.13. Serija karakterističnih (a) godišnjih razina vode i (b) protoka u period od 1947. do 2006. godine, mjerna stanica Grohovo-Rječina (6011) (modificirano prema Vodotok d.o.o., 2008.)	.....	25
Slika 2.14. Krivulja protoka (konsumpcijska krivulja) i mjerenje protoka u period od 1983.-2005. godine, mjerna postaja Grohovo-Rječina (6011) (Vodotok d.o.o., 2008.)	.....	27
Slika 2.15. Grafički prikaz mjerenja razine podzemnih voda u piezometrima G1-G7 na klizištu Grohovo od 2007. do 2010. godine (Hrvatske vode, VGO Rijeka)	.....	28
Slika 2.16. Karta instaliranih mjernih uređaja na području klizišta Grohovo	.....	29
Slika 2.17. a) Instalirana meteorološka stanica MS1 na sredini krune brane Valići, b) instalirana meteorološka stanica MS2 na klizištu Grohovo (Foto: Elvis Žic)	.....	29
Slika 2.18. Grafički prikaz poprečnog profila sabirnog kanala oborinske vode sa postavljenim Mini Diver instrumentom 1 (MD1) u rupi na sredini sabirnog kanala	.....	30
Slika 2.19. Dispozicija Mini Diver instrumenata u blizini nožice klizišta Grohovo	.....	30
Slika 2.20. Izrada pleksiglas barijere za hvatanje sitnozrnatog suspendiranog materijala	.....	32
Slika 2.21. Grafički prikazi varijacija a) vanjske temperature zraka, b) vanjske vlažnosti zraka, c) točke rosišta, d) brzine vjetra, e) utjecaja dosega vjetra, f) atmosferskog tlaka, g) maksimalne solarne energije, h) gustoće zraka i i) evapotranspiracije u vremenu za 2012. godinu, meteorološka stanica MS1, brana Valići	.....	33
Slika 2.22. Karakteristični kanalski poprečni presjeci na kojima su postavljeni Mini Diver instrumenti MD1, MD2 i MD3, klizište Grohovo (Žic i sur., 2013a)	.....	35
Slika 2.23. Grafički prikaz promjena vanjske temperature zraka, maksimalne i minimalne temperature zraka, vlažnosti zraka, gustoće zraka i točke rosišta u realnom vremenu za 2012. godinu, MS1 Valići (Žic i sur., 2013a)	.....	36
Slika 2.24. Grafički prikaz promjena vrijednosti atmosferskog tlaka zraka i ukupnih mjesečnih oborina u realnom vremenu za a) 2012. i b) 2013. godinu, MS1 Valići (Žic i sur., 2013a)	.....	37
Slika 2.25. Grafički prikaz varijacija brzina vjetra, maksimalne vrijednosti brzina vjetra i evapotranspiracije ( <i>ET</i> ) u realnom vremenu za a) 2012. i b) 2013. godinu, meteorološka stanica MS1 Valići (Žic i sur., 2013a)	.....	39

Slika 2.26. Grafički prikaz promjena maksimalnih mjesečnih razina vode, maksimalnih mjesečnih brzina toka i maksimalnih mjesečnih protoka u kanalu za period od srpnja 2011. do prosinca 2012. godine na poziciji a) Mini Diver instrumenta 1, b) Mini Diver instrumenta 2, c) Mini Diver instrumenta 3, klizište Grohovo (Žic i sur., 2013a)	.....	41
Slika 2.27. Ukupni mjesečni volumeni vode u odvodnim kanalima za period od srpnja 2011. do prosinca 2012. godine, Mini Diver instrumenti 1, 2 i 3, klizište Grohovo (Žic i sur., 2013a)	.....	42
Slika 2.28. Instalacija Furuno X-Band Dual polarimetrijskog Doplerova radara i njegova primjena za tri karakteristična odabrana pilot područja unutar hrvatsko-japanskog bilateralnog znanstvenog projekta	.....	43
Slika 2.29. a) dispozicija dviju meteoroloških stanica u odnosu na meteorološki radar, b) dnevni podaci oborina (studeni 2012. – svibanj 2013. MS Valići (Grohovo), MS Kozala) (Krvavica i sur., 2013.)	.....	44
Slika 2.30. Kalibracija meteorološkog radara (Krvavica i sur., 2013.)	.....	45
Slika 2.31. Usporedba radara i kišomjernih stanica, a) odnos intenziteta oborina u vremenu, te b) odnos 24-h kumulativne oborine u vremenu (Krvavica i sur., 2013.)	.....	46
Slika 3.1. Klasifikacija gibanja mase kao funkcija krutih frakcija i tipa materijala, (modificirano prema Coussot i Meunier, 1995a)	.....	50
Slika 3.2. Sastav toka suspendiranog materijala/nanosa (trostruki fazni dijagram)	.....	50
Slika 3.3. a) Tok krupnozrnatog materijala u obliku lavine koji je proizašao iz plitkog koluvija u alpskom području u blizini grada Jasper, Britanska Kolumbija, Kanada. b) klasični prikaz toka krupnozrnatog materijala	.....	51
Slika 3.4. Odnosi između nastanka toka krupnozrnatog materijala, intenziteta oborina i razine podzemne vode (Takahashi, 2007.)	.....	52
Slika 3.5. Odnos između kritičnog intenziteta oborina i trajanja pojave toka krupnozrnatog materijala. Podaci sa švicarskih Alpi (modificirano prema Zimmermann i sur, 1997.)	.....	53
Slika 3.6. Prikaz nastanka toka nevezanog krupnozrnatog materijala (modificirano prema Blancu, 2008.)	.....	54
Slika 3.7. Uzdužni profil vala kod toka krupnozrnatog materijala (Pierson, 1986.)	.....	55
Slika 3.8. Shematski prikaz poprečnog presjeka definiranog sa $H$ i $L$ parametrima za stazu toka krupnozrnatog materijala (Iverson i sur., 1997a)	.....	56
Slika 3.9. Odnos između vršnog protoka toka krupnozrnatog materijala (debritnog toka) i jačine događaja (Rickenmann, 1999.)	.....	57
Slika 3.10. Primjena Manningove jednadžbe za tokove krupnozrnatog materijala, koristeći pseudo Manningove povratno izračunate vrijednosti koeficijenta hrapavosti $n$ za svaki podskup podataka (Rickenmann 1999.; Rickenmann i Weber, 2000.)	.....	58
Slika 3.11. Deponiranje toka krupnozrnatog materijala režnjastog oblika (Blanc, 2008.)	.....	60
Slika 3.12. a) Tipični tok sitnozrnatog (blatnog) materijala, b) prikaz toka sitnozrnatog (zemljanog) materijala na području regije Campania u Italiji (Fakultet Guadagno Sveučilišta u Sanniu, Benevento, Italija; O'Brien i sur., 1993.)	.....	60
Slika 3.13. Tipičan prikaz hidrograma i odnosa koncentracije sedimenata kod vode i toka sitnozrnatog materijala (O'Brien i sur., 1993.)	.....	61
Slika 3.14. a) Karta faktora sigurnosti pod utjecajem pornog pritiska, Primjer 1, intenzitet oborina 31,5 mm/h; b) karta faktora sigurnosti pod utjecajem pornog pritiska, Primjer 3, intenzitet oborina 70,0 mm/h, TRIGRS model, sliv vodotoka Rječine	.....	66
Slika 3.15. a) Vodotok Rječina nakon klizanja 1885., stacionaža 10+60 km (Državni arhiv grada Rijeke – kutije A; B; C), b) klizište iz 1893. godine na lijevoj obali Rječine nasuprot naselja Grohovo (Državni arhiv Rijeka – kutija B)	.....	67
Slika 4.1. Tipični poprečni profil toka krupnozrnatog materijala (Bardou, 2007.)	.....	73

Slika 4.2. Fizikalni model toka krupnozrnatog materijala u laboratorijskim uvjetima (primjena različitih materijala za vizualnu predodžbu toka: a) led, b) šljunak, c) pijesak)	.....	73
Slika 4.3. a) Osnovni dijelovi fizikalnog modela toka krupnozrnatog materijala, b) deponirani krupnozrnati material, (Ujigawa Open Laboratory), Sveučilište u Kyotu (Žic i sur., 2013a)	.....	74
Slika 4.4. Shematski dijagram eksperimentalnog (fizikalnog) modela toka krupnozrnatog materijala (Žic i sur., 2013a)	.....	76
Slika 4.5. Koraci na fizikalnom modelu potrebni za mjerodavno ispitivanje propagacije toka krupnozrnatog materijala (Žic i sur., 2013a)	.....	77
Slika 4.6. Koraci tijekom uzorkovanja materijala na fizikalnom modelu (Žic i sur., 2013a)	.....	78
Slika 4.7. Usporedba frekvencije brzine čestica na eksperimentalnom i numeričkom modelu za različite slučajeve u blizini nizvodnog dijela za velike čestice (BP), a) nagib kanala 25° - početni slučaj b) nagib kanala 25° - nakon 2s, c) nagib kanala 20° - početni slučaj, d) nagib kanala 20° - nakon 2s, e) nagib kanala 15° - početni slučaj, f) nagib kanala 15° - nakon 2s (Žic i sur., 2013c)	.....	80
Slika 4.8. Usporedba frekvencije brzine čestica na eksperimentalnom i numeričkom modelu za različite slučajeve u blizini nizvodnog dijela za male čestice (SP), a) nagib kanala 25° - početni slučaj b) nagib kanala 25° - posljednjih 4s, c) nagib kanala 20° - početni slučaj, d) nagib kanala 20° - posljednjih 4s, e) nagib kanala 15° - početni slučaj, f) nagib kanala 15° - posljednjih 4s (Žic i sur., 2013c)	.....	81
Slika 4.9. Prikaz kretanja i snimanja putanja čestica unutar toka krupnozrnatog materijala od (a) 0,042 s do (e) 0,067 s, primjena Photoshop CS6 programa (Žic i sur., 2013d)	.....	82
Slika 4.10. 2D i 3D prikaz deponiranog krupnozrnatog materijala na depozitnoj ploči – drugo mjerenje (nagib žlijeba 25°), Ujigawa Open Laboratory (Žic i sur., 2013a)	.....	83
Slika 4.11. Shematski prikaz metoda za određivanje dosega toka krupnozrnatog materijala i dimenzije njihovih proračunskih domena (SafeLand projekt, 2012., točka 1.7)	.....	90
Slika 4.12. Tipovi elemenata u SOLFEC simulacijskom programu (Kožarić, 2010.)	.....	92
Slika 4.13. Četiri različita tijela za primjenu u SOLFEC programu (Kožarić, 2010.)	.....	94
Slika 4.14. Dodirne točke i normalan smjer izdvojen iz sjecišta dvaju konveksnih objekata (Kožarić, 2008.)	.....	97
Slika 4.15. Prikaz bujičnog vodotoka Slani potok i erozijske baze za potrebe izrade računalnog koda u SOLFEC simulacijskom programu (Žic i sur., 2012b, 2012c)	.....	99
Slika 4.16. Hidrografska mreža u slivu vodotoka Dubračine (A. Rubinić, 2009.)	.....	99
Slika 4.17. a) Bujični vodotok Slani potok (zimski period), b) erozijska baza vodotoka Slani potok (Foto Elvis Žic)	.....	100
Slika 4.18. Karta nagiba sliva Slanog potoka u slivu Dubračine (Ružić i sur., 2011.)	.....	100
Slika 4.19. Simulacija tečenja suspendiranog nevezanog materijala na primjeru erozijske baze vodotoka Slani potok (Žic i sur., 2014.)	.....	103
Slika 4.20. Simulacija tečenja suspendiranog nevezanog materijala na primjeru gornje i donje taložnice unutar bujičnog vodotoka Slani potok (Žic i sur., 2014.)	.....	103
Slika 4.21. Vizualni prikazi a) kontaktnih točaka, b) kontaktnih sila, c) tangencijalnih naprezanja i brzina, te d) reznih sila unutar SOLFEC programa (Žic i sur., 2014.)	.....	104
Slika 4.22. Postotak prolaska suspendiranih čestica (kamenih oblutaka) na gornjoj taložnici u ovisnosti o vremenu i koeficijentu trenja (Žic i sur., 2014.)	.....	104
Slika 4.23. Postotak prolaska suspendiranih čestica (kamenih oblutaka) na donjoj	.....	105

taložnici u ovisnosti o vremenu i koeficijentu trenja (Žic i sur., 2014.)	
Slika 4.24. Pogled na vodotok Slani potok: a) uzvodno od gornje taložnice, b) nizvodno od donje taložnice (Foto: Elvis Žic)	..... 106
Slika 4.25. Poprečni profil vodotoka Slani potok, neposredno uzvodno od gornje taložnice (mjereno na stacionaži MD No.7) (Žic i sur., 2014.)	..... 106
Slika 4.26. Protočna krivulja na poziciji Mini Diver instrumenta (MD No.7), neposredno iznad gornje taložnice, vodotok Slani potok (Žic i sur., 2014.)	..... 107
Slika 4.27. Mjerenje prolaznosti kamenih oblutaka na bujičnom vodotoku Slani potok: a) prikaz dispozicije gornje i donje taložnice, b) prikaz dispozicije Mini Diver instrumenta (MD No.7) uzvodno od gornje taložnice (Foto: Elvis Žic)	..... 108
Slika 4.28. Grafička usporedba (verifikacija) proračunatih (SOLFEC program) i izmjerenih (terensko mjerenje) vrijednosti broja prolaznih kamenih oblutaka u ovisnosti o vremenu (Žic i sur., 2014.)	..... 109
Slika 4.29. Početno generiranje čestica za kontinuum pomoću trokutaste mreže u 2D prostoru (Liu i Liu, 2003.)	..... 111
Slika 4.30. Skica reprezentativnog uzorka tla	..... 114
Slika 4.31. Referentni sustav i označavanje korišteno u numeričkoj analizi (Blanc, 2008.)	..... 119
Slika 5.1. Definićijska skica erozijske stope (Blanc, 2008.)	..... 127
Slika 5.2. Prikaz strukture računalnog koda primjenjenog u SPH 2D modelu (Blanc, 2008.)	..... 130
Slika 5.3. Struktura podprograma "Erosion_SW" primjenjena u SPH 2D modelu	..... 131
Slika 6.1. Generalizirani poprečni profil nagiba kosine klizišta Grohovo (Benac i sur., 2005b)	..... 135
Slika 6.2. Nekoliko značajnih povijesnih klizišta u srednjem dijelu toka Rječine	..... 136
Slika 6.3. Sadržaj veličine zrna materijala uzoraka prikupljenih na klizištu Grohovo (modificirano prema Benac i sur., 2014.)	..... 138
Slika 6.4. Minerološki sastav materijala uzoraka prikupljenih na klizištu Grohovo (modificirano prema Benac i sur., 2014.)	..... 138
Slika 6.5. Rezultati analize veličine zrna: a) sedimentološka metoda, b) geotehnička metoda (Granulacijska klasifikacija tla prema ISO/DIS 14688), (modificirano prema Benac i sur., 2014.)	..... 139
Slika 6.6. Nedrenirani kontrolni test brzine na zasićenom glinenom uzorku klizišta Grohovo: a) krivulja naprezanja, b) vremenska serija podataka za naprezanje, porni tlak i posmične pomake (Oštrić i sur., 2012.)	..... 140
Slika 6.7. Nedrenirani test cikličkog opterećenja na saturiranom glinenom flišnom uzorku sa klizišta Grohovo ( $B_D=0,96$ : početna suha gustoća materijala: $1,51 \text{ g/cm}^3$ , specifična gravitacija, $G_s=2,66$ ): a) vremenska serija podataka naprezanja, pritiska i posmičnih pomaka, b) krivulja naprezanja (modificirano prema Benac i sur., 2005b, 2006.)	..... 142
Slika 6.8. Oscilacije razina podzemne vode na klizištu Grohovo, a) u periodu od studenog 1999. do listopada 2003. (Benac i sur., 2005b), te b) u periodu od siječnja 2013. do travnja 2014. godine (Žic i sur., 2013b)	..... 143
Slika 6.9. Simulacijski prikaz klizanja i formiranja toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 1.	..... 145
Slika 6.10. Simulacijski prikaz klizanja i formiranja toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 1.1.	..... 146
Slika 6.11. Simulacijski prikaz klizanja i formiranja toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 1.2.	..... 147
Slika 6.12. Simulacijski prikaz klizanja i formiranja toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 1.3.	..... 148
Slika 6.13. Simulacijski prikaz klizanja s dvije klizne mase i formiranje toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC	..... 149

simulacijskog programa, Scenarij 2.	
Slika 6.14. Simulacijski prikaz odrona stijenske mase i formiranje lavine krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SOLFEC simulacijskog programa, Scenarij 3.	..... 151
Slika 6.15. Simulacijski prikaz klizanja stijenske mase i formiranja lavine krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo izrađena SOLFEC simulacijskim programom, Scenarij 4.	..... 152
Slika 6.16. Grafička analiza fizikalnih veličina toka (lavine) krupnozrnatog materijala s klizišta Grohovo određenih primjenom SOLFEC simulacijskog programa	..... 153
Slika 6.17. Simulacijski prikaz propagacije toka krupnozrnatog materijala na vodotoku Rječina, prikaz propagacije prirodno formiranog materijala (prirodne brane) ispod klizišta Grohovo i puknuća brane Valići, SIMULACIJA 1	..... 156
Slika 6.18. Rezultati propagacije toka sitnozrnatog materijala na vodotoku Rječina, akumulacija Valići i klizni materijal s klizišta Grohovo, SIMULACIJA 1, (Newtonov zakon tekućine u turbulentnom režimu)	..... 157
Slika 6.19. Visine deponiranog sitnozrnatog materijala na karakterističnim poprečnim profilima unutar vodotoka Rječine, Newtonov zakon tekućine u turbuletnom režimu tečenja, SIMULACIJA 1	..... 158
Slika 6.20. Simulacijski prikaz propagacije toka sitnozrnatog materijala na vodotoku Rječina ispod klizišta Grohovo, SIMULACIJA 2	..... 160
Slika 6.21. Rezultati propagacije toka sitnozrnatog materijala na vodotoku Rječina ispod klizišta Grohovo, SIMULACIJA 2	..... 161
Slika 6.22. Prikaz promjena visina materijala uslijed propagacije toka sitnozrnatog materijala na pojedinim karakterističnim poprečnim profilima unutar vodotoka Rječine, SIMULACIJA 2	..... 162
Slika 6.23. Simulacijski prikaz propagacije toka sitnozrnatog materijala na vodotoku Rječina ispod klizišta Grohovo, SIMULACIJA 3	..... 163
Slika 6.24. Rezultat propagacije toka sitnozrnatog materijala na vodotoku Rječina ispod klizišta Grohovo, SIMULACIJA 3	..... 164
Slika 6.25. Prikaz promjena visina materijala uslijed propagacije toka sitnozrnatog materijala na karakterističnim poprečnim profilima unutar vodotoka Rječine, realan Binghamov zakon, SIMULACIJA 3	..... 165
Slika 6.26. Simulacijski prikaz erozijskog djelovanja unutar vodotoka Rječine, primjena erozijskog zakona po Egashiri, SIMULACIJA 2	..... 166
Slika 6.27. Simulacijski prikaz erozijskog djelovanja unutar vodotoka Rječine, primjena erozijskog zakona po Hungru, SIMULACIJA 3	..... 167
Slika 6.28. Vizualizacija ovisnosti pojedinih izlaznih vrijednosti modela u odnosu na vrijeme i doseg udaljenosti propagacije toka sitnozrnatog (blatnog) materijala, SIMULACIJA 1	..... 168
Slika 6.29. Vizualizacija ovisnosti pojedinih izlaznih vrijednosti modela u odnosu na vrijeme i doseg udaljenosti propagacije toka sitnozrnatog (blatnog) materijala, SIMULACIJA 2, primjena erozijskog zakona po Egashiri	..... 169
Slika 6.30. Vizualizacija ovisnosti pojedinih izlaznih vrijednosti modela u odnosu na vrijeme i doseg udaljenosti propagacije toka sitnozrnatog (blatnog) materijala, SIMULACIJA 3, primjena erozijskog zakona po Hungru	..... 170
Slika 6.31. a) usporedba linearne erozijske stope i relativne dosegnute udaljenosti toka sitnozrnatog materijala, te b) usporedba stope prirasta volumena i relativne dosegnute udaljenosti toka sitnozrnatog materijala za događaj koji se dogodio 1908. godine nedaleko sela Grohovo	..... 172
Slika 6.32. Simulacijski prikaz klizanja mase i formiranja toka krupnozrnatog materijala na klizištu Grohovo, Primjena SPH metode (opcija: Contour fill), Scenarij 1.	..... 177
Slika 6.33. Simulacijski prikaz interakcije dvaju klizišta u neposrednoj blizini sela Grohovo i mogućnost formiranja toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 2.	..... 179

Slika 6.34. 3D prikaz batimetrije akumulacije Valići (Ružić i sur., 2012., nepublicirano)	.....	181
Slika 6.35. a) odnos volumena i razine vode u akumulaciji Valići, b) odnos površine i razine vode u akumulaciji Valići (Ružić i sur., 2012., nepublicirano)	.....	181
Slika 6.36. Simulacijski prikaz puknuća brane Valići i formiranje toka sitnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 3.	.....	182
Slika 6.37. Simulacijski prikaz puknuća brane Valići i klizanja krupnozrnatog materijala s klizišta Grohovo, te formiranje toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 4.	.....	183
Slika 6.38. Simulacijski prikaz proloma brane Valići i propagacija klizne mase s klizišta Grohovo, SPH metoda, Scenarij 5.	.....	185
Slika 6.39. Simulacijski prikaz puknuća brane Valići i klizanja krupnozrnatog materijala sa klizišta Grohovo, te formiranje toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 6.	.....	187
Slika 6.40. Simulacijski prikaz puknuća brane Valići i klizanja krupnozrnatog materijala s dviju kliznih ploha u neposrednoj blizini klizišta Grohovo, te formiranje toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 7.	.....	188
Slika 6.41. Simulacijski prikaz puknuća brane Valići i klizanja krupnozrnatog materijala s triju kliznih ploha u neposrednoj blizini klizišta Grohovo, te formiranje toka krupnozrnatog materijala u koritu Rječine, SPH metoda, Scenarij 8.	.....	190
Slika 6.42. Simulacijski prikaz klizanja materijala u akumulaciju Valići i formiranje poplavnog vala nakon preljevanja preko krune brane, SPH metoda, Scenarij 9.	.....	191
Slika 7.1. Metode procjene hazarda od pojave klizišta (Aleotti i Chowdhury, 1999.)	.....	200
Slika 7.2. Proces analize hazarda i organizacijska otpornost zajednice (pr. Pine, 2008.)	.....	201
Slika 7.3. Okvirni prikaz višehazardne procjene analize rizika od pojave klizišta (temeljeno na Van Westen i sur., 2005.)	.....	204
Slika 7.4. Glavni elementi koje treba uzeti u obzir u procjeni hazarda od tokova krupnozrnatog materijala (Rickenmann, 2001.)	.....	213
Slika 7.5. Sustav ocjenjivanja hazarda korišten u Švicarskoj (Rickenmann, 2001.)	.....	214
Slika 7.6. Predloženi opći tok aktivnosti sustava za rano uzbunjivanje od pojave hazarda klizišta i formiranja krupnozrnatog toka na području srednjeg i donjeg toka Rječine (modificirano prema ClimChAlp, 2008.)	.....	225
Slika 7.7. Postupak za određivanje poplava na srednjem i donjem dijelu vodotoka Rječine (modificirano prema Sodnik, 2009.)	.....	227
Slika 7.8. Procesne faze upravljanja rizicima od poplava (prema WMO/GWP, 2008.)	.....	230



## ŽIVOTOPIS

Elvis Žic rođen je u Kopru 1977. godine. Osnovnu školu „Marija i Lina“ završio je u Umagu. Godine 1996. završava srednjoškolsko obrazovanje u Srednjoškolskom centru „Vladimir Gortan“ u Bujama, smjer Elektrotehnika - visoka struja, te iste godine upisuje Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. Tijekom fakultetskog obrazovanja odlazi u ljeto 2000. na usavršavanje u Oviedo i Gijon, pokrajina Asturias (Španjolska) preko IAESTE studenske organizacije za međunarodnu razmjenu studenata tehničkih i prirodnih znanosti, u kojoj je posljednje dvije godine svog obrazovanja radio kao glavni koordinator za marketing. U Institutu Portuaria de Gijon u Gijonu radi na sanaciji postojećeg doka, te na izradi idejnog i glavnog projekta za buduću marinu nedaleko grada. Tu stječe velika iskustva na području Pomorske hidraulike i projektiranja pomorskih građevina.

Diplomu inženjera građevinarstva stječe u veljači 2002. godine na Građevinskom fakultetu u Rijeci iz kolegija Hidrologija s temom „Matematički model transformacije vodnih valova“ pod mentorstvom prof.dr.sc. Nevenke Ožanić i komentorstvom mr.sc. Josipa Rubinića.

Od listopada 2002. godine zaposlen je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci kao znanstveni novak na Zavodu za hidrotehniku i geotehniku. Također kao asistent na istoimenom fakultetu održava vježbe iz kolegija: Hidromehanika, Hidraulika, Vodoopskrba, Odvodnja, Vodoopskrba i kanalizacija. Kao komentor i neposredni voditelj sudjelovao je u izradi 34 diplomska rada, te kao glavni voditelj na 20 završnih radova na Građevinskom fakultetu u Rijeci, pretežno iz kolegija Hidromehanike.

Poslijediplomski znanstveni studij za stjecanje titule magistra znanosti upisuje u veljači 2003. godine na Fakultetu za građevinarstvo, arhitekturu i geodeziju Sveučilišta u Splitu, znanstveno polje Građevinarstvo, smjer Hidrotehnika. Magistarski rad je obranjen 23. travnja 2009. godine pod povjerenstvom za obranu u sastavu prof.dr.sc. Roko Andričević, prof.dr.sc. Mijo Vranješ, (mentor), prof.dr.sc. Nevenka Ožanić, (komentor), te doc.dr.sc. Damir Jukić.

Kao znanstveni istraživač surađivao je na tri znanstvenoistraživačka projekta: *Znanstvene osnove za razvoj natapanja u Republici Hrvatskoj*, *Hidrologija osjetljivih vodnih resursa u kršu*, te znanstveno-istraživačkom bilateralnom hrvatsko-japanskom projektu pod nazivom *Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj*. U sklopu posljednjeg navedenog projekta Elvis Žic je izradio svoj doktorski rad pod nazivom „Prilog modeliranju potencijalnih poplavnih tokova i tokova krupnozrnatog materijala u slivu Rječine“ pod mentorstvom prof.dr.sc. Nevenke Ožanić i prof.dr.sc. Nenada Bićanića.

U koautorstvu je objavio 44 znanstvena rada, od kojih je 19 izlagano na stručnim skupovima i međunarodno-znanstvenim konferencijama. Izradio je 4 interne skripte zadataka sa teorijskom osnovom za potrebe kolegija na kojima održava nastavu. Član je Hrvatskog hidrološkog društva (HHD) od 2003. godine, te Hrvatske komore građevinskih inženjera (HKGI) od 2007. godine.

Godine 2007. upisuje poslijediplomski doktorski studij Građevinarstva na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, smjer Hidrotehnika i geotehnika. U sklopu istraživanja na svom doktorskom radu Elvis Žic je 2010. boravio na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Glasgowu gdje je pod mentorstvom prof.dr.sc. Nenada Bićanića i dr.sc. Tomasza Koziare radio na izradi računalnog koda u SOLFEC simulacijskom programu za opis propagacije tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Također sudjeluje na ljetnoj školi za numeričko modeliranje u gradu Aussoisu (Francuska) pod nazivom „*Nonsmooth Mechanics: Modeling and Simulation*“ u ljeto 2010. godine, kao i na svjetski poznatoj LARAM ljetnoj školi 2013. u Salernu (Italija). Za potrebe istraživanja doktorskog rada Elvis je dva mjeseca boravio na Sveučilištu u Kyotu (*Disaster Prevention Research Institute u mjestu Ujiyawa, DPRI Institut*), gdje je pod mentorstvom prof.dr.sc. Yosuke Yamashikia radio na izradi i analizama propagacije tokova krupnozrnatog materijala na fizikalnom modelu.

Među nagradama i priznanjima izdvajaju se godišnja nagrada Hrvatskih voda za najbolji magistarski rad iz područja hidrotehnike i vodnog gospodarstva u 2009. godini, te Rektorova nagrada iste godine za značajan doprinos u znanosti na Sveučilištu u Rijeci.

## POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

### Izvorni znanstveni radovi u CC, SCI, SCI Expanded časopisima

- [1] Žic, E.; Bićanić, N.; Koziara, T.; Ožanić, N., 2014. The numerical modelling of suspended sediment propagation in small torrents with the application of the Contact Dynamics Method. *Tehnički vjesnik (Technical Gazette)*, 21(5), str. 939-952.
- [2] Žic, E.; Arbanas, Ž.; Bićanić, N.; Ožanić, N., 2015. A model of mudflow propagation downstream from the Grohovo landslide near the city of Rijeka (Croatia). *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, rad u fazi publiciranja

### Poglavlja u knjizi

- [3] Benac, Č.; Ružić, I.; Žic, E.; Gržančić, Ž.; Kraljić, R., 2010. Ranjivost prirodnih žala u području Kvarnera. *Prirodoslovna istraživanja riječkog područja II*, Arko-Pijevac, M.; Surina, B. (ur.), Prirodoslovni muzej Rijeka, Rijeka, str. 97-107.

### Udžbenici i skripte

- [4] Žic, E.; Ožanić, N.; Karleuša, B., 2010. *Skripta riješenih zadataka iz kolegija Hidromehanike sa teoretskim osnovama*. interna skripta iz kolegija Hidromehanike, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 483. str.
- [5] Žic, E., 2008. *Riješeni programski zadaci iz kolegija Hidraulika*. interna skripta iz kolegija Hidraulike, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 212. str.
- [6] Žic, E., 2006. *Radna kopija materijala za rješavanje programa iz kolegija Vodoopskrba*. interna skripta iz kolegija Vodoopskrba, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 158. str.
- [7] Žic, E., 2006. *Radna kopija materijala za izradu programa iz kolegija Odvodnja*. interna skripta iz kolegija Odvodnja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 142. str.

### Znanstveni radovi u drugim časopisima

- [8] Vivoda, M.; Benac, Č.; Žic, E.; Đomlija, P.; Dugonjić Jovančević, S., 2012. Geohazard u dolini Rječine u prošlosti i sadašnjosti. *Hrvatske vode*, 20, 81, str. 105-116.
- [9] Marović, I.; Žic, E.; Jajac, N., 2011. Application of Snapback Chronometry Method in Calculation of Regulation. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5(3), str. 273-277.
- [10] Sušanj, I.; Gjetvaj, G.; Ožanić, N.; Žic, E., 2010. Mehanizmi formiranja postupnog djelomičnog rušenja nasute brane - brana Botonega. *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 13 (2010.), str. 69-89.
- [11] Žic, E., 2009. In memoriam Prof. dr. sc. Bruno Milić - doajen hrvatske urbane arhitekture (1917.-2009.). *Časopis Rijeka*, 1(1), str. 135-142.
- [12] Žic, E.; Volf, G.; Obradović, D., 2009. Utjecaj oscilacija vodnih masa u vodospremi na hidrauličke gubitke u gravitacijskim i potisnim vodoopskrbnim sustavima. *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 12 (2009.), str. 125-148.
- [13] Čaušević, M.; Špalj, I.; Žic, E., 2008. Djelovanje vjetra na mostove prema europskoj normi. *Građevinar*, 60(1), str. 21-35.
- [14] Karleuša, B.; Žic, E.; Prpić, S., 2008. Stanje i mogućnosti zbrinjavanja otpadnih voda malih naselja u Hrvatskoj. *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 11 (2008.), str. 55-79.

- [15] Žic, E.; Ožanić, N., 2008. Metode određivanja koeficijenta hrapavosti u riječnim koritima. *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 11 (2008.), str. 81-101.
- [16] Benac, Č.; Ružić, I.; Žic, E., 2007. Ranjivost obala u području Kvarnera. *Pomorski zbornik Annals of maritime Studies*, 44, str. 201-214.

### **Ostali radovi u drugim časopisima**

- [17] Žic, E., 2008. Prirodne znamenitosti Košljunske drage na otoku Krku, (1.dio). *Hrvatska vodoprivreda*, 17, 185, str. 53-57.

### **Objavljena pozvana predavanja na skupovima**

- [18] Ožanić, N.; Karleuša, B.; Dragičević, N.; Sušanj, I.; Žic, E.; Ružić, I.; Krvavica, N., 2013. Ublažavanje nepogoda kod poplava i odrona zemlje u Hrvatskoj kroz hrvatsko-japansku suradnju. *Dani gospodarenja vodama 2013: Napredak kroz znanost*, Bekić, D. (ur.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, str. 63-93.

### **Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom**

- [19] Žic, E.; Vivoda, M.; Benac, Č., 2014. Uzroci i posljedice regulacije toka Rječine. *Proceedings of 5th International conference on industrial heritage thematically related to Rijeka and the industrial building heritage - architecture and civil engineering heritage: Collection of summaries.*, Palinić, N.; Rotim, Malvić, J.; Đekić, V. (ur.), Rijeka, Pro Torpedo, str. 771-797.
- [20] Ožanić, N.; Sušanj, I.; Ružić, I.; Žic, E.; Dragičević, N., 2012. Monitoring and analyses for the working group II (WG2) in Rijeka area in Croatian-Japanese project. *2nd Project Workshop, Monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods, book of proceedings*, Ožanić, N.; Arbanas, Ž.; Mihalić, S.; Marui, H.; Dragičević, N. (ur.), University of Rijeka, Rijeka, str. 86-90.
- [21] Rubinić, J.; Žic, E.; Travaš, V., 2012. Sea level influence on high water occurrence in coastal urban areas - Umag case study. *Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Drainage Modelling*, Prodanović, D.; Plavšić, J. (ur.), Građevinski fakultet Beograd, Beograd, str. 215-216.
- [22] Žic, E.; Bićanić, N.; Koziara, T.; Ožanić, N., 2012. Numerical Modeling of suspended sediment propagation in small torrents. *People, Buildings and Environment 2012*, Hanák, T.; Adlofová, P.; Kozumplíková, L.; Peštuková, M. (ur.), Brno University of technology, Faculty of Civil Engineering, Lednice, str. 661-670.
- [23] Žic, E.; Bićanić, N.; Koziara, T.; Ožanić, N.; Ružić, I., 2012. Application of the Solfec program for the Numerical Modeling of suspended sediment propagation in small torrents. *2nd Project Workshop, Monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods, Book of Proceedings*, Ožanić, N.; Arbanas, Ž.; Mihalić, S.; Marui, H.; Dragičević, N. (ur.), University of Rijeka, Rijeka str. 98-101.
- [24] Ružić, I.; Sušanj, I.; Ožanić, N.; Žic, E., 2011. Otjecanja sa sliva Slanog potoka i izvora rijeke Dubračine na području Vinodolske doline. *5. Hrvatska konferencija o vodama - hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena*, Biondić, D.; Holjević, D.; Tropan, Lj. (ur.), Hrvatske vode, str. 226-237.
- [25] Marović, I.; Gudac, I.; Car-Pušić, D.; Žic, E., 2010. Significance of making construction management plan - Croatian experiences. *People, Buildings and Environment 2010*, Hanák, T.; Aigel, P.; Dyntarová, K. (ur.), Akademické nakladatelství CERM, Brno, str. 200-205.
- [26] Marović, I.; Žic, E., 2010. Real Estate Value Assessment. *Građevinarstvo - nauka i praksa*, Lučić, D. (ur.), Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet u Titogradu, str. 1757-1762.

- [27] Žic, E.; Marović, I.; Ožanić, N.; Sušanj, I., 2010. The throughput of the drainage-retaining channel Botonega in Istria, Croatia. *People, Buildings and Environment 2010*. Hanák, T.; Aigel, P.; Dyntarová, K. (ur.), Akademické nakladatelství CERM, Brno, str. 455-461.
- [28] Žic, E.; Ožanić, N.; Vranješ, M., 2010. Function of the drainage-retaining Botonega channel in the integrated management of the Botonega accumulation. *BALWOIS 2010*, Morell, M. (ur.), Faculty of Civil Engineering "Sts. Cyril and Methodius", University in Skopje, Ohrid, str. 234-234.
- [29] Žic, E.; Ožanić, N.; Vranješ, M.; Marović, I., 2010. Geomorfološke karakteristike odvodno-obuhvatnog kanala Botonega u Istri. *Građevinarstvo - nauka i praksa*, Lučić, D. (ur.), Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet u Titogradu, str. 1641-1646.
- [30] Žic, E.; Vranješ, M.; Ožanić, N., 2010. One-dimensional unsteady flow model in the non-prismatic Botonega channel. *BALWOIS 2010*, Morell, M. (ur.), Faculty of Civil Engineering "Sts. Cyril and Methodius", University in Skopje, Ohrid, str. 94-95.
- [31] Marović, I.; Jajac, N.; Žic, E., 2009. Snapback Chronometry Method - Way to Achieve Greater Work Performance. *People, Buildings and Environment 2009*, Aigel, P.; Foltynova, L.; Hanak, T.; Hromadka, V. (ur.), Akademické nakladatelství Cerm, Brno, str. 244-247.
- [32] Žic, E.; Ožanić, N.; Marović, I., 2009. Management of butoniga Accumulation in Istria (Croatia). *People, Buildings and Environment 2009*, Aigel, P.; Foltynova, L.; Hanak, T.; Hromadka, V. (ur.), Akademické nakladatelství Cerm, Brno, str. 159-162.
- [33] Žic, E.; Vranješ, M.; Ožanić, N., 2009. Methods of Roughness Coefficient Determination in Natural Riverbeds. *WMHE 2009 Proceedings, Eleventh International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Volume II*, Popovska, C.; Jovanovski, M., (ur.), Faculty of Civil Engineering, Ss. Cyril and Methodius University, Skopje, str. 851-862.

## **Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom**

- [34] Ožanić, N.; Arbanas, Ž.; Mihalić, S.; Sušanj, I.; Žic, E.; Ružić, I.; Dragičević, N., 2012. Hrvatsko-japanski projekt o poplavama i klizištima: znanstvene aktivnosti i primjena rezultata. *Zaštita od poplava u Hrvatskoj, Okrugli stol*, Biondić, D.; Holjević, D. (ur.), Hrvatske vode, Vukovar, str. 171-188.
- [35] Ožanić, N.; Ružić, I.; Sušanj, I.; Žic, E., 2012. Planed Hydrotechnical Research in Rijeka Area in Croatian-Japanese Project. *Book of extended abstract of 1st Project Workshop: Risk identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia – International experience*. Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H. (ur.), Sveučilište u Zagrebu, Dubrovnik, 2012.
- [36] Volf, G.; Žic, E.; Lipovac, A., 2008. Kanalizacijski sustav grada Čabra i zbrinjavanje sadržaja iz septičkih jama okolnih naselja. *Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji*. Linić, A. (ur.), Venerus, Šibenik, str. 57-62.
- [37] Žic, E.; Volf, G.; Hrčić, N., 2008. Osnovne karakteristike i stupanj priključenosti potrošača na kanalizacijski sustav mjesta Punat na otoku Krku. *Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji*. Linić, A. (ur.), Venerus, Rijeka, str. 47-56.
- [38] Žic, E.; Volf, G., 2007. Analiza utjecaja značajki hidrauličkih parametara na hidrauličke gubitke i dimenzioniranje potisnih dijelova vodoopskrbnih sustava. *Gubici vode u vodoopskrbi i odvodnji - suvremene metodologije praćenja, pronalaženja i otklanjanja*. Anton, L. (ur.), Venerus, Rijeka, str. 197-206.
- [39] Ožanić, N.; Karleuša, B.; Orbančić, J.; Žufić, E.; Žic, E., 2003. Hidrogrami velikih vodenih valova - primjer hidrološke obrade za akumulaciju Križ. *3. hrvatska konferencija o vodama - Hrvatske vode u 21. stoljeću*, Gereš, D. (ur.), Hrvatske vode, Osijek, str. 91-99.

## **Sažeci u zbornicima skupova**

- [40] Ožanić, N.; Sušanj, I.; Žic, E.; Krvavica, N.; Ružić, I.; Dragičević, N.; Volf, G.; Karleuša, B., 2013. Disaster Mitigation of Floods and Debris Flow at Rijeka Region through Croatian-

- Japanese Collaboration. *4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on "Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia"*, Book of abstracts, Vlastelica, G.; Andrić, I.; Salvezani, D. (ur.), Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, Split, str. 43-45.
- [41] Volf, G.; Žic, E.; Ožanić, N., 2013. Relationship between atmospheric conditions and groundwater level on Grohovo landslide. *4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on "Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia"*, Book of abstracts, Vlastelica, G.; Andrić, I.; Salvezani, D., (ur.), Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, Split, str. 46-46.
- [42] Yamashiki, Y.; Kurokawa, S.; Žic, E.; Takahashi, T.; M. Ramy Rozainy, M.A.Z.; Sušanj, I.; Fujiki, S., 2013. Development of Hydro-Debris 2D and 3D applicable for stony debris flow. *3th Workshop of the Japanese-Croatian Project on "Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia"*, *Landslide and flood hazard assessment*, Abstract Proceedings, Arbanas, M.S.; Arbanas, Ž. (ur.), City of Zagreb, Emergency Management Office, Zagreb, str. 32-32.
- [43] Žic, E.; Cuomo, S.; Ožanić, N.; Bićanić, N., 2013. Application of SPH method to create numerical models of Debris flow propagation. *4th Workshop of the Croatian-Japanese Project „Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia"*, Book of abstracts, Vlastelica, G.; Andrić, I.; Salvezani, D. (ur.), Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, Split, str. 52-52.
- [44] Žic, E.; Sušanj, I.; Ružić, I.; Ožanić, N.; Yamashiki, Y., 2013. Hydrologic Data Analysis for the Grohovo Landslide Area. *Landslide and flood hazard assesment, Abstract Proceedings*. Arbanas, M.S.; Arbanas, Ž. (ur.), City of Zagreb, Emergency Management Office, Zagreb, str. 29-29.
- [45] Žic, E.; Yamashiki, Y.; Kurokawa, S.; Fujiki, S.; Ožanić, N., 2013. Physical modelling of debris flow movement - laboratory research. *4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on "Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia"*, Book of abstracts, Vlastelica, G.; Andrić, I.; Salvezani, D. (ur.), Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, Split, str. 53-54.
- [46] Žic, E.; Yamashiki, Y.; Kurokawa, S.; Fujiki, S.; Ožanić, N.; Bićanić, N., 2013. Validation study of debris flow movement - laboratory experiments and numerical simulation. *Landslide and flood hazard assessment*, Abstract Proceedings, Arbanas, M.S.; Arbanas, Ž. (ur.), City of Zagreb, Emergency Management Office, Zagreb, str. 31-31.
- [47] Žic, E.; Palinić, N.; Čebuhar, L.; Kajapi, I., 2012. Brana i akumulacija Valiči na vodotoku Rječine. *5. međunarodna konferencija o industrijskoj baštini posvećena temi Rijeka i industrijsko graditeljsko naslijeđe - baština arhitekture i građevinarstva*, Zbornik sažetaka, Palinić, N., (ur.). Pro Torpedo, Rijeka, str. 48-49.

## Magistarski rad

- [48] Žic, E., 2009. Analiza koeficijenta hrapavosti na primjeru kanala Butonige u Istri. Magistarski rad, Mentor: Prof.dr.sc. Mijo Vranješ, Komentor: Prof.dr.sc. Nevenka Ožanić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Sveučilište u Splitu, Split, 153. str.

## Diplomski rad

- [49] Žic, E., 2002. Matematički model transformacije vodnih valova pri prolasku kroz akumulaciju. Diplomski rad, Mentor: Prof.dr.sc. Nevenka Ožanić, Komentor: Mr.sc. Josip Rubinić, Građevinski fakultet Rijeka, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 95. str.