Procjena geohazarda vrtača korištenjem GIS tehnologije i podataka daljinskih istraživanja

Benić, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:445995

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geološkog inženjerstva

PROCJENA GEOHAZARDA VRTAČA KORIŠTENJEM GIS TEHNOLOGIJE I PODATAKA DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA

Diplomski rad

Filip Benić

GI329

Zagreb, 2021.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

PROCJENA GEOHAZARDA VRTAČA KORIŠTENJEM GIS TEHNOLOGIJE I PODATAKA DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA

Filip Benić

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak
Vrtače su geomorfološki oblici koji su usko vezani za krška područja, a mogu predstavljati opasnost za ljudske živote i infrastrukturu. Kao područje istraživanja izabran je grad Rijeka i neposredna okolica grada, zbog mnogobrojnih pojava vrtača na širem području. U radu je provedena GIS multikriterijska analiza susceptibiliteta vrtača u svrhu izdvajanja potencijalno opasnih područja. U tu svrhu identificirano je osam faktora koji utječu na kemijsko otapanje karbonata i razvoj vrtača, kao i njihovi utjecaji na ukupan geohazard. U GIS okruženju izrađeno je osam tematskih karata, na temelju podataka dobivenih daljinskim istraživanjima. Provedena je prostorna analiza, vrijednosti tematskih karata su sumirane, a rezultat je karta geohazarda pomoću koje su izdvojena potencijalno opasna područja.

Ključne riječi: Riječko područje, krški reljef, vrtače, daljinska istraživanja, GIS, multikriterijska analiza susceptibiliteta, geohazard

Diplomski rad sadrži: 47 stranica, 41 sliku, 9 tablica, 24 reference

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Doc. dr. sc. Bojan Matoš, prof. RGNF

Ocjenjivači: Doc. dr. sc. Bojan Matoš, prof. RGNF
Izv. prof. dr. sc. Dario Perković, dipl. ing. RGNF
Izv. prof. dr. sc. Uroš Barudžija, dipl. ing. RGNF

Datum obrane: 12.02.2021.

University of Zagreb Master's Thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

SINKHOLES GEOHAZARD ASSESSMENT USING GIS TECHNOLOGY AND REMOTE SENSING DATA

Filip Benić

Thesis completed at: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Department of Geology and Geological Engineering

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

Sinkholes are geomorphological features related to karst areas, which could pose a threat to human lives and infrastructure. City of Rijeka and its surrounding area has been selected as the study area, because of high frequency of sinkhole occurrence in the region. Multicriteria susceptibility analysis has been conducted in order to detect hazardous parts of the study area. Eight different factors have been identified as responsible for dissolution of carbonate rocks and sinkhole development, as well as their respective influence on the total geohazard. In accordance, eight thematic maps were created in GIS environment, based on remote sensing data. Spatial analysis was conducted, thematic map values were summed, and a geohazard map was created as a result, which was then used to identify potentially hazardous areas.

Keywords: Rijeka area, karst relief, sinkholes, remote sensing, GIS, multicriteria susceptibility analysis, geohazard

Thesis contains: 47 pages, 41 figures, 9 tables, 24 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,

Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Bojan Matoš, PhD

Reviewers: Assistant Professor Bojan Matoš, PhD

Associate Professor Dario Perković, PhD

Associate Professor Uroš Barudžija, PhD

Date of defense: February 12, 2021.

Sadržaj

1 UVOD 1
2 GEOGRAFSKI POLOŽAJ 2
3 GEOLOŠKA GRAĐA 3
3.1 DONJA KREDA 5
3.2 GORNJA KREDA 7
3.3 PALEOGEN 11
3.4 KVARTAR 14
4 TEKTONSKI I GEMORFOLOŠKI RAZVOJ PODRUČJA ISTRAŽIVANJA 15
4.1 TEKTONSKI RAZVOJ 15
4.2 GEOMORFOLOŠKE ZNAČAJKE 17
5 METODOLOGIJA 20
5.1 METODA IZRADE KARTE GEOHAZARDA 20
5.2 ArcGIS 23
5.3 TEMATSKE KARTE 28
5.3.1 KARTA VRTAČA 28
5.3.2 KARTA NAGIBA TERENA 31
5.3.3 KARTA RASJEDA I TRANSGRESIVNIH GRANICA 32
5.3.4 KARTA UTJECAJA VODENIH POVRŠINA 33
5.3.5 KARTA PROMETNICA 34
5.3.6 LITOLOŠKA KARTA 36
5.3.7 PEDOLOŠKA KARTA 38
5.3.8 KARTA KORIŠTENJA TERENA 40
6 REZULTATI I DISKUSIJA 42
7 ZAKLJUČAK 45
8 LITERATURA 46

Popis tablica:

Tablica 5-1. Težinske vrijednosti raspona površine vrtača na istraživanom području..... 29

Tablica 5-2. Težinske vrijednosti raspona nagiba terena na istraživanom području..... 31

Tablica 5-3. Težinske vrijednosti geoloških značajki na istraživanom području..... 32

Tablica 5-4. Težinske vrijednosti vodenih površina na istraživanom području. 33

Tablica 5-5. Težinske vrijednosti vrsta prometnica na istraživanom području. 35

Tablica 5-6. Težinske vrijednosti litoloških članova na istraživanom području. 37

Tablica 5-7. Težinske vrijednosti tipova tla na istraživanom području..... 39

Tablica 5-8. Težinske vrijednosti terena istraživanog područja prema upotrebi..... 40

Tablica 6-1. Koeficijenti utjecaja tematskih karata. 43

Popis slika:

Slika 2-1. Satelitski snimak istraživanog područja (preuzeto sa https://dgu.gov.hr/). 2

Slika 3-1. Geološka karta istraživanog područja, isječak OGK listova Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967) i Labin (Šikić et al., 1969). 3

Slika 3-2. Geološki stup sa shematskim prikazom litoloških članova koji se nalaze na istraživanom području (modificirano prema Šikić et al., 1967). 4

Slika 3-3. Pločasti vapnenac donjokredne starosti na lokaciji odmorište Vrata Jadrana. 5

Slika 3-4. Vapnenci, dolomitna i vapnenačka breča na lokaciji Trampov Breg, zapadno od naselja Marinići. 6

Slika 3-5. Vapnenci s prvim rudistima i dolomiti na lokaciji Štefani. 7

Slika 3-6. Vapnenci i dolomiti u izmjeni na lokaciji gradskog naselja Kozala. 8

Slika 3-7. Gusti dobro uslojeni vapnenci na lokaciji naselja Marinići. 9

Slika 3-8. Sivi i smeđi vapnenci na lokaciji naselja Tibljaši, istočno od naselja Marinići.. 10

Slika 3-9. Foraminiferski vapnenac na lokaciji gradskog naselja Rastočine. 11

Slika 3-10. Geološka karta šireg istraživanog područja (Palenik et al., 2019)..... 12

Slika 3-11. Naslage fliša na lokaciji Škurinjske drage, sjeverno od same jezgre Riječke sinklinale..... 13

Slika 3-12. Kvartarne naslage na području Grobničkog polja..... 14

Slika 4-1. Tektonska karta regionalnog područja (Schmid et al., 2008) 16

Slika 4-2. Najveća vrtača na istraživanom području (promjera približno 300 m) nalazi se na lokaciji zapadno od naselja Marčelji. 17

Slika 4-3. Shematski prikaz razvoja disolucijskih vrtača (Galloway et al., 1999). 18

Slika 4-4. Shematski prikaz razvoja vrtača sa sliježućim pokrovom (Galloway et al., 1999). 18

Slika 4-5. Shematski prikaz razvoja vrtača s urušavajućim pokrovom (Galloway et al., 1999). 19

Slika 5-1. Mozaik ulaznih podataka. Slika gore lijevo: digitalni model reljefa (Aster GDEM); slika gore desno: OGK 1:100 000, listovi Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967) i Labin (Šikić et al., 1969); slika dolje lijevo: OPK 1:300 000 (Bogunović et al., 1996); slika dolje desno: TK 1:25 000 (Državna geodetska uprava)..... 21

Slika 5-2. Shematski prikaz izrade karte geohazarda iz ulaznih podataka (Al-Kouri et al., 2013). 22

Slika 5-3. Prikaz ArcMap sučelja. 23

Slika 5-4. Shematski prikaz povezivanja značajki naredbom *Merge* (www.arcgis.com). .. 25

Slika 5-5. Shematski prikaz djelovanja naredbe *Buffer* (www.arcgis.com). 25

Slika 5-6. Alatna kutija ekstenzije *Spatial Analyst,* s pripadajućim alatima 26

Slika 5-7. Digitalni model reljefa nakon obrade naredbom *Hillshade.* 26

Slika 5-8. Shematski prikaz dobivanja vrijednosti nagiba terena naredbom *Slope.* Lijevo se nalaze vrijednosti visinske komponente z u pojedinom pikselu, a desno se nalaze vrijednosti nagiba terena (www.arcgis.com). 27

Slika 5-9. Prostorna raspodjela vrtača na istraživanom području. 28

Slika 5-10. Prostorna raspodjela utjecaja vrtača na geohazard istraživanog područja. 30

Slika 5-11. Karta nagiba terena istraživanog područja. 31

Slika 5-12. Karta utjecaja rasjeda i transgresivnih granica na geohazard istraživanog područja. 32

Slika 5-13. Karta utjecaja vodenih površina na geohazard istraživanog područja. 33

Slika 5-14. Karta prometnica i naseljenih područja u sklopu istraživanog područja. 34

Slika 5-15. Karta utjecaja prometnica i naseljenih područja na geohazard istraživanog područja. 35

Slika 5-16. Karta litoloških članova istraživanog područja. 36

Slika 5-17. Karta utjecaja litoloških članova na potencijal geohazarda istraživanog područja. 37

Slika 5-18. Karta tipova tla na istraživanom području. 38

Slika 5-19. Karta utjecaja tipova tla na potencijal geohazarda istraživanog područja. 39

Slika 5-20. Karta korištenja terena istraživanog područja. 41

Slika 5-21. Karta utjecaja dijelova terena s obzirom na upotrebu na potencijal geohazarda istraživanog područja. 41

Slika 6-1. Alat *Weighted sum.* U stupac *Raster* unose se raster koji sudjeluju u sumiranju, u stupcu *Field* označuje se pripadajuće polje vrijednosti, a u stupcu *Weight* zadaju se koeficijenti utjecaja rastera na konačan rezultat. 42

Slika 6-2. Karta geohazarda istraživanog područja s obzirom na nastanak i razvoj vrtača. 44

1 UVOD

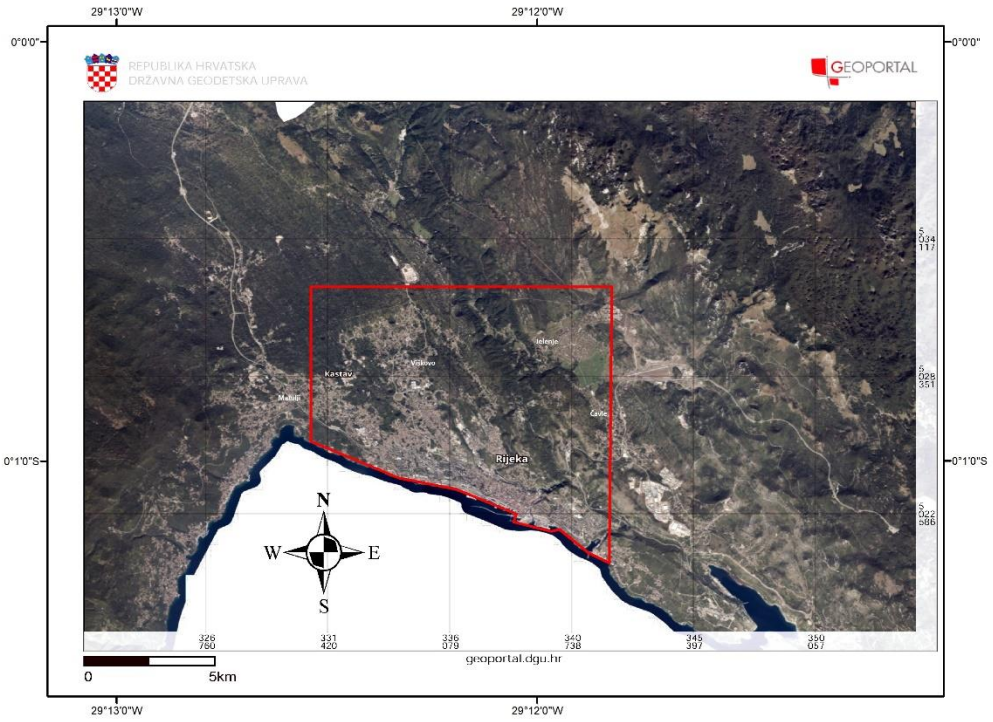
Vrtače su geomorfološki oblik usko vezan za područja na kojima dominira krški reljef. Svojom pojavom i progresivnim razvojem predstavljaju opasnost za stanovništvo i infrastrukturu, pa su iz tog razloga provedene brojne studije s ciljem pobližeg opisivanja ovih geomorfoloških oblika i kvantificiranja njihovog utjecaja na sigurnost područja. U sklopu ovog rada provedena je prostorna analiza vrtača koja uključuje identifikaciju i analizu elemenata i faktora koji utječu na stvaranje i razvoj vrtača.

Kao područje istraživanja izabrano je šire područje grada Rijeke, budući da predstavlja jedno od najnaseljenijih područja u Republici Hrvatskoj, a također je utvrđeno i kao područje s velikim brojem vrtača. Prilikom izrade ove studije korišten je softver *ArcGIS* 10.3 tvrtke ESRI, u čijem su okruženju obrađeni podaci dobiveni daljinskim istraživanjima.

Cilj ovog rada je izdvajanje dijelova istraživanog područja koji pokazuju relativno veći potencijal geohazarda u odnosu na ostatak istraživanog područja. U tu svrhu provedena je analiza susceptibiliteta, a integrirani su podaci o geološkoj podlozi, površinskim geomorfološkim oblicima, tlu, nagibu terena, infrastrukturi, rasjedima, vrsti korištenja terena i utjecaju vodenih površina. Podaci su dobiveni kako iz dvodimenzionalnih zapisa (geološke, topografske, pedološke karte) tako i iz digitalnog modela reljefa (eng. *digital elevation model* - DEM). Rezultat je karta geohazarda istraživanog područja, koja će dati sliku o osjetljivosti terena s obzirom na vrtače, i postaviti dobar temelj za daljnja istraživanja.

2 GEOGRAFSKI POLOŽAJ

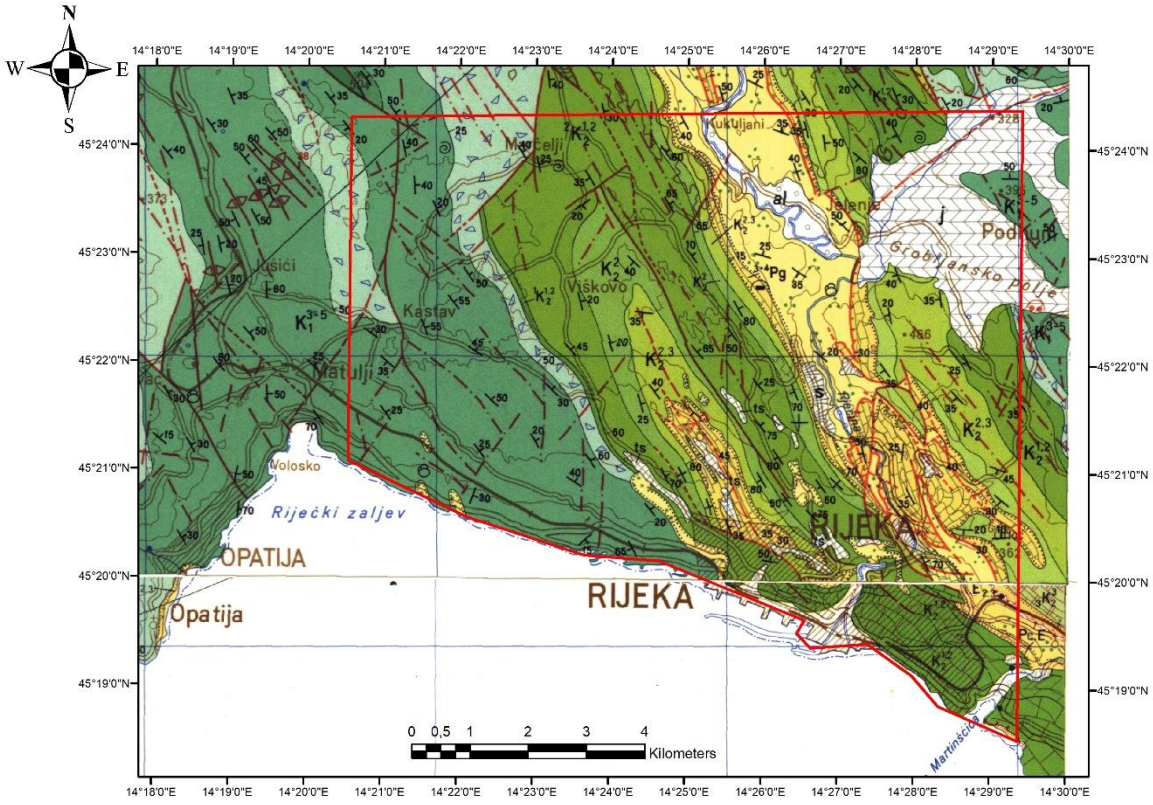
Područje istraživanja je šire gradsko područje Rijeka te neposredno zaleđe Rijeke. Šire područje grada koje obuhvaća približno 100 km^2 uključuje i dijelove 5 susjednih općina: Matulji, Kastav, Viškovo, Jelenje i Čavle (Slika 2-1). Jugozapadnu granicu istraživanog područja čini obalna linija, dok glavninu područja istraživanja pokriva urbana sredina i naselja, te brojne prometnice koje ih povezuju. Veća nenaseljena područja nalaze se na sjeverozapadu, sjeverno od grada Kastva, te na sjeveru gdje nalazimo i najviši vrh istraživanog područja – Jelenski vrh (577 m) (Slika 2-1). U širem smislu, istraživano se područje nalazi u središtu Kvarnerskog zaljeva, te je omeđeno planinama: Učkom na zapadu, te Risnjakom na sjeveroistoku (Slika 2-1). Glavni i jedini značajni vodotok predstavlja rijeka Rječina, koja se glavninom toka nalazi unutar istraživanog područja. Reljef područja je generalno krški, s izuzetkom pojedinih flišolikih tvorevina (Šikić et al., 1967) na području doline Rječine. Klima područja definirana je kao umjereno topla vlažna klima, s vrlo izraženim padalinama (Milković & Sijerković, 1997). Kao rezultat krške osnove te klimatskih obilježja, u topografiji se pojavljuju mnogobrojne vrtače, što je i predmet istraživanja u okviru ovog diplomskog rada.



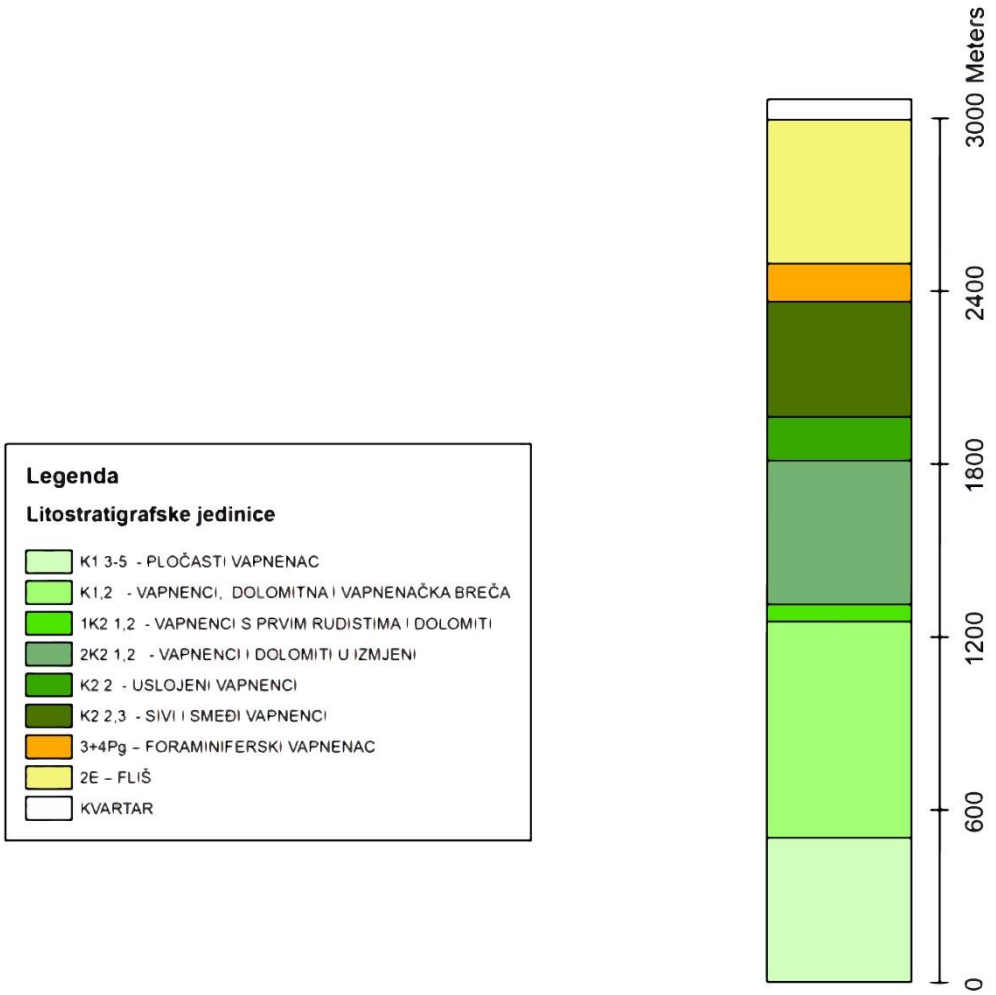
Slika 2-1. Satelitski snimak istraživanog područja (preuzeto sa https://dgu.gov.hr/).

3 GEOLOŠKA GRAĐA

Pri razmatranju geološke građe (Slika 3-1) na temelju osnovne geološke karte OGK 1: 100 000 lista Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967) i Labin (Šikić et al., 1969) na području Rijeke prevladavaju kredne i paleogenske naslage, a koje prekrivaju sporadično i kvartarne naslage. Prema tumaču OGK lista Ilirska bistrica (Šikić et al., 1967) na području istraživanja može se izdvojiti ukupno 9 stratigrafskih jedinica. U narednim podpoglavljima izdvojene su stratigrafske jedinice te će biti opisane, idući od najstarijih prema najmlađim naslagama.



Slika 3-1. Geološka karta istraživanog područja, isječak OGK listova Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967) i Labin (Šikić et al., 1969).



Slika 3-2. Geološki stup sa shematskim prikazom litoloških članova koji se nalaze na istraživanom području (modificirano prema Šikić et al., 1967).

3.1 DONJA KREDA

K_1^{3-5} - PLOČASTI VAPNENAC

Najstarije jedinice na istraživanom području predstavljaju paket uslojenih pločastih vapnenaca (Slika 3-3), koji se nalaze na zapadu, na području Kantride te na Grobničkom polju, koje se nalazi na sjeveroistoku istraživanog područja (Slika 2-1). Prema tumaču OGK lista Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967) debljina ove jedinice iznosi 500-600 m, no prikazuje tendenciju zadebljanja prema jugoistoku, te na istraživanom području iznosi i više od 600 m (Slika 3-2). Osim vapnenaca, u manjoj se mjeri nalaze i breče kao i slojevi dolomita. Uglavnom se radi o kalciruditima i pseudoolitičnim i oolitičnim kalkarenitima, sa sadržajem $CaCO_3$ 97-99%. Ove su naslage starosti barema i apta, a potencijalno i alba (Šikić et al., 1967).



Slika 3-3. Pločasti vapnenac donjokredne starosti na lokaciji odmorište Vrata Jadrana.

$K_{1,2}$ - VAPNENCI, DOLOMITNA I VAPNENAČKA BREČA

U stratigrafskoj krovini, povrh pločastih vapnenaca barem-albske starosti nalazimo karbonatne breče, u koje su povremeno uloženi slojevi vapnenaca (Slika 3-4). Dolomitne breče, koje leže na vapnenačkim, također spadaju u ovu jedinicu koja predstavlja prijelaz između donje i gornje krede (Šikić et al., 1967). Vapnenci su oolitični kalkaerniti, sadržaj $CaCO_3$ iznosi 93-98%. Debljina ove jedinice iznosi 750 m (Slika 3-2).



Slika 3-4. Vapnenci, dolomitna i vapnenačka breča na lokaciji Trampov Breg, zapadno od naselja Marinići.

3.2 GORNJA KREDA

$^{1}K_{2}^{1,2}$ - VAPNENCI S PRVIM RUDISTIMA I DOLOMITI

Prve naslage koje pripadaju gornjoj kredi, točnije cenomanu i turonu, su rudistni vapnenci i dolomiti, koji su povremeno nepravilno utisnuti u vapnence, iako se mogu pojavljivati i u slojevima (Slika 3-5; Šikić et al., 1967). Vapnenci su kalkareniti i biokalkareniti, dok su ostale naslage dolomitizirani kalcilutiti (Šikić et al., 1967). Prema tumaču lista Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967) pronađeni su brojni fragmentirani i očuvani ostaci fosila. Osim foraminifera, nađeni su ostaci *Chondrodonta joanae i radiolarije*. Debljina ovih cenomanskih naslaga iznosi oko 60 m (Šikić et al., 1967; Slika 3-2.).



Slika 3-5. Vapnenci s prvim rudistima i dolomiti na lokaciji Štefani.

$^{2}K_{2}$ ^{1,2} - VAPNENCI I DOLOMITI U IZMJENI

Slijede gornjokredni karbonati u kojem se svijetli, sivi i smeđi vapnenci izmjenjuju s dolomitima cenomanske i turonske starosti (Slika 3-6), a koje nalazimo na području koje okružuje Škurinjsku dragu u kojoj se nalazi jezgra Riječke sinklinale (Slika 3-1). Stijene tvore okolne uzvisine, te područje na kojem se nalaze gradska naselja Podmurvice, Pehlin, Drenova, Kozala, kao i naselja Marčelji i Viškovo na sjeveroistoku istraživanog područja (Slika 2-1) . Prema tumaču OGK lista Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967), slijed debljine 400-600 m (Slika 3-2) se sastoji od debelo uslojenih biokalkarenita i litokalkarenita koji se nalaze u gornjem i donjem dijelu, te od dolomita i dolomitiziranih litokalkarenita i kalcilutita koji se nalaze u sredini. Sadržaj $CaCO_3$ u vapnencima je 93-97%; biokalkareniti se odlikuju vrlo visokim postotkom $CaCO_3$ 95-98% i vrlo su bogati organskim detritusom. Dolomitizirani kalcilutiti imaju 27-40%, a vapneni dolomiti 67-74% $CaMg(CO_3)_2$.



Slika 3-6. Vapnenci i dolomiti u izmjeni na lokaciji gradskog naselja Kozala.

K_2^2 - USLOJENI VAPNENCI

Idući prema jezgri Riječke sinklinale koja se nalazi na području Škurinjske drage (Slika 3-1) nalazimo 100-200 m debeo paket dobro uslojenih vapnenaca (Šikić et al., 1967; Slika 3-7). Slojevi su debljine do 3 m, a radi se o sivim do smeđim vapnencima, dominantno kalcilutitima, a rjeđe i kalkarenitima koje nalazimo u bazalnom vršnom području. Naslage su turonske starosti, što se između ostaloga da zaključiti iz mnogobrojnih nalaza fosila rudista.



Slika 3-7. Gusti dobro uslojeni vapnenci na lokaciji naselja Marinići.

$K_2^{2,3}$ - SIVI I SMEĐI VAPNENCI

Na zapadnoj obali Rječine kao i na području Marinića nailazimo na kompleks sivih i smeđih vapnenaca, koji se rjeđe izmjenjuju s dolomitima (Slika 3-8). Na istočnoj obali Rječine česti su i bijeli prekristalizirani vapnenci. Prema tumaču OGK lista Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967) vapnenci se odlikuju visokim postotkom $CaCO_3$ i vrlo su bogati mikro i marko-fosilima. Uglavnom su to biokalkareniti, a rjeđe i kalkareniti i kalcilutiti. Pronađeni rudisti sugeriraju turonsku starost, iako su pronađene neke vrste koje upućuju na mlađi senon, Debljina ovog kompleksa je 300-500 m (Slika 3-2).



Slika 3-8. Sivi i smeđi vapnenci na lokaciji naselja Tibljaši, istočno od naselja Marinići.

3.3 PALEOGEN

Paleogenske naslage kao najmlađi slijed nalazimo u samoj jezgri Riječke sinklinale (Slika 3-1). One se sastoje od starijih, vapnenačkih stijena, i mlađih klastičnih stijena. Uglavnom se radi o naslagama donjeg i srednjeg eocena. Zajedno sa područjem sjeverne Istre i sjevernim dijelom otoka Cresa, istraživano područje je dio regionalne emerzije koja je trajala od sredine mlađe krede pa sve do eocena (Vlahović et al., 2005) pa time paleogenske naslage transgresivno leže na karbonatnoj podlozi koja je najčešće gornjokredne starosti.

$^{3+4}$Pg – FORAMINIFERSKI VAPNENAC

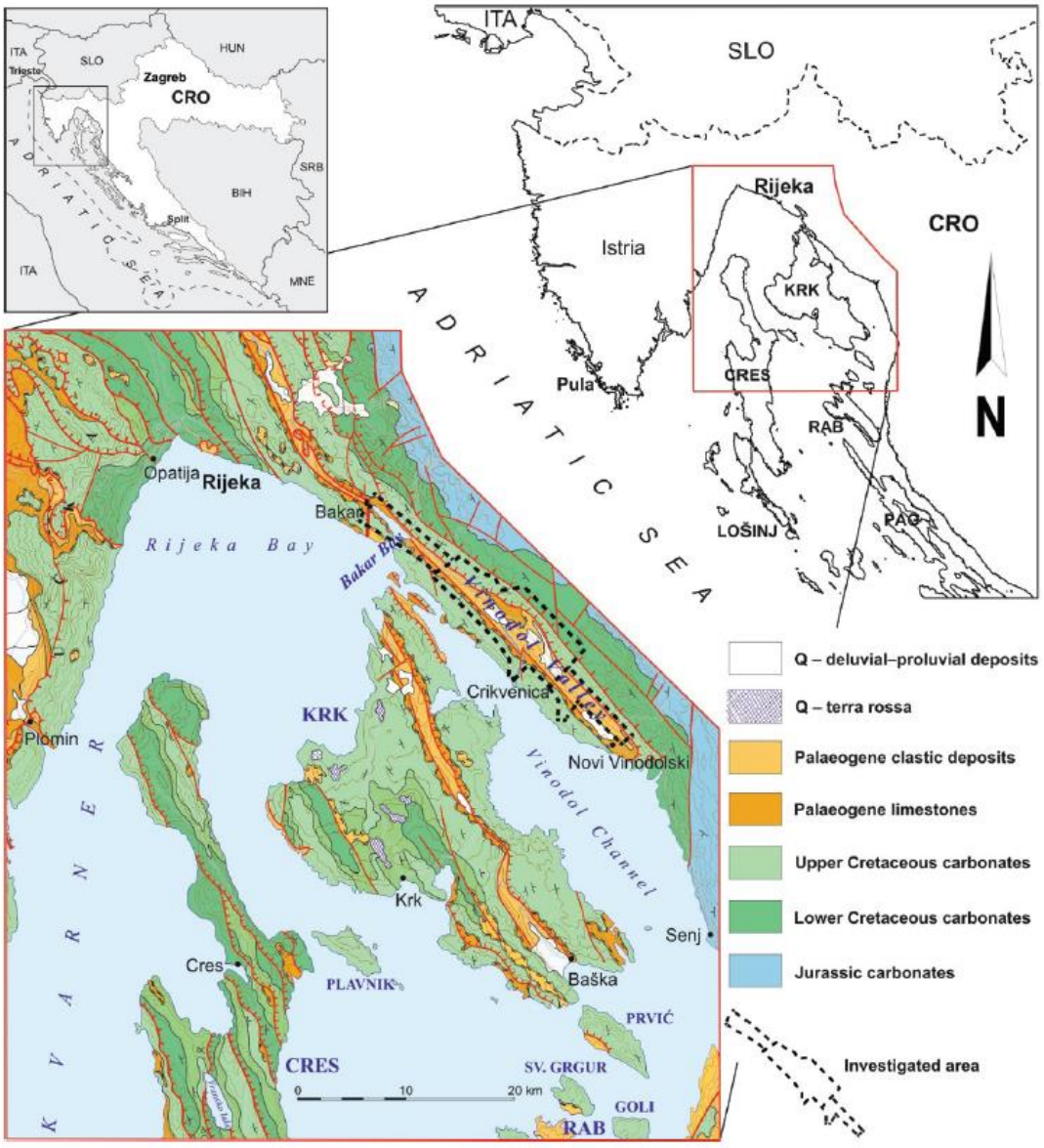
Foraminiferski vapnenci na istraživanom području nalazimo na području Škurinjske drage i Rastočina. Prema tumaču OGK lista 33-89 (Šikić et al., 1967), foraminiferski vapnenci sadrže alveoline i numulite, a budući da se obje skupine miješaju u širokoj zoni, izdvajanje pojedinih asocijacija je vrlo teško, tako da alveolinske i numulitne vapnence ovdje svrstavamo u jednu cjelinu (Slika 3-2). Litološki se radi o sivim do sivo-smeđim vapnencima, biokalkarenitima sa sadržajem $CaCO_3$ 94-97% (Šikić et al., 1967). Naslage pokazuju vrlo slabu uslojenost, a foraminifere su vrlo lijepo očuvane na površinama stijena (Slika 3-9). Stratigrafski, alveolinski vapnenci pripadaju donjem, a numulitni donjem i srednjem eocenu. Prema tumaču OGK lista Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967), ukupna debljina ovog paketa naslaga je 100-130 m.



Slika 3-9. Foraminiferski vapnenac na lokaciji gradskog naselja Rastočine.

^{2}E – FLIŠ

Naslage fliša (slika 3-11), koje dalje transgresivno leže na foraminiferskim vapnencima, nalaze se u središnjem dijelu sinklinale Rječine (Slika 3-1) . Dolina Rječine dio je morfostrukturne jedinice koja se pruža pravcem SZ-JI, od Ilirske Bistrice, kroz dolinu Rječine i Bakarski zaljev do Vinodolske doline (Slika 3-10; Benac et al., 2011; Palenik et al., 2019). Ova bi se morfostrukturna jedinica mogla opisati kao sinklinala dominantno ispunjena naslagama fliša (Benac et al., 2011) srednje do gornje eocenske starosti (Palenik et al., 2019) odnosno starosti mlađeg luteta. Ukupna debljina paketa naslaga fliša iznosi 400-600 m (Slika 3-2; Šikić et al., 1967).



Slika 3-10. Geološka karta šireg istraživanog područja (Palenik et al., 2019)

Naslage fliša sastoje se od breča i konglomerata, pješčenjaka, lapora i glina, uz izraženu glinovitu i kvarcnu komponentu (Šikić et al., 1967). Odlikuju se litološkom heterogenošću, točnije vertikalnom i lateralnom izmjenom različitih stijena, dominantno glinovitih lapora, siltita, šejlova i sitnozrnatih pješčenjaka (Benac et al., 2011).

Breče i konglomerati se pojavljuju u slojevima debljine 3-8 m.

Pješčenjaci su građeni od subangularnih zrnaca kvarca i litičnih fragmenata, uz rjeđa zrna feldspata, a vezivo je glinoviti agregat kvarca. Udjeli pojedinih komponenti su sljedeći: kvarc 37%, fragmenti stijena 30%, feldspati 9,5%, 1-2% tinjaca i klorita, te 20-24% veziva. Debljina pojedinih slojeva se povećava s dubinom, pa donji slojevi imaju debljinu od 220 cm, dok gornji slojevi imaju debljinu tek 1-6 cm (Šikić et al., 1967).

Laporovite naslage sadrže 24-77% $CaCO_3$ definirane su kao laporovite gline. Također se pojavljuju i šejlovi koji sadrže 35% minerala glina. Iako ovi slojevi mogu biti i deblji, prema OGK tumaču lista 33-89 (Šikić et al., 1967), prosječna im debljina iznosi 10-40 cm.



Slika 3-11. Naslage fliša na lokaciji Škurinjske drage, sjeverno od same jezgre Riječke sinklinale.

3.4 KVARTAR

Prema OGK tumaču lista 33-89 (Šikić et al., 1967), kvartarne naslage nalazimo na istraživanom području uglavnom u najplićim dijelovima dolinama. Na Grobničkom polju nalaze se slabo sortirane, uslojene jezerske naslage (j), u kojima su definirane gline, pjeskovite gline, pijesci i šljunci (Slika 3-12). Terra rossa (ts), drugoga naziva i zemlja crvenica, prekriva jezgru riječke sinklinale s nanosima debljine nekoliko centimetara do nekoliko metara. Sipar (s) nalazi se u dolini Rječine i usko je vezan za naslage fliša, koje su podložne eroziji i raspadanju (Vivoda et al., 2012). Aluvijalni nanosi (al) nalaze se u gornjem dijelu toka rijeke Rječine. Također se radi o materijalu erodiranom iz naslaga fliša, koji je zatim transportiran rijekom. Osim pijeska i gline, u aluvijalnim nanosima rijeke Rječine nalaze se veće količine šljunka, čije su valutice promjera do 20 cm.



Slika 3-12. Kvartarne naslage na području Grobničkog polja.

4 TEKTONSKI I GEMORFOLOŠKI RAZVOJ PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

4.1 TEKTONSKI RAZVOJ

Istraživano područje pripada Jadranskoj karbonatnoj platformi, čiji je razvoj uvjetovan kontinuiranim dinamičkim procesima koji su izazvali koliziju mikroploče Adria i Europske ploče (Palenik et al., 2019). Jadranska karbonatna platforma jedna je od karbonatnih platformi nastala dezintegracijom megaplatforme u srednjoj juri (Schmid et al., 2008). Međudjelovanjem tektonike i erozije na području su registrirani brojni kraći ili duži periodi emerzije. Unatoč tome, platforma se dominantno sastoji od sedimentnih stijena taloženih u plitkomorskim uvjetima. Kraj razvoja platforme definiran je regionalnom emerzijom na prijelazu iz krede u paleogen. Ukupna debljina karbonatnog slijeda varira između 3500 i 5000 m (Tomljenović et al., 2008; Vlahović et al., 2005).

Prema Šikić et al., 1967, istraživano se područje sastoji od dvije tektonske jedinice: Riječki paleogenski bazen na zapadu, te jugoistočni dio kredno palegenske građe Čićarije koja pokriva istočni dio istraživanog područja.

Riječki bazen proteže se pravcem SZ-JI, i pretežno prati tok rijeke Rječine, nastavljajući se dalje prema Bakarskom zaljevu (Slika 3-10). Budući da je bazen dio zone rasjeda Ilirska Bistrica – Rijeka – Senj, rasjedi su mnogobrojni, a mnogi od njih pokazuju i neotektonsku aktivnost (Palenik et al., 2019). Česti su potresi relativno slabih magnituda (ML<4), uz povremene pojave i jačih potresa (Markušić et al., 2019, iz Ivančić et al., 2006, 2018).

Od Riječkog zaljeva prema sjeverozapadu proteže se kredno-paleogenska tektonska jedinica unutar koje se može izdvojiti više manjih cjelina. Borano područje Kastavske zaravni jedina je cjelina koja spada u istraživano područje. Ova cjelina je od ostatka tektonske jedinice odvojena morfološki i rasjedima. Cjelinu karakterizira niz sekundarnih bora u pločastim vapnencima, a na sjeveroistoku cjeline definiran je niz rasjeda na prijelazu u sinklinalu doline Rječine (Šikić et al., 1967).

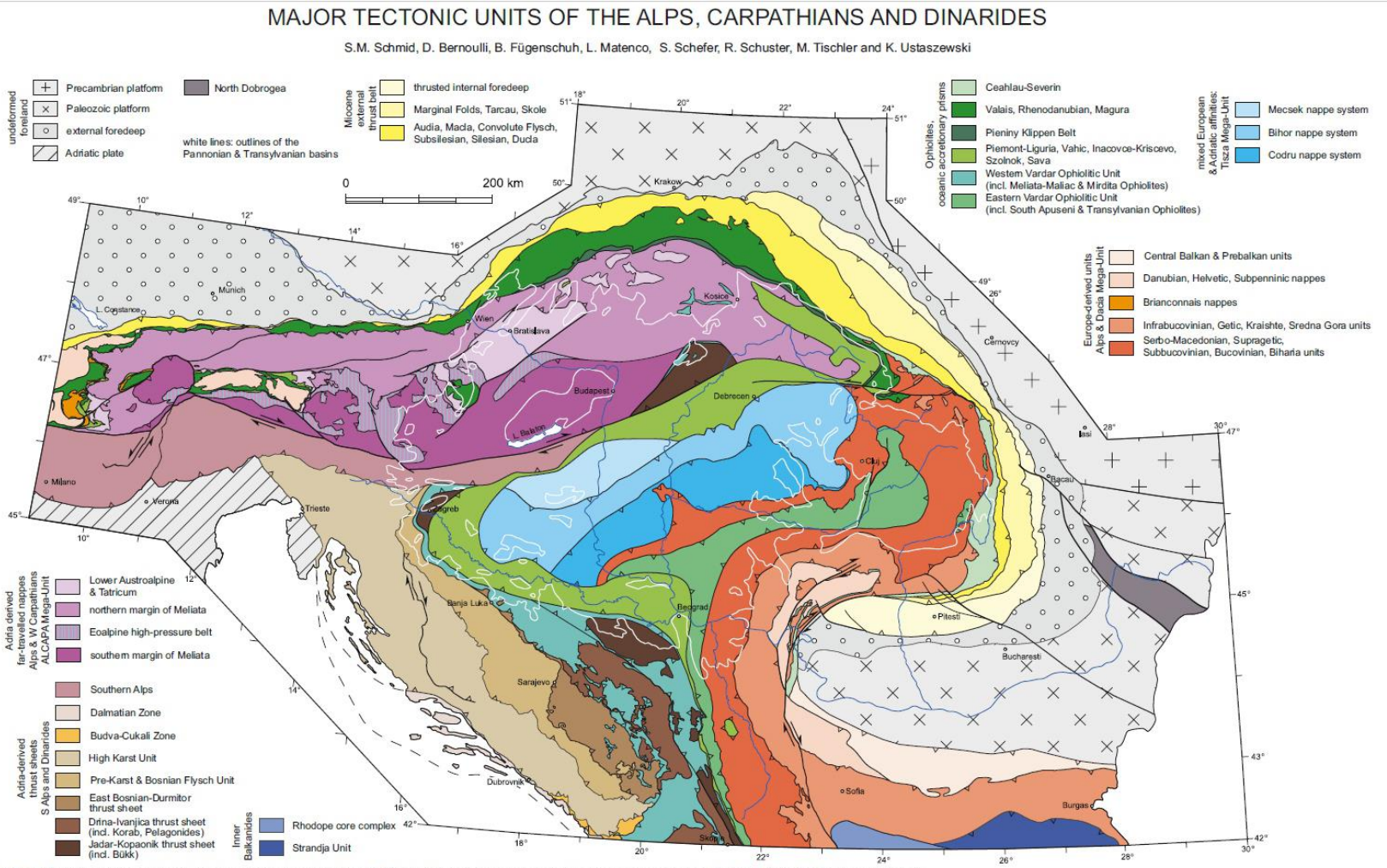


Plate 1: Major tectonic units of the Alps, Carpathians and Dinarides 1:5'000'000. Note that the locations of the cross-sections given in Fig. 3 and Plates 2 & 3 are found in Fig. 6.

Slika 4-1. Tektonska karta regionalnog područja (Schmid et al., 2008)

4.2 GEOMORFOLOŠKE ZNAČAJKE

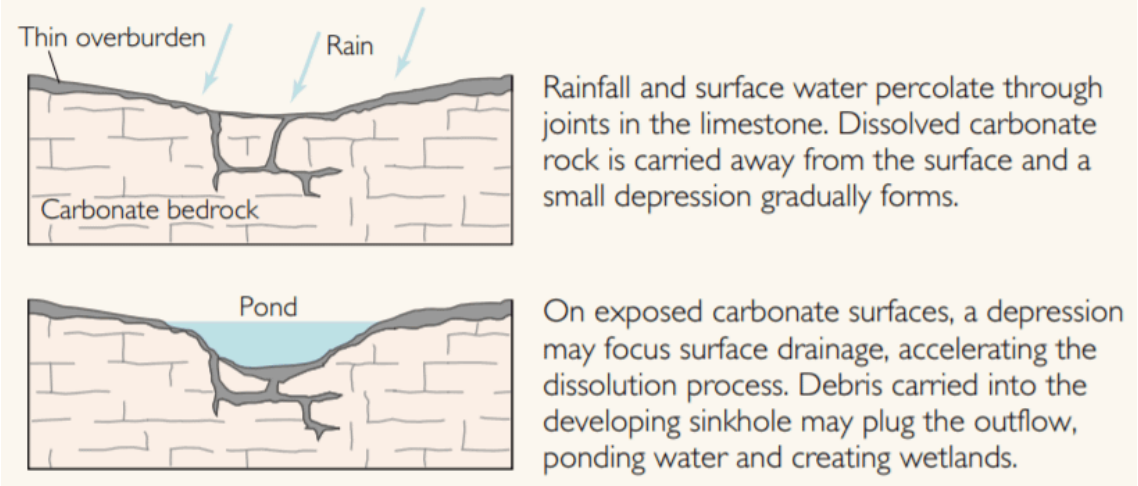
Područje istraživanja karakterizira krški teren te krški reljefni oblici. S obzirom na karbonatnu podlogu i velike prosječne godišnje količine padalina, koja je u 2020. godini prema Državnom hidrometeorološkom zavodu iznosila 1248 mm (www.meteo.hr), na području istraživanja prevladavaju dominantno vrtače i drugi manji površinski erozijski oblici. Vrtače kao dominantne reljefne oblike na području istraživanja karakteriziramo kao kružne ili eliptične depresije u tlu, promjera i do nekoliko stotina metara (Kohl, 2001). Dubina vrtača također varira, pa u praksi nalazimo plitke s vrtače vrlo blagim nagibima, kao i duboke vrtače u kojima je nagib "zidova" gotovo vertikalan (Slika 4-2). S hidrogeološkog aspekta vrlo su zanimljive budući da nemaju prirodni površinski drenažni sustav. Sve padaline dreniraju se u podzemlje, pa tako vrtače igraju veliku ulogu u napajanju krških vodonosnika (Ford & Williams, 2007). Iako mogu nastati u evaporitnim stijenama, vrtače se najčešće formiraju u karbonatima, gdje se karbonatna podloga erodira mehaničkim i kemijskim procesima uslijed čega dolazi do slijeganja ili urušavanja terena.



Slika 4-2. Najveća vrtača na istraživanom području (promjera približno 300 m) nalazi se na lokaciji zapadno od naselja Marčelji.

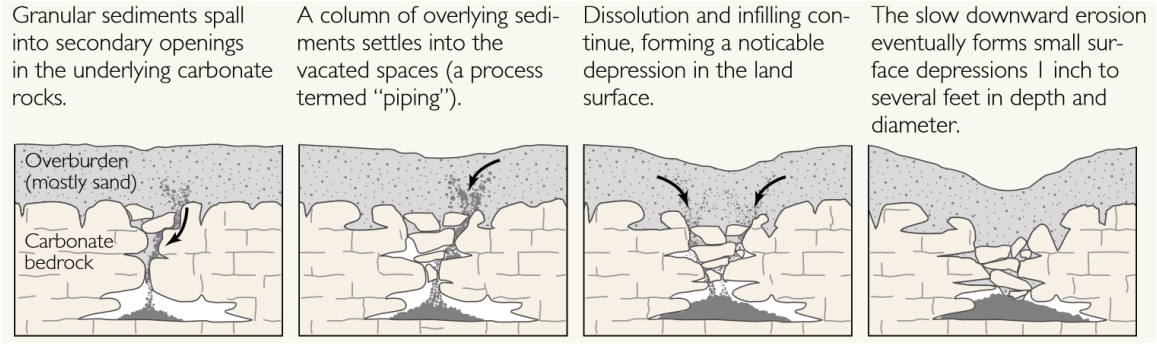
Postoji više definicija i klasifikacija tipova vrtača, ovisno o autoru. Prema Galloway et al.,1999., vrtače su, prema mehanizmu nastajanja, podijeljene u tri tipa: a) disolucijske vrtače; b) vrtače s sliježućim pokrovom; te c) vrtače s urušavajućim pokrovom.

Disolucijske vrtače (Slika 4-3) nastaju kada padaline i površinska voda, koji imaju blago kisela svojstva zbog otopljenog CO_2, dođu u direktni kontakt s karbonatima, pri čemu dolazi do kemijske erozije (otapanja) karbonatne podloge. Erozija je najznačajnija na granici vodenog lica, na rasjednim i slojnim plohama, te u pukotinama. Otopljene karbonatne stijene erodirane su s površine, na kojoj se zatim postepeno razvija depresija.



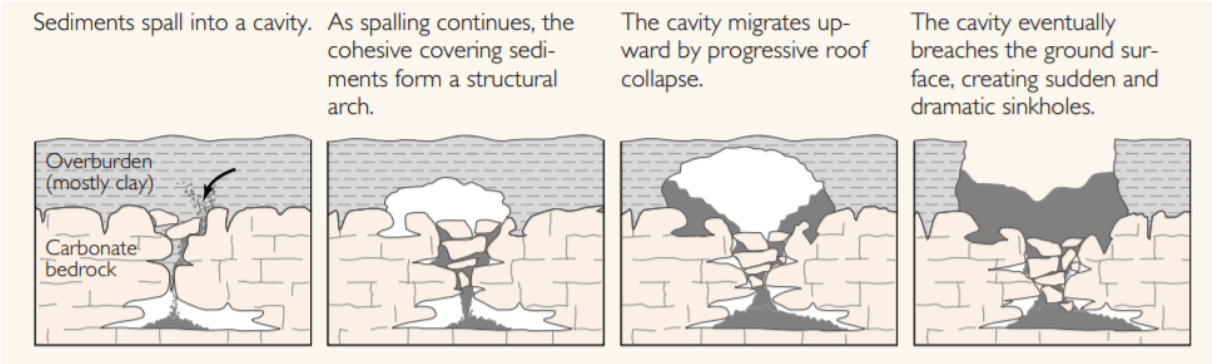
Slika 4-3. Shematski prikaz razvoja disolucijskih vrtača (Galloway et al., 1999).

Vrtače sa sliježućim pokrovom (Slika 4-4) se postepeno razvijaju na područjima gdje iznad karbonatne podloge postoji pojas pokrovnog sedimenta čije dimenzije zrna granulometrijski odgovaraju veličini pijeska. Depresija se formira na način da pokrovni sediment ulazi u pukotine i praznine nastale erozijom karbonatne podloge. Postepenim topljenjem karbonata praznine i pukotine se povećavaju, što rezultira daljnjom migracijom sedimenta, a samim time i širenjem i produbljivanjem same depresije.



Slika 4-4. Shematski prikaz razvoja vrtača sa sliježućim pokrovom (Galloway et al., 1999).

Vrtače s urušavajućim pokrovom (Slika 4-5) razlikuju se od prethodnog tipa vrtača u dimenzijama zrna pokrovnog sedimenta, koji u ovom tipu vrtača granulometrijski odgovara česticama gline. Za razliku od slijeganja terena, koje se generalno odvija kroz duži vremenski period, urušavanje je nagli proces koji se najčešće odvije unutar nekoliko minuta ili sati. Zbog brzine odvijanja procesa, urušavanje tla je vrlo opasan proces koji može imati katastrofalne posljedice za infrastrukturu kao i ljudske živote. Do urušavanja pokrovnog sedimenta dolazi kada glineni sediment iz podine sedimentnog sloja upada u praznine i pukotine nastale otapanjem karbonatne podloge. No, za razliku od pijeska, glina ima veću kompaktnost i koheziju pa se krovina pokrovnog sedimentnog sloja ne deformira. Umjesto toga, pokrovni sedimentni sloj formira luk ispod kojeg se nalazi praznina uzrokovana dislokacijom sedimenta. S vremenom, taj se luk smanjuje do trenutka kada više ne može podržavati vlastitu težinu, te dolazi do urušavanja. Taj je proces najučestaliji uslijed velikih oborina, gdje voda znatno povećava težinu te smanjuje čvrstoću i stabilnost tla.



Slika 4-5. Shematski prikaz razvoja vrtača s urušavajućim pokrovom (Galloway et al., 1999).

5 METODOLOGIJA

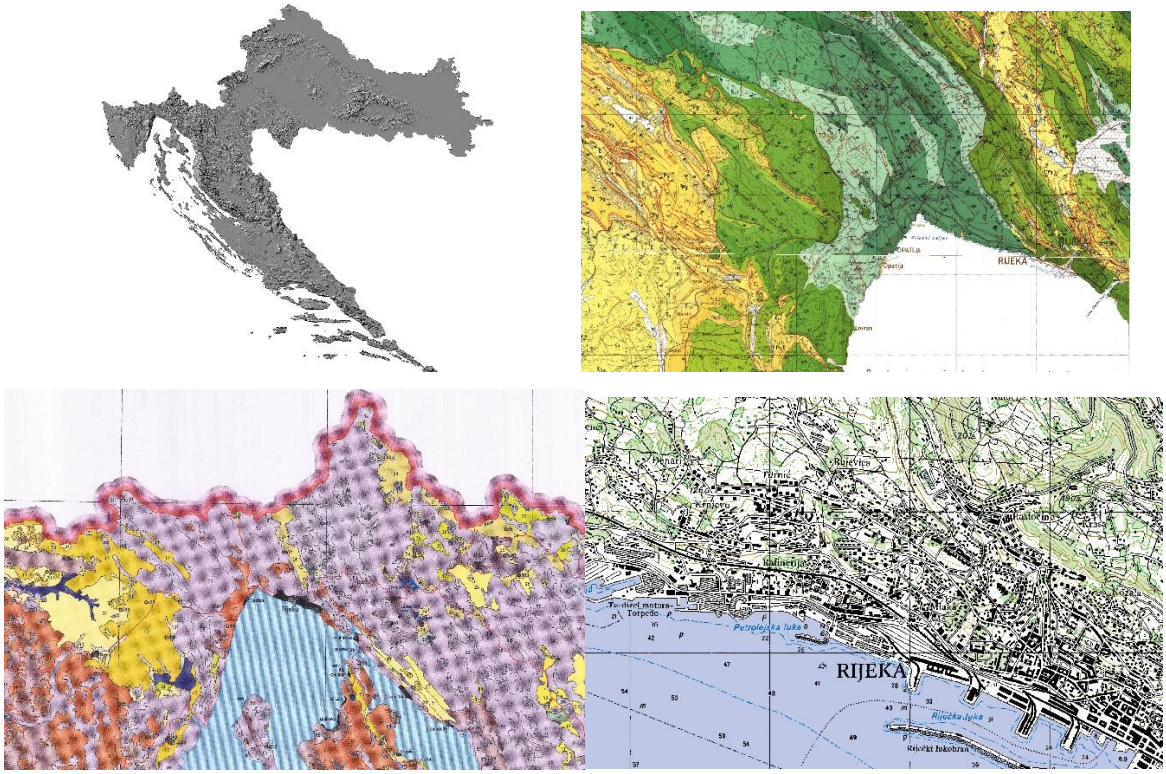
5.1 METODA IZRADE KARTE GEOHAZARDA

Temelj procjene geohazarda na pretežito krškim terenima leži u analizi vrtača, koje su jedan od najznačajnijih indikatora otapanja karbonatne podloge. Pojava i razvoj vrtača uvjetovani su i ovise o raznim faktorima: geologija područja, vrsta pokrovnog materijala, geomorfologija terena, utjecaj čovjeka i sl. Iz tog se razloga morfometrijska analiza vrtača na krškim područjima pokazala kao dobar alat za procjenu opasnosti pojedinih dijelova područja.

Uporaba GIS (geografski informacijski sustavi) softvera omogućuje korisniku integraciju različitih setova podataka u svrhu postizanja preciznijih rezultata u kraćem vremenskom roku od tradicionalnih analitičkih metoda. Također, omogućuje identifikaciju i kvantifikaciju uvjeta koji su odgovorni za hazarde u kršu (Al-Kouri et al., 2013).

Izrada karte geohazarda za područje Rijeke i njene neposredne okolice ostvarena je pomoću softvera ArcGIS 10.3 tvrtke ESRI. Softver je korišten za izradu, georeferenciranje te obradu ulaznih podataka, kao i za konačni prikaz rezultata.

U sklopu rada, kao ulazni podaci korišteni su satelitski snimci područja; pedološka karta OPK 1:300 000 (Bogunović et al., 1996), topografska karta Republike Hrvatske u mjerilu 1:25 000 (Državna geodetska uprava); isječci geološke karte OGK 1:100 000, listovi Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967) i Labin (Šikić et al., 1969); te digitalni model reljefa rezolucije 30 x 30 m (Aster GDEM). Ulazni podaci prikazani su na slici 5-1.



Slika 5-1. Mozaik ulaznih podataka. Slika gore lijevo: digitalni model reljefa (Aster GDEM); slika gore desno: OGK 1:100 000, listovi Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967) i Labin (Šikić et al., 1969); slika dolje lijevo: OPK 1:300 000 (Bogunović et al., 1996); slika dolje desno: TK 1:25 000 (Državna geodetska uprava)

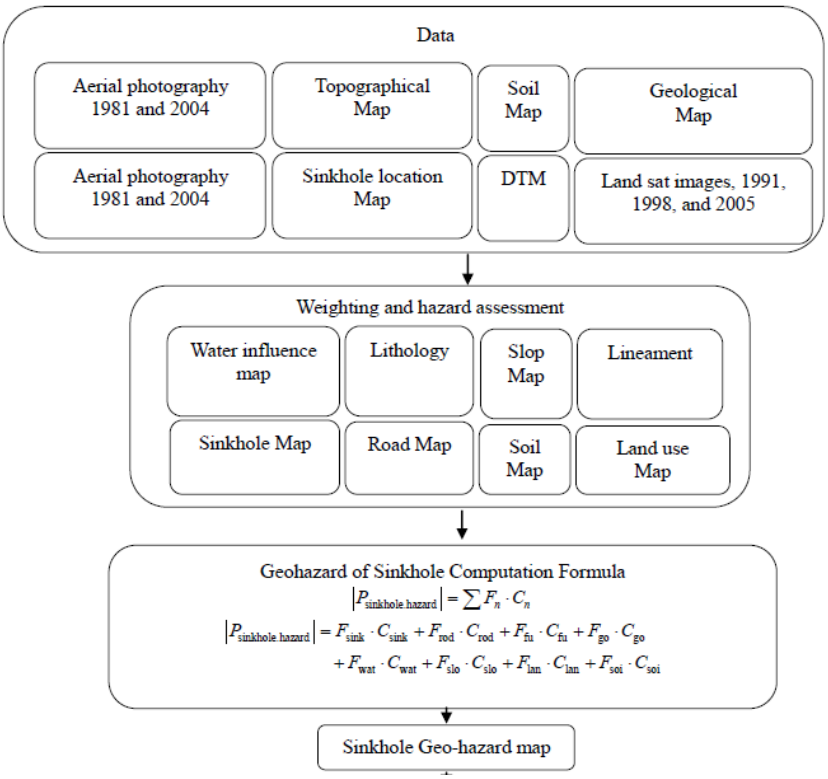
Budući da na geohazard utječu razni prirodni i antropogeni uvjeti, u svrhu ovog diplomskog rada identificirano je osam elemenata hazarda, a sama izrada karte geohazarda zahtijeva sumiranje težinskih vrijednosti elemenata hazarda, što omogućuje izradu modela heohazarda. U tu svrhu korišten je metodološki pristup opisan u radu „Geospatial Modeling for Sinkholes Hazard Map Based on GIS & RS Data“ (Al-Kouri et al., 2013). Shodno navedenome, u provedenom istraživanju, unutar GIS aplikacije analizirani su prostorni odnosi između pojave vrtača, litologije terena, distribucije tla, vodenih površina, rasjeda, glavnih prometnica, te negiba terena, što je detaljnije opisano u poglavlju 5.3. Temeljem istih izrađene su tematske karte odnosno rasterske teme koje predstavljaju jedan element hazarda. Unutar svakog tematskog rastera prikazani su faktori elementa hazarda, a razlikuju se ovisno o utjecaju pojedinog faktora na sam element hazarda, te u konačnici i na rezultat modela geohazarda. Svi su ulazni rasteri spremljeni u GIS okruženju te im je prilikom izračuna dodijeljena težinska vrijednost.

Generalno govoreći, geoprostorni podaci u GIS-u izrađuju se ili u rasterskom ili u vektorskom obliku. U okviru ovog rada, tematske karte izrađene su u rasterskom obliku, iz razloga što je s podatke u rasterskom obliku lakše procesuirati i prostorno analizirati. Temeljna jedinica u obradi rasterskih podataka je piksel (P), koji u našem slučaju predstavlja jedan kvadratni metar.

U ovom radu, svaki faktor hazarda (F) prikazan je u matrici piksela koja predstavlja rasterski model pojedinog elementa hazarda kao i u radu Al-Kouri et al., 2013. Suma faktora koji utječu na model geohazarda iznosi ΣF_n; za svaki piksel na karti geohazarda. No, budući da razni faktori imaju različite utjecaje, svakom faktoru F_n pridodan je koeficijent (*Cn)* koji određuje utjecaj pojedinog faktora na geohazard. Prema tome, ukupnost utjecaja svih faktora za pojedini piksel može se izraziti kao:

$$P = \Sigma F_n * C_n \quad (1)$$

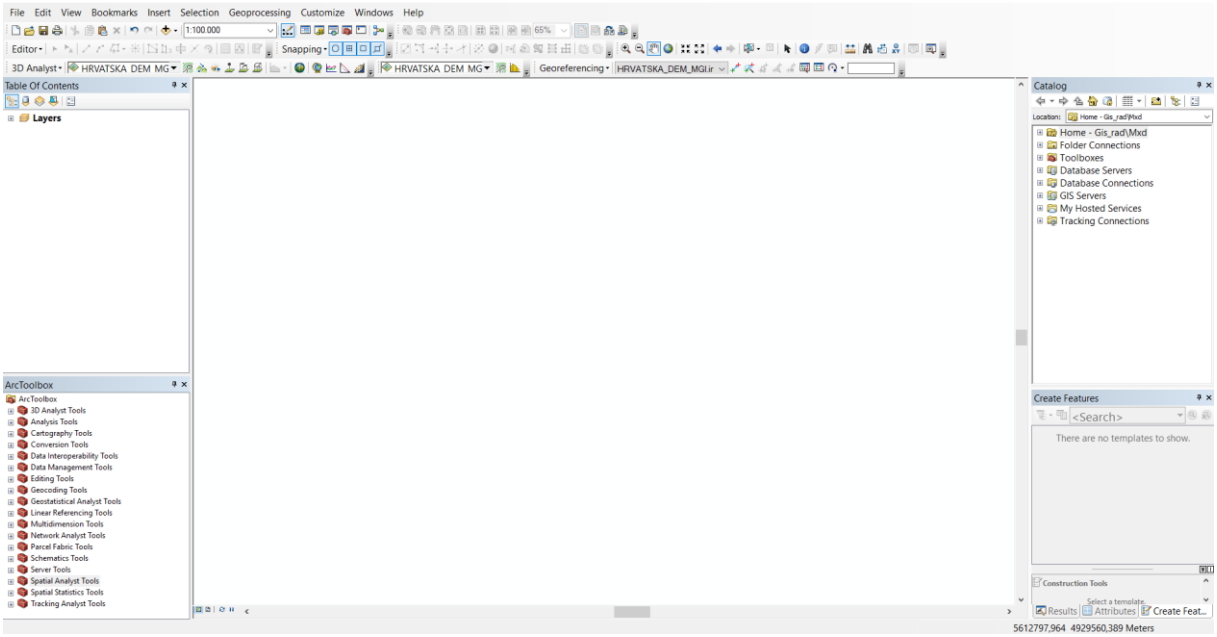
gdje je: P = konačna vrijednost piksela u modelu geohazarda;
F_n = težinska vrijednost faktora n na pikselu P;
C_n = koeficijent utjecaja pridodan F_n



Slika 5-2. Shematski prikaz izrade karte geohazarda iz ulaznih podataka (Al-Kouri et al., 2013).

5.2 ArcGIS

ArcMap je glavna komponenta ArcGIS sustava koja omogućuje izradu, prikaz i obradu geoprostornih podataka te izradu dvodimenzionalnih karata. Opis softvera, njegovih mogućnosti, alata i naredbi korištenih u sklopu ovog rada preuzet je sa službene ArcGIS web stranice (www.arcgis.com).



Slika 5-3. Prikaz ArcMap sučelja.

Prije početka GIS projekta preporuča se izrada radne mape unutar koje se pohranjuju svi ulazni podaci kao i nove mape u koje će se pohranjivati svi podaci dobiveni obradom ulaznih podataka. U sklopu izrade ovog rada kreirane su projektne mape „Mxd“ u koju se pohranjuje ArcMap projektna Mxd datoteka; mapa „Shp“ gdje se pohranjuju svi izrađeni shapefileovi; mapa „Raster“ u koju se pohranjuju rasteri nastali konverzijom shapefileova te mapa „Xls“ u koju se pohranjuju Microsoft Excel datoteke.

U izradi diplomskog rada, nakon što je započet novi ArcMap projekt, prvo su uneseni ulazni podaci. Unutar prozora Cataloge (Slika 5-3) radna mapa „GIS“ povezana je s mxd datotekom naredbom Connect folder, kako bi se lakše pristupalo ulaznim podacima te kako bi se organizirale i pohranile nove datoteke. Podaci se unose naredbom Add Data, koja se nalazi na glavnoj alatnoj traci.

Prvo je unesen digitalni model reljefa (DEM) koji je prethodno georeferenciran, te ostali ulazni vektorski i rasterski podaci. Svi novi podaci u sklopu ovog rada su organizirani i obrađeni u službenom referentnom koordinatnom sustavu HTRS96/TM pri čemu su od prije

postojeći podaci u MGI Balkans 5 projekciji korišteni pomoću on-the-fly geotransformacije, podešene u GIS projektu.

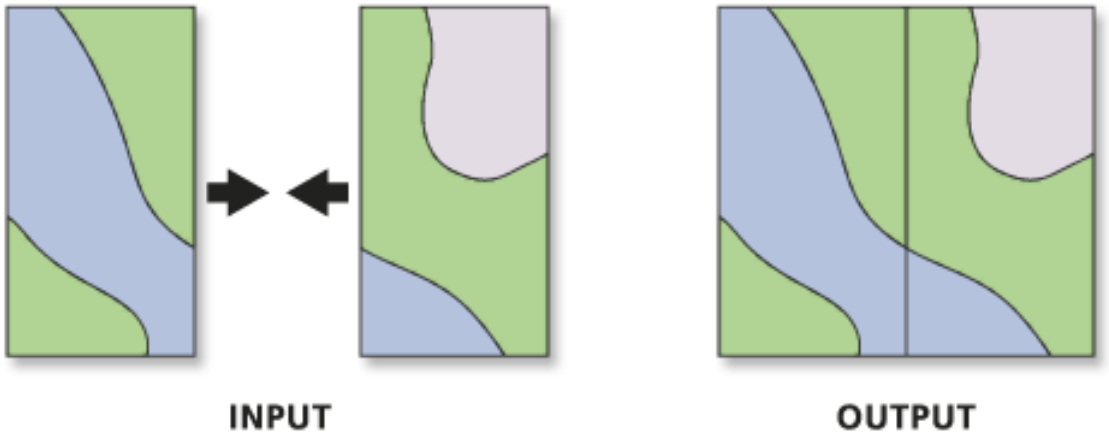
Georeferenciranje ulaznih podataka

Ulazni vektorski i rasterski podaci georeferencirani su pomoću alata „Georeferencing“ koji nalazimo u istoimenoj alatnoj traci (Slika 5-3). Ukoliko ona nije bila prikazana na GIS sučelju, ista je uključena pomoću naredbe Customize > Toolbars > Georeferencing. Naredbom Add Control Points dodavani su parovi kontrolnih točaka, po jedna za svaki od rastera koji sudjeluju u georeferenciranju (raster koji se želi georeferencirati i raster koji je već georeferenciran ili se nalazi na svojoj pravoj poziciji). Određuju se kontrolne točke koje predstavljaju istu lokaciju na oba rastera, na način da se zadaju na uočljivim i dobro definiranim objektima ili geografskim lokacijama (npr. obalna linija, vrhovi planina i sl.). Par kontrolnih točaka na odgovarajućim rasterima čini georeferentnu vezu (link), a kako bi proces georeferenciranja bio uspješan, potrebne su minimalno 3 a optimalno 4 takve veze. Povećavanjem broja veza povećavana je preciznost samog procesa, a u sklopu ovog rada kreirano je po 6 veza za svaki georeferencirani raster. Ukoliko je preklapanje rastera zadovoljavajuće te ukoliko su odstupanja unutar zadovoljavajućih vrijednosti, georeferenciranje se potvrđuje i završava naredbom *Rectify*.

Izrada i obrada podataka

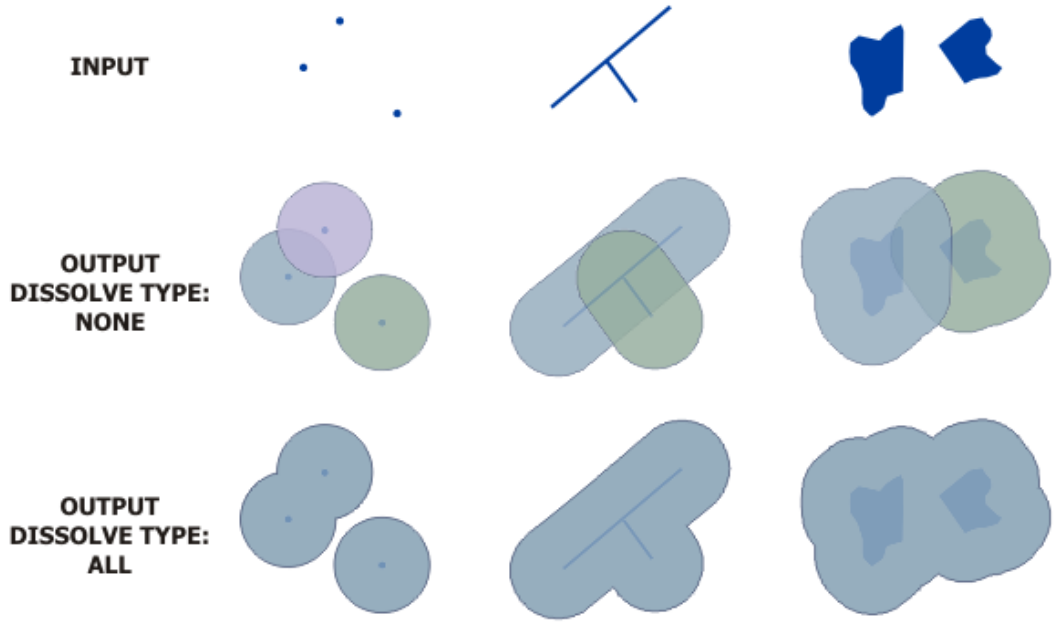
Budući da su ulazni podaci rasteri u raznim rezolucijama, izrađeni su setovi vektorskih podataka, od kojih svaki set predstavlja jednu tematsku kartu geohazarda. Takav oblik zapisa naziva se *shapefile*, a predstavlja jednostavni vektorski format za pohranu stvarnih geometrijskih objekata i njhovih atributnih informacija. Vektorski podaci u shapefile-u, koji se nazivaju i značajke (features), mogu biti zapisani u tri različita oblika: točke, linije i poligoni. U ovome su radu korišteni samo vektorski podaci u linijskom i poligonskom obliku (Slika 5-9).

U korištenju vektorskih podataka, njihovoj sintezi i analizi često je korištena i naredba *Merge* kojom su se povezivale dvije zasebne vektorske značajke u jednu, koje dalje posjeduju iste atribute u atributnoj tablici (Slika 5-4). Ova se opcija pokazala vrlo korisnom prilikom spajanja više zasebnih značajki istoga tipa (npr. prometnice, rasjedi i sl.).



Slika 5-4. Shematski prikaz povezivanja značajki naredbom *Merge* (www.arcgis.com).

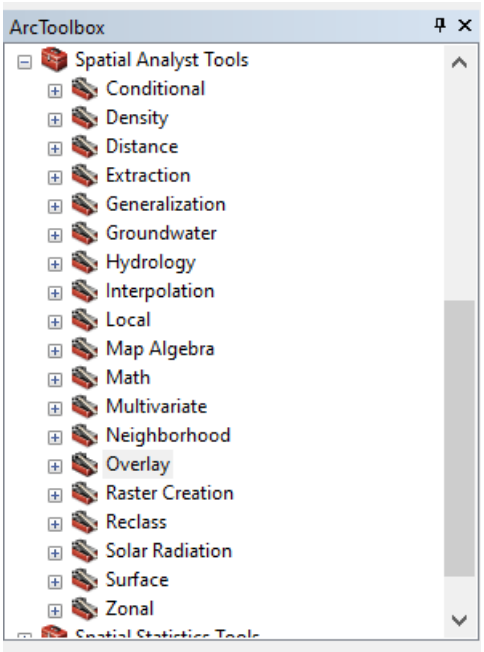
Budući da je sve vektorske podatke naposljetku bilo potrebno pretvoriti u rastere, i s obzirom da linijski vektori nemaju površinu, prostorna komponenta zone utjecaja vektorskih podataka dobivena je naredbom *Buffer* (Slika 5-5). Iako se *Buffer* može iskoristiti i za poligonske i točkaste podatke, u ovome slučaju to je bilo potrebno samo za linijske podatke, budući da poligonski već zauzimaju fizički prostor a točkastih podataka nema. Naredbom *Buffer* ostvareno je se svojevrsno područje utjecaja (Slika 5-5).



Slika 5-5. Shematski prikaz djelovanja naredbe *Buffer* (www.arcgis.com).

Alati za kompleksnije analize i obrade podataka nalaze se u alatnim kutijama u sklopu prozora *ArcToolbox* (Slika 5-6). U ovom radu najvećim dijelom je korištena je ekstenzija

Spatial Analyst a koja korisniku pruža niz setova alata za prostornu analizu i obradu vektorskih i rasterskih podataka.



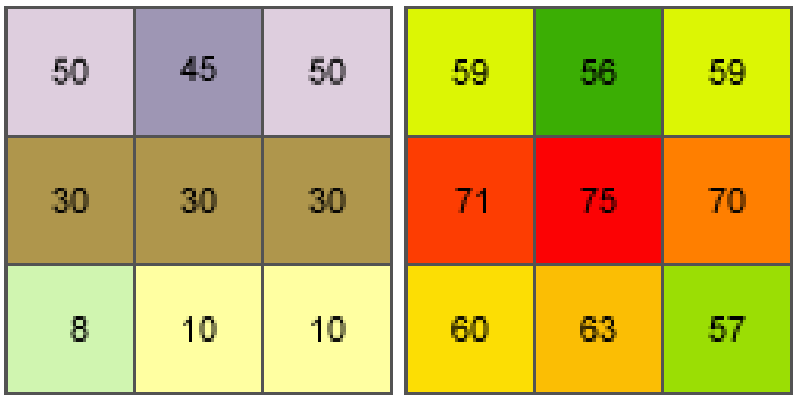
Slika 5-6. Alatna kutija ekstenzije *Spatial Analyst*, s pripadajućim alatima

Jedan od njih je i set alata *Surface* koja je korištena za kvantifikaciju i vizualizaciju terena predstavljenog podacima digitalnog modela reljefa (DEM). Isto tako, naredbom *Hillshade* izrađen je osjenčani model reljefa u svrhu lakše vizualizacije terena i identifikacije raznih geomorfoloških značajki (Slika 5-7).



Slika 5-7. Digitalni model reljefa nakon obrade naredbom *Hillshade*.

Kako bi se kvantificirao nagib terena, korišten je alat *Slope*. Budući da svaka ćelija u DEM rasteru sadrži i visinsku komponentu, izračunat je nagib terena kao razlika visinske komponente z između susjednih ćelija (Slika 5-8). Rezultantni je raster gdje je svaki piksel imao vrijednost u rasponu od 0 do 90 ukoliko se izabere zapis u stupnjevima.



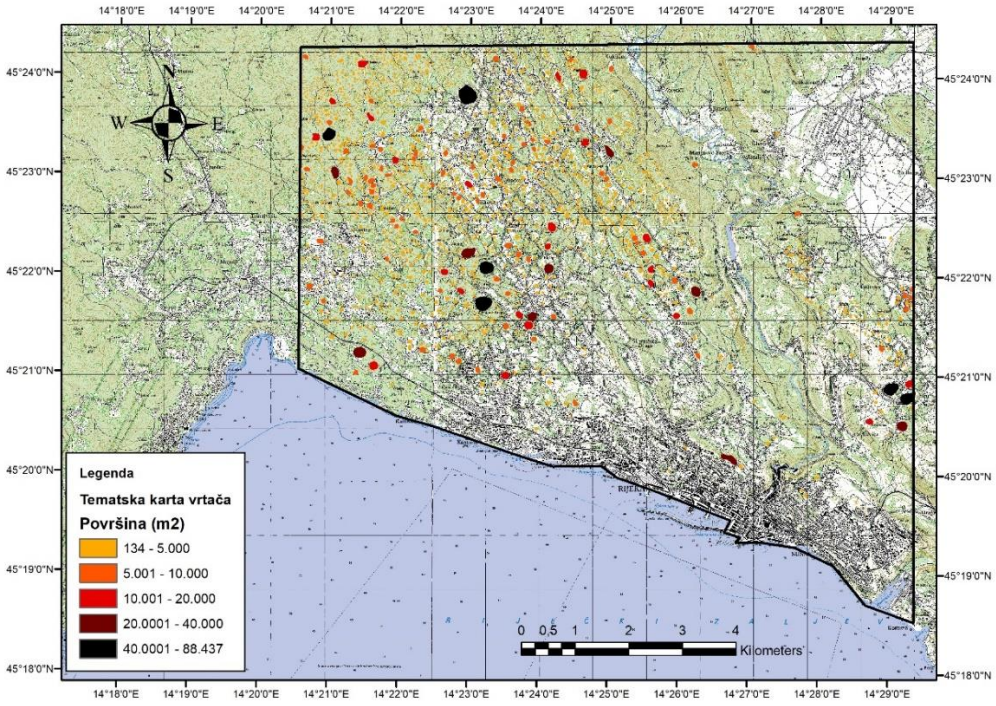
Slika 5-8. Shematski prikaz dobivanja vrijednosti nagiba terena naredbom *Slope*. Lijevo se nalaze vrijednosti visinske komponente z u pojedinom pikselu, a desno se nalaze vrijednosti nagiba terena (www.arcgis.com).

5.3 TEMATSKE KARTE

U sklopu rada izrađene su tematske karte relativnih utjecaja pojedinih elemenata koji sudjeluju u ukupnoj procjeni geohazarda od nastanka i razvoja vrtača na istraživanom području. Karte su izrađene digitalizacijom i obradom podataka u GIS okruženju. Rezultati su dvodimenzionalni prikazi istraživanog područja u rasterskom obliku, gdje svaki piksel predstavlja relativni utjecaj pojedinog faktora tematske karte na ukupni potencijal geohazarda. Težinske vrijednosti tematskih karata zadani su u *integer* obliku, a raspon im se kreće od 1 do 5, gdje vrijednost 1 predstavlja najmanji, a vrijednost 5 najveći utjecaj na potencijal geohazarda.

5.3.1 KARTA VRTAČA

Kao podloga za izradu tematske karte vrtača izabrana je topografska karta Republike Hrvatske u mjerilu 1:25 000 (Državna geodetska uprava). Iako u sklopu ArcMap softvera postoje alati koji omogućuju izdvajanje geomorfoloških oblika na temelju digitalnog modela reljefa (DEM), primijećeno je kako rezolucija DEM-a nije dovoljno velika kako bi se izdvojile vrtače manjeg promjera. Iz tog razloga vrtače su izdvojene metodom digitalizacije poligona prostornog opsega vrtača koristeći se pritom topografskom podlogom kao referencom (Slika 5-9).



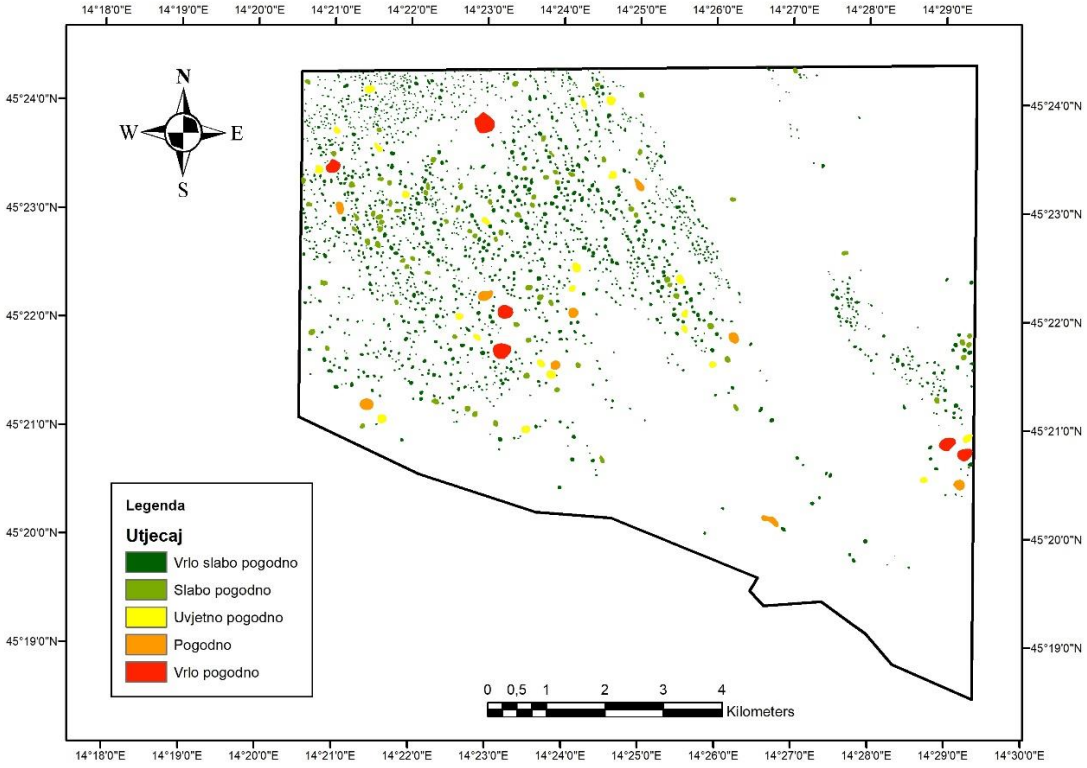
Slika 5-9. Prostorna raspodjela vrtača na istraživanom području.

Na području istraživanja ukupno je izdvojeno 2120 vrtača kojima promjer varira od 10 do 330 metara. Na slici 5-9 prikazana je prostorna raspodjela vrtača na istraživanom području. Opaža se neravnomjerna raspodjela, gdje se velika većina vrtača nalazi na istočnom i sjeveroistočnom djelu istraživanog područja, dok su vrtače na sjeverozapadnom djelu područja vrlo rijetke. Usporedbom s geološkom podlogom (OGK list Ilirska Bistrica, Šikić et al., 1967) primijećena je korelacija između koncentracije vrtača i geoloških jedinica, koje se dominantno nalaze na pločastim vapnencima, izmjenama vapnenaca s dolomitima i u uslojenim vapnencima. U sivim i smeđim vapnencima, kao i u fliškim i kvartarnim naslagama, vrtača praktički i nema. Također, vidljiva je i gusta koncentracija vrtača u blizini transgresivnih granica i rasjeda, izuzevši rasjede u naslagama fliša.

Budući da oblik vrtača varira od kružnice do elipse, kao kriterij kategorizacije umjesto promjera uzeta je površina vrtača. Ovisno o utjecaju na ukupni geohazard, vrtače su na temelju površine klasificirane unutar pet kategorija te im je sukladno tome dodijeljena težinska vrijednost (Slika 5-10; Tablica 5-1).

Tablica 5-1. Težinske vrijednosti raspona površine vrtača na istraživanom području.

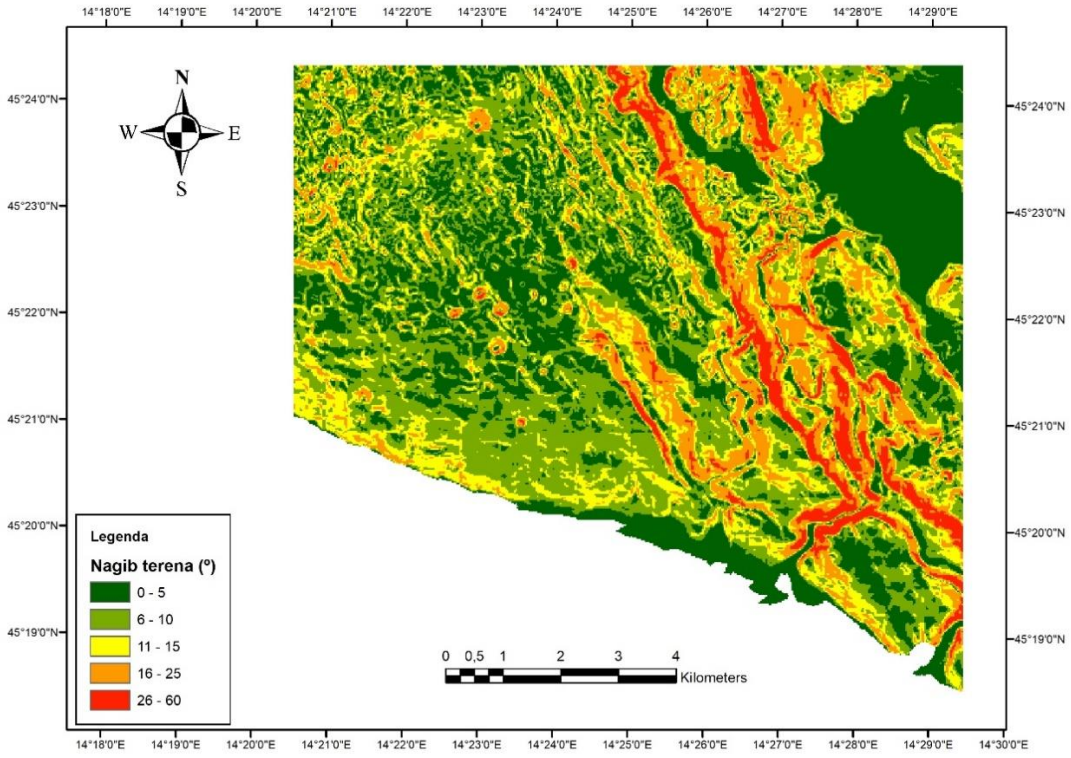
Površina vrtača (m^2)	Težinska vrijednost
<5000	1
5000 - 10000	2
10000-20000	3
20000-40000	4
>40000	5



Slika 5-10. Prostorna raspodjela utjecaja vrtača na geohazard istraživanog područja.

5.3.2 KARTA NAGIBA TERENA

Kao druga težinska karta naredbom Slope je iz digitalnog modela reljefa izrađena tematska karta nagiba terena (Slika 5-11). Svaki piksel na rasteru sadrži prosječnu vrijednost nagiba terena površine 30 x 30 m. Analiza nagiba terena je u ovome radu bila važna zbog činjenice da nagibi terena direktno utječu na infiltraciju oborinske vode u podzemlje, što je glavni mehanizam otapanja karbonatnih stijena a time i stvaranja sustava vrtača (Ford & Williams, 2007.) Infiltracija će biti najznačajnija na područjima niskog nagiba terena, pa je takvim vrijednostima pridodana i najznačajnija težinska vrijednost, što je vidljivo u tablici 5-2.



Slika 5-11. Karta nagiba terena istraživanog područja.

Tablica 5-2. Težinske vrijednosti raspona nagiba terena na istraživanom području.

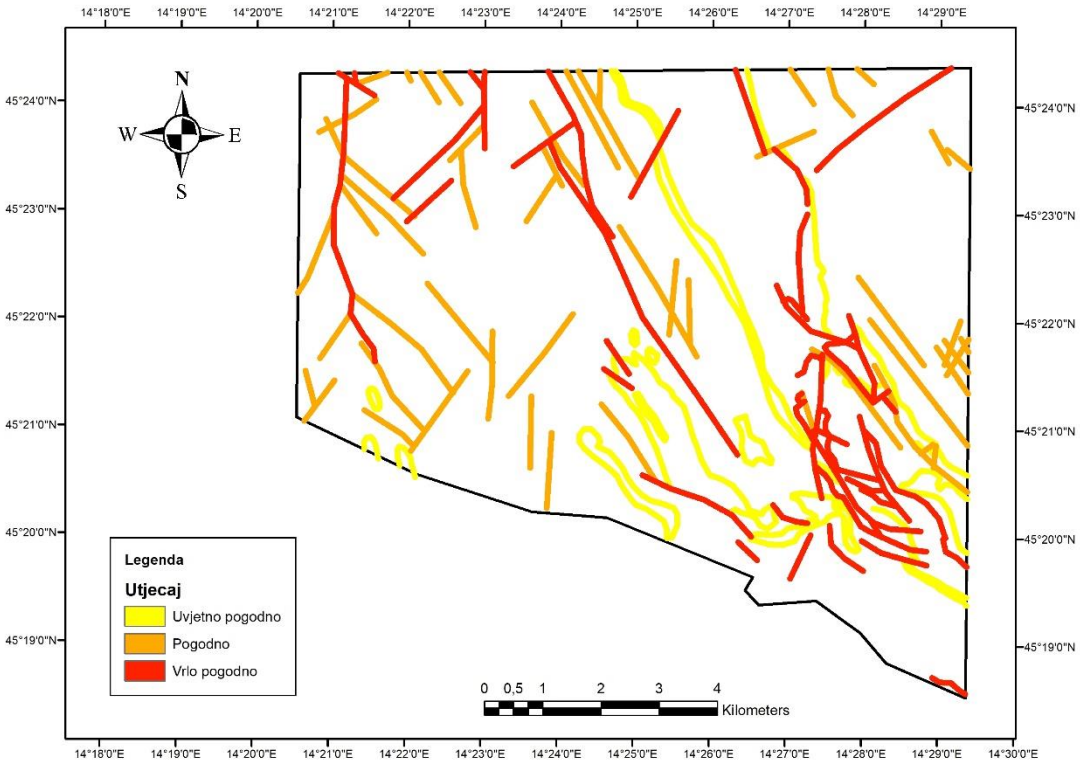
Nagib terena (°)	Težinske vrijednosti
0 - 5	5
6 - 10	4
11 - 15	3
16 - 25	2
>26	1

5.3.3 KARTA RASJEDA I TRANSGRESIVNIH GRANICA

Rasjedi i transgresivne granice preuzeti su s geološke karte OGK listova Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1967) i Labin (Šikić et al., 1969). Rasjedi i transgresivne granice preuzeti su u obliku linijskih vektora. Prije pretvaranja značajki u raster, opcijom *Buffer* značajkama je dodano područje utjecaja u iznosu od ukupno 100 m. Izdvojeno je ukupno 26 utvrđenih i 45 pretpostavljenih rasjeda. Transgresivna granica nalazi se na kontaktu krednih i paleogenskih naslaga, kao i na kontaktu paleogenskih naslaga s naslagama fliša. Učinjena je kategorizacija geoloških značajki, a pripadajuće težinske vrijednosti prikazane su u tablici 5-3 te na slici 5-12.

Tablica 5-3. Težinske vrijednosti geoloških značajki na istraživanom području.

Vrsta	Težinske vrijednosti
Utvrđeni rasjed	4
Pretpostavljeni rasjed	3
Transgresivna granica	2



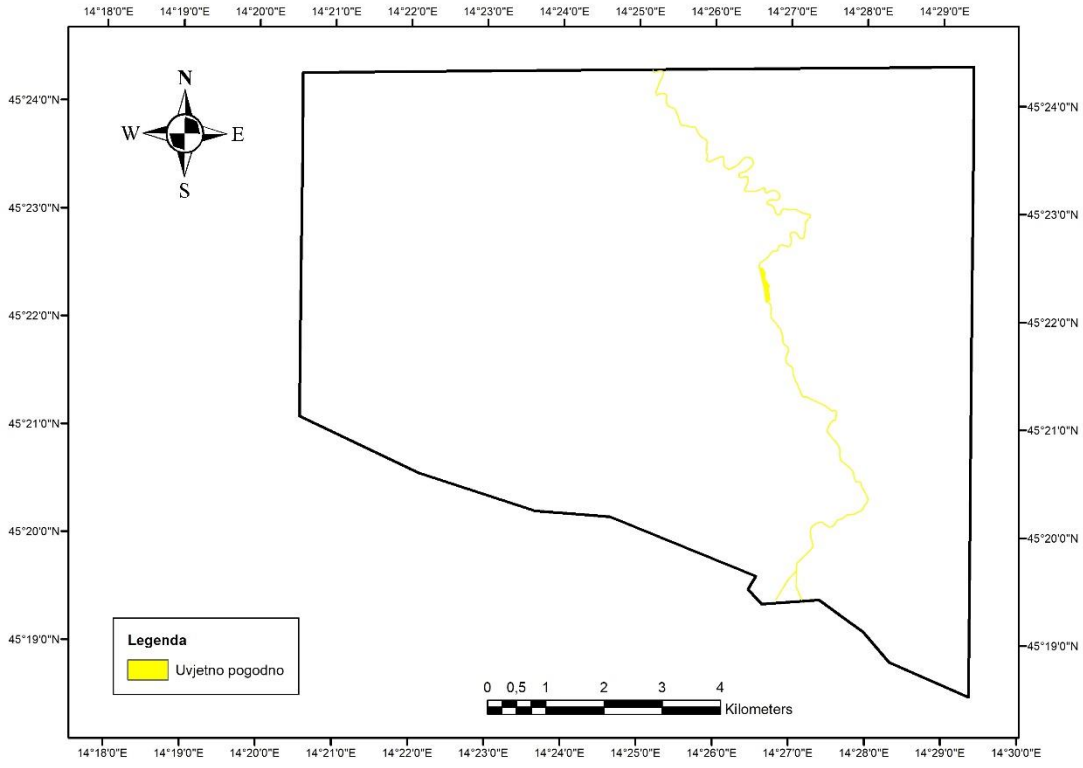
Slika 5-12. Karta utjecaja rasjeda i transgresivnih granica na geohazard istraživanog područja.

5.3.4 KARTA UTJECAJA VODENIH POVRŠINA

Vodene površine vrlo su rijetke na istraživanom području. Od vodotoka, u okviru rada izdvojena je tematska karta vodotoka na kojoj dominira rijeka Rječina. Značajka je izrađena u vektorskom obliku, liniji kojoj je pridodano područje utjecaja ovisno o širini toka. Budući da je širina toka približno ujednačena, određeno je konstantno područje utjecaja ukupne širine 15 m. Izuzetak je akumulacijsko jezero, čija širina u prosjeku iznosi 80 m (Slika 5-13). Težinske vrijednosti prikazane su u tablici 5-4.

Tablica 5-4. Težinske vrijednosti vodenih površina na istraživanom području.

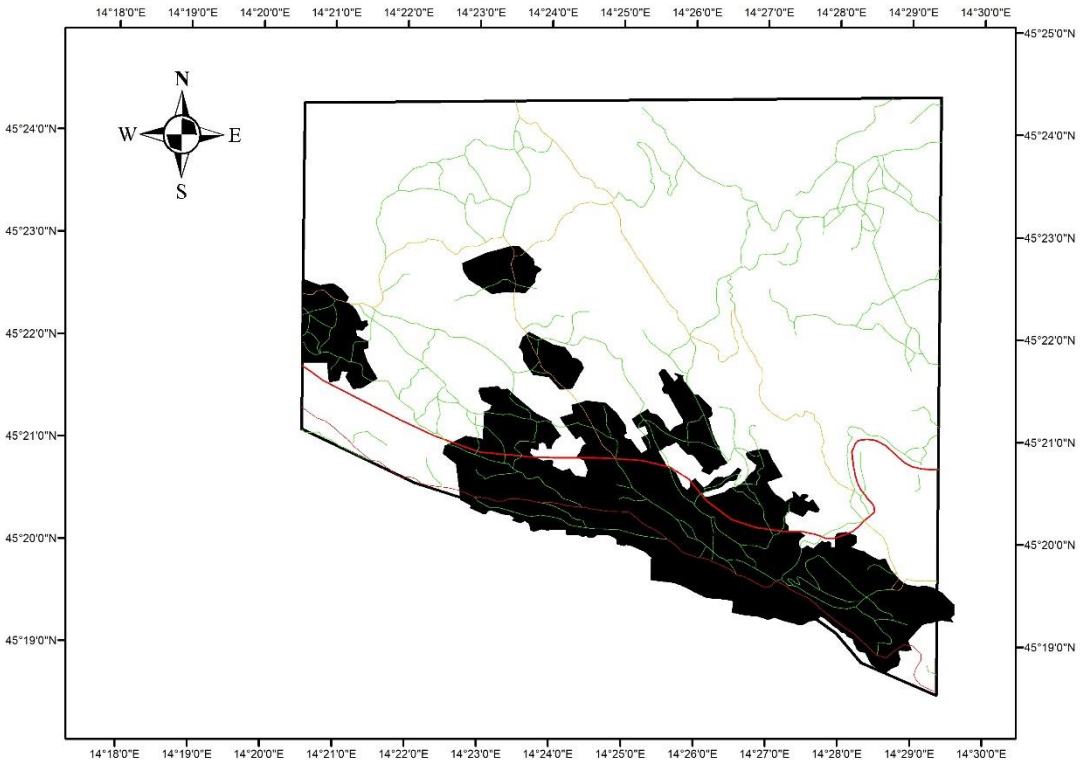
Tip vodene površine	Težinske vrijednosti
Rijeka	3



Slika 5-13. Karta utjecaja vodenih površina na geohazard istraživanog područja.

5.3.5 KARTA PROMETNICA

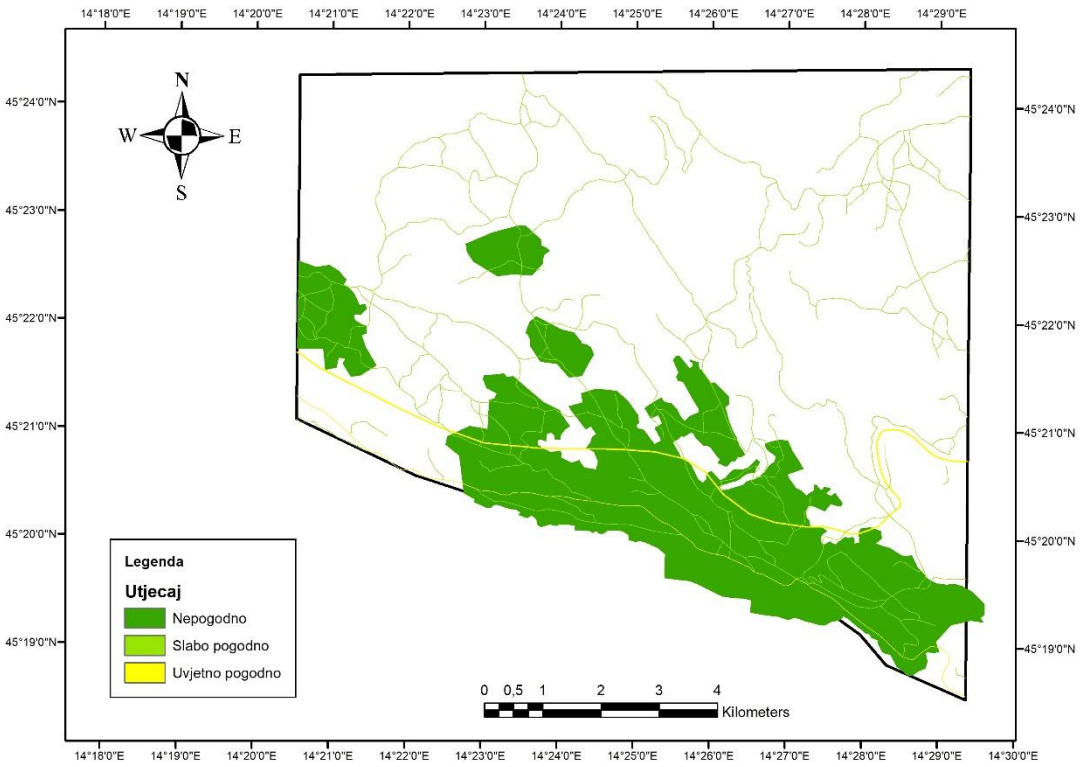
U daljnjem slijedu, težinsko preklapanje podrazumijevalo je i izradu tematske karte prometnica. Tematska karta se sastojala od dva seta podataka koje su činile prometnice, koje su linijski vektori; te naseljene površine, koje su poligoni (Slika 5-14). Prometnice različitih kategorija grupirane u posebne datoteke, te se konvertirane iz linijskih podataka u poligone naredbom *Buffer*. Autocestama je zadan *Buffer* od 25 m, državnim cestama od 10 m, a glavnim cestama od 8 m. Zatim su svi poligoni objedinjeni u jednu datoteku, kojoj su pridodani poligoni koji predstavljaju gradsko područje. Težinske vrijednosti i utjecaji značajki prikazani su u tablici 5-5 i na slici 5-15.



Slika 5-14. Karta prometnica i naseljenih područja u sklopu istraživanog područja.

Tablica 5-5. Težinske vrijednosti vrsta prometnica na istraživanom području.

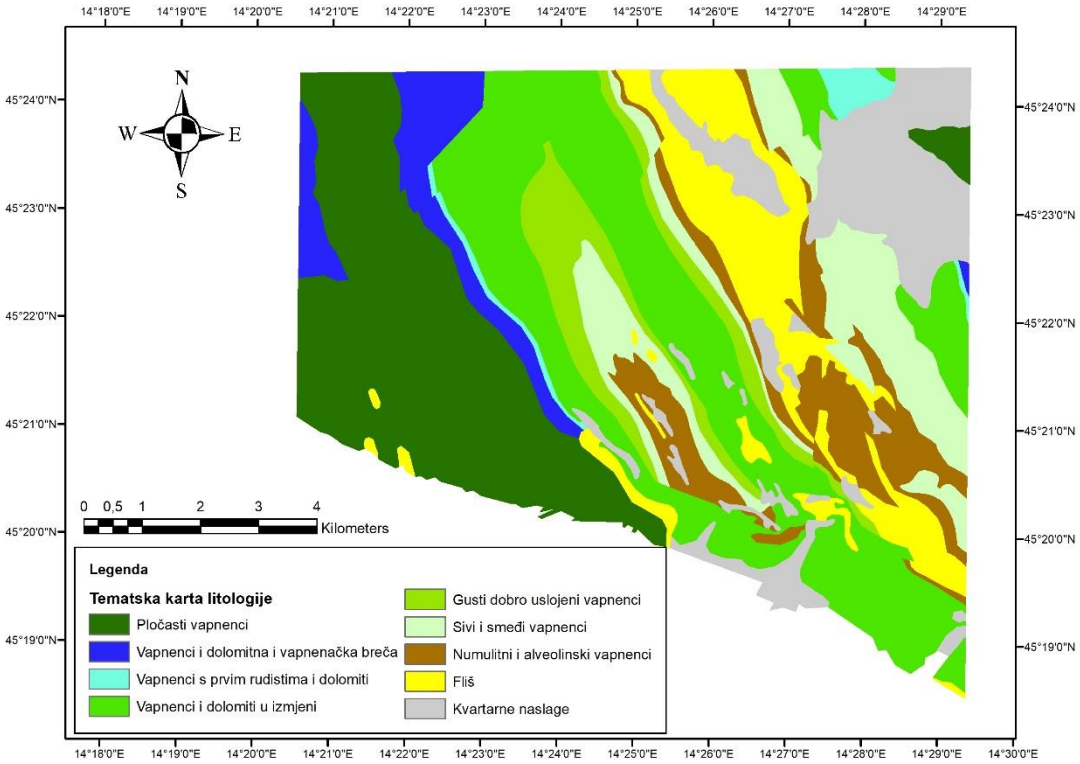
Vrsta prometnice	Težinske vrijednosti
Autocesta	3
Državna cesta	2
Glavna cesta	2
Gradsko područje	1



Slika 5-15. Karta utjecaja prometnica i naseljenih područja na geohazard istraživanog područja.

5.3.6 LITOLOŠKA KARTA

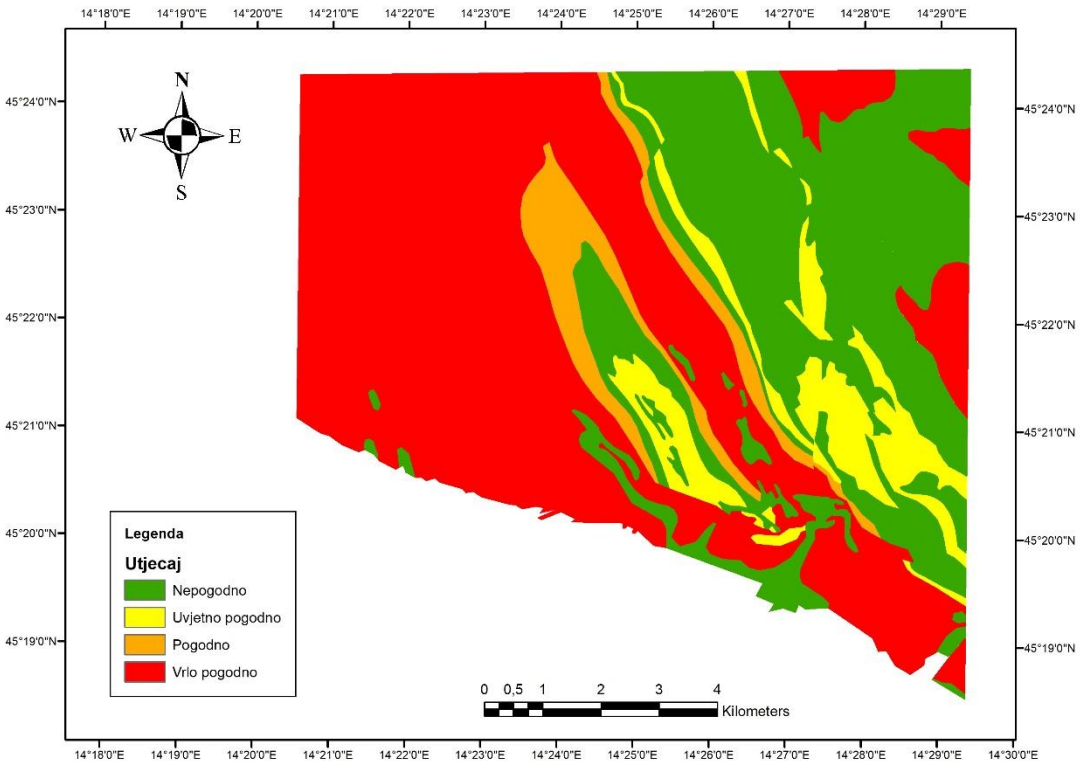
Tematska karta litoloških članova istraživanog područja (Slika 5-16) napravljena je izradom poligona od kojih svaki predstavlja određenu litostratigrafsku jedinicu. Kao podloga za izradu navedene tematske karte korišteni su isječci OGK listova Ilirska Bistrica (Šikić et al., 1972) i Labin (Šikić et al., 1969). Poligoni litoloških članova su objedinjeni u devet kategorija (tablica 5-6), a njihovi utjecaji na potencijal geohazarda prikazani su na slici 5-17.



Slika 5-16. Karta litoloških članova istraživanog područja.

Tablica 5-6. Težinske vrijednosti litoloških članova na istraživanom području.

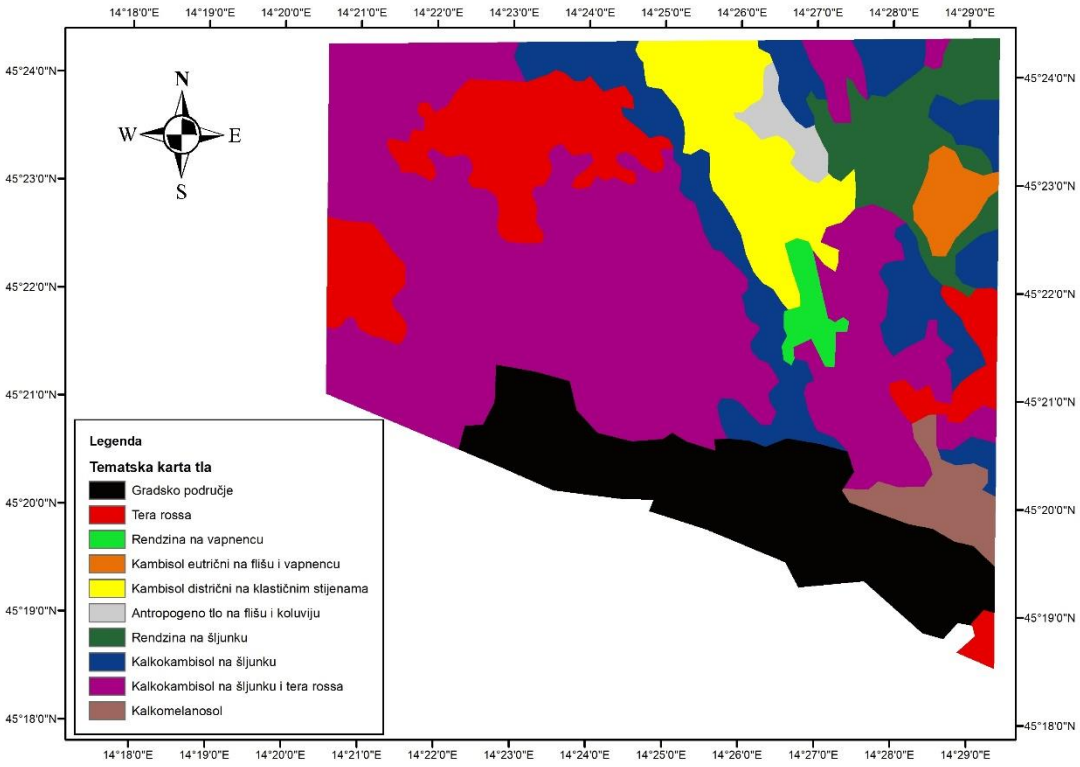
Stratigrafska jedinica	Težinske vrijednosti
Pločasti vapnenac	5
Vapnenci, dolomitna i vapnenačka breča	5
Vapnenci s prvim rudistima i dolomiti	5
Vapnenci i dolomiti u izmjeni	5
Gusti dobro uslojeni vapnenci	4
Sivi i smeđi vapnenci	1
Numulitni i alveolinski vapnenac	3
Fliš	1
Kvartarne naslage	1



Slika 5-17. Karta utjecaja litoloških članova na potencijal geohazarda istraživanog područja.

5.3.7 PEDOLOŠKA KARTA

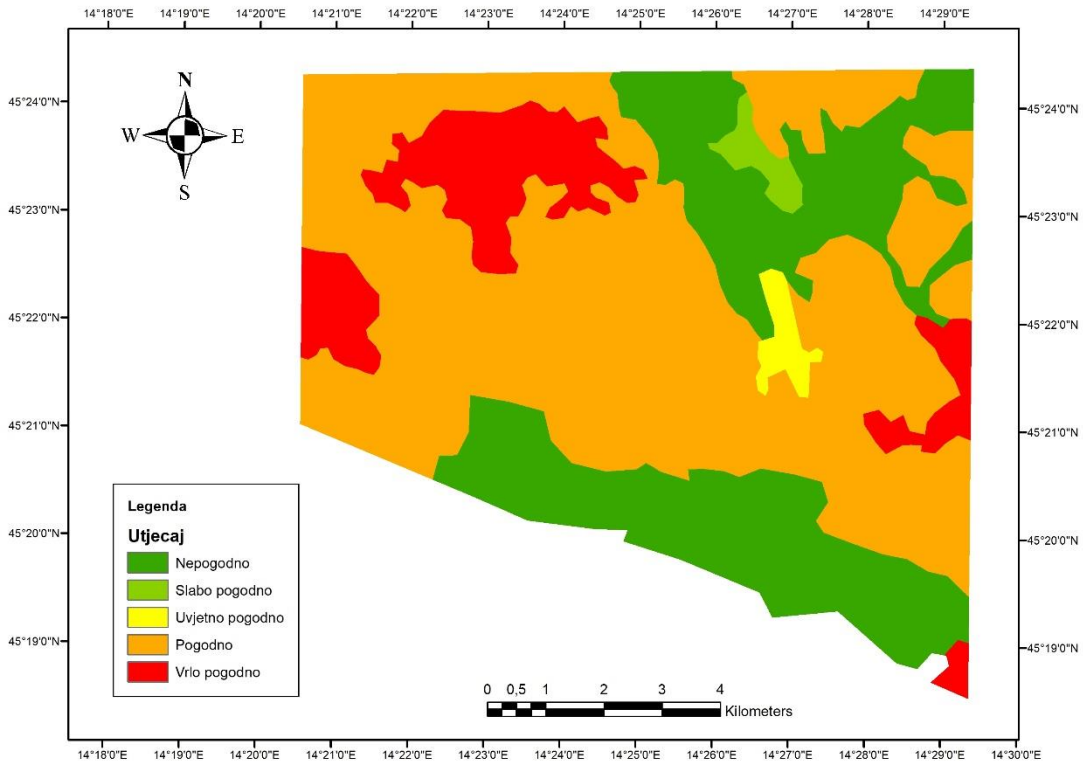
Tematska karta tipova tla na istraživanom području prikazana je na slici 5-18. Kao podloga za izradu poligona korištena je pedološka karta Republike Hrvatske OPK 1:300 000 (Bogunović et al., 1996). Ovisno o svojim fizičkim i kemijskim svojstvima, razne vrste tla utjecati će na infiltraciju padalina u podzemlje (Bogunović et al., 1996), i tako pridonijeti otapanju karbonatnih stijena koje se nalaze u podini (Ford & Williams, 2007). Tipovi tla prisutni na istraživanom području i njihove težinske vrijednosti prikazane su u tablici 5-7, a njihovi utjecaji na potencijal geohazarda prikazani su na slici 5-19.



Slika 5-18. Karta tipova tla na istraživanom području.

Tablica 5-7. Težinske vrijednosti tipova tla na istraživanom području.

Tip tla	Težinske vrijednosti
Urbano područje	1
Tera rossa	5
Rendzina na vapnencu	3
Kambisol eutrični na flišu i vapnencu	4
Kambisol distrični na klastičnim stijenama	1
Antropogeno tlo na flišu i koluviju	2
Rendzina na šljunku	1
Kalkokambisol na šljunku	4
Kalkomelanosol	4



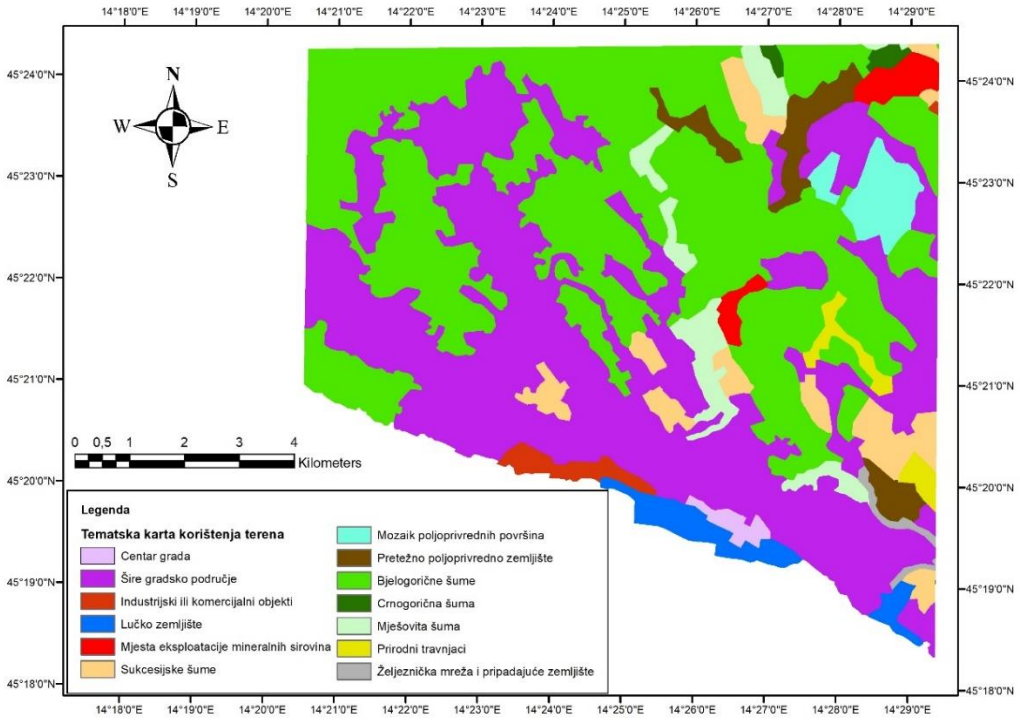
Slika 5-19. Karta utjecaja tipova tla na potencijal geohazarda istraživanog područja.

5.3.8 KARTA KORIŠTENJA TERENA

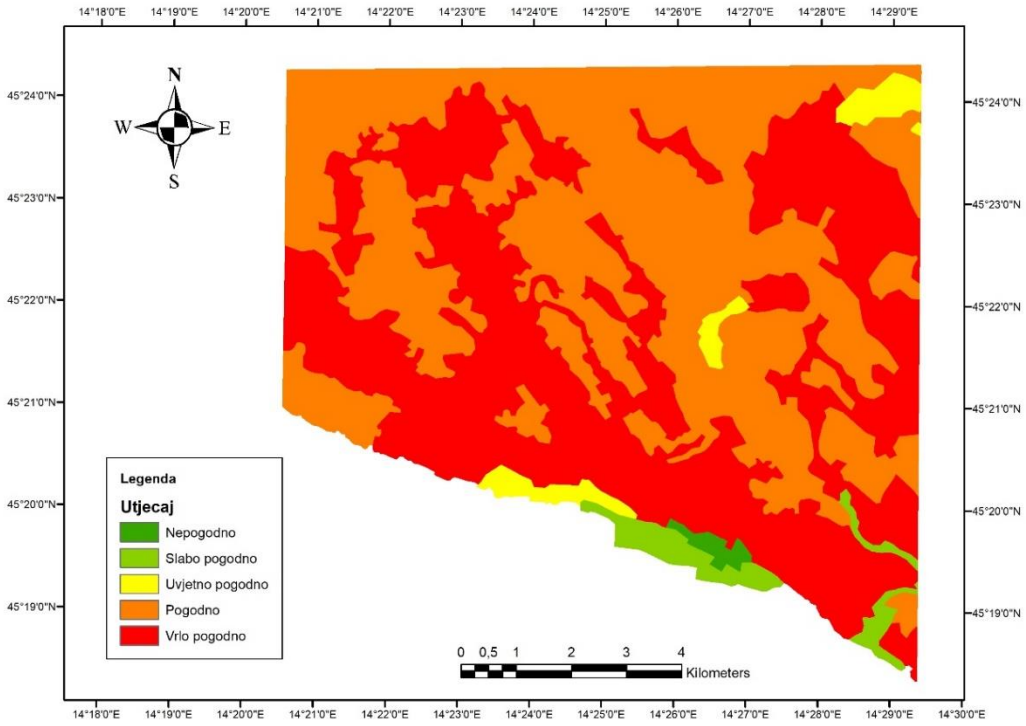
Karta korištenja terena (Slika 5-20) omogućena je u sklopu Corine 2012 datoteke (Aster GDEM). Budući da je zapis na razini cijele Republike Hrvatske, u sklopu ovog rada bilo je potrebno izrezati sloj prema istraživanom području, kategorizirati pojedine značajke te izraditi raster. Težinske vrijednosti pojedinih značajki prikazane su u tablici 5-8, a karta utjecaja prikazana je na slici 5-21.

Tablica 5-8. Težinske vrijednosti terena istraživanog područja prema upotrebi.

Vrsta terena prema upotrebi	Težinske vrijednosti
Lučko zemljište	2
Željeznička mreža i pripadajuće zemljište	2
Centar grada	1
Šire gradsko područje	5
Industrijski i komercijalni objekti	3
Mjesta eksploatacije mineralnih sirovina	3
Bjelogorična šuma	4
Crnogorična šuma	4
Mješovita šuma	4
Sukcesijske šume	4
Prirodni travnjaci	5
Pretežno poljoprivredno zemljište	5
Mozaik poljoprivrednih površina	5



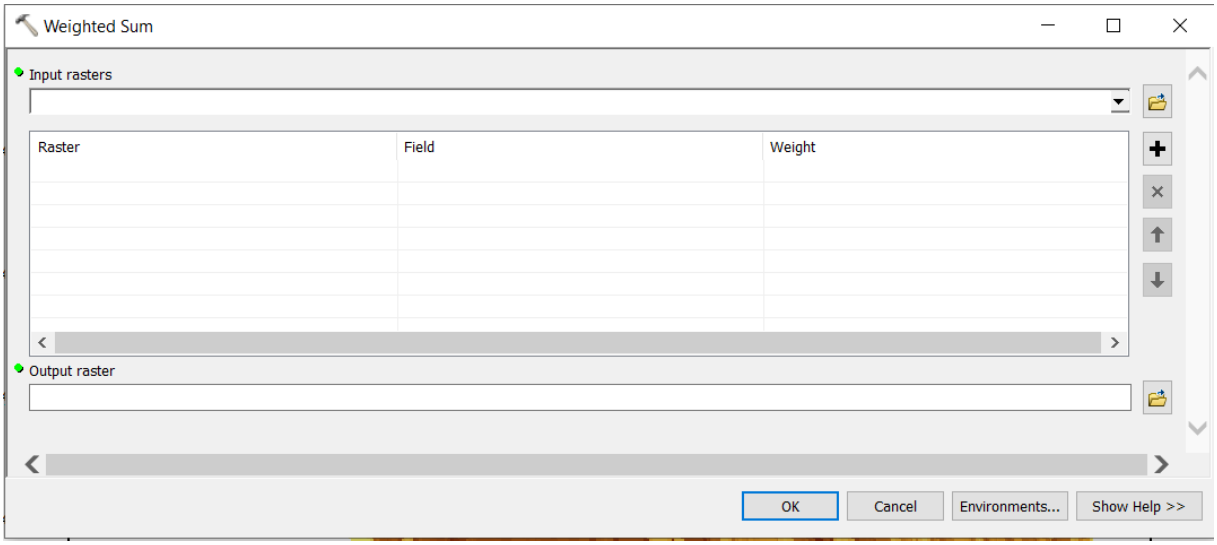
Slika 5-20. Karta korištenja terena istraživanog područja.



Slika 5-21. Karta utjecaja dijelova terena s obzirom na upotrebu na potencijal geohazarda istraživanog područja.

6 REZULTATI I DISKUSIJA

Analiza susceptibiliteta vrtača nije moguća bez objedinjenja različitih tematskih karti u kartu geohazarda. Ovo je ostvareno alatom *Weighted sum*, koja se u GIS okruženju nalazi u sklopu *Spatial Analyst* alatne kutije (Slika 6-1).



Slika 6-1. Alat *Weighted sum.* U stupac *Raster* unose se raster koji sudjeluju u sumiranju, u stupcu *Field* označuje se pripadajuće polje vrijednosti, a u stupcu *Weight* zadaju se koeficijenti utjecaja rastera na konačan rezultat.

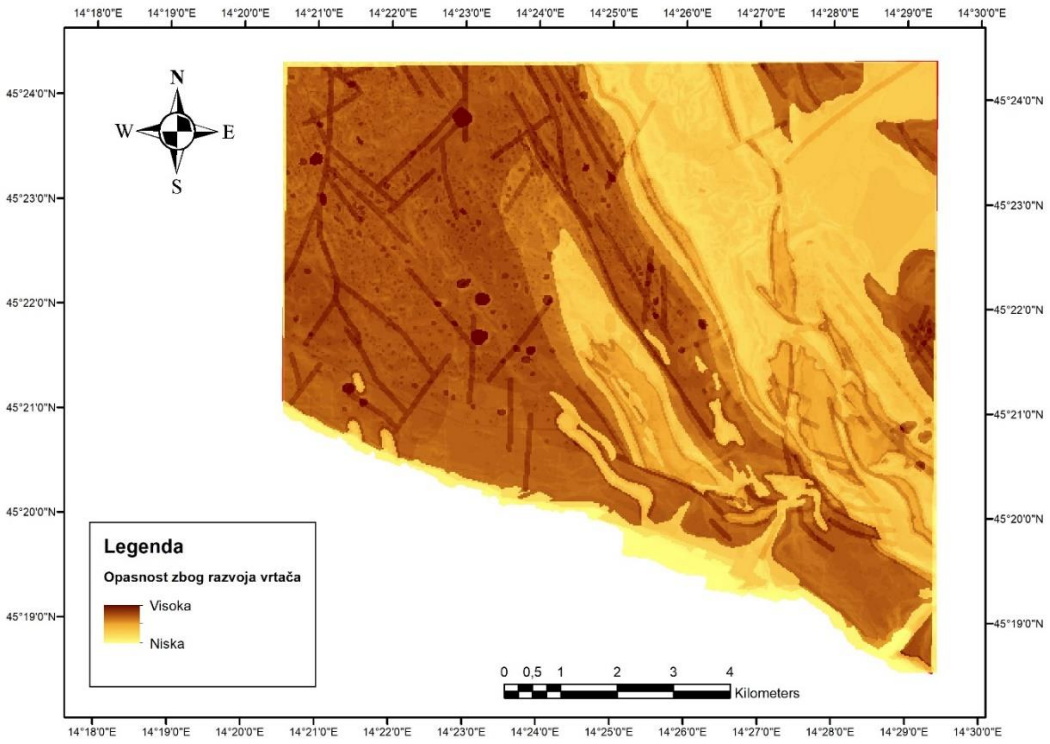
Ova naredba omogućuje zbrajanje rastera ovisno o njihovom koeficijentu utjecaju, kao što je opisano u poglavlju 5.1 (Slika 5-2). Bitno je napomenuti da prilikom pokretanja naredbe svaki raster koji sudjeluje u zbrajanju mora sadržavati neku vrijednost u svim pikselima koji spadaju u područje zbrajanja (www.arcgis.com). Ukoliko postoje dijelovi rastera koji spadaju u okvire zbrajanja a nemaju nikakve vrijednosti, kao što je slučaj kod rastera dobivenih pretvorbom iz linijskih vektora ili nepovezanih poligona, potrebno je zadati vrijednost 0 za piksele koji ne sadrže vrijednosti, tzv. *"No data"* pikseli.

Ne postoji pravilo na temelju kojega se može točno odrediti utjecaj pojedinih faktora na ukupan rezultat. Sukladno tome, koeficijenti utjecaja u ovome radu pridruženi su tematskim kartama na temelju literature, sličnih radova (npr. Al-Kouri et al., 2013; Andualema et al., 2019) te iskustvu mentora, a prikazani su u tablici 6-1.

Tablica 6-1. Koeficijenti utjecaja tematskih karata.

Tematske karte	Koeficijent utjecaja
Karta vrtača	0.25
Karta nagiba terena	0.10
Karta rasjeda	0.10
Karta vodenih površina	0.05
Karta prometnica	0.05
Litološka karta	0.35
Pedološka karta	0.05
Karta korištenja terena	0.05

Rezultat analize susceptibiliteta vrtača je karta geohazarda prikazana na slici 6-2. Tamnijom bojom istaknuta su područja najrizičnija za stvaranje novih, i širenje postojećih vrtača. Sukladno očekivanjima, najrizičnija su područja gdje se osim karbonata kredne starosti nalaze i rasjedi i/ili veće vrtače, budući da su to elementi koji najviše utječu na stvaranje takvih geomorfoloških oblika. Područje Grobnika na sjeveroistoku istraživanog područja pokazuje najmanje vrijednosti i predstavlja zonu najmanjeg rizika. Slijedi područje grada Rijeke, gdje su vrijednosti umjerene. Iako sličnog litološkog sastava kao sjeverozapad istraživanog područja, u samome gradu Rijeci nisu identificirani veći geomorfološki oblici, djelomično i zbog postojanja gradske infrastrukture. Najrizičniji dijelovi istraživanog područja nalaze se na sjeverozapadu područja. Iako to administrativno nije dio grada, na ovome se području nalaze brojna manja naselja i izolirani objekti. Lokalno su izdvojena i kao najrizičnije klasificirana područja u okolici općina Marčelji, Marinići te područje sjeverno od grada Kastva**.**



Slika 6-2. Karta geohazarda istraživanog područja s obzirom na nastanak i razvoj vrtača.

7 ZAKLJUČAK

Vrtače su jedan od najznačajnijih hazarda na krškom području te je njihova analiza ključna prilikom procjene geohazarda nekog područja. Multikriterijska analiza susceptibiliteta vrlo je koristan alat koji omogućuje integraciju raznih podataka dobivenih daljinskim istraživanjima i identifikaciju potencijalno rizičnih lokaliteta u sklopu istraživanja šireg područja. Ovom metodom nije ostvarena procjena apsolutne vrijednosti hazarda na pojedinom području, ali metoda omogućuje dobar uvid u relativne promjene uvjeta koji diktiraju stvaranje hazarda. Time se ostvaruje podloga za daljnja istraživanja i analize, čije će područje istraživanja biti manje, rezolucija veća, pa će i preciznost istraživanja biti kvalitetnija.

Detaljna morfometrijska analiza vrtača trebala bi svakako biti provedena, kako bi se opisali lokalni uvjeti na rizičnim lokacijama. Također, geofizičke metode bi mogle dati dobar uvid u stanje u podzemlju te identificirati šupljine i kaverne koje se potencijalno stvaraju. Analize sedimenata na dnu vrtača mogu omogućiti informacije o infiltraciji padalina u podzemlje u svrhu boljeg opisivanja razvoja vrtača. Također, ukoliko se građevinski objekti nalaze na rubu ili u samim vrtačama, trebala bi se analizirati stabilnost tla i opasnost od potencijalnog urušavanja ili slijeganja.

Iako su jedan od najvažnijih čimbenika za otapanje karbonata i stvaranje geomorfoloških oblika u kršu, podaci o padalinama nisu bili uključeni u ovu analizu. Razlog tomu je maleno područje istraživanja, na kojem su relativne razlike u padalinama vrlo male. Budući da se metoda istraživanja temelji na relativnim promjenama vrijednosti podataka unutar istraživanog područja, tematska karta padalina ne bi imala utjecaj na konačni rezultat. U slučaju sličnog istraživanja na velikom području, gdje su relativne promjene u padalinama izražene, podaci o padalinama bi svakako trebali biti uključeni u analizu.

8 LITERATURA

AL-KOURI, O., AL-FUGARA, A., AL-RAWASHDEH, S., SADOUN, B., PRADHAN, B., 2013. Geospatial Modeling for Sinkholes Hazard Map Based on GIS & RS Data. Journal of Geographic Information System, 2013, 5, 584-592

ANDUALEMA, T.G., DEMEKE, G.G., 2019. Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia. Journal of Hydrology: Regional Studies 24 (2019) 100610

BENAC, Č., JURAČIĆ, M., 1998. Geomorphological indicators of sea level changes during upper pleistocene (Wurm) and holocene in the Kvarener region (NE Adriatic sea). Acta Geographica Croatica, 33, 27-45

BENAC, Č., DUGONJIĆ, S., VIVODA, M., OŠTRIĆ, M., ARBANAS, Ž., 2011. Complex landslide in the Rječina Valley: results of monitoring from 1998–2010. Geologia Croatica, 64/3, 239-249

BOGUNOVIĆ, M., VIDAČEK, Ž., RACZ, Z., HUSNJAK, S., SRAKA, M., 1996. The practical aspects of soil suitability map of Croatia. Soil Science Department Agricultural Faculty, University of Zagreb, 1996

FORD, D., WILLIAMS, P., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley and Sons Ltd., 2007

GALLOWAY, D., JONES, D.R., INGEBRIGTSEN, S.E., 1999. Land subsidence in the United States. U.S. Geological Survey, Circular 1182

IVANČIĆ, I., HERAK, D., MARKUŠIĆ, S., SOVIĆ, I., AND HERAK, M., 2006. Seismicity of Croatia in the period 2002–2005, Geofizika, 23, 87–103

KOHL, M.S., 2001. Subsidence and Sinkholes in East Tennessee: A Field Guide to Holes in the Ground. Tennessee Division of Geology, 2001

MARKUŠIĆ, S., STANKO, D., KORBAR, T., SOVIĆ, I., 2019. Estimation of near-surface attenuation in the tectonically complex contact area of the northwestern External Dinarides and the Adriatic foreland. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 19, 2701–2714, 2019

MILKOVIĆ, J., SIJERKOVIĆ, M., 1997. Weather and climate characteristics of the village of Volosko. Hrvatski meteorološki časopis, 31, 23-39

PALENIK, D., MATIČEC, D., FUČEK, L., MATOŠ, B., HERAK, M., VLAHOVIĆ, I., 2019. Geological and structural setting of the Vinodol Valley (NW Adriatic, Croatia): insights into its tectonic evolution based on structural investigations. Geologia Croatica, 72/3, 179-193

SCHMID, S.M., BERNOULLI, D., FÜGENSCHUH, B., MATENCO, L., SCHEFER, S.,

SCHUSTER, R., TISCHLER, M., USTASZEWSKI, K., 2008. The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. Swiss Journal of Geosciences, 101, 139–183

ŠIKIĆ, K., PLENIČAR, M., ŠPARICA, M., 1967. Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100.000. Tumač za list Ilirska Bistrica, L33-89. Institut za geološka istraživanja, Zagreb.

ŠIKIĆ, K., PLENIČAR, M., ŠPARICA, M., 1967. Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100.000, list Ilirska Bistrica, L33-89. Institut za geološka istraživanja, Zagreb.

ŠIKIĆ, D., POLŠAK, A. & MAGAŠ, N., 1969. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, list Labin, L 33-101. Institut za geološka istraživanja Zagreb

TOMLJENOVIĆ, B., CSONTOS, L., MARTON, E., MARTON P., 2008. Tectonic evolution of the northwestern Internal Dinarides as constrained by structures and rotation of Medvednica Mountains, north Croatia. Geological Society, London, Special Publications 2008, 298, 145-167

VLAHOVIĆ, I., TIŠLJAR, J., VELIĆ, I., MATIČEC, D., 2005. Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 220 (2005) 333–360

INTERNET IZVORI:

https://www.arcgis.com/ (11.12.2020.)

https://dgu.gov.hr/ (09.01.2021)

http://www.meteo.hr/ (22.10.2020)

https://www.usgs.gov/ (05.01.2021)

https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp (07.05.2020)

KLASA: 602-04/21-01/6
URBROJ: 251-70-03-21-2
U Zagrebu, 02.02.2021.

Filip Benić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/6, UR. BROJ: 251-70-14-21-1 od 25.01.2021. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

PROCJENA GEOHAZARDA VRTAČA KORIŠTENJEM GIS TEHNOLOGIJE I PODATAKA DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu dr. sc. Bojan Matoš, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Bojan Matoš
(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Stanko Ružičić
(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek
(titula, ime i prezime)