

Hidrološko-hidraulička analiza opasnosti od poplava u Gradu Rijeci

Tomljanović, Dino

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:157:630224>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Dino Tomljanović

**Hidrološko – hidraulička analiza opasnosti od poplava u Gradu
Rijeci**

Diplomski rad

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij
Hidrotehnika
Urbani vodni sustavi**

**Dino Tomljanović
JMBAG: 0114030885**

**Hidrološko – hidraulička analiza opasnosti od poplava u Gradu
Rijeci**

Diplomski rad

Rijeka, studeni 2023.

IZJAVA

Diplomski rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Dino Tomljanović

Dino Tomljanović

U Rijeci, 1. studenoga 2023.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Ninu Krvavici, dipl. ing. građ. na pomoći, pristupačnosti i uloženom trudu tijekom izrade diplomskog rada. Također se zahvaljujem svojoj obitelji, kolegama i prijateljima na pruženoj podršci prilikom izrade diplomskog rada i tijekom cjelokupnog studiranja.

Sažetak

Cilj ovog diplomskog rada je izraditi procjenu opasnosti od pluvijalnih poplava na širem području grada Rijeke. Procjena je provedena sukladno Direktivi o poplavama (Direktiva 2007/60/EZ o procjeni i upravljanju poplavnim rizicima). Na temelju prikupljenih podataka i generiranih podloga izrađeni su digitalni model terena, model infiltracije i model hrapavosti. Hidrološko-hidraulički proračun poplava proveden je u računalnom programu HEC-RAS za tri specifična poplavna scenarija (veliku, srednju i malu vjerojatnost pojavljivanja). Rezultati provedenih simulacija prikazani su na kartama opasnosti u vidu dubina i brzina vode na obuhvaćenom području. Provedene analize odgovaraju makro razini istraživanja i daju samo općeniti pregled plavljenja. Za izradu točnijih i preciznijih karata opasnosti od poplava trebalo bi koristiti preciznije podloge te uzeti u obzir sustav odvodnje oborinskih voda. Međutim, i ovakvi rezultati nam daju vrijedan uvid u glavne zone akumuliranja i smjerove otjecanja površinskih voda.

Ključne riječi: karte opasnosti od poplava, Direktiva o poplavama, pluvijalne poplave, grad Rijeka, brzine i dubine vode, digitalni model terena

Abstract

The aim of this master's thesis is to assess the risk of pluvial floods in the wider area of the city of Rijeka. The assessment was conducted in accordance with the Floods Directive (Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks). Based on collected data and generated layers, a digital terrain model, infiltration model, and roughness model were created. Hydrological-hydraulic modelling of flooding was performed using the HEC-RAS computer program for three specific flood scenarios (high, medium, and low probability of occurrence). The results of the simulations are presented as hazard maps, showing water depths and water velocities in the exposed area. The conducted analyses were conducted at a macro level and provide a general overview of flooding. To create more accurate and precise flood hazard maps, more precise data and integration of stormwater drainage systems would be necessary. However, these results still offer valuable insights into the main areas of water accumulation and surface water flow directions.

Key words: flood hazard maps, Flood directive, pluvial floods, city of Rijeka, water depth and water velocity, digital terrain model

Sadržaj

1. UVOD	1
2. POPLAVE	3
2.1. Fluvijalne (riječne) poplave	4
2.2. Pluvijalne (oborinske) poplave	6
2.3. Obalne poplave	8
3. URBANE POPLAVE	10
3.1. Urbane poplave fluvijalnog (riječnog) porijekla	10
3.2. Urbane poplave oborinskog (pluvijalnog) porijekla	11
4. DIREKTIVA O POPLAVAMA	12
4.1. Preliminarna procjena	12
4.2. Karte opasnosti i karte rizika od poplava	13
4.3. Planovi upravljanja poplavnim rizicima	13
4.4. Direktiva o poplavama u Hrvatskoj.....	13
4.4.1. <i>Smjernice u vezi s tehničkim aspektima izrade karata opasnosti od poplava i karata rizika od poplava</i>	14
4.4.2. <i>Smjernice u vezi s procjenom rizika od poplava i štetnim posljedicama poplava</i>	15
4.4.3. <i>Smjernice u vezi s objedinjenom procjenom postojećih i planiranih građevinskih mjera za obranu od poplava</i>	15
4.4.4. <i>Smjernice u vezi s metodologijom za procjenu potencijalnih učinaka klimatskih promjena na rizike od poplava</i>	15
4.4.5. <i>Smjernice u vezi sa sudjelovanjem javnosti i dionika u upravljanju rizicima od poplava</i>	16
4.4.6. <i>Smjernice u vezi s izradom planova upravljanja rizicima od poplava</i>	16
5. KARTE OPASNOSTI OD POPLAVA I KARTE RIZIKA OD POPLAVA	17
5.1. Karte opasnosti od poplava	19
5.2. Karte rizika od poplava	21
6. OPIS ANALIZIRANOG PODRUČJA	24
7. PROVEDENE ANALIZE OPASNOSTI OD POPLAVA U GRADU RIJECI	27
7.1. Prethodna procjena rizika od poplava	27
7.2. Karte opasnosti od poplava	31
8. METODOLOGIJA ANALIZE	34
8.1. QGIS	34
8.2. Priprema podloga	35
8.3. Meteorološke podloge.....	40

8.4. Hidraulički proračun (HEC-RAS).....	42
8.5. Karte dubine i brzine vode	44
9. REZULTATI.....	46
9.1. Provedene simulacije.....	46
9.2. Karte opasnosti od poplava	53
10. DISKUSIJA	57
11. ZAKLJUČAK	59

POPIS SLIKA

- Slika 1: Distribucija vremenski uzrokovanih elementarnih nepogoda u Europi u razdoblju od 2001. do 2020. godine [4]
- Slika 2: Shema nastanka fluvijalne (riječne) poplave [6]
- Slika 3: Poplava rijeke Drave u Varaždinskoj županiji 2012. godine [7]
- Slika 4: Shema nastanka pluvijalne (oborinske) poplave [6]
- Slika 5: Centar Rijeke potopljen 2022. godine uslijed ekstremne oborine [10]
- Slika 6: Bujična poplava u Indiji 2013. godine [11]
- Slika 7: Shema nastanka obalne poplave [6]
- Slika 8: Obalna poplava u gradu Rijeci 2019. godine [12]
- Slika 9: Utjecaj urbanizacije na podizanje razine poplavnog područja [9]
- Slika 10: Negativan utjecaj urbanizacije na formiranje pluvijalnih poplava [9]
- Slika 11: Radnje propisane Direktivom o poplavama [14]
- Slika 12: Karta opasnosti od poplava za srednju vjerojatnost pojavljivanja za područje Siska [16]
- Slika 13: Karta opasnosti od poplava po vjerojatnosti pojavljivanja za područje Siska [16]
- Slika 14: Elementi i indikatori procjene opasnosti, ranjivosti i rizika od poplava [17]
- Slika 15: Karta rizika od poplava za srednju vjerojatnost pojavljivanja za područje Siska [16]
- Slika 16: Položaj Republike Hrvatske (narančasta boja) na karti Europe [18]
- Slika 17: Položaj grada Rijeke i Riječkog zaljeva na karti Republike Hrvatske [19]
- Slika 18: Sliv rijeke Rječine s ucrtanim bitnim elementima [21]
- Slika 19: Područje novog korita rijeke Rječine (zelena boja) i Mrtvog kanala (crvena boja)
- Slika 20: Vodna područja i područja podslivova u Republici Hrvatskoj [23]
- Slika 21: Karta preliminarne procjene rizika od poplava [23]
- Slika 22: Područje grada Rijeke na karti preliminarne procjene rizika od poplava [23]
- Slika 23: Karta područja potencijalno značajnih rizika od poplava [23]
- Slika 24: Grad Rijeka na karti područja potencijalno značajnih rizika od poplava [23]
- Slika 25: Karta opasnosti od poplava male, srednje i velike vjerojatnosti za područje RH [24]
- Slika 26: Karte opasnosti od poplava (dubine vode) za područje grada Rijeke za: a) veliku vjerojatnost pojavljivanja, b) srednju vjerojatnost pojavljivanja, c) malu vjerojatnost pojavljivanja i d) po vjerojatnosti pojavljivanja [21]
- Slika 27: Razlika između vektorskog i rasterskog zapisa podataka [27]
- Slika 28: Obuhvat područja analize na OpenStreetMapu-u
- Slika 29: Digitalni model terena za područje obuhvata
- Slika 30: Generirani podslivovi i smjerovi otjecanja oborinskih voda unutar obuhvata

- Slika 31: Klase zemljišnog pokrova (Urban Atlas)
- Slika 32: Generirane i prikupljane podloge za procjenu opasnosti od poplava: a) Manningov koeficijent hrapavosti ($10^{-3} \text{ m}^{-1/3}\text{s}$), b) CN broj krivulje i c) nepropusnost podloge (%)
- Slika 33: Grafički prikaz HTP krivulja različitih povratnih perioda za mjernu postaju Rijeka
- Slika 34: Pluviogram projektnog pljuska za mjernu postaju Rijeka
- Slika 35: Primjer definiranih prostornih podloga u HEC-RAS modelu: a) digitalni model terena, b) prostorna raspodjela Manningovog koeficijenta hrapavosti, c) prostorna raspodjela CN brojeva kojima se definira proces infiltracije u podlogu, d) prostorna gustoća izgrađenosti (nepropusnost)
- Slika 36: Digitalni model terena s prikazom proračunske mreže
- Slika 37: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih dubina vode (m) za veliku vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata
- Slika 38: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih brzina vode (m/s) za veliku vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata
- Slika 39: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih dubina vode (m) za srednju vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata
- Slika 40: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih brzina vode (m/s) za srednju vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata
- Slika 41: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih dubina vode (m) za malu vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata
- Slika 42: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih brzina vode (m/s) za malu vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata
- Slika 43: Karta opasnosti od poplava za veliku vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim dubinama vode (m)
- Slika 44: Karta opasnosti od poplava za veliku vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim brzinama vode (m/s)
- Slika 45: Karta opasnosti od poplava za srednju vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim dubinama vode (m)
- Slika 46: Karta opasnosti od poplava za srednju vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim brzinama vode (m/s)

- Slika 47: Karta opasnosti od poplava za malu vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim dubinama vode (m)
- Slika 48: Karta opasnosti od poplava za malu vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim brzinama vode (m/s)
- Slika 49: Izdvojena područja povećanog rizika od poplava u gradu Rijeci
- Slika 50: Izdvojena područja povećanog rizika od poplava sa prikazanim dubinama vode (m): a) područje centra grada uz obalu, b) područje Mlake i c) podvožnjak na Kantridi
- Slika 51: Izdvojena područja povećanog rizika za vrijeme poplave: a) područje centra grada uz obalu [30], b) područje Mlake [31] i c) podvožnjak na Kantridi [32]

POPIS TABLICA

- *Tablica 1: Upotreba, sadržaj i složenost karata poplava različitih mjerila [15]*
- *Tablica 2: Vrijednosti usvojenog koeficijenta hrapavosti za klase pokrova zemljišta (prema [17])*
- *Tablica 3: Vrijednosti usvojenog CN broja krivulje za klase pokrova zemljišta*
- *Tablica 4: Tablični prikaz HTP krivulja različitih povratnih perioda za mjernu postaju Rijeka*
- *Tablica 5: Odabrani scenariji i trajanja oborine za analizu opasnosti od poplava*
- *Tablica 6: Korišteni razredi dubine vode i pripadajuće boje u RGB formatu (prema [15])*
- *Tablica 7: Korišteni razredi brzine vode i pripadajuće boje u RGB formatu (prema [15])*

1. UVOD

Poplave su prirodne pojave s razornim posljedicama za društvo i okoliš. Ovisno o mjestu plavljenja, mogu utjecati na velik broj ljudi i različite ljudske aktivnosti, a posebno u urbanim i gospodarski značajnim područjima. Poplave uzrokuju brojne direktne i indirektne štete u poljoprivredi, ratarstvu, prometu, energetici, infrastrukturi, poplavljuju objekte i predstavljaju rizik za život i zdravlje ljudi te onečišćenje okoliša. Posebno su izraženi negativni utjecaji na gospodarstvo i turizam, ali i psihološki utjecaj na stanovništvo pogođeno poplavom. Međutim, nisu svi utjecaji poplava negativni, poplave također obogaćuju podzemne vode u sušnim područjima, povećavaju plodnost tla i pospješuju biološku raznolikost uslijed prijenosa hranjivih tvari [5].

Poplave je moguće podijeliti prema brojnim kriterijima, ali generalno se smatra da postoje tri osnovna tipa poplava: fluvijalne (riječne), pluvijalne (oborinske) i obalne [2]. Grad Rijeka je poznat po velikoj količini pale oborine što često dovodi do plavljenja uslijed preopterećenja sustava odvodnje oborinskih voda. Veliki utjecaj na pojavu poplava u centru grada Rijeke ima i podizanje razine mora uslijed pojave olujnih uspora, naročito kada puše jugo. Upravo zato je grad Rijeka vrlo zanimljivo područje za provedbu analize opasnosti od poplava.

Na području Europske unije upravljanje poplavama je regulirano Direktivom o poplavama (Direktiva 2007/60/EZ o procjeni i upravljanju poplavnim rizicima). Osnovna svrha ove Direktive je uspostava okvira za procjenu i upravljanje poplavnim rizicima s ciljem smanjenja štetnih učinaka poplava na ljudsko zdravlje, okoliš, gospodarstvo i kulturnu baštinu. Za učinkovito upravljanje poplavnim rizicima, potrebna je koordinacija između zemalja članica kao i suradnja s trećim zemljama. Sukladno Direktivi, za svako vodno područje ili jedinicu upravljanja, potrebno je provesti preliminarnu procjenu rizika kako bi se odredila područja za koja postoji značajan rizik od poplava. Za sva takva područja izrađuju se karte opasnosti i karte rizika od poplava koje ukazuju na potencijalne štetne učinke i posljedice specifičnih scenarija poplava. Da bi se izbjegli ili smanjili štetni učinci poplava, potrebno je izraditi i planove upravljanja rizicima od poplava [13].

Svrha izrade ovog diplomskog rada je upravo procjena opasnosti od poplava za područje grada Rijeke. Na temelju prikupljenih podataka i podloga izraditi će se model terena u GIS okruženju. Navedeni model će se koristiti za provedbu hidrauličkog proračuna u računalnom programu HEC-RAS, čime će se dobiti vremenski zapis dinamike otjecanja površinskih voda

zabilježen u obliku dubina i brzina vode. Na temelju dobivenih rezultata napraviti će se karte opasnosti od poplava za tri poplavna scenarija (velike, srednje i male vjerojatnosti pojavljivanja) s prikazanim dubinama i brzinama vode. Karte opasnosti će se izraditi u skladu sa smjericama za izradu istih.

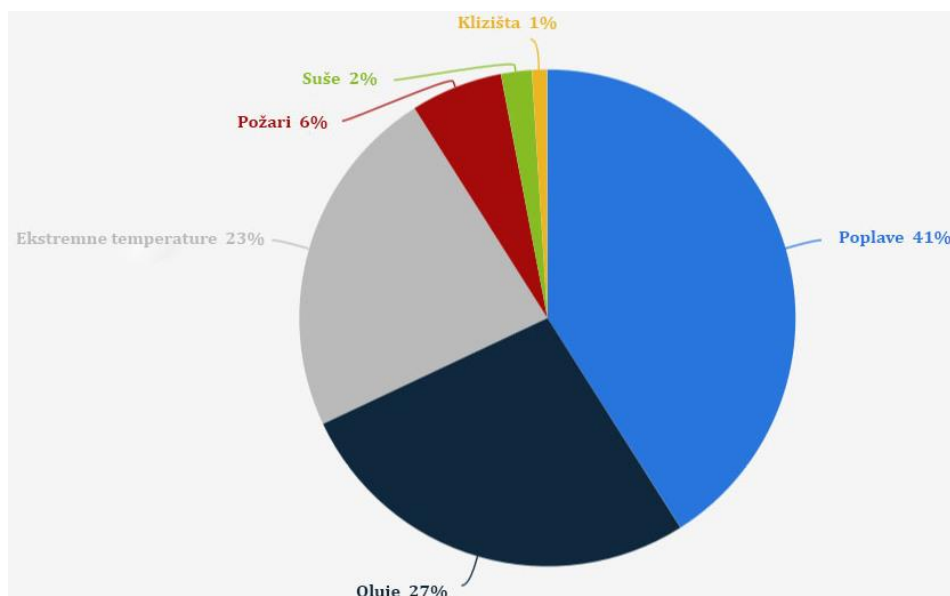
2. POPLAVE

Pod pojmom poplave podrazumijeva se privremena prekrivenost vodom područja, koje inače nije prekriveno vodom, a može nastati kao posljedica prirodnih pojava i/ili antropogene aktivnosti [1].

Poplave nastaju uslijed [2, 3]:

- **prirodnih pojava** - izlivanjem vode iz korita vodotoka (rijeka, potoka, bujica...) zbog pojave velikih protoka uslijed obilnih oborina ili naglog topljenja snijega, stvaranjem prirodnih prepreka u koritu te naglog podizanja razine more u priobalnim područjima,
- **antropogenih aktivnosti** - krećenjem šuma, oštećivanjem ili rušenjem hidrotehničkih objekata te nepravilnim rukovanjem istima (brane, nasipi...),
- **kombinacije** prirodnih i antropogenih čimbenika.

U odnosu na druge elementarne nepogode, poplave su najčešće pa samim time pogađaju najveći postotak stanovništva [1]. Vrlo često rezultiraju gubitkom ljudskih života, velikim materijalnim štetama, devastiranjem kulturnih dobara i ekološkim katastrofama [3]. Na slici 1 je prikazana distribucija vremenski uzrokovanih elementarnih nepogoda u Europi u razdoblju od 2001. do 2020. godine [4].



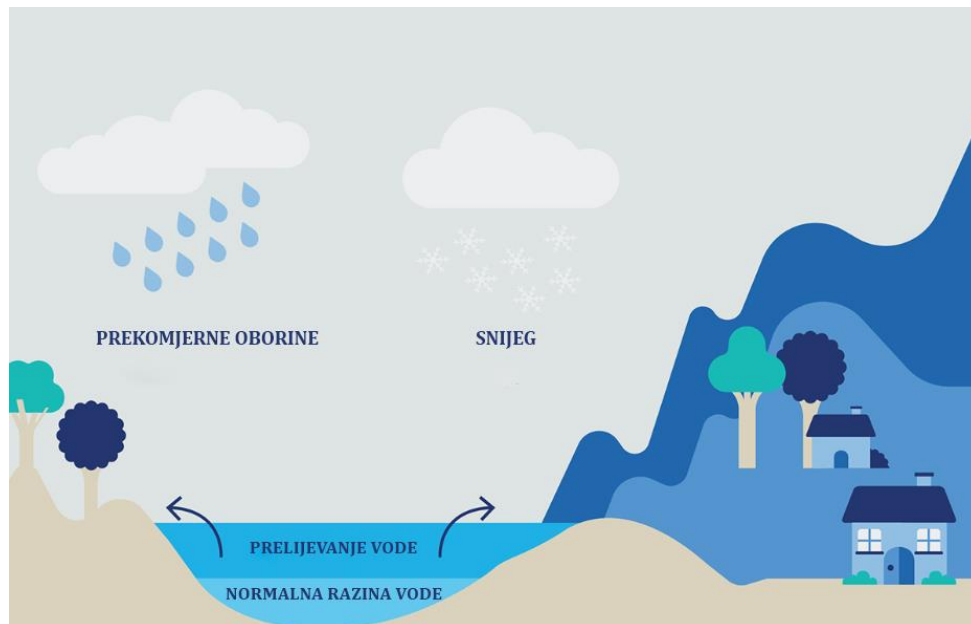
Slika 1: Distribucija vremenski uzrokovanih elementarnih nepogoda u Europi u razdoblju od 2001. do 2020. godine [4]

Poplave su pojave s velikim posljedicama za društvo i okoliš. Uzrokuju direktne i indirektnu štetu u prometu, energetici, poljoprivredi, oštećuju infrastrukturu i građevine te predstavljaju rizik za život i zdravlje ljudi kao i onečišćenje okoliša. Indirektnu štetu nakon poplave je ponekad teško procijeniti, ali jasan je negativan utjecaj na turizam, gospodarstvo i prehrambenu industriju. Međutim, postoje i pozitivni učinci poplava, poput obogaćivanja podzemnih voda u sušnim područjima, poboljšanja biološke raznolikosti površinskih voda zbog transporta hranjivih tvari kao i povećanja plodnosti tla [5].

Postoje razni kriteriji po kojima se poplave mogu podijeliti, ali generalno se smatra da postoje tri osnovna tipa poplava: **fluvijalne** (riječne), **pluvijalne** (oborinske) i **obalne** [2].

2.1. Fluvijalne (riječne) poplave

Fluvijalne (riječne) poplave nastaju kao posljedica izlivanja vode iz vodnih tokova (rijeka, jezera, potoka...) uslijed pojave velikih protoka vode. Obilne oborine tijekom duljeg vremenskog perioda te topljenje snijega i leda dovode do podizanja razine vode u koritu i izlivanja [6]. Na slici 2 prikazana je shema nastanka fluvijalnih poplava.



Slika 2: Shema nastanka fluvijalne (riječne) poplave [6]

Štete od riječnih poplava su obično znatne jer često zahvaćaju vrlo velika područja. Kako bi se odredila vjerojatnost pojave poplave iz rijeka, često se koriste matematički modeli koji u obzir uzimaju prethodne oborine, predviđene oborine, vodostaje, ali i uvjete tla i terena. Ozbiljnost riječnih poplava određena je profilom terena te trajanjem i intenzitetom oborina u riječnom slivu. U ravničarskim područjima javljaju se niže razine i sporiji rast vodostaja, ali poplave mogu potrajati danima. Planinska područja su karakteristična po tome što se poplave mogu dogoditi u roku od nekoliko minuta nakon jake oborine, vrlo brzo oteći i uzrokovati štetu uslijed otjecanja [6].

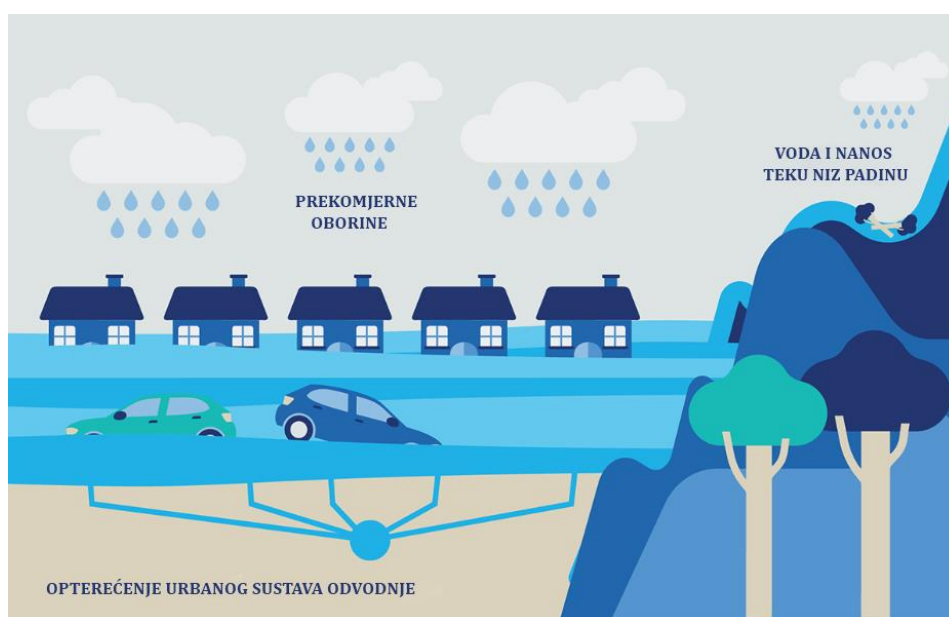
Na slici 3 je prikazano poplavljeno područje uz rijeku Dravu u Varaždinskoj županiji 2012. godine. Vrhunac vodenog vala na Dravi je stigao iz Slovenije i odmah uzrokovao velike probleme. Izmjeren je protok vodenog vala od 3300 m³/s, što odgovara povratnom periodu od 1000 godina [7].



Slika 3: Poplava rijeke Drave u Varaždinskoj županiji 2012. godine [7]

2.2. Pluvijalne (oborinske) poplave

Pluvijalne (oborinske) poplave nastaju kada količina oborina premaši kapacitet urbanih sustava odvodnje oborinskih voda ili tla i neovisne su o rijekama i vodotocima. Višak vode površinski otječe, nakupljajući se u prirodnim ili umjetno stvorenim udubljenjima i nizinskim područjima [8]. Opasne su u urbanim područjima, a posebno u starim gradskim jezgrama uz obalu gdje nema mogućnosti i prostora za odvodnju oborinskih voda, pa visina vode naglo raste i uzrokuje velike materijalne štete na nekretninama i infrastrukturi, uključujući i moguće ljudske žrtve [9]. Na slici 4 prikazana je shema nastanka pluvijalnih poplava.



Slika 4: Shema nastanka pluvijalne (oborinske) poplave [6]

Postoje dvije vrste pluvijalnih poplava:

a) površinske poplave - događaju se kada je urbani sustav odvodnje preplavljen pa voda ne može otjecati te se skuplja na ulicama; javlja se postupno što ljudima daje vremena za evakuaciju, a razina vode je rijetko dublja od 1 metra; ne predstavlja neposrednu opasnost za živote, ali može uzrokovati značajnu materijalnu štetu [6].

Na slici 5 je prikazan potopljeni centar grada Rijeke u poplavi 2022. godine. Do poplave je došlo zbog ekstremne oborine od $287,5 \text{ l/m}^2$. To je najveća dnevna količina oborine izmjerena na meteorološkoj postaji Rijeka od 1948. godine kada su uspostavljena mjerenja [10].



Slika 5: Centar Rijeke potopljen 2022. godine uslijed ekstremne oborine [10]

b) bujične poplave - iznimno opasne i destruktivne poplave izazvane ekstremnom oborinom koja padne u kratkom vremenu; formiraju se bujice koje imaju jako velike brzine toka i za sobom nose ogromne količine vode i nanosa [6].

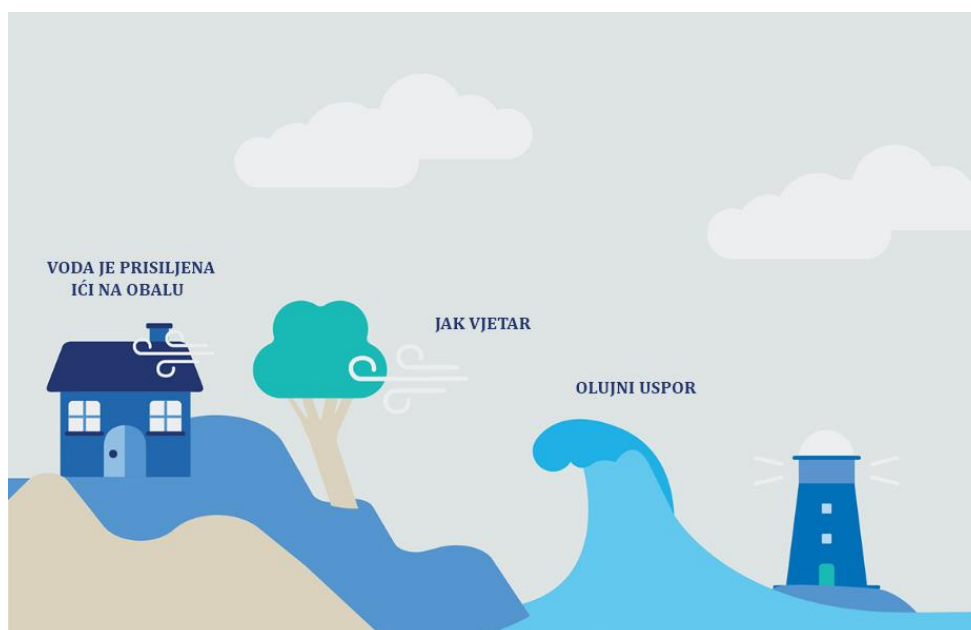
Na slici 6 je prikazana bujična poplava koja se dogodila u Indiji 2013. godine. Obilne oborine uzrokovale su velike bujične poplave i pokrenule masivna klizišta. Više od 1000 ljudi je poginulo, a oko 70 000 ljudi je ostalo zarobljeno zbog nastalih šteta na prometnicama i infrastrukturi [11].



Slika 6: Bujična poplava u Indiji 2013. godine [11]

2.3. Obalne poplave

Pod pojmom **obalne poplave** podrazumijeva se plavljenje kopnenih područja duž obale morskam vodom. Uobičajeni uzroci obalnih poplava su olujna nevremena koja se obično javljaju u kombinaciji s visokom plimom ili tsunamijem i mogu dovesti do pojave olujnog uspora [6]. Na slici 7 prikazana je shema nastanka obalnih poplava.



Slika 7: Shema nastanka obalne poplave [6]

Olujni uspor je vodeći uzrok obalnih poplava i najveća prijetnja povezana s atmosferskim poremećajima, a nastaje uslijed niskog tlaka zraka i djelovanja olujnog vjetra koji tjera vodu na obalu. Posebno su opasni olujni uspori koji se javljaju tijekom ekstremnih plima jer za sobom nose velike materijalne štete i predstavljaju ozbiljnu prijetnju za ljudske živote [6].

Ovisno o nastaloj šteti, obalne poplave se mogu podijeliti na poplave [2]:

- **malih razmjera** - neznatna do mala erozija obale; bez značajnih oštećenja,
- **srednjih razmjera** - vidljiva erozija obale; manja materijalna šteta,
- **velikih razmjera** - jaka erozija obale; velika materijalna šteta; ozbiljna opasnost za ljudske živote.

Na slici 8 prikazana je obalna poplava koja se dogodila u gradu Rijeci 2019. godine. Uslijed podizanja razine mora, poplavljen je veći dio Centralne riječke tržnice i okolnih ulica [12].



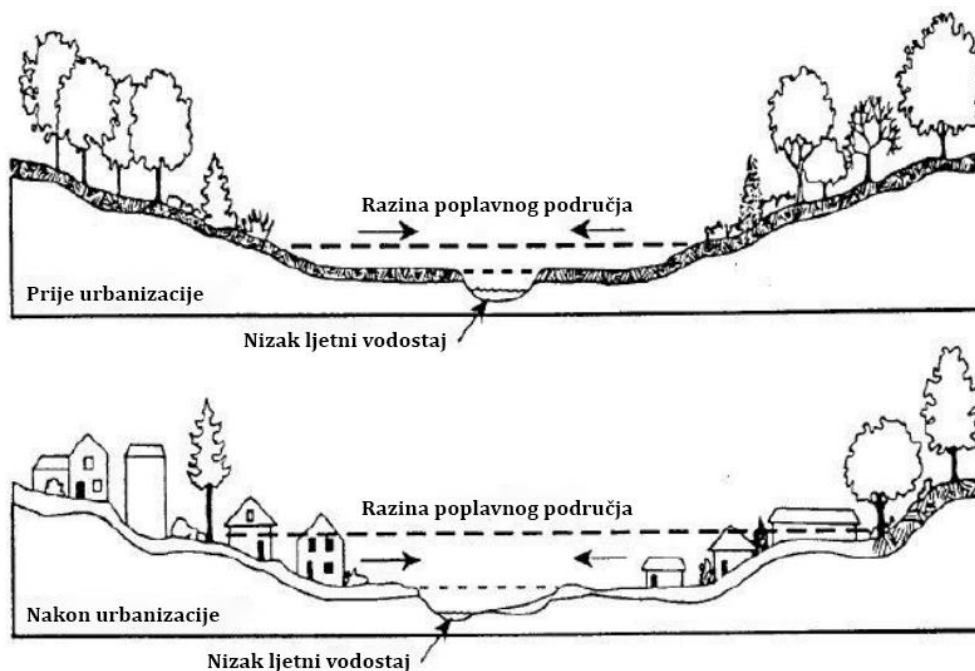
Slika 8: Obalna poplava u gradu Rijeci 2019. godine [12]

3. URBANE POPLAVE

Urbane poplave nastaju kao rezultat ljudskih zahvata na određenom području i najčešće se javljaju kod kratkotrajnih intenzivnih oborina. Velike količine vode koje otječu s krovova i asfaltiranih površina formiraju površinsko otjecanje koje premašuje kapacitet kanalizacijskog sustava [5]. S obzirom na nastanak, urbane poplave se mogu podijeliti na poplave fluvijalnog i pluvijalnog porijekla [9].

3.1. Urbane poplave fluvijalnog (riječnog) porijekla

Poplave fluvijalnog porijekla najčešće su posljedica povećanih dotoka vode sa šireg slivnog područja uslijed čega dolazi do podizanja razine vode u koritu i izlivanja. Nepovoljan utjecaj leži u nekontroliranoj urbanizaciji kojom se zauzima prostor prirodnih vodnih tokova, sužuju se inundacijska područja te se povećava brzina toka zbog regulacija na vodotocima [9]. Na slici 9 prikazan je utjecaj urbanizacije na podizanje razine poplavnog područja.



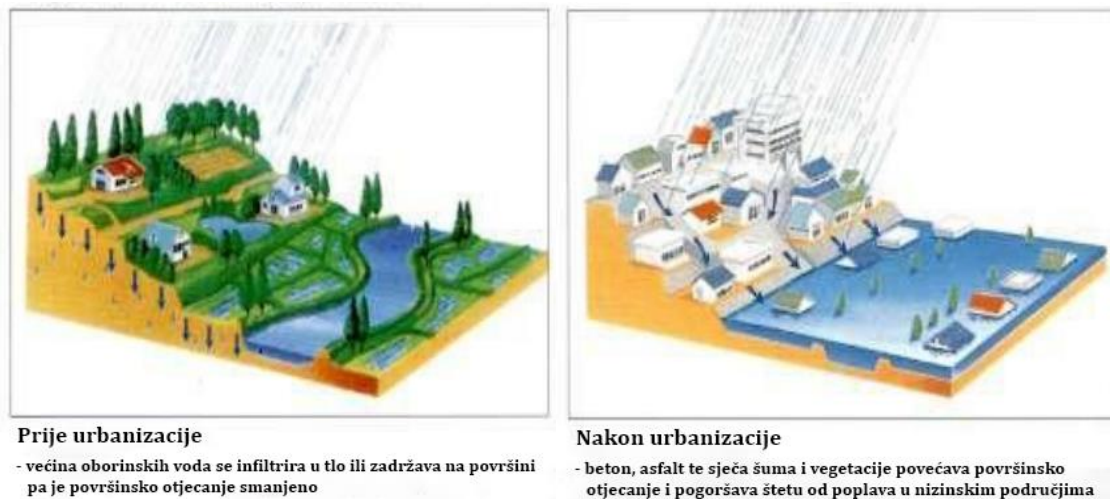
Slika 9: Utjecaj urbanizacije na podizanje razine poplavnog područja [9]

S ciljem zaštite od poplava, u urbanim sredinama se grade regulacijske građevine visoke razine sigurnosti, dimenzionirane da mogu prihvatiti protoke rijetke pojavnosti (najčešće 100-godišnjeg povratnog perioda za manje i 1000-godišnjeg povratnog perioda za veće

sredine). Uz izgradnju navedenih regulacijskih građevina unutar samih urbanih sredina, grade se i retencije, čija je funkcija smanjenje vršnog protoka odnosno spljoštenje poplavnog vodnog vala. Za vrijedne urbane sredine, također se mogu izrađivati matematički modeli kojima se simuliraju poplave, brzine i visine vode te izrađuju karte opasnosti i planovi upravljanja rizicima od poplava. Planovi evakuacije se izrađuju kada postoje velike brane uzvodno od većih urbanih sredina kako bi se, u slučaju iznenadnog rušenja, uspješno evakuirao što veći broj ljudi [9].

3.2. Urbane poplave oborinskog (pluvijalnog) porijekla

Glavni uzrok pluvijalnih poplava su ekstremne oborine, kada u relativno kratkom vremenskom periodu, padnu vrlo velike količine oborine. U tom slučaju nijedan postojeći sustav odvodnje nije u mogućnosti prihvatiti tu količinu vode pa dolazi do pojave površinskog otjecanja. Ulice gradova postaju bujice i sva se udubljenja (depresije) ispunjavaju vodom [9]. Na slici 10 prikazan je negativan utjecaj urbanizacije na formiranje pluvijalnih poplava.



Slika 10: Negativan utjecaj urbanizacije na formiranje pluvijalnih poplava [9]

Do urbanih poplava najčešće dolazi zbog podkapacitiranosti, nefunkcionalnosti ili nedovršenosti sustava mješovite odvodnje. Pod pojmom podkapacitiranosti se podrazumijeva nemogućnost prihvata oborinskih voda većih od 5-godišnjeg povratnog perioda [9].

4. DIREKTIVA O POPLAVAMA

Direktiva 2007/60/EZ Europskog parlamenta i vijeća o procjeni i upravljanju rizicima od poplava donesena je 23. listopada 2007. godine. Osnovna svrha ove Direktive je uspostava okvira za procjenu i upravljanje poplavnim rizicima s ciljem smanjenja štetnih posljedica poplava na zdravlje ljudi, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarsku aktivnost. Poplave su prirodna pojava koju nije moguće spriječiti, ali klimatske promjene i određene ljudske aktivnosti doprinose povećanju vjerojatnosti pojave poplava te njihovim štetnim učincima. Širom Europske unije pojavljuju se različite vrste poplava, poput riječnih, bujičnih, urbanih, ali i obalnih poplava uzrokovanih visokim razinama mora [13].

Kako bi mjere za smanjenje rizika od poplava bile učinkovite, potrebna je koordinacija između država članica kao i suradnja s trećim zemljama. Direktiva o poplavama nalaže da je nužno osigurati izradu karata opasnosti i karata rizika od poplava. Navedene karte prikazuju moguće štetne posljedice povezane s različitim scenarijima poplava kako bi se što jednostavnije moglo doći do informacija potrebnih za upravljanje poplavnim rizicima [13].

Uz izradu navedenih karata, prikladno je osigurati i planove upravljanja poplavnim rizicima kako bi se izbjegli ili makar smanjili štetni učinci poplava na određenom području. Uzroci i posljedice poplava variraju širom Zajednice pa u obzir treba uzeti posebne karakteristike promatranog područja te predvidjeti rješenja prilagođena potrebama i prioritetima tih područja [13].

4.1. Preliminarna procjena

Za svaku jedinicu upravljanja ili vodno područje na teritoriju Zajednice, potrebno je provesti preliminarnu procjenu poplavnih rizika na temelju povijesnih podataka i drugih dostupnih informacija. Države članice na osnovu provedene procjene utvrđuju područja za koja postoji značajan rizik od poplava [13].

Preliminarna procjena mora obuhvaćati [13]:

- karte vodnog područja u odgovarajućem mjerilu sa ucrtanom topografijom terena, namjenom zemljišta te granicama slivova, podslivova i obalnih područja,

- opis povijesnih poplava koje su imale štetne učinke na zdravlje ljudi, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarsku aktivnost, uključujući obuhvat poplavljenog područja i puteva otjecanja poplavnih voda,
- procjenu mogućih štetnih posljedica budućih poplava na zdravlje ljudi, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarstvo.

4.2. Karte opasnosti i karte rizika od poplava

Za sva područja na kojima postoji značajan rizik od poplava na temelju provedene preliminarne procjene izrađuju se karte opasnosti i karte rizika od poplava [13].

Karte opasnosti od poplava ukazuju na potencijalne učinke specifičnih scenarija poplava (male, srednje i velike vjerojatnosti). Moraju biti izrađene u odgovarajućem mjerilu za sva područja identificirana kao područja s potencijalno značajnim rizikom od poplava [13].

Karte rizika od poplava pokazuju potencijalne štetne posljedice za sva tri scenarija [13].

4.3. Planovi upravljanja poplavnim rizicima

Na temelju navedenih karata izrađuju se planovi upravljanja poplavnim rizicima. Svaka država članica postavlja vlastite ciljeve upravljanja za određeno područje, kako bi smanjila potencijalne štetne posljedice koje poplave donose. Potrebno je razmotriti sve aspekte upravljanja s naglaskom na sprečavanje, zaštitu, pripravnost, sustave ranog upozoravanja i prognoze poplava. Također, planovima se može obuhvatiti i promicanje prakse održive uporabe zemljišta, kontrolirano plavljenje određenih područja i poboljšanje retencije vode [13].

4.4. Direktiva o poplavama u Hrvatskoj

Gospodarenje vodama u Republici Hrvatskoj uređeno je Zakonom o vodama (NN 66/19, 84/21, 47/23) i Zakonom o financiranju vodnog gospodarstva (153/09, 90/11, 56/13, 154/14, 119/15, 120/116, 127/17, 66/19). Zakon o vodama propisuje da su Hrvatske vode dužne provesti preliminarnu procjenu rizika od poplava, izraditi karte opasnosti i karte rizika od poplava te napraviti planove upravljanja poplavnim rizicima. Republika Hrvatska i Europska komisija pokrenule su Twinning projekt kako bi se što bolje proveo Zakon o vodama. Jedan

od rezultata projekta je niz smjernica koje daju jasne upute o provedbi Direktive o poplavama u Hrvatskoj [14]:

- smjernice u vezi s tehničkim aspektima izrade karata opasnosti od poplava i karata rizika od poplava,
- smjernice u vezi s procjenom rizika od poplava i štetnim posljedicama poplava,
- smjernice u vezi s objedinjenom procjenom postojećih i planiranih građevinskih mjera za obranu od poplava,
- smjernice u vezi s metodologijom za procjenu potencijalnih učinaka klimatskih promjena na rizike od poplava,
- smjernice u vezi sa sudjelovanjem javnosti i dionika u upravljanju rizicima od poplava,
- smjernice u vezi s izradom planova upravljanja rizicima od poplava.

Na slici 11 prikazane su radnje kod izrade Plana upravljanja rizicima od poplava, propisane Direktivom o poplavama.



Slika 11: Radnje propisane Direktivom o poplavama [14]

4.4.1. Smjernice u vezi s tehničkim aspektima izrade karata opasnosti od poplava i karata rizika od poplava

Prije nego se krene na izradu karata, potrebno je u obzir uzeti [14]:

- organizaciju rada,
- prikupljanje podataka,
- informiranje javnosti.

Organizacija rada podrazumijeva jasno definiranje odgovornosti u smislu izrade karata i isporuke informacija. Bitan faktor je odabir vrste poplava koje će se analizirati, ali i identifikacija potencijalne skupine korisnika navedenih karata [14].

Zbog čestog nedostatka povijesnih podataka (ili nedovoljne točnosti), potrebno je utvrditi metodu prikupljanja istih. Podatke o poplavama moguće je dobiti modeliranjem oborina i otjecanja, razgovorom s lokalnim stanovništvom ili na osnovu pretpostavki u suradnji s lokalnim stručnjacima. Neovisno o načinu prikupljanja podataka, moraju se izraditi karte za tri scenarija (niske, srednje i visoke vjerojatnosti) [14].

Informiranje javnosti tijekom procesa izrade je također poželjno jer na taj način izrađene karte postaju razumljivije široj populaciji [14].

4.4.2. Smjernice u vezi s procjenom rizika od poplava i štetnim posljedicama poplava

Osnovna svrha ovih smjernica je pomoć oko utvrđivanja područja s potencijalno značajnim rizikom od poplava. Analiza rizika se temelji na izrađenim kartama za sva tri scenarija poplava. U Hrvatskoj je identificirano oko 2000 rizičnih područja [14].

4.4.3. Smjernice u vezi s objedinjenom procjenom postojećih i planiranih građevinskih mjera za obranu od poplava

Kako bi se uspješno postigli zadani ciljevi, plan upravljanja rizicima od poplava mora sadržavati građevinske i ne-građevinske mjere. Jedan dio mjera služi za smanjenje opasnosti, dok se drugi dio mjera bavi smanjenjem ranjivosti od poplava. U navedenom dokumentu su opisane mjere za smanjenje poplavnih područja, hidrauličkog opterećenja, skretanja vodotoka, uklanjanja objekata te preusmjeravanja nasipa [14].

4.4.4. Smjernice u vezi s metodologijom za procjenu potencijalnih učinaka klimatskih promjena na rizike od poplava

Za uspješno upravljanje poplavnim rizicima nužno je u obzir uzeti utjecaj klimatskih promjena na poplave. Svrha ovoga dokumenta je dati kratki pregled političke i zakonske pozadine u pogledu klimatskih promjena. Hrvatska se tek nedavno počela baviti prilagodbom klimatskim promjenama, pa je po tom pitanju još uvijek napravljeno vrlo malo [14].

4.4.5. Smjernice u vezi sa sudjelovanjem javnosti i dionika u upravljanju rizicima od poplava

Direktiva o poplavama preporuča aktivno sudjelovanje šire javnosti u samom procesu upravljanja. Smjernice opisuju prednosti takvog pristupa s obzirom da poplavni događaji pogađaju velik dio stanovništva. Edukacija i informiranje građana o procesu upravljanja može uvelike pridonijeti smanjenju štetnih posljedica poplava [14].

4.4.6. Smjernice u vezi s izradom planova upravljanja rizicima od poplava

Ovaj dokument nam daje opći prikaz provedbe Direktive o poplavama i opisuje različite korake potrebne za izradu efikasnog Plana upravljanja. Koraci su sljedeći [14]:

- identificiranje nadležnih tijela,
- koordinacija između Direktive o poplavama i Okvirne direktive o vodama,
- zaključak Preliminarne procjene poplavnih rizika,
- zaključci karata opasnosti i karata rizika od poplava,
- drugi korisni izvori informacija za Karte rizika od poplava,
- opis odgovarajućih ciljeva,
- sažetak mjera i određivanje njihova prioriteta,
- sažetak mjera informiranja javnosti i konzultacija te
- Međunarodna koordinacija.

Plan upravljanja rizicima od poplava izrađuje se na temelju karata opasnosti i karata rizika od poplava. Svaka država članica izrađuje plan za područje svojeg teritorija s ciljem smanjenja potencijalnih štetnih posljedica koje poplave donose. Plan upravljanja rizicima od poplava sastavni je dio Plana upravljanja vodnim područjima. To je planski dokument kojeg donosi Vlada Republike Hrvatske za razdoblje od 6 godina i za svako vodno područje mora obuhvaćati: opis prirodnih značajki i stanja voda, popis ciljeva kakvoće za površinske i podzemne vode, sažeti prikaz donesenih mjera i načina za postizanje tih ciljeva, utvrđivanje sredstava potrebnih za provedbu mjera, pravila primjene pojedinih sastavnica Plana, registar detaljnijih planova i programa, izvješće koje sadrži opis aktivnosti i rezultata sudjelovanja javnosti u pripremi Plana te popis nadležnih institucija za primjenu Plana [28].

5. KARTE OPASNOSTI OD POPLAVA I KARTE RIZIKA OD POPLAVA

Karte poplava predstavljaju temelj upravljanja rizicima od poplava i koriste se za brojne namjene. Kako bi se učinkovito upravljalo poplavnim rizicima, potrebno je poznavanje dominantnih opasnosti i rizika na cijelom vodnom području. To uključuje poznavanje vrsta poplava (fluvijalne, pluvijalne, obalne, poplave uzrokovane podzemnim vodama), vjerojatnosti pojavljivanja poplava, poplavne magnitude, dubine i brzine vode te potencijalnu magnitudu štete [15].

Karte poplava se najviše koriste za [15]:

- upravljanje poplavnim rizicima,
- planiranje upotrebe i upravljanja zemljištem,
- planiranje hitnih situacija,
- podizanje javne svijesti te
- u sektoru osiguranja (javni sektor).

Ovisno o namjeni i kategoriji karata, postoje specifični zahtjevi u pogledu sadržaja, mjerila, preciznosti ili ciljane skupine kojoj su karte namijenjene. Što se tiče sadržaja, mogu obuhvaćati različite poplavne površine, ali i različite nivoe rizika i opasnosti. Karte se izrađuju u različitim mjerilima pa mogu prikazivati velika područja s manjom preciznosti ili pružati detaljne informacije nekog užeg područja. Kada je riječ o ciljanoj skupini, mogu biti namijenjene stručnjacima, vladajućim tijelima ili općoj javnosti [15]. Tablica 1 opisuje upotrebu, sadržaj i složenost karata poplava različitih mjerila.

Tablica 1: Upotreba, sadržaj i složenost karata poplava različitih mjerila [15]

Razina /mjerilo	Upotreba karata poplava	Publika /Složenost	Sadržaj karata poplava
Nacionalna 1:100 000 - 1:1 000 000	<ul style="list-style-type: none"> Planiranje u velikom mjerilu/prioritizacija mjera upravljanja poplavnim rizicima/strategije na nacionalnoj razini 	<ul style="list-style-type: none"> Donosioci odluka Lakorazumljive, jednostavne mape 	<ul style="list-style-type: none"> Poplavne površine Poplavni rizici Mjesta ranjivosti okoliša Rizik zagađenja Imovina pod rizikom Okvirna ranjivost
Regionalna 1:25 000 – 100 000	<ul style="list-style-type: none"> Planiranje / prioritizacija mjera upravljanja poplavnim rizicima / strategije na regionalnoj razini Upravljanje poplavnim rizikom unutar riječnog područja Utvrdjivanje strateških zona pohrane poplava (područja zadržavanja, područja uz rijeku koja često plave) Sudjelovanje javnosti 	<ul style="list-style-type: none"> Donosioci odluka Tehničke službe Direktno pogođeni ljudi/opća javnost Lakorazumljive, jednostavne mape 	<ul style="list-style-type: none"> Poplavne površine Poplavni rizici Mjesta ranjivosti okoliša Rizik zagađenja Imovina pod rizikom Ranjivost
Lokalna 1:2 000 - 1:25 000	<ul style="list-style-type: none"> Planiranje, dizajniranje i evaluacija lokaliziranih/specifičnih mjera upravljanja poplavama Sudjelovanje javnosti 	<ul style="list-style-type: none"> Direktno pogođeni ljudi/ opća javnost Donosioci odluka Tehničke službe Moguće složene karte (stručnjaci) 	<ul style="list-style-type: none"> Poplavne površine Dubina vode Ako je potrebno – drugi parametri poplave Ranjivost Rizik (procjena ekonomskog stanja) Utjecaji na okoliš

Kartiranje poplava uvijek uključuje i određene nepouzdanosti koje proizlaze iz nepreciznosti modela, aproksimacije te promjene prirodnih fenomena. Navedene nepouzdanosti uvjetuju preciznost kartiranja i bitno ih je razumjeti kako bi shvatili koliko vjerodostojno karta prikazuje ono što se događa u stvarnosti. Do pojave nepouzdanosti dolazi zbog preciznosti digitalnog modela terena, preciznosti sjecišta vodnih puteva, hidrološke i hidraulične nepouzdanosti... Ulazni podaci uvelike uvjetuju preciznost konačnog modela s obzirom da se izlazni podaci u svakom koraku koriste kao ulazni podaci u sljedećem [15].

Prije samog prikupljanja i pripreme podataka potrebno je definirati upotrebu, sadržaj, preciznost, mjerilo i publiku kojoj su karte namijenjene. Nakon što se provede analiza dostupnih podataka, kreće se na utvrđivanje nedostajućih podataka i uspostavljanje procesa kojim će se ti podaci prikupiti [15].

Polazišna točka prilikom izrade karata su utvrđena područja s potencijalno značajnim rizikom od poplava. Sukladno Direktivi o poplavama, karte je potrebno izraditi za sva takva područja i vrlo je bitno odrediti vrstu poplave koja je relevantna za plavljenje pojedinog područja [15].

5.1. Karte opasnosti od poplava

Karte opasnosti od poplava ukazuju na potencijalne učinke specifičnih scenarija poplava. Moraju biti izrađene u odgovarajućem mjerilu za sva područja identificirana kao područja s potencijalno značajnim rizikom od poplava. Potrebno ih je izraditi prema sljedećim scenarijima [15]:

- poplave male vjerojatnosti ili scenariji ekstremnih događaja (povratni period 1000 godina),
- poplave srednje vjerojatnosti (povratni period ≥ 100 godina) i
- poplave velike vjerojatnosti (povratni period do 25 godina).

Za svaki navedeni scenarij, karte trebaju prikazati [15]:

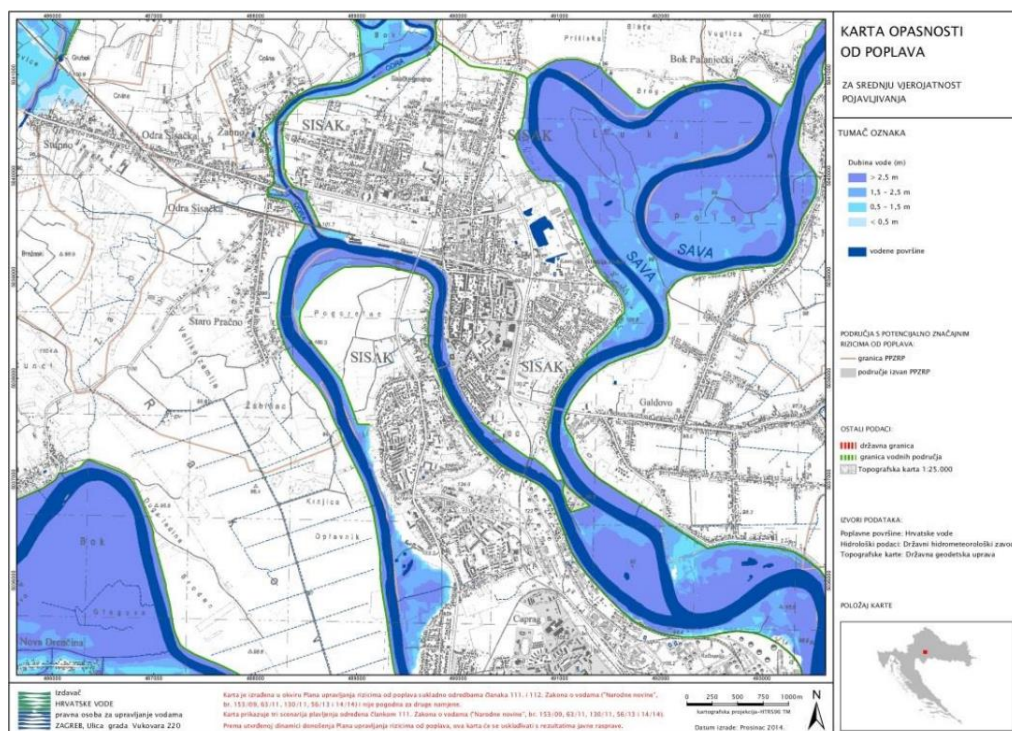
- poplavne površine,
- vodostaj ili dubinu vode,
- brzinu toka i odgovarajući protok vode.

Prvi korak u pripremi karata opasnosti je prikupljanje i priprema podataka na temelju provedene analize potrebnih podataka te utvrđivanje podataka koji nedostaju. Mjerilo u kojem će karte biti izrađene ovisi o kvaliteti, odnosno preciznosti dostupnih podataka. Ukoliko je preciznost podataka niska, nije preporučljivo izrađivati karte visokih rezolucija jer će takve karte davati netočne informacije. Kako bi se olakšalo upravljanje poplavnim rizikom na lokalnoj i regionalnoj razini, potrebni su visokokvalitetni podaci jer je na temelju njih moguće izraditi lako razumljive karte za donosioce odluka, ali i detaljne karte potrebne za planiranje hitnih slučajeva [15].

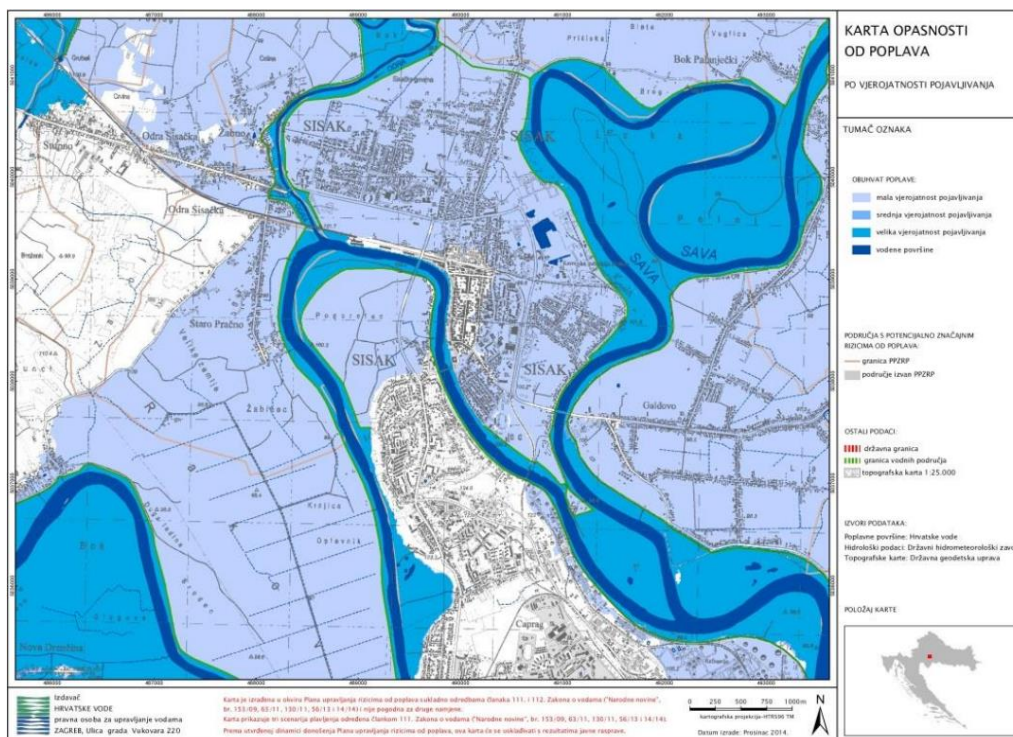
Prilikom definiranja sadržaja i vrste karte opasnosti, potrebno je uzeti u obzir ciljanu skupinu kojoj je karta namijenjena, mjerilo karte, projekciju i koordinatni sustav, granice područja, vrstu i scenarije poplava, opseg poplave te dubinu i brzinu vode [15].

Što se tiče ciljanih skupina, karte mogu biti namijenjene široj javnosti (jednostavnije karte u manjem mjerilu, npr. 1:10000 - 1:25000) ili stručnjacima koji će karte koristiti za lokalno planiranje (karte većeg mjerila, npr. 1:2000 - 1:10000). Obavezno je izraditi karte za sva područja potencijalno značajnog poplavnog rizika, ali korisno je prikazati opasnost i na područjima koja to nisu, kako se ne bi stekao dojam da na takvim područjima ne postoji opasnost od poplava. Potrebno je odrediti projekciju i koordinatni sustav koji će se koristiti te način na koji će se označavati različite vrste poplava i različiti scenariji. Vrijednosti dubine vode mogu se dobiti iz statističkih analiza i opažanja ili se mogu izvesti iz modela protoka (riječne poplave). Za rijeke se najčešće koriste numerički modeli, dok se za mora i jezera primjenjuju statističke metode. Dubine na određenim lokacijama mogu biti izražene u metrima ili centimetrima. Prema Direktivi o poplavama, nužno je iskazati i brzinu vode ili brzinu širenja poplave. Uz sav navedeni tehnički sadržaj, karte moraju biti pregledne i moraju sadržavati osnovne informacije poput naslova, legende, sadržaja, lokacije, izvora podataka i ostalo [15].

Na sljedećim slikama vidljiva su dva primjera karata opasnosti od poplava. Slika 12 prikazuje kartu opasnosti (dubine vode) na području Siska za srednju vrijednost pojavljivanja, dok je na slici 13 prikazana karta koja sadrži sve tri vjerojatnosti pojavljivanja na istom području [16].



Slika 12: Karta opasnosti od poplava za srednju vjerojatnost pojavljivanja za područje Siska [16]



Slika 13: Karta opasnosti od poplava po vjerojatnosti pojavljivanja za područje Siska [16]

5.2. Karte rizika od poplava

Karte rizika od poplava trebaju prikazati potencijalne štetne posljedice koje se povezuju sa svakim prethodno navedenim scenarijem, a sadrže [15]:

- okvirni broj potencijalno ugroženog stanovništva,
- vrstu gospodarske aktivnosti na potencijalno pogođenom području,
- postrojenja koja bi mogla uzrokovati iznenadno onečišćenje u slučaju poplava i potencijalno pogođena zaštićena područja,
- informacije o drugim značajnim izvorima onečišćenja,
- sve ostale informacije koje država članica smatra korisnima.

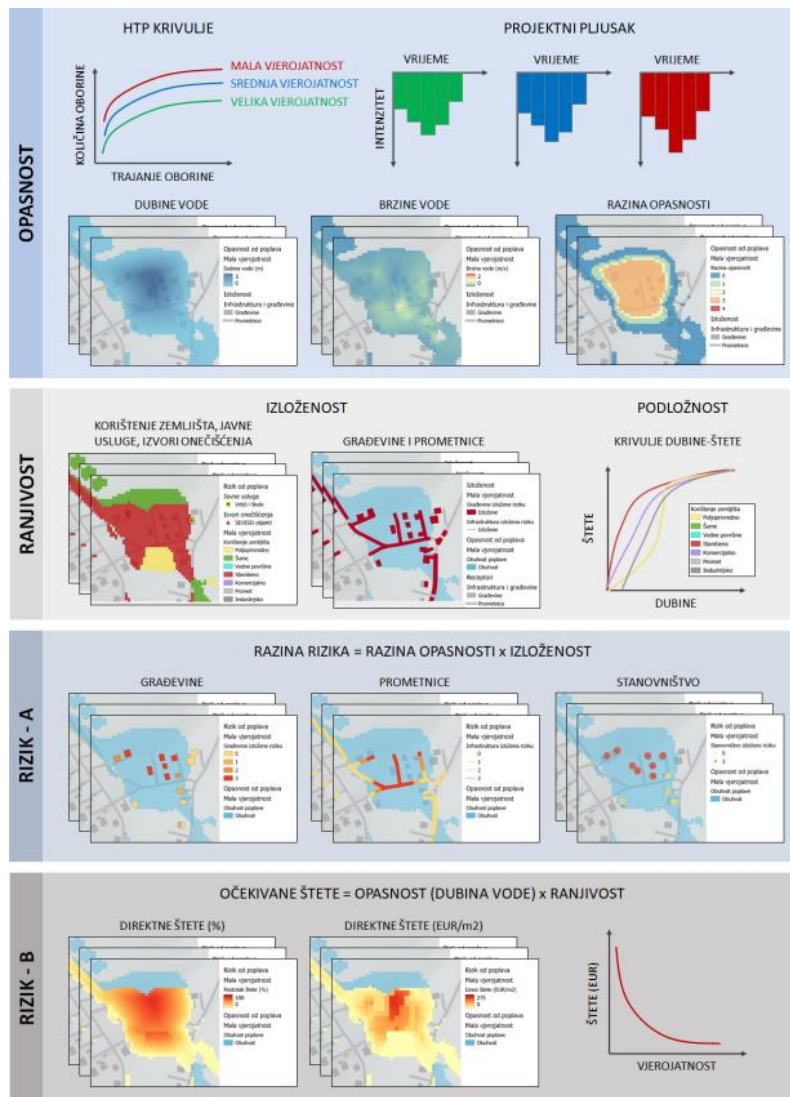
Poplavni rizik se definira kao kombinacija vjerojatnosti pojave poplavnog događaja i potencijalnih štetnih posljedica tog događaja na zdravlje ljudi, imovinu, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarsku aktivnost. Rizik od poplava općenito sadrži dva indikatora - **opasnost** i **ranjivost** [17].

Opasnost od poplava u smislu procjene rizika moguće je definirati kao vjerojatnost premašenja potencijalno štetnog poplavnog događaja na nekom području. Najčešće se izražava pokazateljima poput obuhvata poplave, dubine i brzine vode, protoka, trajanja

poplave te brzine plavljenja. Uz procjenu opasnosti, nužno je identificirati **receptore rizika**, odnosno sve elemente na koje poplave mogu utjecati (stanovništvo, imovina, infrastruktura, okoliš, itd.) [17].

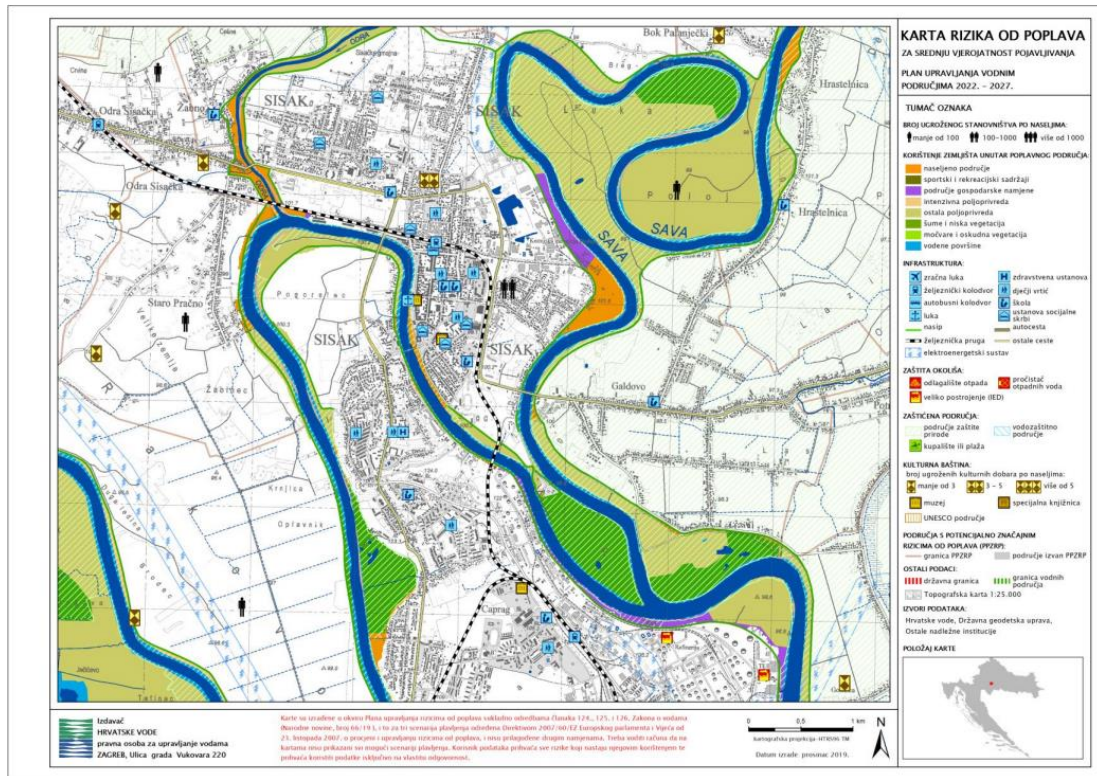
Ranjivost je stanje određeno ekonomskim, društvenim, fizičkim i ekološkim čimbenicima ili procesima koji pospešuju osjetljivost pojedinca, zajednice ili sustava na opasnosti i posljedice od poplava. Može se definirati kao kombinacija **podložnosti** i **izloženosti** [17].

Pojam **podložnosti** podrazumijeva štetni učinak poplava na receptore i najčešće se prikazuje krivuljama ovisnosti između postotka nastale štete i dubine vode. **Izloženost** se može definirati kao vjerojatnost da će određeni receptori biti izloženi poplavnom događaju [17]. Na slici 14 prikazani su elementi i indikatori procjene opasnosti, ranjivosti i rizika od poplava.



Slika 14: Elementi i indikatori procjene opasnosti, ranjivosti i rizika od poplava [17]

Prilikom definiranja vrste i sadržaja karte rizika od poplava, vrijede ista pitanja i pretpostavke kao i kod karata opasnosti od poplava. Uz navedene informacije, potrebno je definirati i receptore rizika koji će biti prikazani na karti [15]. Na slici 15 prikazana je karta rizika od poplava za srednju vjerojatnost pojavljivanja za područje Siska.



Slika 15: Karta rizika od poplava za srednju vjerojatnost pojavljivanja za područje Siska [16]

6. OPIS ANALIZIRANOG PODRUČJA

Područje analize ovog diplomskog rada uključuje veći dio administrativnih granica Grada Rijeke i njegove vodne resurse. Rijeka je treći po veličini najveći grad i najveća luka u Republici Hrvatskoj. Na slici 16 prikazan je položaj Republike Hrvatske na karti Europe.



Slika 16: Položaj Republike Hrvatske (narančasta boja) na karti Europe [18]

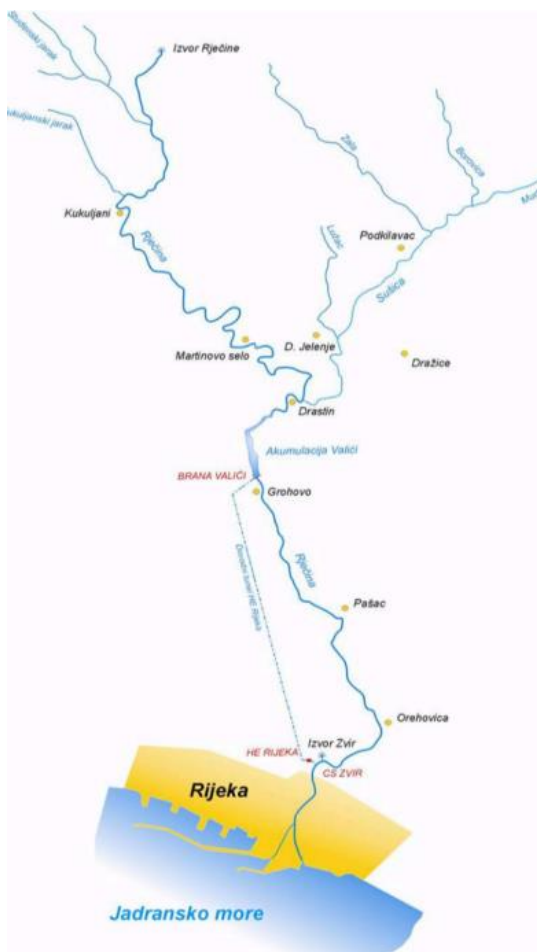
Grad Rijeka se nalazi na zapadu Hrvatske, na sjevernoj obali Riječkog zaljeva. Zbog dovoljne dubine Riječkog zaljeva i mogućnosti uplovljavanja velikih brodova, Rijeka se razvila kao najveća Hrvatska luka [19]. Na slici 17 prikazana je karta Hrvatske sa označenim položajem grada Rijeke i Riječkog zaljeva.



Slika 17: Položaj grada Rijeke i Riječkog zaljeva na karti Republike Hrvatske [20]

Kroz centar grada Rijeke prolazi korito rijeke **Rječine** i staro kanalizirano korito zvano **Mrtvi kanal** [19].

Vodotok Rječina je karakterističan primjer priobalnog vodotoka bujičnih karakteristika koji je tipičan za krška područja. Duljina vodotoka od izvorišta do ušća u Riječki zaljev iznosi 18,3 km. Rječina ima nekoliko pritoka, ali glavina protoka dolazi sa izvorišta u podnožju brda Kičej [21]. Izvor Rječine presušuje jednom do tri puta godišnje u trajanju od dva do četiri mjeseca uslijed izuzetno velikih suša tijekom ljetnih mjeseci. U donjem dijelu toka nalazi se i izvor Zvir koji nikad ne presušuje zbog izrazito velikog slivnog područja. Minimalna izdašnost izvora iznosi 1400 l/s i nalazi se u samom centru grada Rijeke. Koristi se kao vodoopskrbna rezerva za vrijeme ljetnih mjeseci kada dođe do presušivanja izvora Rječine. Neposredno uz izvor Zvir nalazi se hidroelektrana Rijeka koja se opskrbljuje vodom iz akumulacije Valići. Akumulacija Valići i istoimena brana izgrađeni su 1966. godine nedaleko od sela Grohovo [22]. Na slici 18 prikazan je sliv rijeke Rječine s ucrtanim bitnim elementima.



Slika 18: Sliv rijeke Rječine s ucrtanim bitnim elementima [21]

Zbog velikih poplava koje su se događale na riječkom području, krenulo se u regulaciju Rječine na način da se iskopalo novo korito po pravcu koji rijeka prirodno bira za vrijeme najviših vodostaja. Po dovršetku radova, u staro korito je puštena morska vode, čime je nastao **Mrtvi kanal**. Dugačak je oko 530 m i danas služi kao privez čamaca i manjih brodica [21]. Na slici 19 označeno je područje novog korita rijeke Rječine (zelena boja) i Mrtvog kanala (crvena boja).



Slika 19: Područje novog korita rijeke Rječine (zelena boja) i Mrtvog kanala (crvena boja)

7. PROVEDENE ANALIZE OPASNOSTI OD POPLAVA U GRADU RIJEKI

Aktualni Plan upravljanja vodnim područjima i Plan upravljanja rizicima od poplava u Republici Hrvatskoj izrađen je na temelju odredbi Zakona o vodama i vrijedi za razdoblje od 2022. do 2027. godine. Prvi korak u pripremi i donošenju navedenih planova bila je izrada prethodne procjene rizika od poplava koja je donesena 2018. godine. U sklopu prethodne procjene određena su područja upravljanja, poplavni događaji, opasnosti, receptori rizika i provedena je procjena preliminarnog rizika od poplava. Na temelju rezultata prethodne procjene određena su područja s potencijalno značajnim rizicima od poplava u koje spada i grad Rijeka koja se nalazi u kategoriji vrlo visokog preliminarnog rizika [23].

Karte opasnosti od poplava za područje Republike Hrvatske izrađene su 2019. godine kao drugi korak u procesu pripreme i donošenja Plana upravljanja rizicima od poplava. Izrađene su karte za tri specifična poplavna scenarija (mala, srednja i velika vjerojatnost pojavljivanja) za sva područja s potencijalno značajnim poplavnim rizikom [24].

7.1. Prethodna procjena rizika od poplava

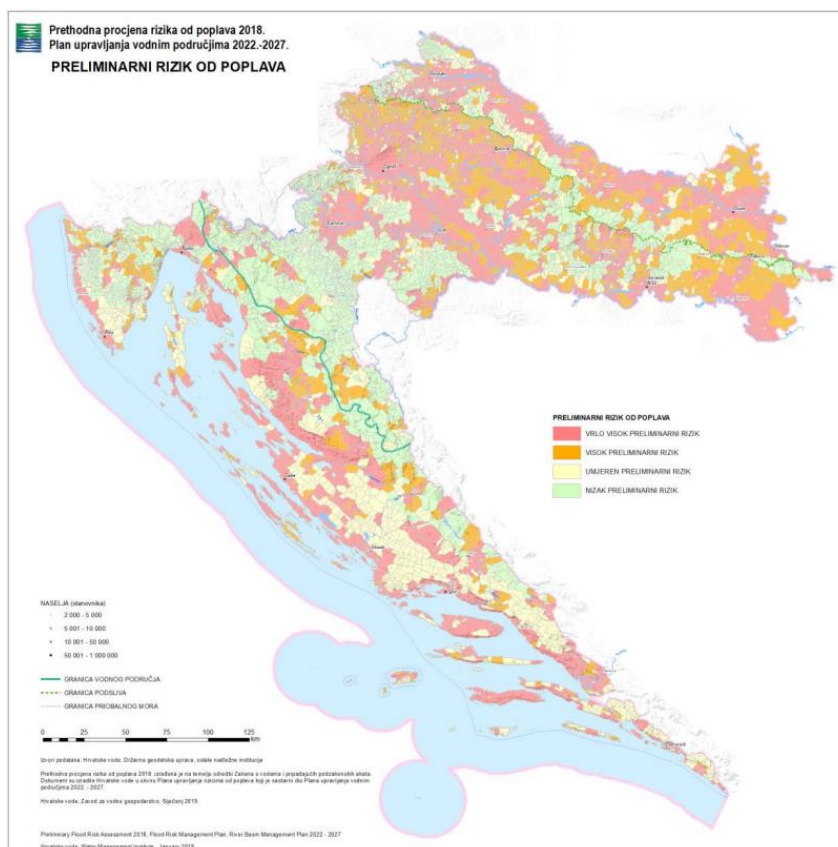
Prethodna procjena rizika od poplava izrađena je na temelju odredbi Zakon o vodama i Direktive o poplavama. Izrađena je od strane Hrvatskih voda kao prvi korak u izradi Plana upravljanja rizicima od poplava. Za potrebe izrade Prethodne procjene rizika od poplava 2018. godine usvojeni su već postojeći elementi koji su korišteni u Prethodnoj procjeni donesenoj 2013. godine. pri čemu su napravljena manja unaprjeđenja u vidu stečenih iskustva i dodatno prikupljenih podataka. Teritorij Republike Hrvatske podijeljen je na dva vodna područja - vodno područje rijeke Dunav i jadransko vodno područje (slika 20) [23].



Slika 20: Vodna područja i područja podslivova u Republici Hrvatskoj [23]

Na području primorsko-istarskih slivova, prioriteta područja zaštite su urbane sredine, turistička područja, prometnice i poljoprivredne površine. Najčešće su bujične poplave do kojih dolazi zbog jakih oborina koje padnu u kratkom vremenskom periodu. Dodatnu opasnost na kvarnerskom području predstavlja potencijalno zatrpavanje vodotoka materijalom iz klizišta [23].

Prilikom određivanja preliminarnog rizika, sagledava se mogućnost obrane pojedinog područja od poplava i različiti pristup obrani u smislu isplativosti i efikasnosti. Za sva područja za koja se utvrdi da posjeduju vrlo visok, visok i umjeren rizik od poplava, potrebno je napraviti karte opasnosti i rizika. Na slici 21 prikazani su rezultati procjene preliminarnog rizika od poplava sa označenim vrlo visokim (crvena boja), visokim (narančasta boja), umjerenim (žuta boja) i niskim (zelena boja) rizikom od poplava [23].



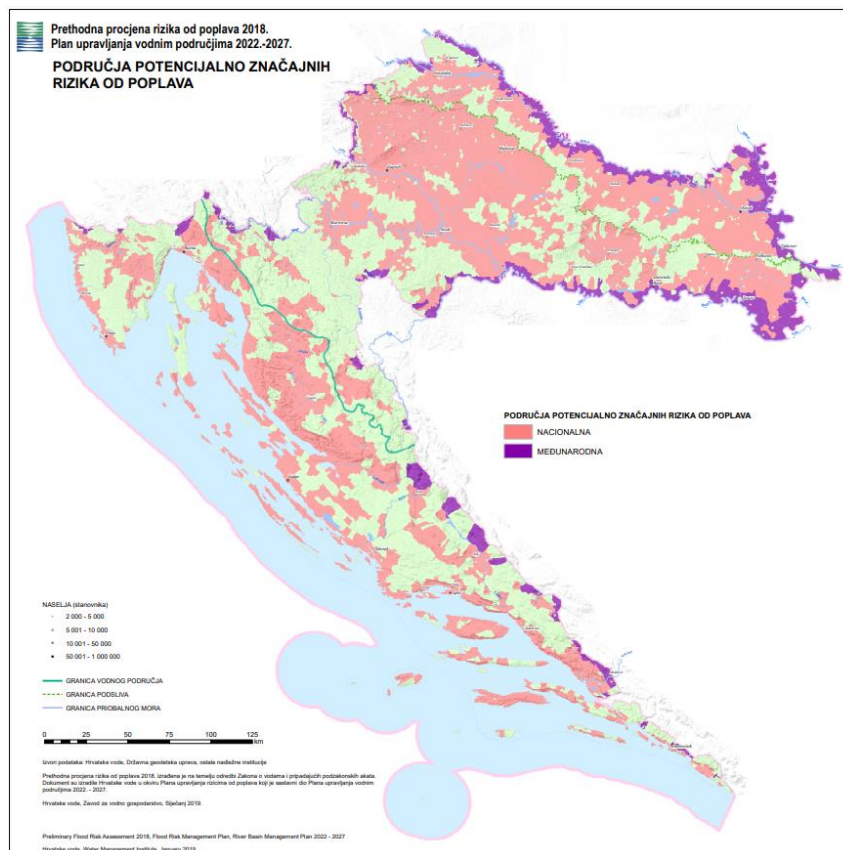
Slika 21: Karta preliminarnog procjene rizika od poplava [23]

Vrlo visok i visok poplavni rizik podrazumijeva da područje ne posjeduje skoro nikakav obrambeni mehanizam od poplava. U tom slučaju, nužno je izraditi detaljne karte opasnosti i rizika od poplava. Umjereni rizik od poplava zahtijeva izradu karata opasnosti i rizika od poplava koje su više indikativnog karaktera uz mogućnost izrade detaljnih karata [23]. Na slici 22 prikazano je uvećano područje grada Rijeke na karti preliminarnog procjene poplavnog rizika. Za veći dio grada Rijeke procijenjen je vrlo visok rizik od poplava.



Slika 22: Područje grada Rijeke na karti preliminarnog procjene rizika od poplava [23]

Posljednji korak u izradi prethodne procjene je određivanje područja s potencijalno značajnim rizikom od poplava. Područja s visokim i vrlo visokim preliminarnim rizikom su svrstana pod područja s potencijalno značajnim rizikom od poplava, dok ona s niskim i umjerenim rizikom nisu uvrštena u prijedlog [23]. Na slici 23 vidljiva su nacionalna (crvena boja) i međunarodna (ljubičasta boja) područja potencijalno značajnih rizika od poplava.



Slika 23: Karta područja potencijalno značajnih rizika od poplava [23]

Područje grada Rijeke označeno je crvenom bojom čime je svrstano u kategoriju nacionalnog područja potencijalno značajnog rizika od poplava (slika 24).



Slika 24: Grad Rijeka na karti područja potencijalno značajnih rizika od poplava [23]

7.2. Karte opasnosti od poplava

Karte opasnosti od poplava izrađene 2019. godine značajno su dopunjene u odnosu na one iz 2013. Kartirana su sva područja potencijalno značajnog rizika od poplava prema Prethodnoj procjeni rizika od poplava izrađenoj 2018. godine. Za svako područje rizika su, ovisno o relevantnosti, kartirane sljedeće vrste poplava [24]:

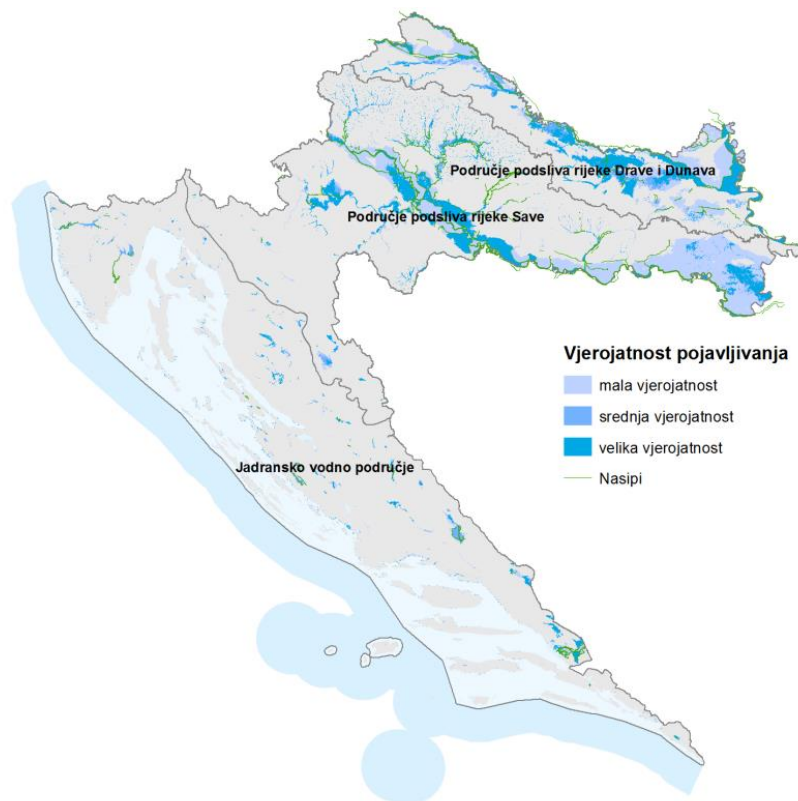
- fluvijalne (riječne i bujične),
- poplave uzrokovane visokom razinom mora,
- poplave krških područja uzrokovane podzemnim vodama,
- poplave nastale uslijed izlivanja vode iz akumulacija i umjetnih kanala uslijed oštećenja ili pucanja hidrotehničkih građevina,
- poplave koje nastaju uslijed gubitka funkcije sustava za zaštitu od poplava na velikim rijekama, nizinskim retencijama i velikom dijelu brdskih retencija.

Kartiranje je provedeno za 3 specifična poplavna scenarija (visoka, srednja i niska vjerojatnost pojavljivanja) u mjerilu 1:25 000. Analize su provedene za nešto više od 34.000 km², što čini više od polovice kopnenog teritorija Republike Hrvatske [24].

Iako su u Prethodnoj procjeni rizika od poplava (2018.) oborine navedene kao jedan od relevantnih izvora plavljenja, one nisu obuhvaćene kartama opasnosti jer ih u trenutku izrade nije bilo moguće izraditi za zadovoljavajućim stupnjem pouzdanosti [24].

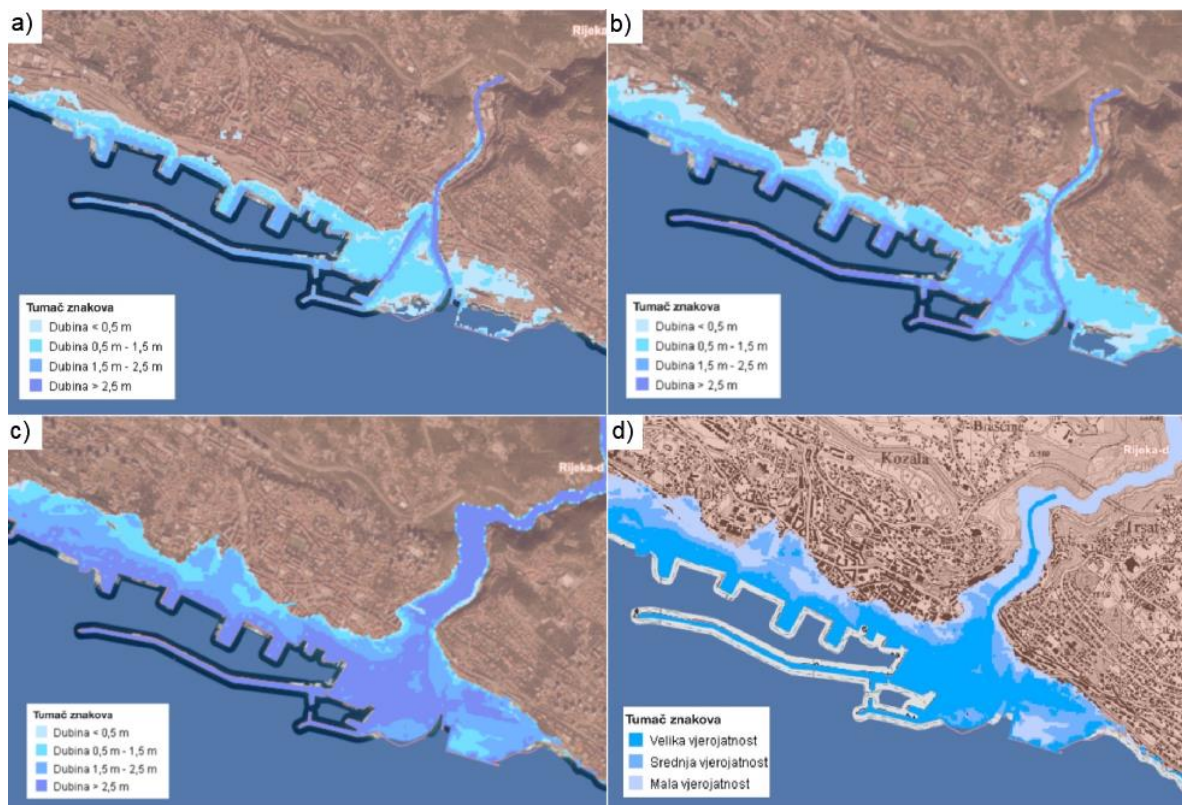
Za izradu navedenih karata korištene su hidrometeorološke podloge Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ), topografske podloge Državne geodetske uprave (DGU) i mareografske podloge Hrvatskog hidrografskog instituta [24].

Na slici 25 prikazana je karta opasnosti od poplava po vjerojatnosti pojavljivanja za teritorij Republike Hrvatske. Najugroženija su područja podsliva rijeke Save, Drave i Dunava. Jadransko vodno područje, kojem pripada i grad Rijeka, površinom je znatno manje ugroženo od poplava [24].



Slika 25: Karta opasnosti od poplava male, srednje i velike vjerojatnosti za područje RH [24]

Na slici 26 prikazane su karte opasnosti od poplava za područje grada Rijeke, izrađene u sklopu Plana upravljanja rizicima od poplava. Prikazane su karte opasnosti od poplava za svaki od 3 scenarija te karta opasnosti po vjerojatnosti pojavljivanja [21].



Slika 26: Karte opasnosti od poplava (dubine vode) za područje grada Rijeke za: a) veliku vjerojatnost pojavljivanja, b) srednju vjerojatnost pojavljivanja, c) malu vjerojatnost pojavljivanja i d) po vjerojatnosti pojavljivanja [21]

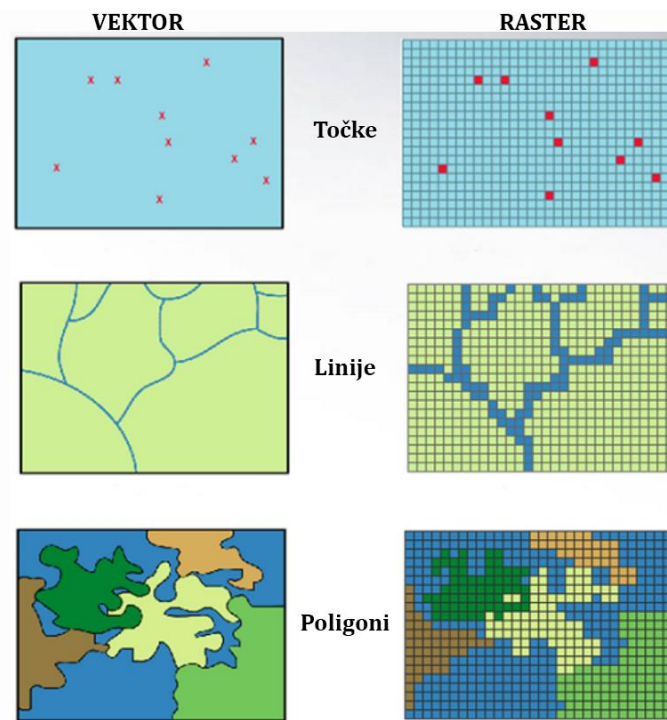
8. METODOLOGIJA ANALIZE

Predmet ovog diplomskog rada je hidrološko-hidraulička analiza opasnosti od poplava u gradu Rijeci. Prvi korak u provedbi analize bio je prikupiti potrebne podatke i podloge. Za potrebe izrade korišten je digitalni model terena rastera 5 x 5 m, za šire područje grada Rijeke. Također, korištene su karte pokrova zemljišta i gustoće nepropusnosti podloge sa Copernicus Land Monitoring Service-a [29]. Kako bi se definirale oborine korištene su HTP krivulje i oblik projektnog pljuska za područje grada Rijeke.

Za obradu, uređivanje i generiranje podloga korišten je računalni program QGIS verzije 3.30.2. Simulacije poplava provedene su u programu HEC-RAS 6.4 za povratne periode 5, 25 i 100 godina. Na temelju provedenog istraživanja izrađene su karte opasnosti. Za svaki scenarij izrađene su dvije karte, jedna sa prikazom brzina, a druga sa prikazom dubina vode.

8.1. QGIS

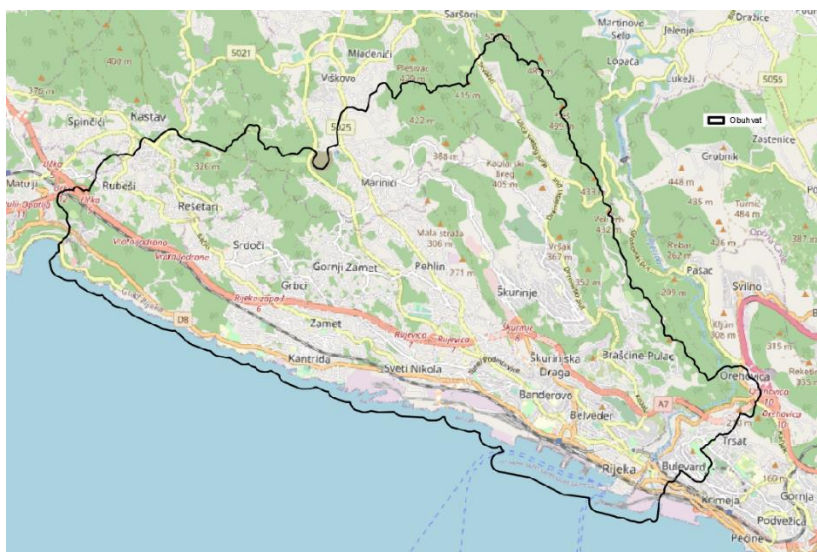
QGIS je računalni GIS alat otvorenog koda koji se koristi za prikupljanje, upravljanje i analizu geopodataka. Tehnologija geografskog informacijskog sustava upotrebljava se za kombiniranje geografskih podataka s ostalim vrstama podataka i njihovu vizualizaciju na karti [25]. Drugim riječima, GIS nam omogućuje izradu karata s većim brojem slojeva koji mogu biti zapisani u vektorskom ili rasterskom obliku. Vektorski zapis podataka koristi geometriju poput točaka, linija i poligona te služi za modeliranje diskretnih podataka. S druge strane, rasterski podaci se sastoje od mreže ćelija jednakih dimenzija pri čemu se u svakoj ćeliji sprema pojedinačna vrijednost. Koriste se za prikaz kontinuiranih podataka poput temperature, tlaka, visinskih točaka, itd. [26]. Na slici 27 prikazana je razlika između vektorskog i rasterskog zapisa podataka.



Slika 27: Razlika između vektorskog i rasterskog zapisa podataka [27]

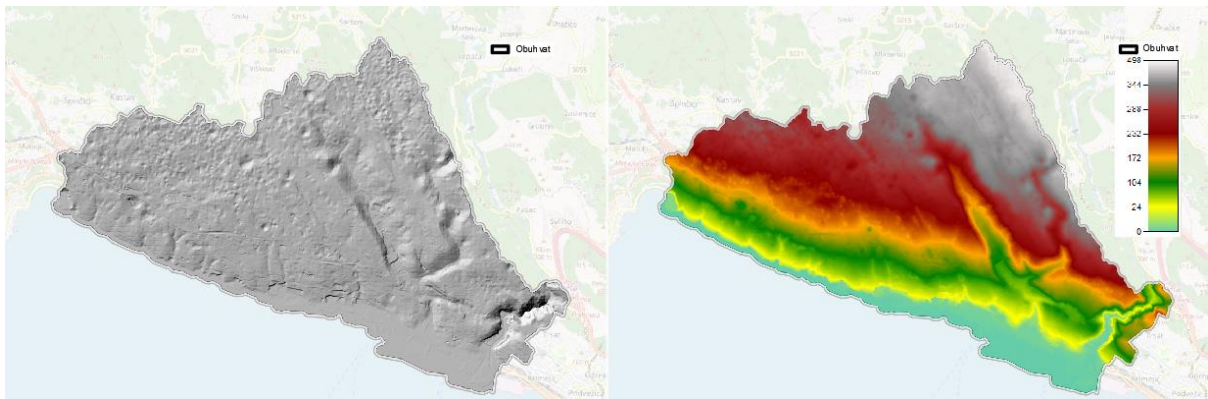
8.2. Priprema podloga

Digitalni model terena podrazumijeva skup točaka u prostoru koje imaju određen položaj i visinu. Za provedbu analize korišten je digitalni model terena rastera 5 x 5 m za šire područje grada Rijeke koji je izrađen iz digitalnog modela reljefa od Državne geodetske uprave. Prvi korak bio je odrediti obuhvat unutar kojeg će se provoditi analiza (slika 28).



Slika 28: Obuhvat područja analize na OpenStreetMap-u

Granice analiziranog područja vezane su uz granice topografskog sliva, a kreću se zapadno do Općine Matulji, istočno do Orehovice, uključujući dio rijeke Rječine te sjeverno do Općine Viškovo. Južna granica modela postavljena je na obalnu liniju. Površina određenog sliva iznosi 38 km². Na slici 29 prikazan je digitalni model terena za područje obuhvata, rezolucije 5 m.



Slika 29: Digitalni model terena za područje obuhvata

Sljedeći korak bio je definirati podslivove i generirati smjerove otjecanja kojima voda površinski otječe u slučaju jakih oborina, što je vidljivo na slici 30.



Slika 30: Generirani podslivovi i smjerovi otjecanja oborinskih voda unutar obuhvata

U svrhu provedbe hidrološko-hidrauličke analize otjecanja oborinskih voda, odnosno opasnosti od poplava, prikupljene su i karte zemljišnog pokrova (Urban Atlas) te karte gustoće nepropusnosti podloge (Imperviousness Density) sa Copernicus Land Monitoring

Service-a [29]. Navedene podloge korištene su za generiranje karata infiltracije i karata hrapavosti podloge.

Na temelju karte zemljišnog pokrova Urban Atlas identificirano je 25 klasa pokrova unutar obuhvaćenog područja (slika 31). Za opis hrapavosti podloge korišten je Manningov koeficijent hrapavosti. U tablici 2 dan je prikaz različitih klasa zemljišnog pokrova sa usvojenim vrijednostima Manningovog koeficijenta hrapavosti n koji je preuzet iz projekta STREAM [17].

Tablica 2: Vrijednosti usvojenog koeficijenta hrapavosti za klase pokrova zemljišta (prema [17])

Boja	Klasa	Kod klase	n
	Cjelovita urbana područja (>80% površine)	11100	0.03
	Nepovezana urbana područja veće gustoće (50-80%)	11210	0.035
	Nepovezana urbana područja srednje gustoće (30-50%)	11220	0.04
	Nepovezana urbana područja manje gustoće (10-30%)	11230	0.045
	Nepovezana urbana područja vrlo male gustoće (<10%)	11240	0.05
	Izdvojena područja	11300	0.05
	Industrijski, komercijalni, javni, vojni i privatni objekti	12100	0.035
	Brze ceste i pripadajuće zemljište	12210	0.026
	Ostale ceste i pripadajuće zemljište	12220	0.026
	Željeznice i pripadajuće zemljište	12230	0.032
	Lučke površine	12300	0.03
	Zračne luke	12400	0.03
	Mjesta eksploatacija mineralnih sirovina i odlagališta otpada	13100	0.093
	Gradilišta	13300	0.093
	Područja bez trenutne namjene	13400	0.093
	Zelene gradske površine	14100	0.048
	Športsko rekreacijske površine	14200	0.049
	Obradivo zemljišta, jednogodišnji nasadi	21000	0.054
	Višegodišnji nasadi	22000	0.057
	Pašnjaci	23000	0.047
	Šume	31000	0.138
	Grmolike i travnate, prirodne biljne zajednice	32000	0.091
	Otvorene površine sa malo ili bez vegetacije	33000	0.035
	Močvarno područje	40000	0.05
	Vodene površine	50000	0.026

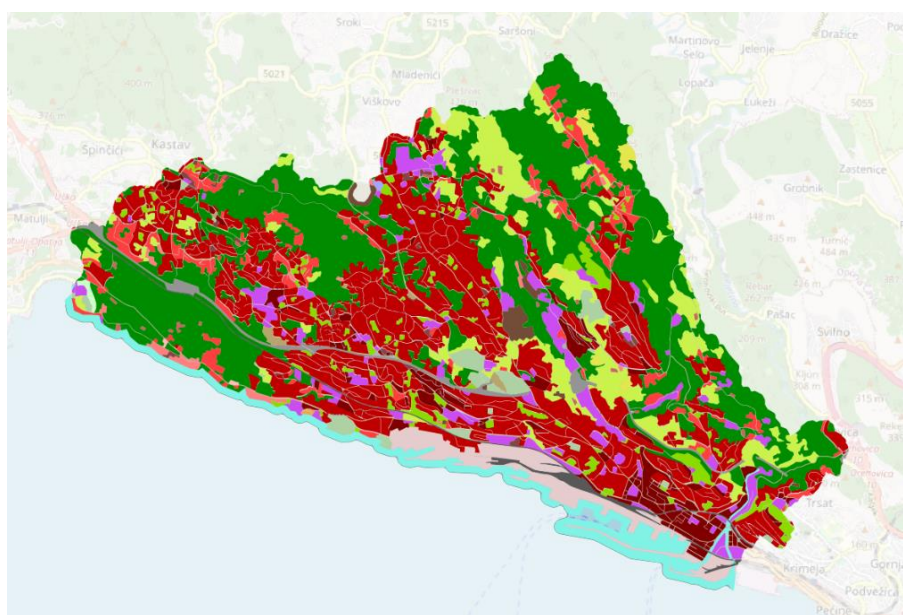
Infiltracijski kapacitet podloge opisan je pomoću CN broja krivulje prema NRCS metodologiji [USDA, 2017] te su svakoj klasi pokrova pridodane odgovarajuće vrijednosti CN broja, prema metodologiji STREAM projekta [17]. U tablici 3 prikazane su vrijednosti

CN broja krivulje za svih 25 klasa zemljišnog pokriva i četiri hidrološke grupe tla. Za provedbu ove analize odabrana je hidrološka grupa tla B kategorije.

Tablica 3: Vrijednosti usvojenog CN broja krivulje za klase pokriva zemljišta

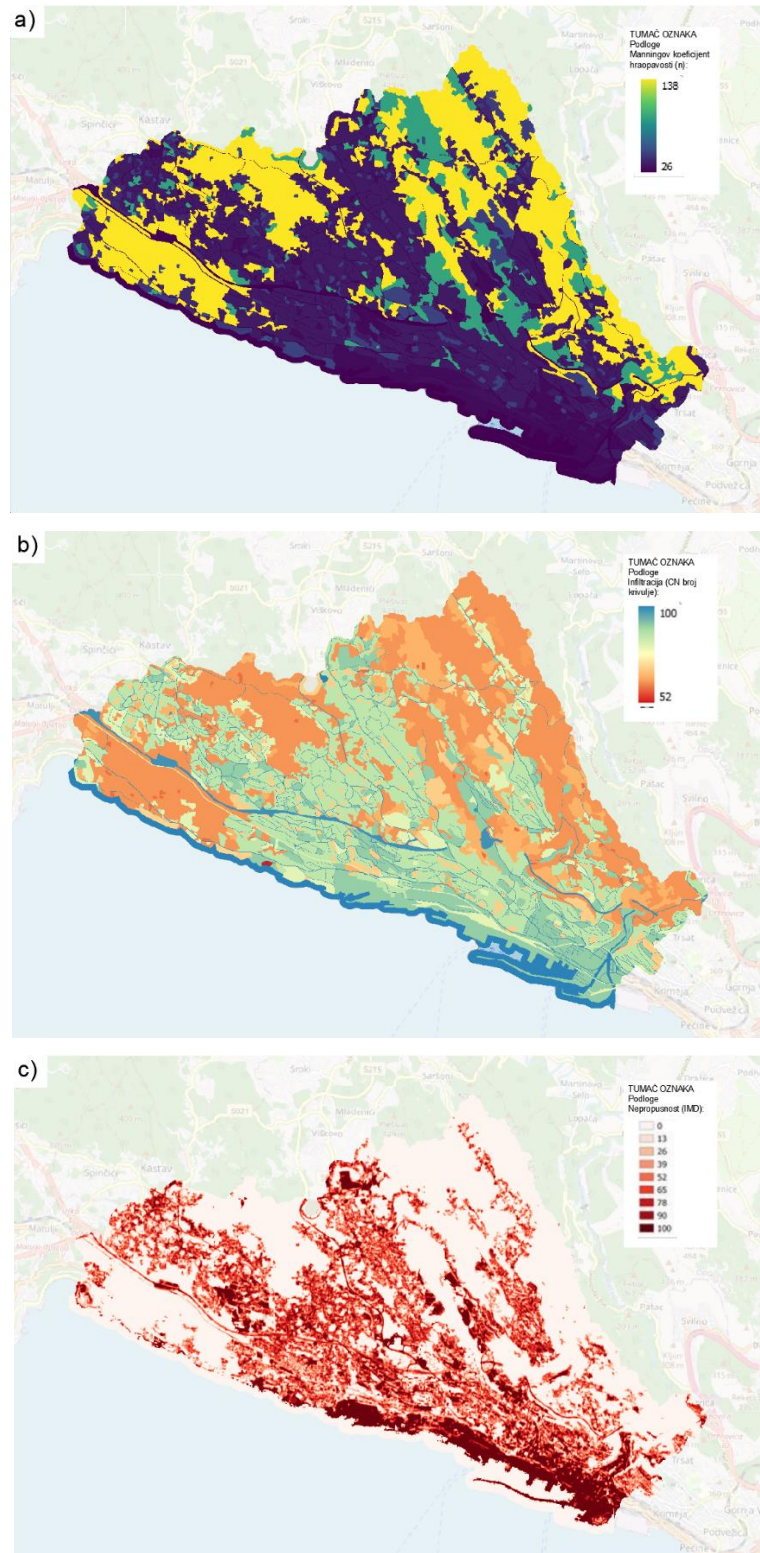
Boja	Klasa	Kod klase	CN A	CN B	CN C	CN D
	Cjelovita urbana područja (>80% površine)	11100	85	90	93	94
	Nepovezana urbana područja veće gustoće (50-80%)	11210	77	85	90	92
	Nepovezana urbana područja srednje gustoće (30-50%)	11220	68	80	87	90
	Nepovezana urbana područja manje gustoće (10-30%)	11230	54	70	80	85
	Nepovezana urbana područja vrlo male gustoće (<10%)	11240	39	59	72	80
	Izdvojena područja	11300	39	59	72	80
	Industrijski, komercijalni, javni, vojni i privatni objekti	12100	85	90	93	94
	Brze ceste i pripadajuće zemljište	12210	98	98	98	98
	Ostale ceste i pripadajuće zemljište	12220	98	98	98	98
	Željeznice i pripadajuće zemljište	12230	69	80	85	88
	Lučke površine	12300	85	90	93	94
	Zračne luke	12400	85	90	93	94
	Mjesta eksploatacija mineralnih sirovina i odlagališta otpada	13100	49	69	79	84
	Gradilišta	13300	49	69	79	84
	Područja bez trenutne namjene	13400	49	69	79	84
	Zelene gradske površine	14100	49	69	79	84
	Športsko rekreacijske površine	14200	67	80	87	91
	Obradivo zemljišta, jednogodišnji nasadi	21000	52	69	79	84
	Višegodišnji nasadi	22000	28	52	67	75
	Pašnjaci	23000	44	63	75	85
	Šume	31000	38	62	75	81
	Grmolike i travnate, prirodne biljne zajednice	32000	45	65	75	80
	Otvorene površine sa malo ili bez vegetacije	33000	70	81	88	92
	Močvarno područje	40000	100	100	100	100
	Vodene površine	50000	100	100	100	100

Na slici 31 prikazane su klase pokriva zemljišta na karti Urban Atlas.



Slika 31: Klase zemljišnog pokriva (Urban Atlas)

Reklasifikacijom rastera zemljišnog pokrova generirane su karte Manningovog koeficijenta hrapavosti i karte infiltracije. Na slici 32 prikazane su generirane podloge i preuzeta karta nepropusnosti podloge, rezolucije 10 m.



Slika 32: Generirane i prikupljane podloge za procjenu opasnosti od poplava: a) Manningov koeficijent hrapavosti ($10^{-3} \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$), b) CN broj krivulje i c) nepropusnost podloge (%)

8.3. Meteorološke podloge

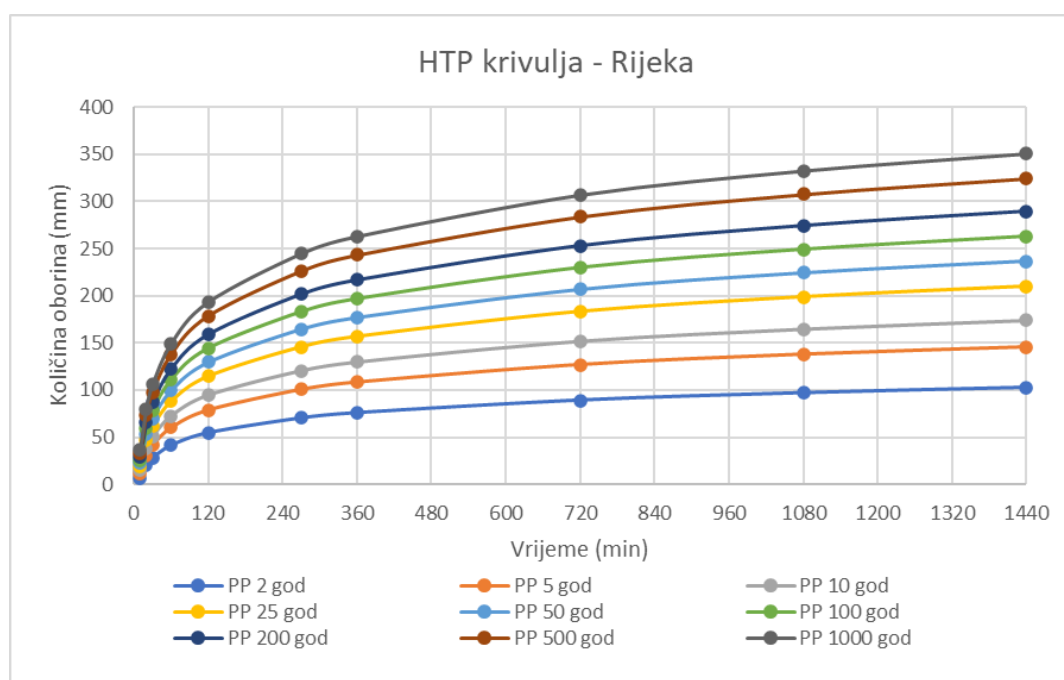
Korišteni su prikupljeni podaci o oborinama u vidu HTP krivulja i projektnog pljuska za mjernu postaju Rijeka (šifra 230). Dostupni ulazni podaci u vidu HTP-krivulje izraženi su za povratne periode 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 i 1000 godina te za trajanja od 10, 20, 30, 60, 120, 180, 270, 360, 720, 1080 i 1440 minuta.

Tablični prikaz HTP krivulja (Količina oborine - trajanje - povratni period) za mjernu postaju Rijeka prikazan je u tablici 4.

Tablica 4: Tablični prikaz HTP krivulja različitih povratnih perioda za mjernu postaju Rijeka

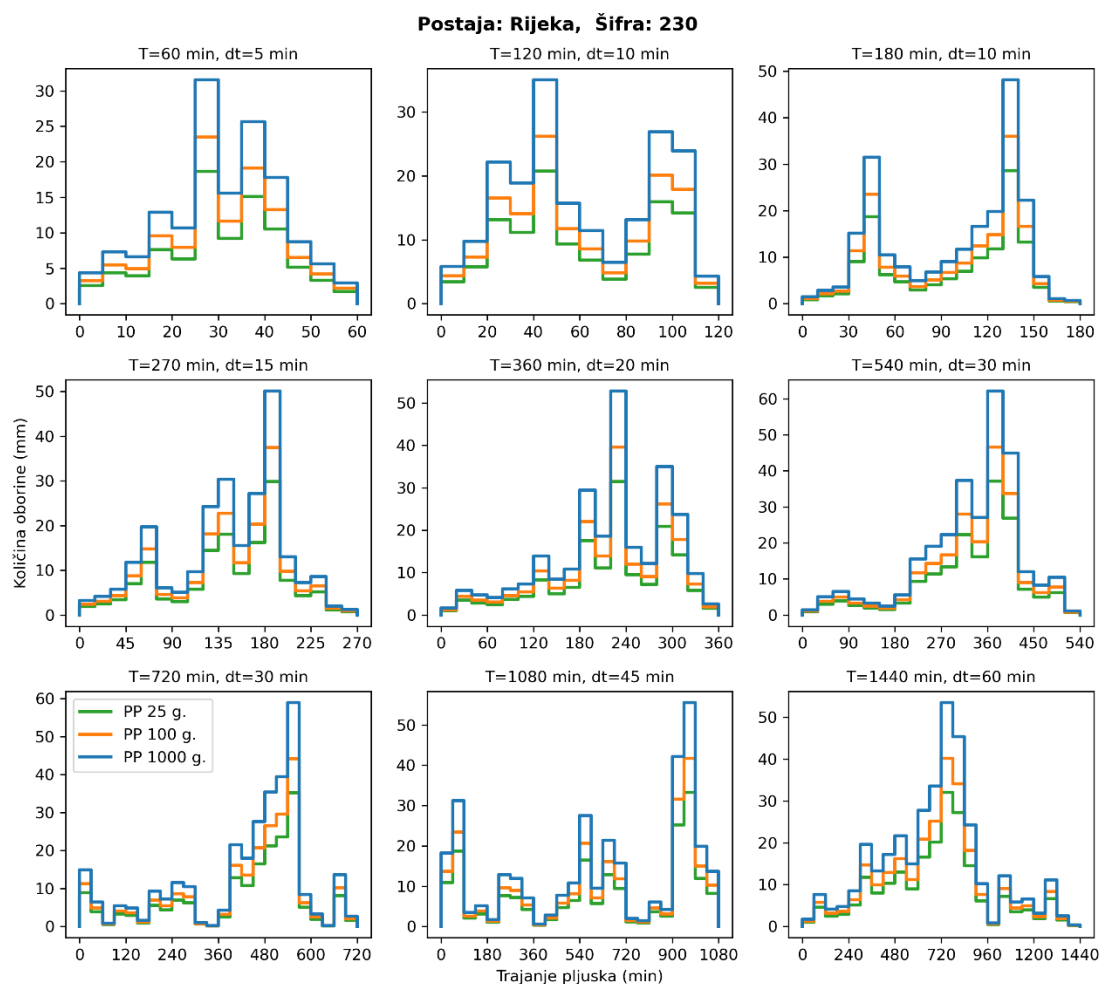
Trajanje (min)	PP 2 god	PP 5 god	PP 10 god	PP 25 god	PP 50 god	PP 100 god	PP 200 god	PP 500god	PP 1000 god
10	7	12.1	15.5	19.7	22.9	26	29.2	33.3	36.4
20	20.3	30.7	37.6	46.3	52.7	59.1	65.5	73.9	80.2
30	28.1	41.6	50.5	61.8	70.2	78.4	86.7	97.6	105.9
60	41.4	60.2	72.6	88.3	100	111.5	123	138.2	149.7
120	54.7	78.8	94.7	114.8	129.8	144.6	159.4	178.8	193.6
270	70.3	100.6	120.6	145.9	164.7	183.3	201.9	226.3	244.9
360	75.8	108.3	129.8	156.9	177	197	216.9	243.2	263
720	89.1	126.9	151.9	183.4	206.8	230.1	253.2	283.8	306.9
1080	96.9	137.8	164.8	198.9	224.3	249.4	274.5	307.6	332.5
1440	102.5	145.5	174	210	236.7	263.2	289.6	324.4	350.7

Na slici 33 prikazana je HTP krivulja za mjernu postaju Rijeka u grafičkom obliku.



Slika 33: Grafički prikaz HTP krivulja različitih povratnih perioda za mjernu postaju Rijeka

Pluviogrami projektnog pljuska definiraju sintetičke oborine različitog trajanja (60, 120, 180, 270, 360, 540, 720, 1080 i 1440 minuta) za različite povratne periode (2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 i 1000 godina). Primjer projektnog pljuska (pluviograma) za tri scenarija (povratni period 25, 100 i 1000 godina) za mjernu postaju Rijeka, prikazan je na slici 34.



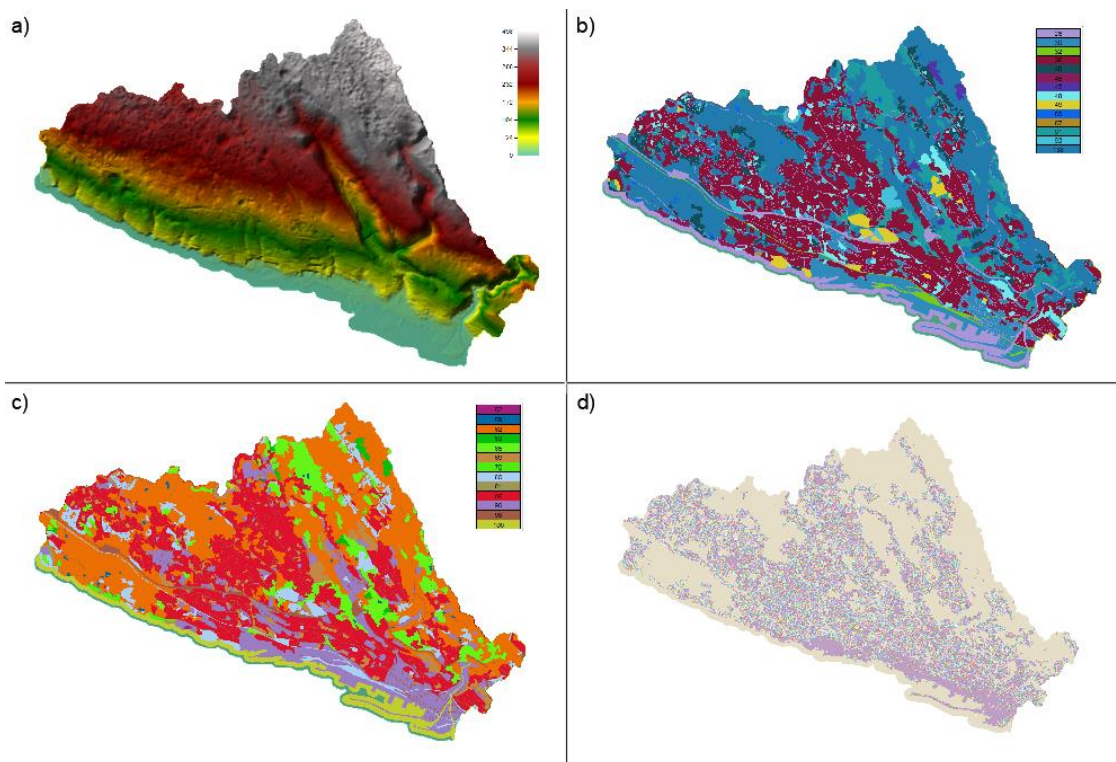
Slika 34: Pluviogram projektnog pljuska za mjernu postaju Rijeka

8.4. Hidraulički proračun (HEC-RAS)

Hidraulički proračun proveden je u računalnom programu HEC-RAS 6.4 (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System). Program je razvijen od strane vojske Sjedinjenih Američkih država, a za javnost je postao dostupan 1995. godine [21]. Program omogućava izradu hidrauličkih proračuna jednodimenzijskog (1D) i dvodimenzijskog (2D) stacionarnog i nestacionarnog toka površinskih voda [17].

Uspostava matematičkog modela u HEC-RAS-u sastojala se od sljedećih koraka [17]:

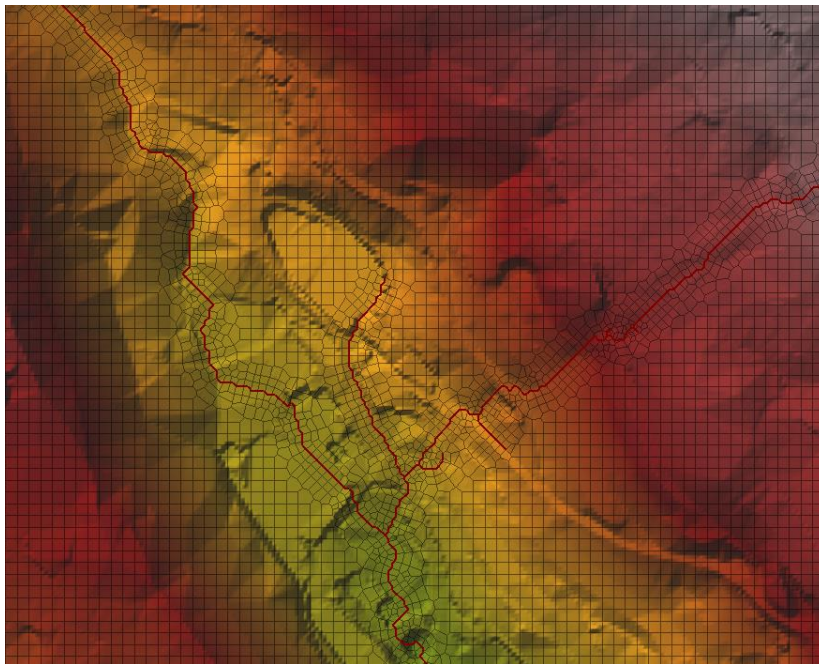
- a) definiranja digitalnog modela terena,
- b) definiranja prostorne raspodjele hrapavosti,
- c) definiranja parametara procesa infiltracije,
- d) definiranja nepropusnosti podloge,
- e) definiranja domene modela i generiranja proračunske mreže,
- f) definiranja rubnih uvjeta,
- g) definiranja parametara numeričkog proračuna te
- h) definiranja scenarija.



Slika 35: Primjer definiranih prostornih podloga u HEC-RAS modelu: a) digitalni model terena, b) prostorna raspodjela Manningovog koeficijenta hrapavosti, c) prostorna raspodjela CN brojeva kojima se definira proces infiltracije u podlogu, d) prostorna gustoća izgrađenosti (nepropusnost)

Na slici 35 prikazan je primjer definiranog digitalnog modela terena, prostorne raspodjele koeficijenta hrapavosti, prostorne raspodjele CN brojeva te prostorne gustoće izgrađenosti (nepropusnosti podloge).

Granica prostorne domene modela proširena je za 50 m u odnosu na obuhvat kako bi se obuhvatili procesi koji se događaju na rubovima slivnog područja. Za potrebe provedbe hidrauličkog proračuna nestacionarnog tečenja bilo je potrebno definirati oblik i veličinu proračunske mreže. Odabrana je strukturirana kvadratna proračunska mreža veličine ćelija 15 x 15 m. Na ovaj način definirana je proračunska mreža koja se sastoji od 186 483 ćelije. Sljedeći korak bio je ubaciti generirane prirodne kanale otjecanja površinskih voda što je utjecalo na konačan oblik mreže. Na slici 36 prikazana je nestrukturirana proračunska mreža s ćelijama promjenjivog oblika, korištena za provedbu proračuna nestacionarnog tečenja.



Slika 36: Digitalni model terena s prikazom proračunske mreže

Na modelu su definirana tri rubna uvjeta. Dva rubna uvjeta su zadana na granicama domene, dok je treći zadan po cijeloj površini domene. Na kopnenoj granici domene zadan je uvjet normalne dubine uz prosječni nagib terena, dok je na morskoj granici domene zadana srednja razina mora od +0,5 m n.m. Po cijeloj površini domene zadana je prostorno homogena, ali vremenski promjenjiva oborina u obliku projektnog pljuska [17].

U svrhu analize toka korišten je nestacionarni 2D proračun te sustav jednadžbi koji je opisan metodom difuznog vala uz vremenski promjenjiv vremenski korak. Za implicitni dio proračuna korišten je parametar $\Theta = 1,0$, dok je za rješavanje matrica korišten PARDISO algoritam [17].

Analize opasnosti provedene su za tri specifična scenarija poplava (veliku, srednju i malu vjerojatnost pojavljivanja), pri čemu je za svaki scenarij provedeno pet proračuna za trajanja oborine od 1, 3, 6, 12 i 24 sata. Ukupno je dakle provedeno 15 simulacija. U tablici 5 prikazani su odabrani scenariji i trajanja oborine za analizu opasnosti od poplava.

Tablica 5: Odabrani scenariji i trajanja oborine za analizu opasnosti od poplava

Scenarij	Povratni period (PP)	Trajanje (h)
Poplave velike vjerojatnosti	5	1, 3, 6, 12, 24
Poplave srednje vjerojatnosti	25	1, 3, 6, 12, 24
Poplave male vjerojatnosti	100	1, 3, 6, 12, 24




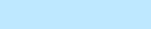
Rezultat hidrauličkog proračuna u HEC-RAS-u je vremenski zapis dinamike površinskog otjecanja u obliku zabilježenih dubina i brzina vode. Dobiveni rezultati zatim su vraćeni natrag u QGIS, gdje su izrađene karte opasnosti od poplava.

8.5. Karte dubine i brzine vode

Konačan rezultat provedene analize dan je u obliku anvelope maksimalnih zabilježenih vrijednosti dubina i brzina vode za svaki navedeni scenarij (ukupno 6 karata opasnosti). Prilikom izrade karata opasnosti, korištene su smjernice za izradu istih.









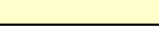
Za izradu karata opasnosti s prikazom dubina vode, korišteni su rasponi dubina i boje za označavanje koje su propisane smjernicama. U tablici 6 prikazani su korišteni razredi dubine vode i njima pridružene boje u RGB formatu.

Tablica 6: Korišteni razredi dubine vode i pripadajuće boje u RGB formatu (prema [15])

Dubina vode [m] razredi:	Crvena boja (R)	Zelena boja (G)	Plava boja (B)	Izgled boje
> 2.5	122	142	245	
1.5-2.5	115	178	255	
0.5-1.5	115	223	255	
<0.5	190	232	255	

Iste smjernice su korištene za izradu karata opasnosti s prikazom brzina vode. Brzine su podijeljene u 9 razreda te je svakom razredu pridružena boja sukladno smjernicama. U tablici 7 prikazani su korišteni razredi brzine vode i njima pridružene boje u RGB formatu.

Tablica 7: Korišteni razredi brzine vode i pripadajuće boje u RGB formatu (prema [15])

Brzina toka [m/s] razredi:	Crvena boja (R)	Zelena boja (G)	Plava boja (B)	Izgled boje
> 2	128	0	38	
1.75-2	189	0	38	
1.5-1.75	227	26	28	
1.25-1.5	252	78	42	
1-1.25	253	141	60	
0.75-1	254	178	76	
0.5-0.75	254	217	118	
0.25-0.5	255	237	168	
<0.25	255	255	204	

Izrađene karte opasnosti prikazane su u sljedećem poglavlju.

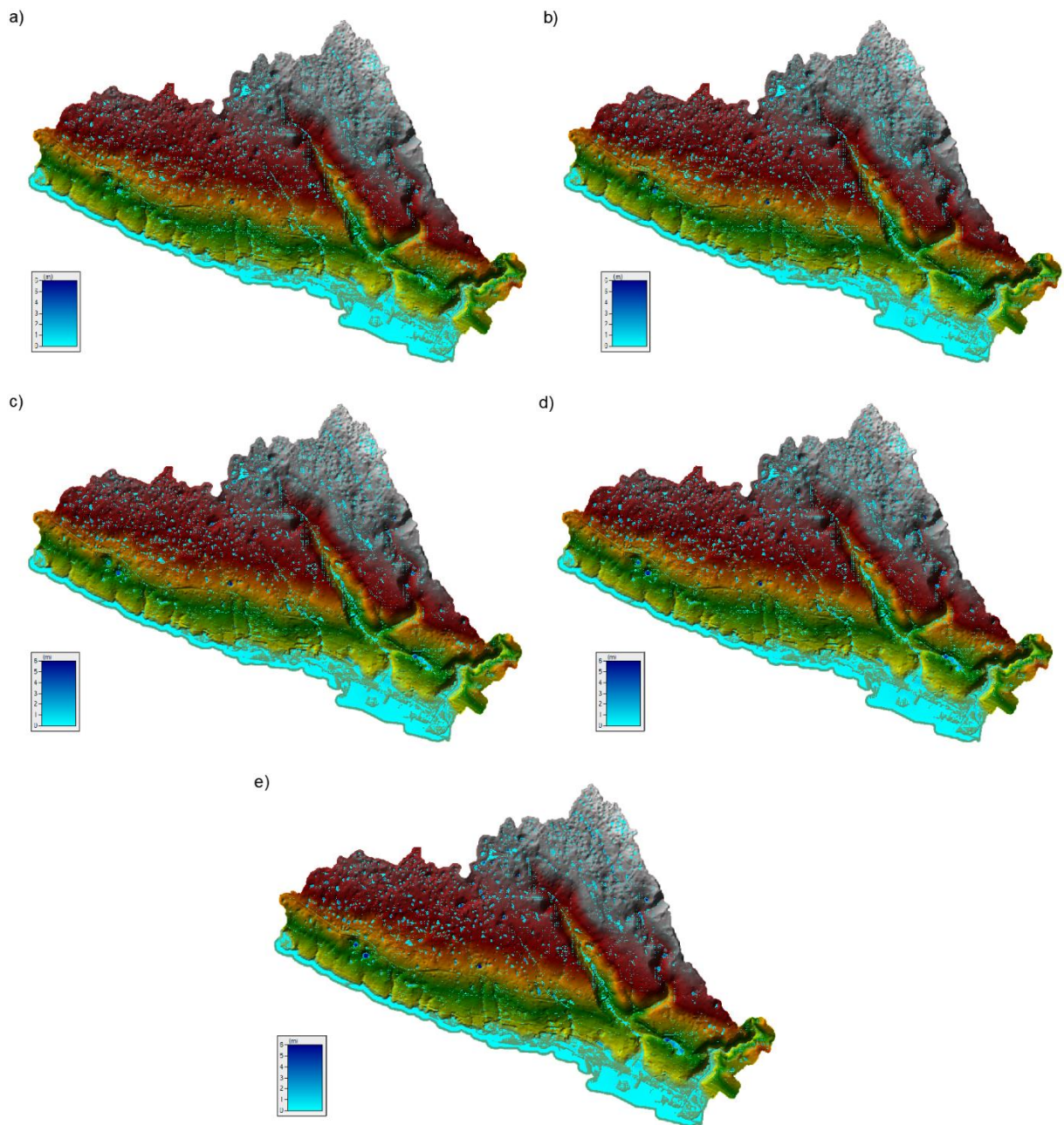
9. REZULTATI

Provedbom simulacija dobiven je vremenski zapis dinamike površinskog otjecanja u obliku dubina i brzina vode. Na temelju dobivenih podataka napravljene su karte opasnosti od poplava za svaki od navedenih scenarija. Rezultat je izražen kao anvelopa maksimalnih zabilježenih vrijednosti dubina i brzina vode.

9.1. Provedene simulacije

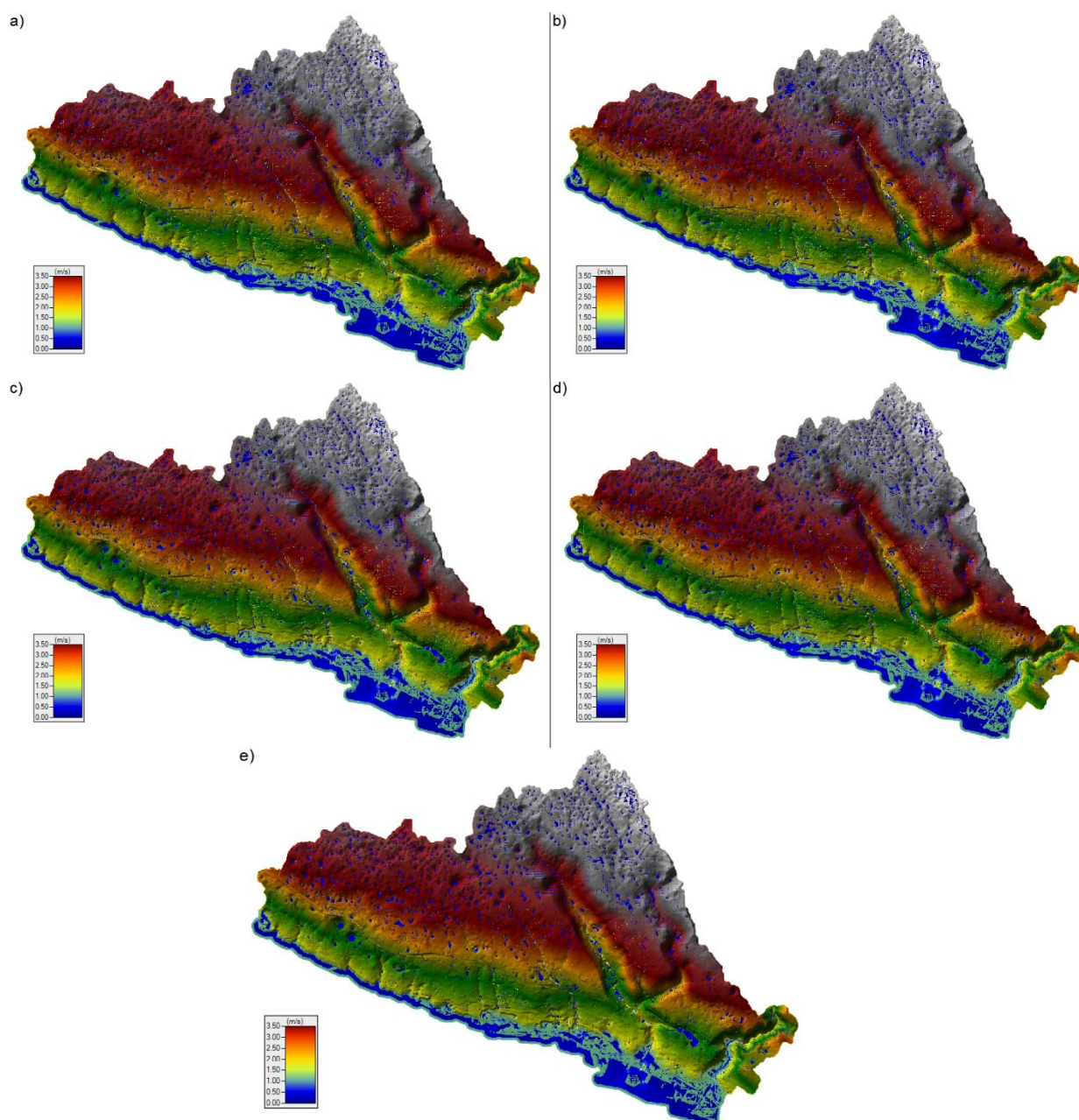
Simulacije poplava provedene su za veliku, srednju i malu vjerojatnost pojavljivanja, pri čemu je za svaki scenarij provedeno pet proračuna i to za trajanja oborine od 1, 3, 6, 12 i 24 sata. Rezultati simulacija prikazani su na digitalnom modelu terena sa prikazom maksimalnih zabilježenih dubina i brzina vode za svaki scenarij i svako navedeno trajanje oborine.

Na slici 37 prikazan je rezultat simulacija na modelu terena s prikazanim maksimalnim dubinama vode (m) za veliku vjerojatnost pojavljivanja (PP 5 godina) i trajanje oborine od 1, 3, 6, 12 i 24 sata.



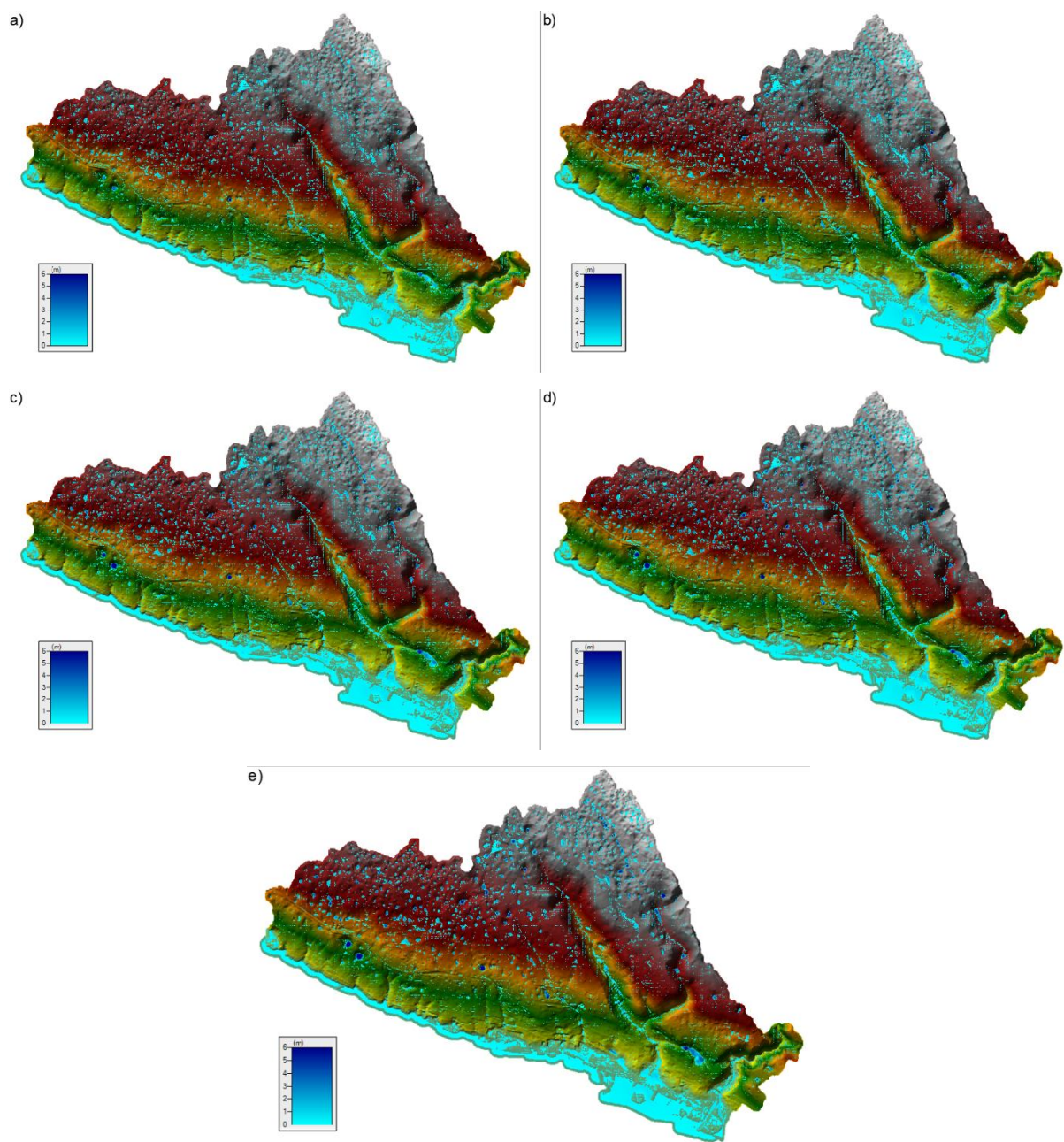
Slika 37: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih dubina vode (m) za veliku vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata

Na slici 38 prikazan je rezultat simulacija na modelu terena s prikazanim maksimalnim brzinama vode (m/s) za veliku vjerojatnost pojavljivanja (PP 5 godina) i trajanje oborine od 1, 3, 6, 12 i 24 sata.



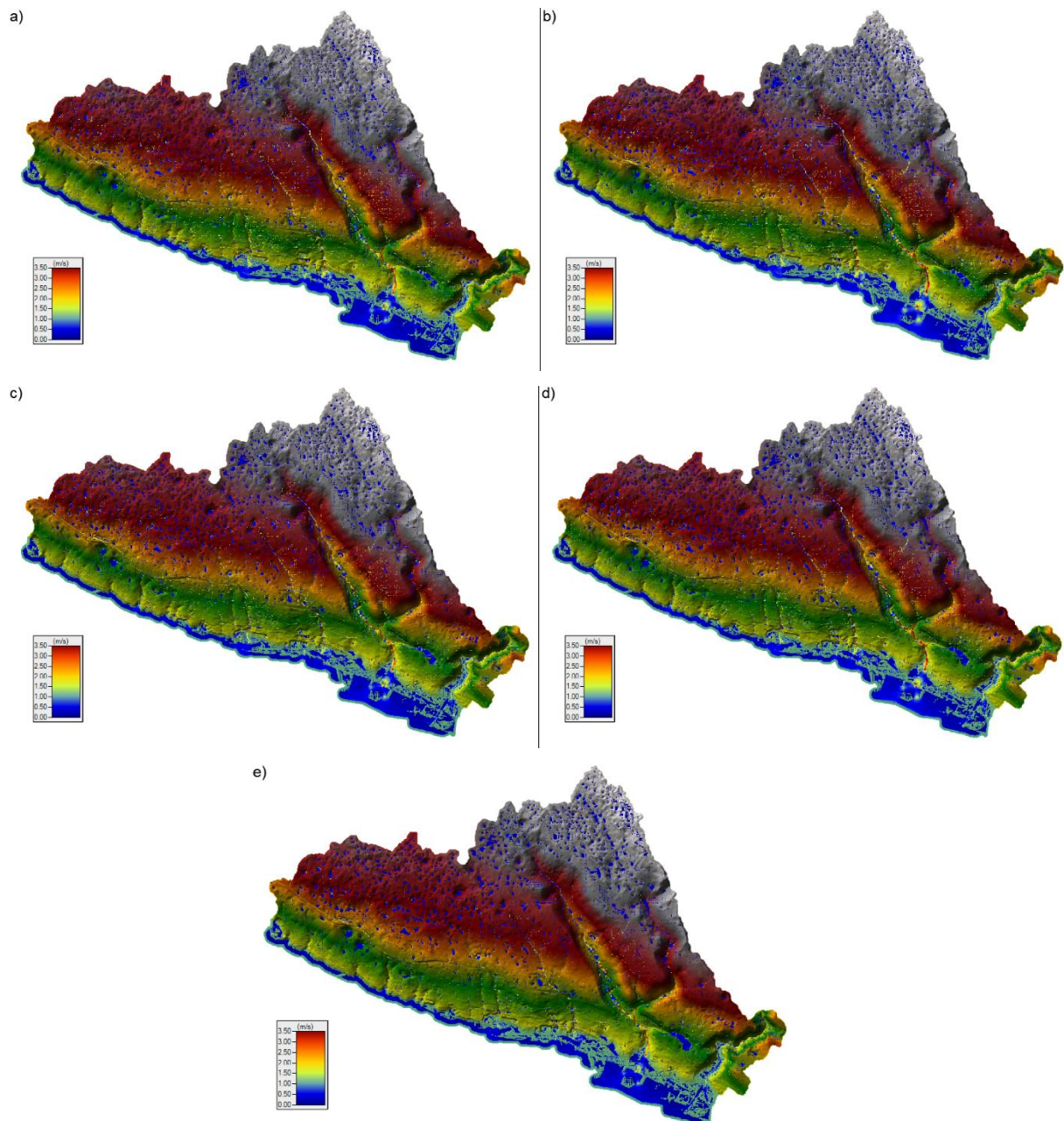
Slika 38: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih brzina vode (m/s) za veliku vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata

Na slici 39 prikazan je rezultat simulacija na modelu terena s prikazanim maksimalnim dubinama vode (m) za srednju vjerojatnost pojavljivanja (PP 25 godina) i trajanje oborine od 1, 3, 6, 12 i 24 sata.



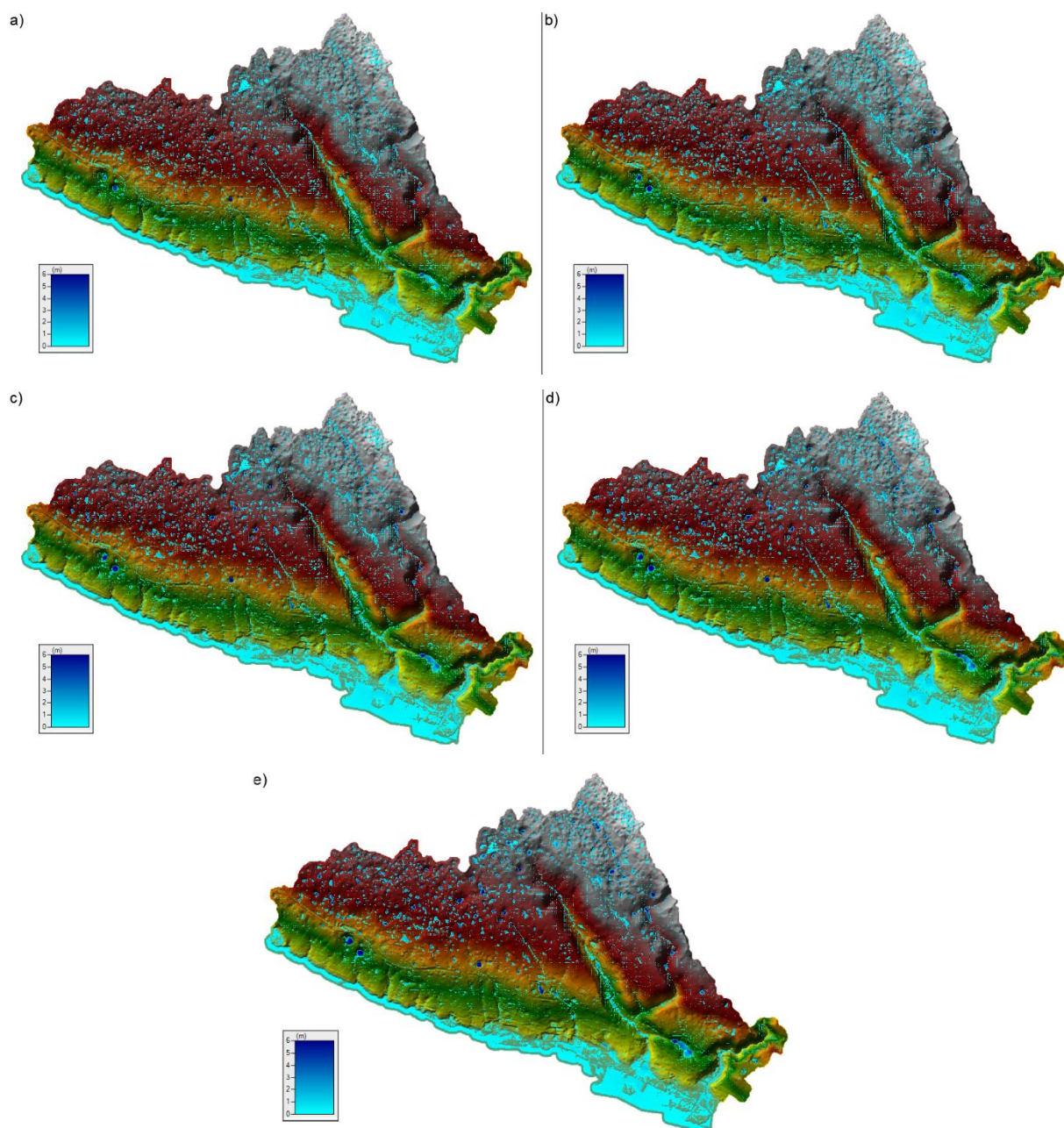
Slika 39: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih dubina vode (m) za srednju vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata

Na slici 40 prikazan je rezultat simulacija na modelu terena s prikazanim maksimalnim brzinama vode (m/s) za srednju vjerojatnost pojavljivanja (PP 25 godina) i trajanje oborine od 1, 3, 6, 12 i 24 sata.



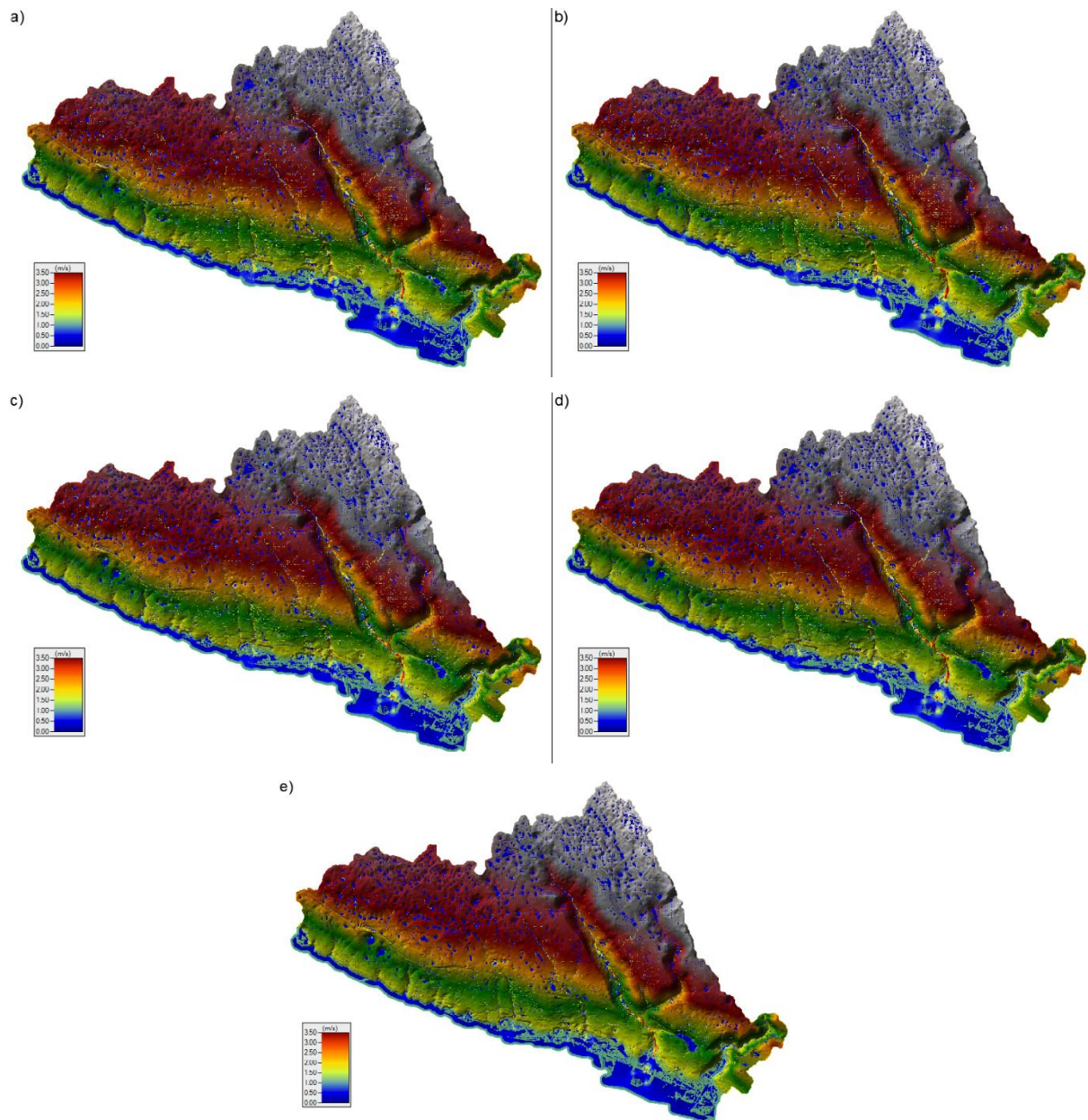
Slika 40: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih brzina vode (m/s) za srednju vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata

Na slici 41 prikazan je rezultat simulacija na modelu terena s prikazanim maksimalnim dubinama vode (m) za malu vjerojatnost pojavljivanja (PP 100 godina) i trajanje oborine od 1, 3, 6, 12 i 24 sata.



Slika 41: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih dubina vode (m) za malu vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata

Na slici 42 prikazan je rezultat simulacija na modelu terena s prikazanim maksimalnim brzinama vode (m/s) za malu vjerojatnost pojavljivanja (PP 100 godina) i trajanje oborine od 1, 3, 6, 12 i 24 sata.



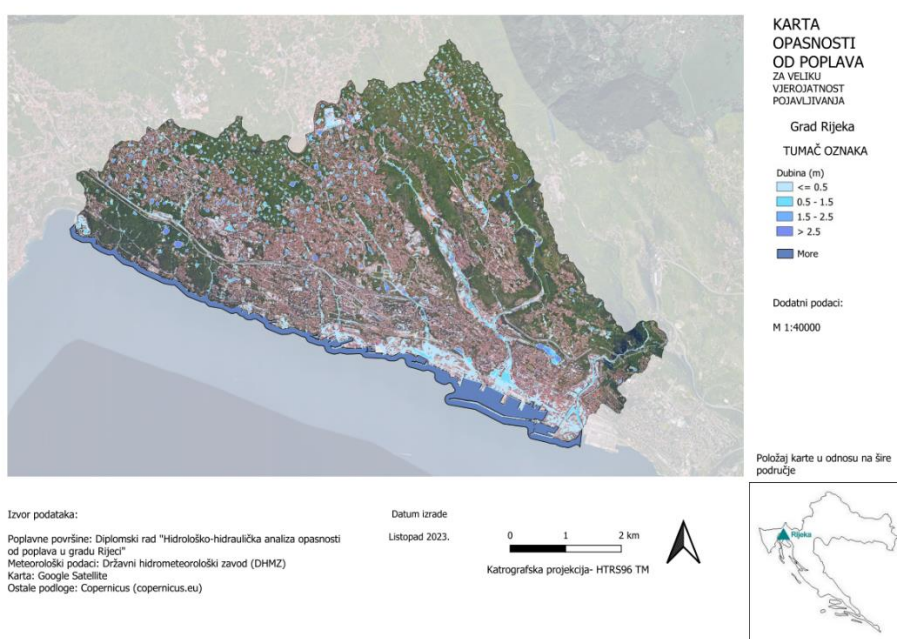
Slika 42: Rezultati simulacija poplava s prikazom maksimalnih brzina vode (m/s) za malu vjerojatnost pojavljivanja i trajanje oborine od: a) 1 sata, b) 3 sata, c) 6 sati, d) 12 sati i e) 24 sata

9.2. Karte opasnosti od poplava

Rezultati simulacija iz HEC-RAS-a prebačeni su natrag u QGIS, gdje su izrađene karte opasnosti od poplava za područje grada Rijeke. Karte opasnosti od poplava izrađene su za scenarij velike, srednje i male vjerojatnosti pojavljivanja. Za svaki navedeni scenarij izrađena je karta s prikazom dubina i brzina vode (ukupno 6 karata).

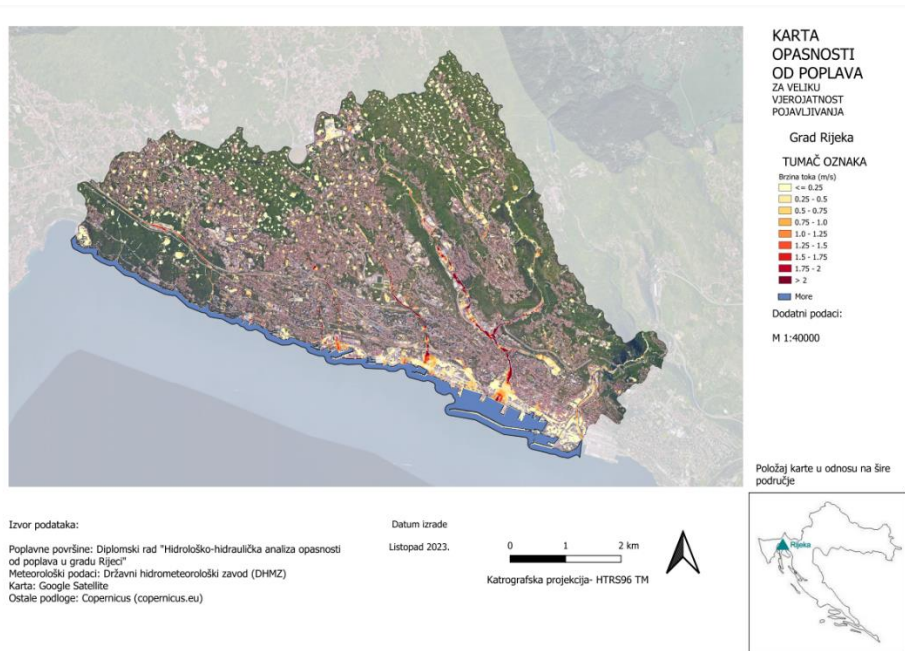
Karte su izrađene na Google Satellite podlozi u mjerilu 1:40 000. Na kartama je označen sav potreban sadržaj poput tumača oznaka, datuma izrade, projekcije, izvora podataka, položaja karte u odnosu na šire područje i dodatnih podataka. Izrađene karte opasnosti su prikazane u nastavku i priložene u poglavlju Prilozi.

Na slici 43 prikazana je karta opasnosti za veliku vjerojatnost pojavljivanja na Google Satellite podlozi s prikazanim dubinama vode (m).



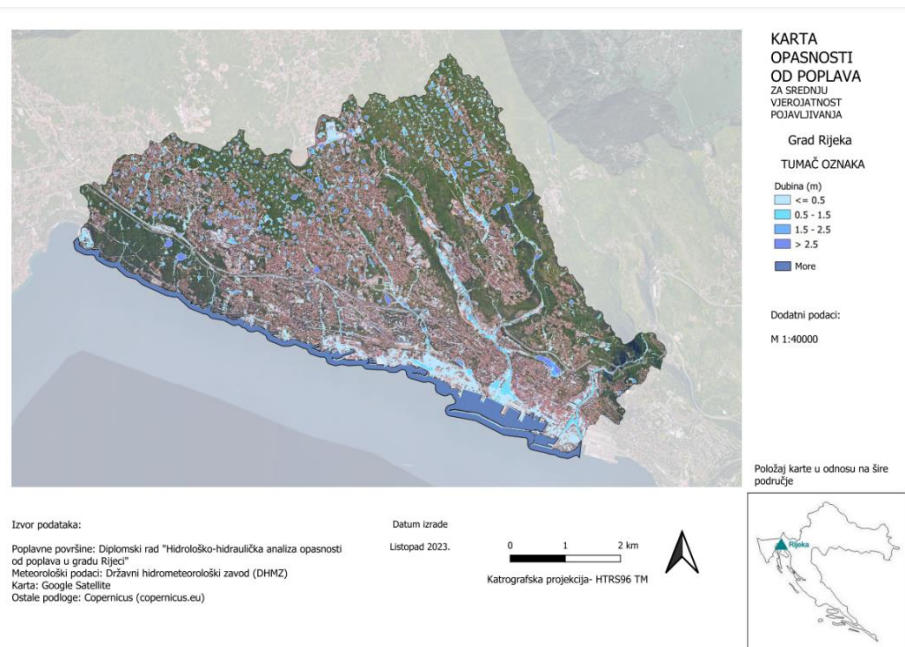
Slika 43: Karta opasnosti od poplava za veliku vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim dubinama vode (m)

Na slici 44 prikazana je karta opasnosti za veliku vjerojatnost pojavljivanja na Google Satellite podlozi s prikazanim brzinama vode (m/s).



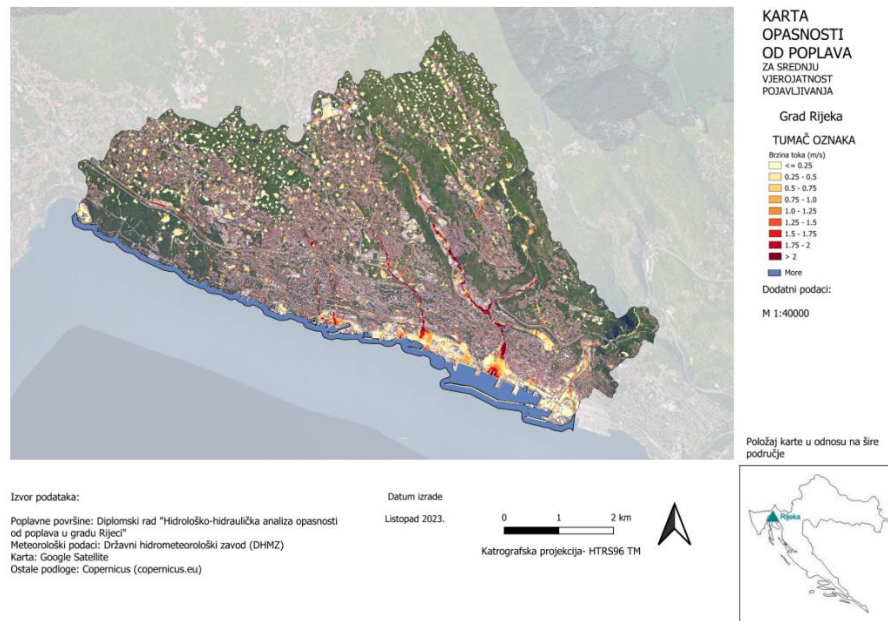
Slika 44: Karta opasnosti od poplava za veliku vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim brzinama vode (m/s)

Na slici 45 prikazana je karta opasnosti za srednju vjerojatnost pojavljivanja na Google Satellite podlozi s prikazanim dubinama vode (m).



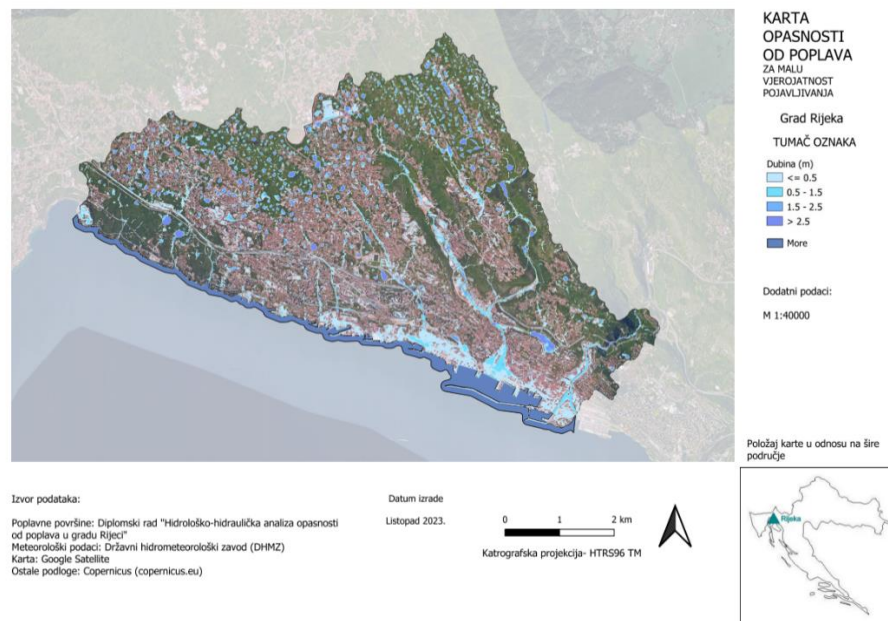
Slika 45: Karta opasnosti od poplava za srednju vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim dubinama vode (m)

Na slici 46 prikazana je karta opasnosti za srednju vjerojatnost pojavljivanja na Google Satellite podlozi s prikazanim brzinama vode (m/s).



Slika 46: Karta opasnosti od poplava za srednju vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim brzinama vode (m/s)

Na slici 47 prikazana je karta opasnosti za malu vjerojatnost pojavljivanja na Google Satellite podlozi s prikazanim dubinama vode (m).



Slika 47: Karta opasnosti od poplava za malu vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim dubinama vode (m)

Na slici 48 prikazana je karta opasnosti za malu vjerojatnost pojavljivanja na Google Satellite podlozi s prikazanim brzinama vode (m/s).



Slika 48: Karta opasnosti od poplava za malu vjerojatnost pojavljivanja s prikazanim brzinama vode (m/s)

10. DISKUSIJA

Na temelju provedene analize i prethodnih poplava, mogu se izdvojiti brojna područja u gradu Rijeci koja su sklona plavljenju. Treba izdvojiti područje centra grada uz obalu, područje Mlake te podvožnjaka na Kantridi. Na slici 49 prikazana je karta na kojoj su navedena područja označena crvenom bojom.



Slika 49: Izdvojena područja povećanog rizika od poplava u gradu Rijeci

Na slici 50 prikazana su navedena područja u uvećanom mjerilu sa prikazanim dubinama vode (PP 100 godina), a na slici 51 prikazana su ta ista područja tijekom poplave.



Slika 50: Izdvojena područja povećanog rizika od poplava sa prikazanim dubinama vode (m): a) područje centra grada uz obalu, b) područje Mlake i c) podvožnjak na Kantridi



Slika 51: Izdvojena područja povećanog rizika za vrijeme poplave: a) područje centra grada uz obalu [30], b) područje Mlake [31] i c) podvožnjak na Kantridi [32]

11. ZAKLJUČAK

U sklopu diplomskog rada provedena je procjena opasnosti od pluvijalnih poplava na području grada Rijeke. Procjena je provedena u skladu s Direktivom o poplavama, za tri specifična scenarija, odnosno veliku, srednju i malu vjerojatnost pojavljivanja. Za provedbu analize korišten je hidrološko-hidraulički model otjecanja površinskih voda. Za svaki navedeni scenarij, korišteni su podaci o projektnom pljusku trajanja 1, 3, 6, 12 i 24 sata, koji su potom zadani kao jedan od rubnih uvjeta za provedbu simulacija. Rezultati procjene opasnosti od poplava izraženi su u obliku karata opasnosti s izraženim maksimalnim dubinama i brzinama vode na određenom području.

Treba napomenuti da provedena analiza odgovara makro razini istraživanja te ne daje detaljan prikaz opasnosti u vidu dubina i brzina vode na obuhvaćenom području. Za izradu točnijih i preciznijih karata opasnosti od poplava trebalo bi koristiti preciznije podloge (primjerice LiDAR snimke) te uzeti u obzir utjecaj sustava odvodnje oborinskih voda, a posebice kolektor Škurinjskog potoka. Međutim, i ovakvi rezultati nam daju vrijedan uvid u generalne zone plavljenja i pravce otjecanja površinskih voda, koji mogu biti korisni prostornim planerima te donosiocima odluka za definiranje užih područja na kojima će se provesti detaljnije analize poplava i procjena učinkovitosti mjera za ublažavanje poplava.

LITERATURA

- [1] Butković, T., Maretić, A., Horvat, B., & Krvavica, N. (2021). Procjena opsega poplave daljinskim istraživanjima, Zbornik Radova (Građevinski Fakultet Sveučilišta U Rijeci), 24(1), 119-132., <https://doi.org/10.32762/zr.24.1.7>
- [2] Horvat, B., Poplave i njihovo kartiranje, predavanje sa kolegija Geohazardi, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2019.
- [3] https://civilna-zastita.gov.hr/UserDocsImages/CIVILNA%20ZAŠTITA/PDF_ZA%20WEB/Poplave_brošura%20A5%20-%20web.pdf , 15.10.2023.
- [4] <https://www.statista.com/statistics/1269886/most-common-natural-disasters-in-europe/> , 15.10.2023.
- [5] <https://frisco-project.eu/hr/o-projektu-hr/o-poplavama/> , 15.10.2023.
- [6] <https://www.zurich.com/en/knowledge/topics/flood-and-water-damage/three-common-types-of-flood> , 15.10.2023.
- [7] Bošnjak, G. (2018). 'Režim rijeke Drave u Hrvatskoj s obzirom na poplave', Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, citirano: 15.10.2023., <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:897352>
- [8] https://www.floodinfo.ie/about_frm/types_and_causes/ , 15.10.2023.
- [9] Holjević D.: Urbane poplave, <https://www.zastita.info/UserFiles/file/zastita/SIGG/SIGG%202016/PREzentacije/17%20-%20Danko%20Holjević%20pptx.pdf> , 15.10.2023.
- [10] <https://www.tportal.hr/vijesti/clanak/stigla-velika-analiza-uzroka-poplave-u-rijeci-bila-je-to-najveca-dnevna-kolicina-oborine-na-ovoj-postaji-od-1948-foto-20221005> , 16.10.2023.
- [11] <https://www.namastedehradun.com/uttarakhand-flood-2013-all-details> , 16.10.2023.
- [12] <https://www.24sata.hr/news/rijeka-je-i-dalje-pod-vodom-a-gradane-cekaju-nove-obilne-kise-659637> , 16.10.2023.
- [13] Direktiva 2007/60/EZ Europskog parlamenta i vijeća od 23. listopada 2007. o procjeni i upravljanju rizicima od poplava, Službeni list Europske unije, 18.10.2023.
- [14] Hrvatske vode, EU Direktiva o poplavama u Hrvatskoj, Smjernice, Sažetak. Zagreb, 2014.
- [15] Glavni elementi pripreme karata opasnosti od poplava i karata rizika od poplava, Izvješće o Komponenti 3, 18.10.2023.

- [16] <https://voda.hr/hr/karte-opasnosti-od-poplava-i-karte-rizika-od-poplava-2014> , 18.10.2023.
- [17] Studija procjene opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina i djelovanja mora na pilot područjima u Hrvatskoj (projekt STREAM), Knjiga 2: Procjena opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina na pilot područjima, Rijeka - Zagreb, 2022.
- [18] https://hr.wikipedia.org/wiki/Pristupanje_Hrvatske_Europskoj_uniji , 22.10.2023.
- [19] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Rijeka> , 22.10.2023.
- [20] <https://orthopediewestbrabant.nl/rijeka-karta/>, 22.10.2023.
- [21] Bilić, M. M. (2020) Procjena opasnosti od složenih poplava u centru grada Rijeke uslijed kombiniranog djelovanja mora i rijeke, Diplomski rad, Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, Diplomski sveučilišni studij, 23.10.2023.
- [22] <https://www.kdrik-rijeka.hr/voda/vodopskrba/izvorista> , 23.10.2023.
- [23] Prethodna procjena rizika od poplava, Plan upravljanja vodnim područjima 2022. - 2027., Hrvatske vode, prosinac 2018.
- [24] Karte opasnosti od poplava i karte rizika od poplava, Plan upravljanja vodnim područjima 2022. - 2027., Hrvatske vode, prosinac 2019.
- [25] <https://www.qgis.org/en/site/>, 25.10.2023.
- [26] <https://pediaa.com/what-is-the-difference-between-raster-and-vector-data/> , 25.10.2023.
- [27] <https://gsp.humboldt.edu/olm/Lessons/GIS/08%20Rasters/RasterToVector.html> , 26.10.2023.
- [28] <https://www.voda.hr/hr/plan-upravljanja-vodnim-podrucjima> , 01.11.2023.
- [29] <https://land.copernicus.eu/en> , 01.11.2023.
- [30] <https://forum.lokalpatrioti-rijeka.com/viewtopic.php?f=32&t=106> , 01.11.2023.
- [31] <https://forum.lokalpatrioti-rijeka.com/viewtopic.php?f=129&t=3501> , 01.11.2023.
- [32] <https://riportal.net.hr/rijeka/video-autobus-autotroleja-pun-vode-nevjerojatni-prizori-u-rijeci-vozac-polozio-i-za-upravljanje-amfibijom/200682/> , 01.11.2023.

POPIS PRILOGA

- **Prilog 1:** Pregledna karta područja M 1:40 000
- **Prilog 2:** Karta opasnosti od poplava velike vjerojatnosti pojavljivanja s prikazanim dubinama vode M 1:40 000
- **Prilog 3:** Karta opasnosti od poplava velike vjerojatnosti pojavljivanja s prikazanim brzinama vode M 1:40 000
- **Prilog 4:** Karta opasnosti od poplava srednje vjerojatnosti pojavljivanja s prikazanim dubinama vode M 1:40 000
- **Prilog 5:** Karta opasnosti od poplava srednje vjerojatnosti pojavljivanja s prikazanim brzinama vode M 1:40 000
- **Prilog 6:** Karta opasnosti od poplava male vjerojatnosti pojavljivanja s prikazanim dubinama vode M 1:40 000
- **Prilog 7:** Karta opasnosti od poplava male vjerojatnosti pojavljivanja s prikazanim brzinama vode M 1:40 000



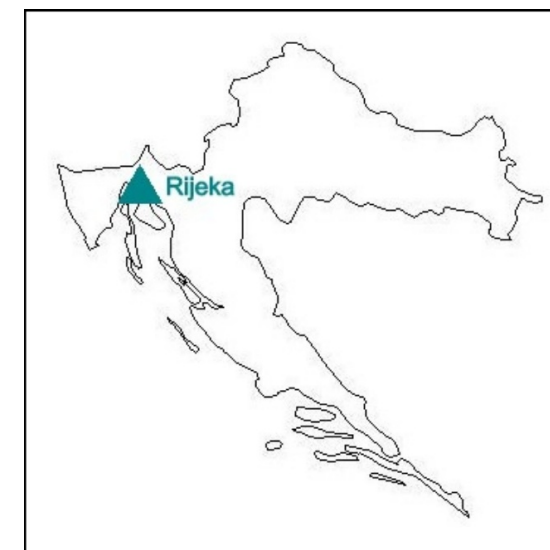
PREGLEDNA KARTA PODRUČJA

Grad Rijeka

Dodatni podaci:

M 1:40000

Položaj karte u odnosu na šire područje



Izvor podataka:

Google Satellite

Datum izrade

Listopad 2023.

0 1 2 km



Katrografska projekcija- HTRS96 TM










KARTA OPASNOSTI OD POPLAVA ZA VELIKU VJEROJATNOST POJAVLJIVANJA

Grad Rijeka

TUMAČ OZNAKA

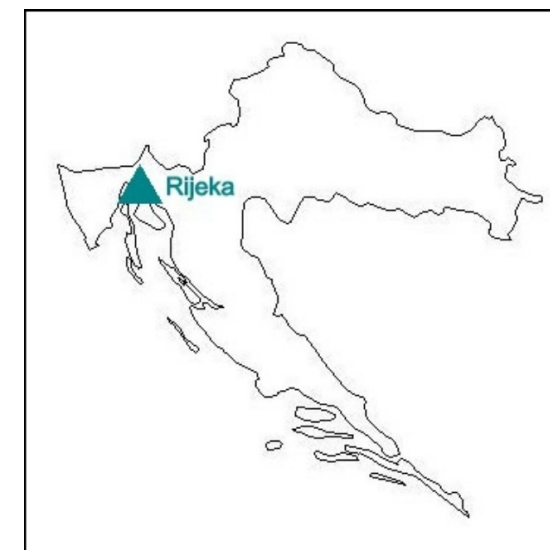
Dubina (m)

-  ≤ 0.5
-  0.5 - 1.5
-  1.5 - 2.5
-  > 2.5
-  More

Dodatni podaci:

M 1:40000

Položaj karte u odnosu na šire područje



Izvor podataka:

Poplavne površine: Diplomski rad "Hidrološko-hidraulička analiza opasnosti od poplava u gradu Rijeci"

Meteorološki podaci: Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ)

Karta: Google Satellite

Ostale podloge: Copernicus (copernicus.eu)

Datum izrade

Listopad 2023.

0 1 2 km



Katrografska projekcija- HTRS96 TM



KARTA OPASNOSTI OD POPLAVA ZA VELIKU VJEROJATNOST POJAVLJIVANJA

Grad Rijeka

TUMAČ OZNAKA

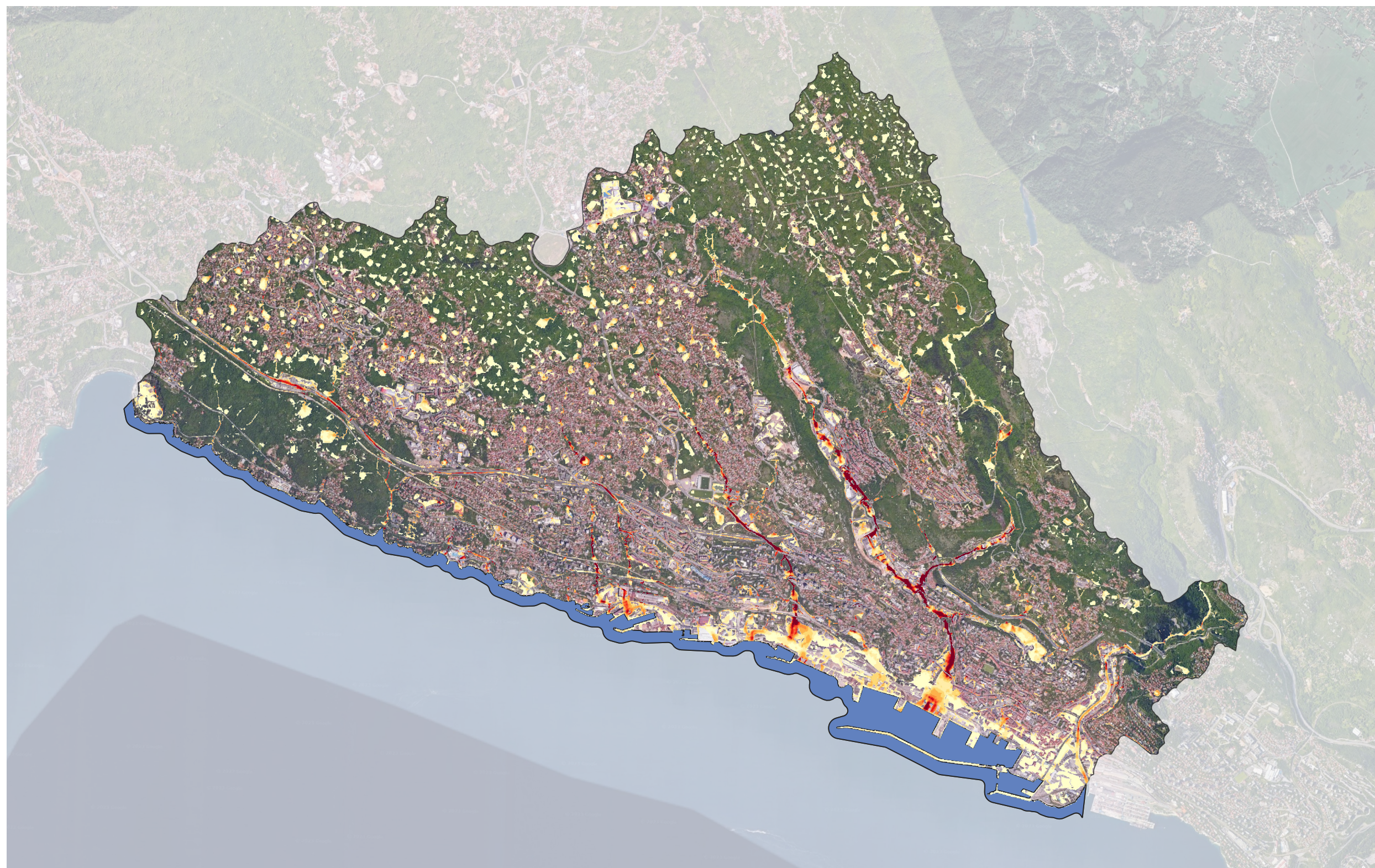
Brzina toka (m/s)



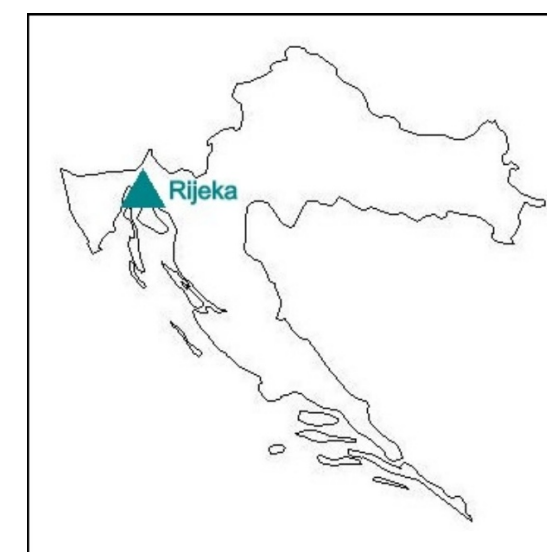
 More

Dodatni podaci:

M 1:40000



Položaj karte u odnosu na šire područje



Izvor podataka:

Poplavne površine: Diplomski rad "Hidrološko-hidraulička analiza opasnosti od poplava u gradu Rijeci"

Meteorološki podaci: Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ)

Karta: Google Satellite

Ostale podloge: Copernicus (copernicus.eu)

Datum izrade

Listopad 2023.

0 1 2 km



Katrografska projekcija- HTRS96 TM








KARTA OPASNOSTI OD POPLAVA ZA SREDNJU VJEROJATNOST POJAVLJIVANJA

Grad Rijeka

TUMAČ OZNAKA

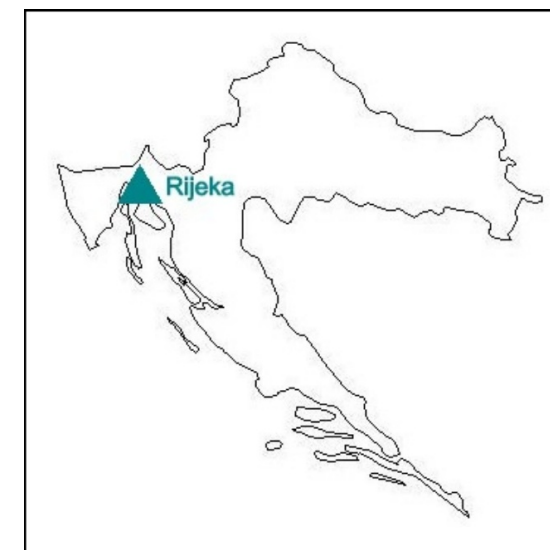
Dubina (m)

	<= 0.5
	0.5 - 1.5
	1.5 - 2.5
	> 2.5
	More

Dodatni podaci:

M 1:40000

Položaj karte u odnosu na šire područje



Izvor podataka:

Poplavne površine: Diplomski rad "Hidrološko-hidraulička analiza opasnosti od poplava u gradu Rijeci"

Meteorološki podaci: Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ)

Karta: Google Satellite

Ostale podloge: Copernicus (copernicus.eu)

Datum izrade

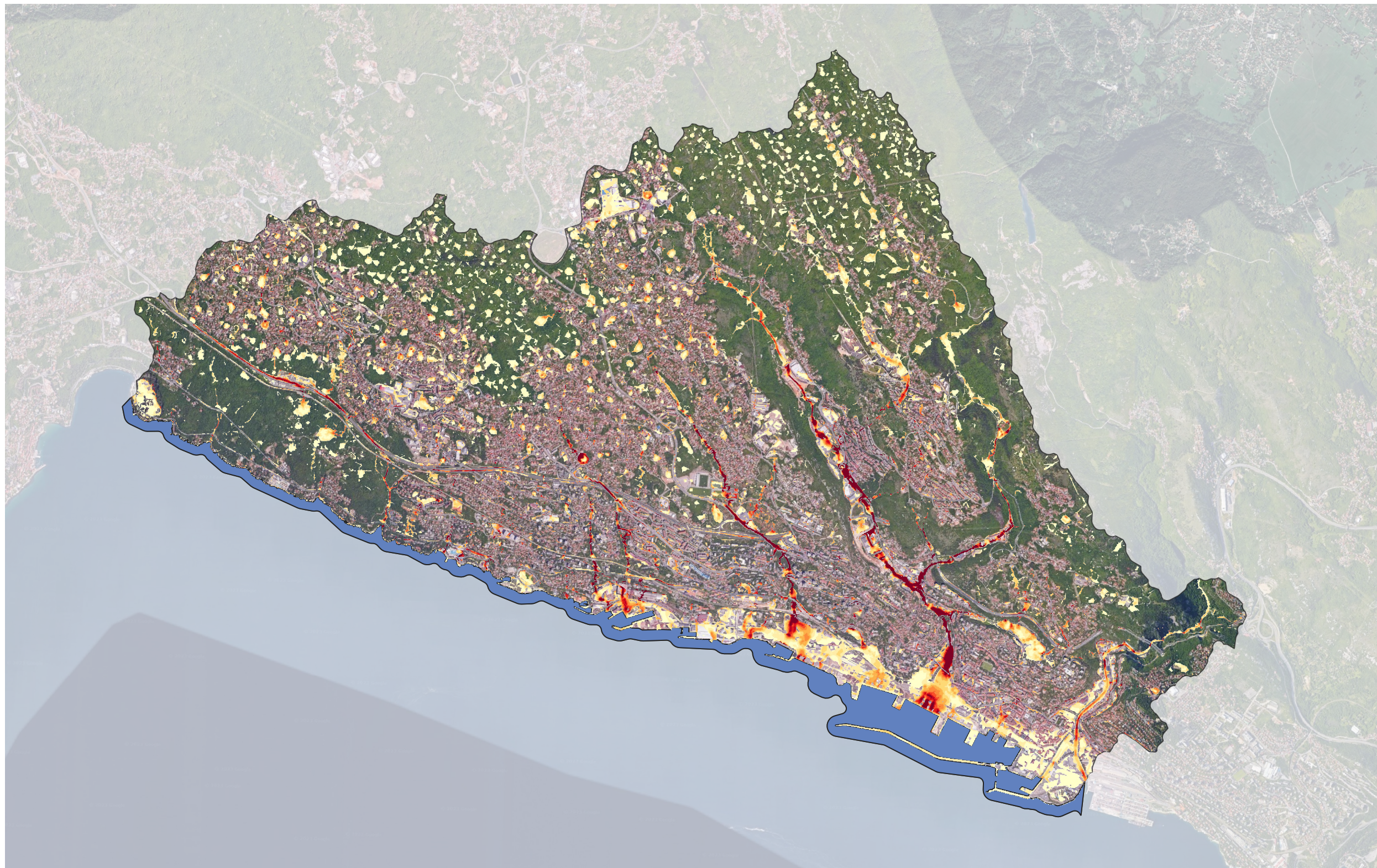
Listopad 2023.

0 1 2 km



Katrografska projekcija- HTRS96 TM





KARTA OPASNOSTI OD POPLAVA ZA SREDNJU VJEROJATNOST POJAVLJIVANJA

Grad Rijeka

TUMAČ OZNAKA

Brzina toka (m/s)

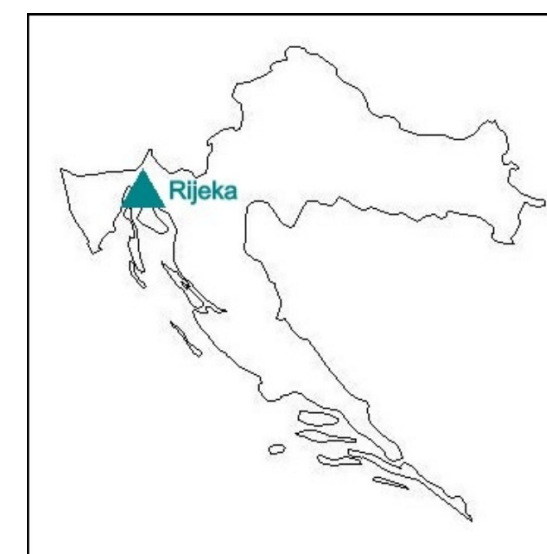
- ≤ 0.25
- 0.25 - 0.5
- 0.5 - 0.75
- 0.75 - 1.0
- 1.0 - 1.25
- 1.25 - 1.5
- 1.5 - 1.75
- 1.75 - 2
- > 2

More

Dodatni podaci:

M 1:40000

Položaj karte u odnosu na šire područje



Izvor podataka:

Poplavne površine: Diplomski rad "Hidrološko-hidraulička analiza opasnosti od poplava u gradu Rijeci"

Meteorološki podaci: Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ)

Karta: Google Satellite

Ostale podloge: Copernicus (copernicus.eu)

Datum izrade

Listopad 2023.

0 1 2 km



Katrografska projekcija- HTRS96 TM

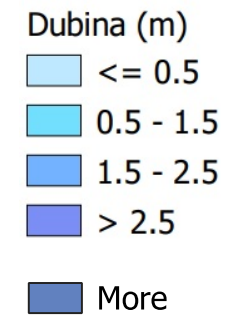




KARTA OPASNOSTI OD POPLAVA ZA MALU VJEROJATNOST POJAVLJIVANJA

Grad Rijeka

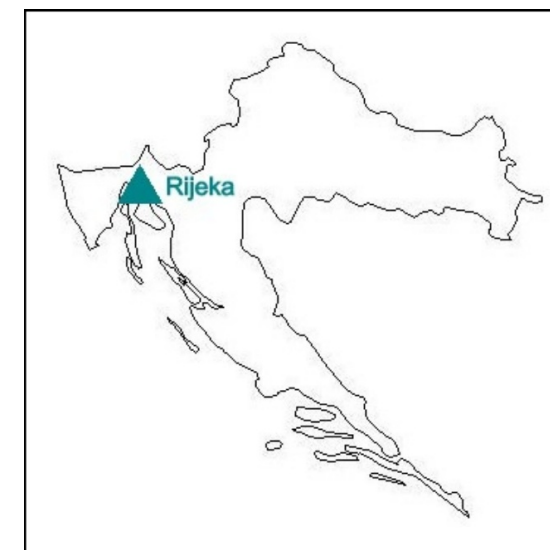
TUMAČ OZNAKA



Dodatni podaci:

M 1:40000

Položaj karte u odnosu na šire područje



Izvor podataka:

Poplavne površine: Diplomski rad "Hidrološko-hidraulička analiza opasnosti od poplava u gradu Rijeci"

Meteorološki podaci: Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ)

Karta: Google Satellite

Ostale podloge: Copernicus (copernicus.eu)

Datum izrade

Listopad 2023.

0 1 2 km



Katrografska projekcija- HTRS96 TM

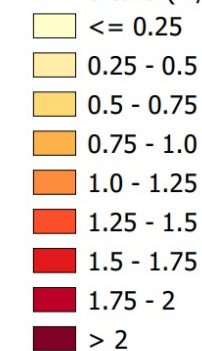


KARTA OPASNOSTI OD POPLAVA ZA MALU VJEROJATNOST POJAVLJIVANJA

Grad Rijeka

TUMAČ OZNAKA

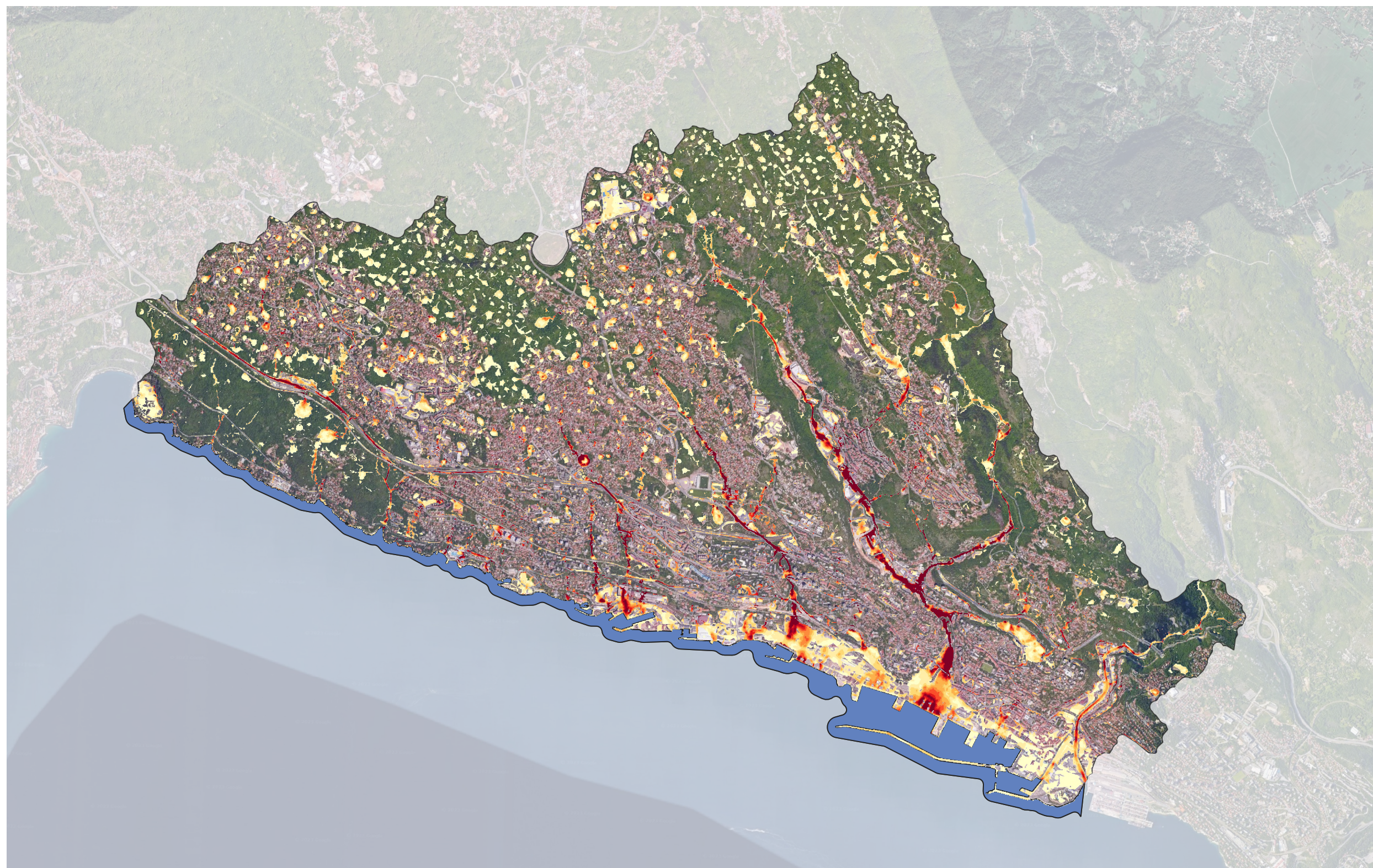
Brzina toka (m/s)



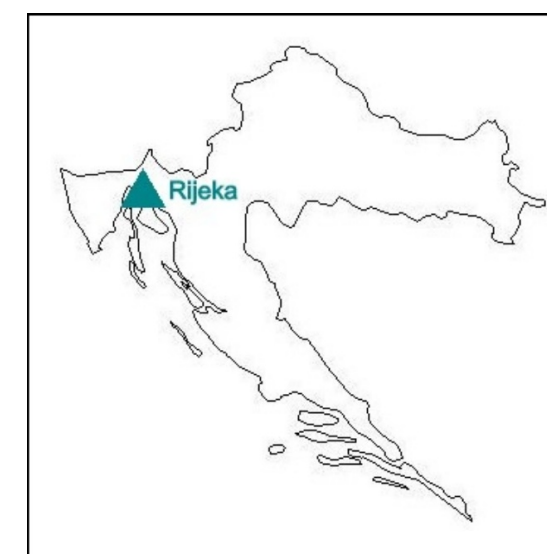
 More

Dodatni podaci:

M 1:40000



Položaj karte u odnosu na šire područje



Izvor podataka:

Poplavne površine: Diplomski rad "Hidrološko-hidraulička analiza opasnosti od poplava u gradu Rijeci"

Meteorološki podaci: Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ)

Karta: Google Satellite

Ostale podloge: Copernicus (copernicus.eu)

Datum izrade

Listopad 2023.

0 1 2 km



Katrografska projekcija- HTRS96 TM

