



Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geografski odsjek

Katarina Pavlek

# **HIDROMORFOLOŠKE PROMJENE I PROCJENA OSJETLJIVOSTI RIJEKE ORLJAVE**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čanjevac

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

Faculty of Science  
Department of Geography

Katarina Pavlek

# **HYDROMORPHOLOGICAL CHANGES AND SENSITIVITY ASSESSMENT OF THE ORLJAVA RIVER**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:

Ivan Čanjevac, PhD, Associate Professor

Zagreb, 2024

## **Životopis mentora – izv. prof. dr. sc. Ivan Čanjevac**

Rođen je 1980. godine u Zagrebu, gdje je završio osnovnu i srednju školu te 2005. godine diplomirao studij geografije na Geografskom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu s odličnim uspjehom. Godine 2006. upisao je poslijediplomski doktorski studij Geografske osnove prostornog planiranja i uređenja te doktorirao 2012. godine s temom Tipologija i promjene režima protoka rijeka u Hrvatskoj (mentori: prof. dr. sc. Danijel Orešić i prof. dr. sc. Ognjen Bonacci). Tijekom (2011.) i nakon dokorskog studija (2014./2015.) usavršavao se na Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau (IWHW), Universität für Bodenkultur Wien, Austrija u ukupnom trajanju od petnaest (15) mjeseci.

Od 2006. zaposlen je na Geografskom odsjeku PMF-a u Zavodu za fizičku geografiju kao znanstveni novak i asistent, od 2013. kao viši asistent, od 2016. kao docent, a 2023. izabran je u znanstveno-nastavno zvanje izvanrednog profesora.

Kao znanstveni novak radio je na nekoliko istraživačkih projekata u području hidrogeografije i geomorfologije, a nakon izbora u docenta (su)vodio je i sudjelovao u više međunarodnih i domaćih znanstvenih i stručnih projekata. Vodio je i infrastrukturni projekt PMF Geografski odsjek, Marulićev trg 19 – program provedbe mjera cjelovite obnove infrastrukture i opreme oštećene potresom (grupa 1 i 4) (FSEU.2021.MZO.035) financiran iz Fonda solidarnosti EU.

Znanstveni rad usmjeren mu je na dva glavna područja. Prvo je proučavanje utjecaja klimatskih promjena i čovjeka na protočni režim rijeka i njegove komponente, posebice visoke vode. Drugo područje interesa je međudnos vode i reljefa kroz hidromorfološka istraživanja tekućica i stajaćica u kontekstu određivanja i praćenja ekološkog stanja voda sukladno Okvirnoj direktivi o vodama EU. Objavio je 25 znanstvenih radova, uključujući radove u časopisima Science i Nature koji su prema WoS-u ukupno citirani više od 1000 puta.

Trenutno na Geografskom odsjeku PMF-a vodi kolegije Hidrologija, Primijenjena hidrogeografija, Prirodni rizici i Prirodna osnova u prostornom planiranju (trećina kolegija) te terensku nastavu. Na Doktorskom studiju geografije: prostor, regija, okoliš, pejzaž sunositelj je kolegija Metodologija istraživanja 2. Mentor je ili savjetnik troje studenata dokorskoga studija.

Aktivan je član Hrvatskoga geografskog društva (HGD) od 2000. godine (potpredsjednik u razdoblju 2014.-2018.; glavni urednik stručno-informativnog časopisa Geografski horizont 2022.- 2024). U razdoblju 2012.-2019. bio je član upravnoga odbora Komisije za vode Međunarodne geografske unije. Član je Hrvatskoga hidrološkog društva i Hrvatskoga geomorfološkog društva.

Od 1. 10. 2023. bio je predstojnik Zavoda za fizičku geografiju, a od 1. 2. 2024. obnaša dužnost pročelnika Geografskog odsjeka PMF-a. Bio je član Senata Sveučilišta u Zagrebu, Vijeća prirodoslovnog područja i Fakultetskog vijeća PMF-a u razdoblju 2009.-2013. (ponovno član od 2023.). Od 2019. do 2022. bio je koordinator PMF-a za Festival znanosti, a 2024. koordinator Geografskog odsjeka za manifestaciju Dan i noć na PMF-u.

Dobitnik je Dekanove nagrade za mlade znanstvenike PMF-a 2014. godine. Peterostruki je dobitnik nagrade Brdo koju dodjeljuje Studentski zbor PMF-a za najboljeg predavača na Geografskom odsjeku PMF-a prema odabiru studenata.

## Zahvale



|                                  |
|----------------------------------|
| TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA |
|----------------------------------|

Sveučilište u Zagrebu

Doktorski rad

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geografski odsjek

## **Hidromorfološke promjene i procjena osjetljivosti rijeke Orljave**

Katarina Pavlek

Poslijediplomski sveučilišni doktorski studij Geografija

**Izvadak:** U ovome su radu istražena hidromorfološka obilježja i promjene rijeke Orljave od kraja 19. stoljeća na temelju kojih je procijenjena morfološka osjetljivost rijeke. Promjene u morfologiji korita poput vijugavosti, širine i bočnog kretanja analizirane su pomoću kartografskih izvora i podataka daljinskih istraživanja. Promjene korita na razini meandara istražene su dvogodišnjim monitoringom bespilotnom letjelicom i GNSS prijemnikom. Utvrđene značajne morfološke promjene rijeke uzrokovane su prvenstveno antropogenim utjecajima. Najznačajniji dugoročni utjecaj jest kanaliziranje i izravnavanje korita. Na području Požege, duljina toka je od kraja 19. stoljeća skraćena za više od 30 %. U posljednjih dvadesetak godina, uklanjanje priobalne vegetacije u sklopu mjera obrane od poplava dovelo je do značajnog povećanja bočnog kretanja korita, mjestimice i do četiri puta. Presijecanje meandara dodatno destabilizira korito povećanjem nagiba i snage toka. Predlaže se upravljanje rijekom koje omogućuje što prirodnije funkcioniranje riječnog sustava, uključujući obnovu priobalne vegetacije, revitalizaciju naplavnih ravnica i slobodno bočno kretanje rijeke.

216 stranica, 72 grafička priloga, 21 tablica, 203 bibliografskih referenci; izvornik na hrvatskom jeziku

Ključne riječi: Orljava, morfologija korita, bočno kretanje, riparijska vegetacija, antropogeni utjecaji, poplave, klasifikacija zemljišnog pokrova

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivan Čanjevac

Povjerenstvo: prof. dr. sc. Danijel Orešić  
prof. dr. sc. Neven Bočić  
izv. prof. dr. sc. Mateo Gašparović

Tema prihvaćena: 24. svibnja 2022.

Rad prihvaćen: 5. prosinca 2024.

Datum i vrijeme obrane: datum i vrijeme

Rad je pohranjen u Središnjoj geografskoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Trg Marka Marulića 19, Zagreb, Hrvatska, u Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu, Hrvatska te na Sveučilištu u Zagrebu, Hrvatska.

|                          |
|--------------------------|
| BASIC DOCUMENTATION CARD |
|--------------------------|

University of Zagreb

Doctoral Thesis

Faculty of Science

Department of Geography

**Hydromorphological changes and sensitivity assessment of the Orłjava River**

Katarina Pavlek

Doctoral University Study of *Geography*

**Abstract:** This study examines the hydromorphological characteristics and changes of the Orłjava River since the late 19th century, assessing the river's morphological sensitivity. Morphometric parameters such as sinuosity, channel width, and lateral movement were analyzed using cartographic sources and remote sensing data. Meander morphology was monitored over a two-year period with a drone and a high-precision GNSS receiver. Significant changes in the river channel have been primarily attributed to human impacts, with channelization and river straightening identified as the most impactful long-term changes. In the Požega urban area, the river's length has been reduced by more than 30% since the late 19th century. Over the past twenty years, the removal of riparian vegetation as part of flood defense measures has led to a significant increase in lateral channel movement—up to four times in some locations. Meander cutoffs further destabilize the channel by increasing slope and stream power. A more nature-based river management approach is recommended, including riparian vegetation restoration, floodplain revitalization, and minimizing artificial bank stabilization.

216 pages; 72 figures; 21 tables; 203 references; original in Croatian

Keywords: Orłjava, channel morphology, lateral migration, riparian vegetation, floods, human impacts, land cover classification

Supervisor: Ivan Čanjevac, PhD, Associate Professor

Reviewers: Danijel Orešić, PhD, Full Professor

Neven Bočić, PhD, Full Professor

Mateo Gašparović, PhD, Associate Professor

Thesis submitted: 24 May 2022

Thesis accepted: 5 December 2024

Thesis defense: datum i vrijeme

Thesis deposited in Central Geographic Library, Faculty of Science, University of Zagreb, Trg Marka Marulića 19, Zagreb, Croatia, in National and University Library in Zagreb, Croatia and at the University of Zagreb, Croatia.

## Sadržaj

|                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. UVOD.....</b>                                                                                | <b>1</b>  |
| <b>1.1. Hidromorfologija tekućica.....</b>                                                         | <b>2</b>  |
| <b>1.2. Teorijski okvir istraživanja .....</b>                                                     | <b>4</b>  |
| 1.2.1. Okviri istraživanja hidromorfologije tekućica .....                                         | 4         |
| 1.2.2. pristupi istraživanju tekućica i izvori podataka.....                                       | 6         |
| 1.2.3. Uzroci hidromorfoloških promjena tekućica.....                                              | 8         |
| 1.2.4. Osjetljivost tekućica .....                                                                 | 11        |
| <b>1.3. Pregled dosadašnjih istraživanja u Hrvatskoj.....</b>                                      | <b>14</b> |
| <b>1.4. Ciljevi i hipoteze istraživanja .....</b>                                                  | <b>16</b> |
| <b>1.5. Prostorno-vremenski okvir istraživanja.....</b>                                            | <b>18</b> |
| <b>2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA.....</b>                                                               | <b>20</b> |
| <b>2.1. Geološka i geomorfološka obilježja.....</b>                                                | <b>22</b> |
| <b>2.2. Klimatska obilježja.....</b>                                                               | <b>26</b> |
| <b>2.3. Osnovni morfometrijski elementi porječja i toka.....</b>                                   | <b>27</b> |
| <b>2.4. Hidrološka obilježja .....</b>                                                             | <b>29</b> |
| <b>2.5. Zemljišni pokrov i ljudski utjecaji.....</b>                                               | <b>33</b> |
| <b>3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA .....</b>                                                          | <b>37</b> |
| <b>3.1. Analize na razini cijelog toka .....</b>                                                   | <b>38</b> |
| 3.1.1. Izvori podataka .....                                                                       | 38        |
| 3.1.2. Delineacija riječnog toka.....                                                              | 39        |
| 3.1.3. Vektorizacija i analiza morfoloških obilježja korita .....                                  | 45        |
| 3.1.4. Procjena osjetljivosti rijeke .....                                                         | 46        |
| <b>3.2. Analize na odsječcima od Frkljevaca do Čosinog mlina.....</b>                              | <b>48</b> |
| 3.2.1. Izvori podataka .....                                                                       | 50        |
| 3.2.2. Obrada aerofotogrametrijskih snimki.....                                                    | 51        |
| 3.2.3. Objektno-orijentirana klasifikacija zemljišnog pokrova .....                                | 53        |
| 3.2.3.1. Procjena točnosti klasifikacije i delineacija riječnog koridora.....                      | 57        |
| 3.2.4. Vektorizacija i analiza morfoloških obilježja korita .....                                  | 60        |
| 3.2.5. Statističke analize povezanosti potencijalnih čimbenika i morfoloških promjena korita ..... | 63        |
| 3.2.5.1. Analiza hidroloških podataka .....                                                        | 65        |
| 3.2.5.2. Korelacijske analize.....                                                                 | 66        |
| 3.2.5.3. Linearni mješoviti modeli.....                                                            | 69        |
| <b>3.3. Terensko istraživanje promjena korita na razini meandra.....</b>                           | <b>71</b> |
| 3.3.1. Prikupljanje i obrada prostornih podataka .....                                             | 72        |
| 3.3.2. Vektorizacija i analiza morfoloških obilježja korita .....                                  | 76        |
| 3.3.3. Granulometrijske analize sedimenta .....                                                    | 79        |
| <b>4. REZULTATI.....</b>                                                                           | <b>82</b> |
| <b>4.1. Promjene korita na razini cijelog toka u razdoblju 1879./1882. – 2019. ....</b>            | <b>82</b> |

|                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.2. Potencijalna i specifična osjetljivost odsječaka rijeke.....</b>                                                                 | <b>86</b>  |
| <b>4.3. Promjene zemljišnog pokrova i morfologije korita u razdoblju 1966. – 2021. (odsječci na potezu Frkljevci – Čosin mlin) .....</b> | <b>88</b>  |
| 4.3.1. Procjena točnosti klasifikacije zemljišnog pokrova .....                                                                          | 88         |
| 4.3.2. Promjene u zemljišnom pokrovu riječnog koridora (2011. – 2021.) .....                                                             | 89         |
| 4.3.3. Promjene u morfološkim obilježjima korita (1966. – 2021.).....                                                                    | 94         |
| 4.3.4. Prirodni i antropogeni čimbenici stope bočnog kretanja rijeke.....                                                                | 99         |
| 4.3.4.1. Analize protoka.....                                                                                                            | 99         |
| 4.3.4.2. Korelacijska analiza.....                                                                                                       | 100        |
| 4.3.4.3. Linearni mješoviti modeli.....                                                                                                  | 110        |
| <b>4.4. Promjene korita na razini meandara.....</b>                                                                                      | <b>111</b> |
| 4.4.1. Lokacija Deževci.....                                                                                                             | 111        |
| 4.4.2. Lokacija Boričevci .....                                                                                                          | 119        |
| 4.4.3. Lokacija Vesela .....                                                                                                             | 125        |
| 4.4.4. Lokacija Bučje.....                                                                                                               | 131        |
| 4.4.5. Lokacija Tenov mlin .....                                                                                                         | 139        |
| 4.4.6. Sinteza rezultata erozije obala na istraženim lokacijama .....                                                                    | 145        |
| <b>5. RASPRAVA.....</b>                                                                                                                  | <b>150</b> |
| <b>5.1. Pouzdanost korištenih metoda .....</b>                                                                                           | <b>150</b> |
| 5.1.1. Točnost i pouzdanost kartografskih izvora i podataka daljinskih istraživanja. ....                                                | 150        |
| 5.1.2. Točnost klasifikacije zemljišnog pokrova.....                                                                                     | 151        |
| 5.1.3. Statističko utvrđivanje uzročno-posljedičnih veza u geomorfologiji.....                                                           | 153        |
| <b>5.2. Čimbenici morfoloških promjena korita rijeke Orljave.....</b>                                                                    | <b>155</b> |
| 5.2.1. Kanaliziranje korita – glavni uzrok dugoročnih morfoloških promjena .....                                                         | 155        |
| 5.2.2. Pojava poplava i uklanjanje priobalne vegetacije (odsječci Frkljevci – Čosin mlin) .....                                          | 157        |
| 5.2.3. Povezanost vijugavosti, nagiba korita i bočnog kretanja (odsječci Frkljevci – Čosin mlin).....                                    | 163        |
| 5.2.4. Čimbenici morfoloških promjena na razini meandra .....                                                                            | 166        |
| <b>5.3. Potencijal za oporavak rijeke i mjere poboljšanja trenutnog hidromorfološkog stanja .....</b>                                    | <b>169</b> |
| 5.3.1. Kanalizirani odsječci .....                                                                                                       | 171        |
| 5.3.2. Odsječci s malim i umjerenim antropogenim utjecajima .....                                                                        | 174        |
| <b>6. ZAKLJUČAK .....</b>                                                                                                                | <b>178</b> |
| <b>Literatura.....</b>                                                                                                                   | <b>182</b> |
| <b>Izvori.....</b>                                                                                                                       | <b>198</b> |
| <b>Popis tablica .....</b>                                                                                                               | <b>200</b> |
| <b>Popis slika.....</b>                                                                                                                  | <b>201</b> |
| <b>Prilozi.....</b>                                                                                                                      | <b>206</b> |
| <b>SUMMARY.....</b>                                                                                                                      | <b>209</b> |
| <b>ŽIVOTOPIS.....</b>                                                                                                                    | <b>215</b> |

## 1. UVOD

Česte promjene u hidrološkim, geomorfološkim i ekološkim obilježjima osnovno su svojstvo riječnih sustava. Dinamična priroda rijeka posljedica je stalne interakcije s vanjskim čimbenicima, koji su podložni sezonskim varijacijama i ekstremnim vremenskim događajima. Obilježja i promjene hidrološkog režima tekućica prirodno ovise o klimatskim obilježjima poput količine i godišnje raspodjele padalina, geološkim i geomorfološkim obilježjima porječja te zemljišnom pokrovu (Fryirs i Brierley, 2013). Te interakcije izravno utječu na morfologiju riječnih korita i naplavnih ravnica, pri čemu ključnu ulogu imaju prirodne varijacije protoka vode i prijenosa sedimenta te obilježja geološke podloge i riparijske (priobalne) vegetacije (Fryirs i Brierley, 2013; Harvey i Gooseff, 2015).

Međutim, od kraja 19. stoljeća, prirodna morfodinamika mnogih tekućica mijenja se uslijed pojačanih antropogenih utjecaja (Downs i Piégay, 2019). Zbog kanaliziranja toka, izgradnje brana i nasipa, intenzivne urbanizacije, jaružanja radi poboljšanja plovnosti ili vađenja sedimenta kao sirovine i sl. dolazi do promjena u hidrološkom režimu i obilježjima toka poput količine i brzine otjecanja (Bonacci i Roje-Bonacci, 2003; Gregory, 2006). Također dolazi i do morfoloških promjena korita poput usijecanja, sužavanja i smanjenja heterogenosti reljefnih oblika (Surian i Rinaldi, 2003; Zawiejska i Wyżga, 2010). Takve promjene u hidromorfologiji tekućica uzrokuju degradaciju ekosustava i gubitak riječnih i riparijskih staništa (Graf i dr., 2016; Hajdukiewicz i Wyżga, 2019), ali mogu imati i izravne negativne posljedice za stanovništvo poput povećanoga rizika od poplava (Kiss i dr., 2021).

Budući da rijeke podržavaju biološki raznolike i produktivne ekosustave, nove strategije upravljanja rijekama promiču holističke pristupe temeljene na znanju o geomorfološkim, hidrološkim i ekološkim procesima u rijekama koji promiču njihovu zaštitu (Grabowski i dr., 2014; Poepl i dr., 2020). Na području Europske unije u posljednjih se dvadesetak godina donose zakonske regulative kojima se nastoji postići ravnoteža između antropogenoga iskorištavanja vodnih resursa i očuvanja i poboljšanja vodenih ekosustava (Okvirna direktiva o vodama Europske unije – ODV; Europska komisija, 2000). Također se razvijaju pristupi obnovi rijeka (engl. *river restoration*), koji teže ponovnoj uspostavi karakterističnih struktura, procesa i funkcija riječnoga okoliša koji odgovaraju ciljanim prirodnim ili tzv. doprirodnim uvjetima (engl. *natural or near natural conditions*) i pružaju razne usluge ekosustava poput potpore bioraznolikosti, rekreacije ili upravljanja poplavama (Muhar i dr., 2018). Dijakronijska analiza promjena tekućica ističe se kao važan korak u upravljanju i planiranju njihove obnove jer pruža

informacije o prošlim stanjima, procesima te stopama promjena u porječju, naplavnoj ravnici i koritu (Grabowski i dr., 2014; Ioana-Toroimac, 2016). Identifikacija i povezivanje hidromorfoloških promjena s mogućim prirodnim i antropogenim uzrocima omogućuje razumijevanje sadašnjega stanja i procesa, kao i procjenu onih budućih (Scorpio i dr., 2015; Zawiejska i Wyżga, 2010).

Aktivno meandrirajuće rijeke posebno su dinamični sustavi, čije je glavno obilježje bočno kretanje korita na naplavnoj ravnici. Međutim, bočna erozija i pomicanje korita mogu predstavljati izazove za naselja i ljudske aktivnosti, posebno ako se nalaze blizu riječnih obala (Bertalan i dr., 2018; Rusnák i dr., 2016). Zbog toga je razumijevanje hidromorfoloških promjena meandrirajućih rijeka ključno za učinkovito upravljanje rijekama i ublažavanje erozije obala i rizika od poplava (Bertalan i dr., 2019; Kiss i Blanka, 2012).

Rijeka Orljava jedna je od rijetkih tekućica Panonske Hrvatske koja nije u potpunosti bočno ograničena ili kanalizirana duž cijelog nizinskog toka, za razliku od rijeka poput Lonje, Krapine ili Ilove (Čanjevac i dr., 2022). Zbog njezinog položaja unutar tektonskog bazena Požeške kotline, hidrološka obilježja rijeke karakterizira česta pojava bujičnih poplava, koje pridonose dinamici erozijsko-sedimentacijskih procesa i heterogenosti morfologije korita. Međutim, naselja i poljoprivredne površine unutar naplavne ravnice izloženi su riziku od poplava i riječne erozije. U ovom istraživanju analizirane su hidromorfološke promjene rijeke Orljave od kraja 19. stoljeća, s ciljem procjene njene osjetljivosti na prirodne i antropogene čimbenike promjena, kako bi se pružile smjernice za unapređenje upravljanja rijekom.

## **1.1. Hidromorfologija tekućica**

Osnovni predmet istraživanja ovog rada je hidromorfologija tekućica. Hidromorfologija je termin koji objedinjuje hidrološka i geomorfološka obilježja i procese u rijekama, jezerima, te obalnim i prijelaznim vodama (EU, 2000). U slučaju tekućica, hidromorfologija objedinjuje područja istraživanja potamologije (grč. *ποταμός, οὔ, ὁ* (*potamós*) = rijeka) i fluvijalne geomorfologije (lat. *fluvius*, -ii, m. = rijeka). Potamologija je grana hidrologije koja proučava površinske tokove i njihove hidrološke režime, te uključuje hidrodinamiku i elemente erozije i taloženja u tekućicama (Žugaj, 2000). Fluvijalna geomorfologija je grana geomorfologije koja istražuje kako tekuća voda oblikuje i mijenja površinu Zemlje kroz erozijske i akumulacijske procese (Fryirs i Brierley, 2013). Prema tome, područje istraživanja hidromorfologije tekućica je sveukupnost njihovih fizičkih obilježja, oblika i procesa.

Iako se termin hidromorfologija u znanstvenoj literaturi o tekućicama javlja i ranije (npr. Astrade i Bravard, 1999; Babiński, 1992; Riđanović, 1993), nakon izdavanja Okvirne direktive o vodama (ODV) (EU, 2000), hidromorfologija postaje čest predmet istraživanja u znanstvenim radovima na području Europe (Gurnell i dr., 2016; Ioana-Toroimac, 2016; Kiss i András, 2017; Rinaldi i dr., 2013). ODV obvezuje države članice Europske unije da provode kontinuirani ekološki monitoring vodnih tijela te promiče zaštitu i održivo gospodarenje vodama. Hidromorfološki pokazatelji, uz biološke karakteristike i fizikalno-kemijske pokazatelje kakvoće vode, jedan su od tri osnovna dijela procjene ekološkog stanja tekućica.

U okviru hidromorfološkog monitoringa istražuju se hidrološki režim, kontinuitet tekućice (longitudinalni i lateralni) te morfološki uvjeti koji predstavljaju obilježja prirodnog staništa: oblik, širina i dubina korita, struktura i sastav dna korita, te struktura riparijske zone (Belletti i dr., 2015; EU, 2000). Hidromorfološki uvjeti kontroliraju i podupiru biotičke elemente u tekućicama, koji pak utječu na biološku raznolikost i funkcije ekosustava (Buffagni i dr., 2016; Elošegi i Sabater, 2013). Osnovne odrednice dobrog hidromorfološkog stanja tekućice su prostorna heterogenost geomorfoloških oblika, dinamičnost hidroloških i geomorfoloških procesa, te longitudinalna, lateralna i vertikalna povezanost. To znači da su longitudinalne migracije organizama i prijenos sedimenta neometani, te da postoji barem sezonska lateralna povezanost između vode u koritu i vodnih tijela na naplavnoj ravnici, kao i vertikalna povezanost s podzemnom vodom (Elošegi i Sabater, 2013; Zaharia i dr., 2018). U slučaju kada se procijeni da je hidromorfološko stanje promijenjeno ili odstupa od očekivanog za određeni tip rijeke, daljnjom analizom identificiraju se glavni antropogeni pritisci koji su uzrokovali takvo stanje. Na taj način hidromorfološko istraživanje tekućica pridonosi razumijevanju antropogenih utjecaja na riječne procese i omogućuje ublažavanje njihovih posljedica.

Budući da na rijeci Orljavi ne postoje velike brane koje bi značajno promijenile hidrološki režim rijeke, u ovom istraživanju naglasak je stavljen na morfološke promjene korita, uključujući posljedice kanaliziranja i prirodnu dinamiku bočnog kretanja korita. Morfologija korita utječe na protočnost i kapacitet za velike protoke, te također odražava erozijsko-sedimentacijske procese u koritu (Boothroyd i dr., 2021). Prema tome, razumijevanje morfoloških promjena i njihovih uzroka omogućuje učinkovito ublažavanje rizika od erozije obala i poplava, kao i identificiranje ključnih područja gdje su potrebne intervencije za očuvanje i poboljšanje hidromorfološkog stanja rijeke.

## 1.2. Teorijski okvir istraživanja

### 1.2.1. Okviri istraživanja hidromorfologije tekućica

Na razini Europske unije ne postoji jedinstvena metodologija hidromorfološkoga monitoringa iako postoje određeni standardi (EN 2004; EN 2010). Države članice uglavnom razvijaju svoje nacionalne metodologije (Belletti i dr., 2015; Zaharia i dr., 2018). Sveobuhvatni metodološki okvir za potrebe istraživanja, upravljanja i obnove tekućica u skladu s ODV-om razvijen je u sklopu projekta REFORM od strane istaknutih europskih znanstvenika i stručnjaka iz područja hidrologije, fluvijalne geomorfologije i ekologije (Gurnell i dr., 2016). REFORM kao okvir predstavlja višerazinsku, hijerarhijsku metodologiju koja se temelji na razumijevanju hidromorfoloških procesa (engl. *process-based*) od razine porječja do razine odsječka rijeke. Razumijevanje procesa koji oblikuju riječne sustave, kao što su erozija i sedimentacija, omogućuju dinamičko predviđanje promjena i prilagodbu na buduće utjecaje, za razliku od metoda za monitoring stanišnih uvjeta, poput *River Habitat Survey* (Raven i dr., 1998), koje nude statičnu sliku trenutnog stanja. Također, prednost *process-based* pristupa je integracija fizičkih, bioloških i kemijskih aspekata ekosustava, koji omogućuju holistički pristup i uspješnije planiranje obnove ili upravljanja rijekama (Grabowski i dr., 2014).

Metodološki okvir razvijen u sklopu projekta REFORM sastoji se od nekoliko koraka (prema Gurnell i dr., 2016):

1. Delineacija prostornih jedinica u porječju (porječje, krajobrazna jedinica, segment, odsječak).
2. Prikupljanje dostupnih podataka potrebnih za analizu hidromorfoloških obilježja pojedinih prostornih jedinica (Tab. 1.1.)
3. Procjena stanja i procesa u prošlosti i danas, rekonstrukcija promjena, interpretacija njihovih uzroka te procjena budućih promjena na razini odsječka s obzirom na buduće scenarije (klimatske promjene, načini upravljanja).

Neovisno o tome odnosi li se istraživanje geomorfoloških promjena tekućice na njezin cijeli tok, ili na samo određeni kraći dio toka, tekućicu je uvijek potrebno staviti u njezin širi prostorni kontekst (Downs i Piégay, 2019). Promjene na određenom dijelu toka nisu samo posljedica lokalnih utjecaja, nego i onih uzvodno. S druge strane, da bi se mogle analizirati razlike u stopama promjene s obzirom na različite čimbenike i obilježja toka, razumno je podijeliti tekućicu na manje prostorne jedinice.



Tab. 1.1. Ključna obilježja prostornih jedinica riječnog sustava s obzirom na različito prostorno i vremensko mjerilo istraživanja (prema Grabowski i dr., 2014; Gurnell i dr., 2016)

| <b>Prostorna jedinica</b>     | <b>Prostorno i vremensko mjerilo</b>                  | <b>Obilježja</b>                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Porječje</b>               | 100 - 100,000 km <sup>2</sup><br>1000 - 10,000 godina | Ukupni unos vode u sustav – režim padalina, zemljišni pokrov, geološka obilježja, topografija                                                                                                                      |
| <b>Krajobrazna jedinica</b>   | 100 - 1000 km <sup>2</sup><br>100 - 1000 godina       | Obilježja otjecanja i količina sedimenta, zemljišni pokrov, topografija, režim padalina, podzemne vode, stopa erozije tla                                                                                          |
| <b>Segment</b>                | 10 - 100 km<br>10 - 100 godina                        | Obilježja doline – reljefna ograničenost, nagib, širina<br>Režim otjecanja, donos i režim prijenosa sedimenta, koridor priobalne vegetacije, prekidi uzdužne povezanosti toka                                      |
| <b>Odsječak</b>               | 0,1 - 10 km<br>10 - 100 godina                        | Tlocrtni oblik i geometrija korita, prijenos sedimenta, priobalna i vodena vegetacija, drveni ostaci, nagib korita, prilagodbe korita (bočno kretanje, usijecanje), antropogeni utjecaji (hidrotehničke građevine) |
| <b>Geomorfološka jedinica</b> | 1 - 100 km<br>1 - 10 godina                           | Specifičan reljefni oblik, obilježja sedimenta, struktura dubine i brzine toka, vrsta vegetacije                                                                                                                   |
| <b>Hidraulička jedinica</b>   | 0,1 - 10 km<br>0,1 - 10 godina                        | Dubina i brzina toka, posmično naprezanje na dnu korita, granulometrijski sastav                                                                                                                                   |

Porječje se unutar metodološkoga okvira REFORM definira na temelju topografske razvodnice jer je hidrogeološku uglavnom teško detaljno odrediti. Krajobrazna jedinica dio je porječja sa sličnim morfološkim obilježjima krajobraza (topografija, zemljišni pokrov), a segment dio rijeke sa sličnim obilježjima na razini riječne doline (reljefna ograničenost, nagib) te energije i količine toka (Gurnell i dr., 2016). Odsječak se određuje kao morfološki relativno homogen dio rijeke unutar kojega su granični uvjeti dovoljno uniformni, tj. unutar kojega nema bitnih razlika u obilježjima riječne doline, geomorfološkim oblicima korita i naplavne ravnice, obliku korita i tipu sedimenta dna (Brierley i Fryirs, 2005; Rinaldi i dr., 2013). Prema tome, odsječci se određuju na temelju obilježja morfologije i nagiba korita, veličine sedimenta te prirodnih i umjetnih prepreka u uzdužnoj povezanosti. Odsječak je osnovna prostorna jedinica analize u fluvijalnogeomorfološkim istraživanjima (Downs i Piégay, 2019; Gurnell i dr., 2016). Treba napomenuti da posebno izdvajanje segmenata na manjim rijekama nije neophodno, tako da se kriteriji za izdvajanje i obilježja za analizu segmenata mogu primijeniti i na same odsječke.

Metodološki okvir projekta REFORM oslanja se na desetak prethodno razvijenih hidroloških i geomorfoloških okvira za istraživanje tekućica (Gurnell i dr., 2016). Među njima treba posebno istaknuti razrađeni i često upotrebljavani okvir *River Styles Framework*, koji je razvijen na Sveučilištu Macquarie u Australiji (Brierley i Fryirs, 2005). *River Styles Framework* je prvenstveno geomorfološki pristup koji se koristi za klasifikaciju i razumijevanje raznolikosti riječnih oblika i procesa unutar krajobraza. Okvir pruža strukturiranu metodu za procjenu stanja rijeka, njihove dinamike i evolucijskih trendova kako bi se omogućilo učinkovito upravljanje i obnova rijeka. Uzimajući u obzir čimbenike kao što su prijenos sedimenta, morfologija korita i obilježja krajobraza okvir pomaže u predviđanju kako rijeke mogu reagirati na prirodne i antropogene čimbenike promjene (Brierley i Fryirs, 2005).

### **1.2.2. Pristupi istraživanju tekućica i izvori podataka**

Hidromorfološka obilježja tekućica na različitim prostornim razinama moguće je istražiti na temelju raznovrsnih tehnika i izvora podataka. Terenska istraživanja uključuju mjerenja erozijsko-sedimentacijskih procesa (Keesstra, 2007; Keesstra i dr., 2009), poprečnog presjeka korita, obilježja protoka i strukture obala i dna (Hooke, 2022; Kidová i dr., 2021) te metode procjene (hidro)morfološkog stanja (Rinaldi i dr., 2013). Daljinska istraživanja koriste podatke prikupljene pomoću satelita, zrakoplova, bespilotnih letjelica ili terestričkih uređaja (Piégay i dr., 2020), dok se povijesna istraživanja temelje na analizi kartografskih izvora, topografskih premjera, podataka hidroloških postaja, putopisa itd. (Hohensinner i dr., 2021; Kiss i dr., 2008). Paleoistraživanja, u koja spadaju sedimentološke i stratigrafske metode te metode datiranja, omogućuju uvid u evoluciju tekućica u daljoj prošlosti za koju instrumentalni podaci ne postoje (Keesstra i dr., 2005; Provansal i dr., 2014).

Kartografski izvori i daljinska istraživanja najznačajniji su izvori podataka u analizi morfoloških promjena tekućica za razdoblje od posljednjih dvjestotinjak godina jer omogućavaju uvid u stanje korita na širem području (Downs i Piégay, 2019). Povijesne topografske karte iz sredine 19. stoljeća, čija horizontalna točnost iznosi otprilike 20 m (Pavlek i Faivre, 2020; Scorpio i dr., 2015), prikazuju stanje tekućica prije najjačih antropogenih utjecaja. Na području bivše Habsburške Monarhije, posebno su značajne karte druge i treće vojne izmjere iz druge polovine 19. stoljeća, na kojima je struktura krajobraza poput vodnih tijela te topografije terena vjerno prikazana radi njihove vojne namjene (Hohensinner i dr., 2021). Od sredine 20. stoljeća, aerofotogrametrijske izmjere državnih teritorija omogućuju još detaljniji uvid u geomorfološka obilježja tekućica, budući da su snimke najčešće krupnijeg

mjerila (rezolucije oko 1 m) te je vidljiv vegetacijski pokrov na riječnim obalama i naplavnoj ravnici (Bertalan i dr., 2019; Hajdukiewicz i Wyżga, 2019). U posljednjim desetljećima, razvoj multispektralnih satelitskih platformi olakšao je analizu korita rijeka (Boothroyd i dr., 2021; Schwenk i dr., 2017) i dinamike zemljišnog pokrova naplavnih ravnica na većim prostornim jedinicama (Harezlak i dr., 2020; Jia i dr., 2020). Na manjim prostornim jedinicama, bespilotne letjelice koriste se za praćenje fluvijalnih reljefnih oblika, erozije obala i obilježja riječnih staništa (Rusnák i dr., 2018; Williams i dr., 2020).

Na temelju topografskih karata te satelitskih ili aerofotogrametrijskih snimaka moguće je izmjeriti i odrediti različita geomorfološka obilježja tekućica, poput duljine korita (Ioana-Toroimac, 2016; Kiss i dr., 2008) širine aktivnog korita (Provansal i dr., 2014; Scorpio i Piégay, 2021), oblika korita (Hohensinner i dr., 2021; Scorpio i dr., 2015); indeksa vijugavosti ili isprepletenosti (Hajdukiewicz i Wyżga, 2019; Hohensinner i dr., 2004), stope bočnog kretanja (Bertalan i dr., 2019; J. M. Hooke i Yorke, 2010), površine otoka ili prudova (Hohensinner i dr., 2004; Kiss i Andrási, 2017), te površine agradacije i erozije naplavne ravnice (Bertalan i dr., 2019; Rusnák i Lehotský, 2014). Vrlo moćan alat u analizi tih obilježja jest geografski informacijski sustav u kojem je moguće integrirati podatke iz raznovrsnih izvora na svim prostornim razinama (porječje, naplavna ravnica, riječno korito), ali i automatizirati izdvajanje određenih jedinica i analizu njihovih obilježja (Roux i dr., 2015). Na satelitskim i zračnim snimkama metodama klasifikacije zemljišnoga pokrova moguće je automatizirati identifikaciju i mjerenje geometrije korita (tlocrtni oblik, širina) te reljefnih oblika u koritu (prud, otok s vegetacijom) (Casado i dr., 2015; Demarchi i dr., 2016). Na snimkama veće rezolucije također je moguće izmjeriti veličinu sedimenta primjenom računalnih algoritama (Carbonneau i dr., 2004; Woodget i Austrums, 2017) ili analizirati morfometrijska obilježja geomorfoloških jedinica (Rusnák i dr., 2018; Williams i dr., 2020). S druge strane, upotreba multispektralnih snimaka i LIDAR-a (engl. *Light Detection and Ranging*, optički mjerni instrument koji koristi laserske zrake), omogućuje detaljnu analizu strukture i rasprostranjenosti riparijske vegetacije, ali i topografije korita (Godfroy i dr., 2022; Williams i dr., 2020).

Općenito, satelitske i aerofotogrametrijske snimke često se koriste za istraživanje interakcija između fluvijalnih reljefnih oblika, obilježja vegetacije i pojave poplava u riječnim koridorima, posebno u vezi s razvojem vegetacije nakon poplava (Räpple i dr., 2017) i njihovim utjecajem na akumulaciju sedimenta, morfološke promjene i sastav staništa kod rijeka s isprepletenim (Bertoldi i dr., 2009, 2011) i meandrirajućim tipom korita (Bertalan i dr., 2018; Garófano-Gómez i dr., 2017).

### 1.2.3. Uzroci hidromorfoloških promjena tekućica

Određeni tipovi tekućica skloniji su morfološkim promjenama, odnosno većoj dinamici geomorfoloških procesa. Zbog toga neki autori razlikuju standardnu dinamiku tekućice koja je karakteristična za određeni geomorfološki tip (engl. *river behaviour*) od značajne promjene u geomorfološkim obilježjima koja dovodi do promjene tipa tekućice (engl. *river change*) (Brierley i Fryirs, 2005; Kondolf i Piégay, 2016). Primjerice, bočna erozija i kretanje meandara pripada prirodnoj dinamici rijeka koje aktivno meandriraju. S druge strane, potpuno zarastanje riječnih prudova i njihova stabilizacija mijenja obilježja erozijsko-sedimentacijskih procesa u tekućici te se time mijenja njezin geomorfološki tip. Međutim, treba naglasiti da se navedena razlika među pojmovima ponekad ne može jasno razlučiti u radovima. Uzrok tomu možda je i činjenica da je katkad teško odrediti kada nastupa bitna promjena u geomorfološkim obilježjima rijeke. Riječ „promjena” zato se u literaturi većinom koristi u širem smislu koji podrazumijeva i promjene koje su dio prirodne dinamike kao i promjenu tipa tekućice prema Brierleyju i Fryirs (2005). U radovima se često koristi i izraz prilagodba korita (engl. *channel adjustment*) (Surian i Rinaldi, 2003; Scorpio i Piégay, 2021).

Kao uzroci hidromorfoloških promjena tekućica u istraživanjima se navode dvije glavne skupine čimbenika: prirodne promjene i antropogeni utjecaji. Najvažniji prirodni čimbenici jesu promjene u klimatskim i geološkim obilježjima. Međutim, u istraživanjima koja analiziraju promjene tekućica u posljednjih dvjestotinjak godina, geološki procesi (npr. tektonika) se rijetko izravno analiziraju jer oni većinom djeluju tijekom duljega razdoblja, izuzev recimo potresa koji mogu uzrokovati aktivaciju klizišta (Gong i dr., 2012). Prema tome, najznačajniji analizirani prirodni čimbenik jest klima, tj. njezin izravan utjecaj na hidrološka obilježja tekućice.<sup>1</sup> Klimatski čimbenici analiziraju se na temelju klimatskih i hidroloških podataka, pri čemu prednjače ovi potonji jer je protok izravni pokretač geomorfoloških procesa (Hooke i Yorke, 2010; Kiss i Blanka, 2012; Schumm, 1977). Kada instrumentalni podaci nisu dostupni, zaključci o hidrološkim i klimatskim uvjetima donose se na temelju sedimentoloških analiza (Keesstra i dr., 2005).

---

<sup>1</sup> Iako se klimatske promjene u razdobljima do 19. stoljeća mogu smatrati prirodnim čimbenikom, danas u doba globalnoga zatopljenja i one spadaju u neizravne antropogene utjecaje. Međutim, radi razgraničenja s navedenim fizičkim promjenama korita i naplavne ravnice koje je izravno uzrokovao čovjek promatraju se odvojeno. Naravno, treba napomenuti da čovjek može izravno mijenjati i hidrološka obilježja izgradnjom brana, alociranjem vode, crpljenjem vode za vodoopskrbu i sl.

Promjene klime osim na promjene u hidrološkim obilježjima također utječu i na vegetacijski pokrov u porječju te na donos sedimenta u riječni sustav. Naime, u radovima koji istražuju promjene tekućica u razdoblju od 1850. do 1950., često se spominje utjecaj klimatskih promjena jer je to razdoblje prelaska iz Maloga ledenog doba (engl. *Little Ice Age*) u trenutni topli period (engl. *Current Warm Period*) (Provansal i dr., 2014; Scorpio i dr., 2015). Iako je vrhunac Malog ledenog doba u Europi bio u 16./17. stoljeću, krajem 19. stoljeća mediteranska je klima još uvijek bila obilježena nižim temperaturama i većom vlažnosti nego sredinom 20. stoljeća (Luterbacher i dr., 2012). Vlažniji uvjeti pogoduju taloženju nakon velikih poplava, progradaciji ušća, i unosu sedimenta u korito putem pojačanih padinskih procesa (Keesstra i dr., 2005; Scorpio i dr., 2015). S druge strane, od kraja 20. stoljeća zabilježeno je produljivanje sušnih razdoblja te povećana pojava ekstremnih padalina (Madsen i dr., 2014; Schneider i dr., 2013), što dovodi do prirodnog sužavanja rijeka, ali i većeg rizika od plavljenja naplavnih ravnica (Kiss i Blanka, 2012).

Međutim, zbog široke rasprostranjenosti i intenziteta ljudskog djelovanja, pogotovo u posljednjih dvjestotinjak godina, antropogeni utjecaji se često ističu kao glavni čimbenici hidromorfoloških promjena tekućica (Downs i Piégay, 2019; Surian i Rinaldi, 2003). Antropogeni utjecaji podrazumijevaju aktivnosti upravljanja vodotocima izgradnjom hidrotehničkih građevina za razne namjene poput zaštite od poplava, plovidbe i iskorištavanja hidroenergije. Neke od najčešćih hidrotehničkih građevina su pregrade na tekućicama (brane, stepenice, preljevi i dr.), nasipi, obaloutvrde (sprečavaju eroziju obale), kanaliziranje i izravnavanje toka (presijecanje meandara) i uklanjanje priobalne vegetacije (Gregory, 2006). Navedene građevine i aktivnosti lokalno fizički mijenjaju izgled korita, ali također mogu utjecati na dinamiku erozijsko-sedimentacijskih procesa uzvodno i nizvodno zbog promjena u longitudinalnoj, lateralnoj, vertikalnoj i temporalnoj povezanosti prijenosa vode i sedimenta (Poepl i dr., 2017). Brane predstavljaju prekid u longitudinalnoj povezanosti: nizvodno dolazi do reguliranja protoka vode i smanjenja prijenosa sedimenta, što često rezultira sužavanjem korita, usijecanjem, pojačanom erozijom obala i nestankom prudova, dok u uzvodnim akumulacijama dolazi do pojačane sedimentacije te posljedično i eutrofikacije (J. M. Hooke, 2006; Pavlek i Faivre, 2020). S druge strane, obaloutvrde sprečavaju lateralno kretanje rijeke i eroziju obala kao prirodni izvor sedimenta u koritu, dok nasipi sprečavaju lateralnu povezanost korita i naplavne ravnice (Hohensinner i dr., 2004). Važan antropogeni utjecaj jest i jaružanje korita, odnosno vađenje sedimenta i produbljivanje korita da bi se dobio građevni materijal i poboljšala plovnost tekućice (Surian i Rinaldi, 2003; Provansal i dr., 2014). U indirektno

antropogene utjecaje na razini porječja spadaju promjene zemljišnoga pokrova poput deforestacije, urbanizacije i dr. (Scorpio i Piégay, 2021), kojima se mijenja količina sedimenta, odnosno stopa erozije tla u porječju (García-Ruiz i dr., 2013).

Na velikim rijekama koje teku gusto naseljenim područjima poput Dunava (Hohensinner i dr., 2004), Tise (Kiss i dr., 2008) ili Rhône (Provansal i dr., 2014) mjere kanaliziranja i izravnavanja korita uzrokovale su usijecanje i sužavanje korita i naplavne ravnice već tijekom 19. stoljeća. Navedene mjere provedene su ponajprije radi poboljšanja plovnosti, isušivanja naplavne ravnice i zaštite od poplava. Međutim, najintenzivnije promjene riječnih korita zabilježene su od sredine 20. stoljeća, prvenstveno sužavanje i usijecanje koje se povezuje s raširenim kanaliziranjem i jaružanjem korita te velikim brojem izgrađenih brana. Primjerice, Poulos i Collins (2002) procijenili su da u slijevu Sredozemnoga mora donos sedimenta na prijelazu u 21. stoljeće iznosi samo 50 % od pretpostavljenih prirodnih količina zbog izgradnje brana, što dovodi do erozije delta rijeka poput Poa, Ebra ili Nila. Liébault i Piégay (2002) navode da sužavanje korita pojedinih rijeka u jugoistočnoj Francuskoj iznosi čak 55 % u drugoj polovini 20. stoljeća, uz promjenu morfološkoga tipa korita iz isprepletenoga u meandrirajuće. U Europi su takvi procesi posebno rašireni i detaljno istraženi na rijekama u Italiji (Surian i Rinaldi, 2003; Scorpio i dr., 2015), poljskim Karpatima (Zawiejska i Wyżga, 2010; Hajdukiewicz i Wyżga, 2019) i Španjolskoj (Baena-Escudero i dr., 2019; Martínez-Fernández i dr., 2017). Važan je uzrok navedenih promjena i reforestacija zbog ekstenzifikacije gospodarskih aktivnosti i zapuštanja poljoprivrednih površina, pogotovo u izvorišnim, planinskim dijelovima porječja koji su prirodno glavni izvor sedimenta u tekućicama (Scorpio i Piégay, 2021). Na rijekama s meandrirajućim tipom korita zabilježeno je smanjenje u indeksu vijugavosti i bočnom kretanju radi kanaliziranja i izgradnja brana (Bertalan i dr., 2019; García-Martínez i Rinaldi, 2022). Međutim, Kiss i Blanka (2012) su na meandrirajućoj rijeci Hernád u Mađarskoj kao glavnu morfološku promjenu zabilježile razvoj sekundarnih zavoja na meandrima u razdobljima smanjenog protoka (dakle povećanje vijugavosti), koje povezuju i s antropogenim utjecajima (izgradnja brane) i s klimatskim promjenama.

Posljednjih tridesetak godina obilježeno je općenito smanjenim stopama morfoloških promjena na tekućicama (Downs i Piégay, 2019). Takav trend stabilizacije procesa može biti posljedica smanjene osjetljivosti tekućica na promjene zbog izvršenih hidrotehničkih zahvata poput kanaliziranja (Provansal i dr., 2014) ili zbog prihvaćanja održivijega načina upravljanja pod utjecajem okolišnih direktiva (npr. ODV; EC, 2000). U Italiji na mnogim rijekama koje nisu kanalizirane zabilježeno je širenje korita nakon poplava, čemu su također doprinijeli prestanak

vađenja sedimenta iz korita i mjere obnove (Scorpio i Piégay, 2021). Za donji tok Dunava, zbog značajnoga širenja vegetacije na riječnim prudovima, Grecu i dr. (2022) zaključuju da je dinamika rijeke danas u usporedbi sa stanjem iz sredine 19. stoljeća smanjena zbog rjeđe pojave poplava, smanjena donosa sedimenta i hidrotehničkih mjera.

#### 1.2.4. Osjetljivost tekućica

Najraširenija definicija osjetljivosti u geomorfologiji je ona Brunsdena i Thornesa (1979), gdje je osjetljivost krajobraza na promjene definirana kao vjerojatnost da će određena promjena u kontrolnim faktorima sustava proizvesti osjetljiv, prepoznatljiv i postojan odgovor. Fryirs (2017) na temelju rada Downs i Gregoryja (1995), definira osjetljivost tekućica / rijeka na tri načina:

1. Mogućnost promjene definirana kao omjer pokretačkih i otpornih sila. Promjene se javljaju kada poremećaj postane veći od sposobnosti rijeke da se odupre tom poremećaju.
2. Vjerojatnost i sklonost promjeni ovisi o blizini sustava graničnim uvjetima (vanjskim ili unutarnjim), čijim probijanjem dolazi do promjene. Poznavanje graničnih uvjeta omogućava interpretaciju vjerojatnosti da dođe do određenog tipa promjene.
3. Sposobnost sustava da se oporavi nakon poremećaja – mjeri se kao omjer povratnog intervala do vremena oporavka. Ova mjera se može koristiti kao pokazatelj trajnosti tj. efektivnosti promjene.

Prema tome, osjetljivost rijeke (engl. *river sensitivity*) odnosi se na vjerojatnost da će se rijeka geomorfološki prilagoditi (tj. promijeniti) u skladu s nastalim promjenama u kontrolnim faktorima riječnog sustava (npr. u protoku ili donosu sedimenta), bili oni uvjetovani ljudskim ili prirodnim utjecajima. Osjetljive rijeke lako se prilagođavaju poremećajima, te ponekad čak i male promjene u kontrolnim faktorima mogu rezultirati velikim promjenama u morfologiji rijeke (Fryirs, 2017; Khan i Fryirs, 2020). To je često slučaj kada se morfološka obilježja rijeke nalaze blizu graničnih uvjeta, te njihovim probijanjem može doći do promjene iz jednog morfološkog tipa rijeke u drugi (npr. meandrirajuća rijeka prijeđe u isprepleteni tip). S druge strane, u nekim slučajevima mogu se dogoditi neznatne prilagodbe na nametnute promjene, pri čemu morfologija rijeke "apsorbira" promjene u kontrolnim faktorima. Takve rijeke imaju zanemarivu osjetljivost te ih možemo smatrati otpornima na promjene (engl. *resilient rivers*)

(Fryirs i Brierley, 2013). Općenito, aluvijalne tekućice osjetljivije su na morfološke promjene od tekućica koje teku po matičnoj stijeni jer imaju prirodno veći kapacitet za promjene.

Fryirs (2017) nadalje predstavlja konceptualni okvir za analizu osjetljivosti rijeka prema prostornim jedinicama (porječje, odsječak, geomorfološka jedinica):

1. Na razini porječja, potrebno je istraživati razmještaj odsječaka u porječju, jačinu veza unutar porječja (protok vode i prijenos sedimenta) i postojanje prepreka.
2. Na razini odsječaka, potrebno je istražiti osjetljivost koja je dio standardne dinamike tekućice koja je karakteristična za određeni geomorfološki tip (engl. *river behaviour* –npr. migracija meandara) i osjetljivosti na promjene u geomorfološkom tipu rijeke (engl. *river change*, podrazumijeva značajnu promjenu u geomorfološkim procesima i oblicima).
3. Na razini reljefnog oblika, potrebno je istražiti sastav i pokretljivost sedimenta kao i fizička svojstva oblika te blizinu graničnih uvjeta.

Longitudinalne, lateralne i vertikalne veze u protoku vode i prijenosu sedimenta u riječnom sustavu, uključujući korito, naplavnu ravnice i podzemne vode, ključan su aspekt osjetljivosti rijeka. Naime, sustavi s jačim vezama su morfološki osjetljiviji jer se poremećaji lakše šire (Poepl i dr., 2017). Nadalje, za neke rijeke izmjerene morfološke promjene mogu biti dio standardne dinamike (npr. bočno kretanje u aktivno meandrirajućim rijekama), a za druge rijeke znače promjenu u morfološkom tipu. Važno je naglasiti da su rijeke koje imaju prirodno veći kapacitet za promjene (tj. veću standardnu dinamiku, npr. aluvijalne tekućice) često i osjetljivije na promjene u morfološkom tipu.

Vremensku dimenziju osjetljivosti rijeka potrebno je sagledati s obzirom na trajanje, učestalost i magnitudu određenih pojava (npr. poplave), geomorfološku efektivnost promjena (odnosno vrijeme oporavka), i uvjete koji su prethodili sadašnjem stanju. Stanje rijeke u trenutku događaja poremećaja odražava, između ostalog, kako je sustav reagirao na nedavne događaje i je li to učinilo sustav više ili manje podložnim prilagodbi (Fryirs, 2017).

U literaturi nema mnogo primjera detaljnih metodologija za procjenu osjetljivosti rijeka. Reid i Brierley (2015) procijenili su osjetljivost odsječaka rijeke isprepletenog tipa korita na Novom Zelandu koristeći hijerarhijski okvir koji se sastoji od dva dijela: kvalitativne analize kapaciteta prilagodbe (promjena) svakog odsječaka u skladu s njegovim geomorfološkim svojstvima kao što su reljefna ograničenost doline, oblik korita, geomorfološke jedinice i sediment dna (potencijalna osjetljivost), i klasifikacije odsječaka na temelju kvantificirane veličine i stope



promjena koje su zabilježene na kartama i zračnim snimkama u promatranom razdoblju istraživanja (specifična osjetljivost). Kao glavni pokazatelj stupnja osjetljivosti odsječka (indeks osjetljivosti) izračunata je standardna devijacija prosječne širine korita između promatranih razdoblja. Na razini porječja, Wheeler i dr. (2022) koristili su sličan pristup, osim što su kao glavni pokazatelj prilagodbe korita izmjerili bočno kretanje zbog meandrirajućeg tipa proučavane rijeke.

Khan i Fryirs (2020) predložile su složeniji pristup koji uključuje izračun promjena korita i osjetljivosti rijeke pomoću stopa i vjerojatnosti prilagodbe korita na temelju povijesnih podataka o morfologiji korita. Osjetljivost rijeke uspoređena je s hidrološkim podacima i vegetacijskim pokrovom kako bi se provjerila povezanost morfoloških promjena s promjenama u obalnoj vegetaciji ili pojavom poplava. Ovaj pristup također je primijenjen za analizu geomorfološke osjetljivosti donjeg toka rijeke Mara u Tanzaniji (Gomes i dr., 2023).

Prema okviru istraživanja koji je predstavljen u projektu REFORM, procjena osjetljivosti i potencijala za morfološke promjene predstavlja posljednji korak analize tekućica, te je ključan aspekt procjene budućih trendova s obzirom na scenarije upravljanja (Gurnell i dr., 2016). Procjena osjetljivosti posebno je bitna u planiranju aktivnosti obnove tekućice jer je predviđanje potencijalnih promjena i trendova ključno kako bi se odabrale ispravne aktivnosti i strategije. Također, analiza osjetljivosti omogućuje odabir odsječka koji ima najbolji potencijal za oporavak, odnosno na kojem su aktivnosti obnove najviše ostvarive (Fryirs i Brierley, 2016). Budući da se osjetljivost rijeke procjenjuje na temelju njezinih hidromorfoloških obilježja i intenziteta promjena u povijesnim i recentnim razdobljima (Khan i Fryirs, 2020; Reid i Brierley, 2015), osnovni koraci metodološkog okvira REFORM predstavljaju istovremeno i temelj za procjenu osjetljivosti tekućica.

Konačni cilj procjene osjetljivosti rijeke je razumijevanje kako su se određeni odsječci rijeke morfološki mijenjali tijekom vremena kao odgovor na promjene u kontrolnim faktorima. Na temelju povijesnog morfološkog razvoja rijeke moguće je odrediti apsorbira li rijeka promjene, prilagođava li im se postupno ili brzo, te pokazuje li nagle promjene (npr. promjene u tipu rijeke) koje bi sugerirale da je neki granični uvjet prijeđen. Za potrebe upravljanja rijekama, važno je identificirati odsječke koji su vrlo osjetljivi na promjene i razumjeti okolnosti pod kojima postaju osjetljivi na nagle promjene, kako bi se u budućnosti mogli poduzeti koraci za njihovo izbjegavanje ili pravovremeno ublažavanje (Fryirs, 2017).

### 1.3. Pregled dosadašnjih istraživanja u Hrvatskoj

Najveći broj dosadašnjih istraživanja tekućica u Hrvatskoj koja se bave nekim od aspekata hidromorfologije su ona hidrološka. Radovi o promjenama protoka i protočnih režima najbrojniji su za velike rijeke poput Save i Drave (Bonacci i Ljubenković, 2008; Bonacci i Oskoruš, 2010; Orešić i dr., 2017) te za rijeke koje su važne za hidroenergetsko istraživanje poput Cetine (Bonacci i Roje-Bonacci, 2003), Kupe (Bonacci i Andrić, 2010) ili Like i Gacke (Bonacci i Andrić, 2008). Tipologiju protočnih režima tekućica u Hrvatskoj izradio je Čanjevac (2013). Istraživanja promjena u srednjim protocima (Čanjevac i Orešić, 2015; 2018) pokazala su da je više od polovine analiziranih stanica pokazalo negativan trend godišnjeg otjecanja u periodu od 1990. do 2009. godine, s izraženijim smanjenjem na manjim nizinskim tekućicama u Panonskoj Hrvatskoj, dok su veće rijeke kao Sava, Drava i Mura zabilježile manja smanjenja ili povećanja što se pripisuje promijenjenim uvjetima u gornjim dijelovima porječja.

Međutim, sustavna istraživanja rijeka s prvenstveno geomorfološkog aspekta u Hrvatskoj nisu brojna. Najviše istraživanja provedeno je na rijeci Dravi, gdje je na temelju povijesnih topografskih karata od sredine 19. stoljeća zabilježeno značajno skraćivanje toka radi regulacijskih radova na koritu, prvenstveno presijecanja meandara u cilju povećanja protočnosti. Na području Križnice, duljina korita smanjila se 73 % u razdoblju 1842. – 1886. (Bognar, 2008), a na dionici između Repaša i Ferdinandovca za otprilike 25 % u razdoblju 1869. – 1941. (Pavlek i dr., 2022). Na cijeloj graničnoj duljini toka Drave između Hrvatske i Mađarske od kraja 19. stoljeća do 1960-ih Kiss i András (2017) zabilježili su prosječno smanjenje širine korita s 513 m na 361 m. Značajno je smanjen i broj otoka: do 1960-ih 75 % otoka spojilo se s naplavnom ravnicom, čime je Drava promijenila oblik korita iz složenog (koji se sastoji od više korita, odnosno rukavaca) u jednostavan (Kiss i András, 2017). U drugoj polovini 20. stoljeća, značajne morfološke promjene na Dravi nastaju zbog izgradnje hidroelektrana. Sužavanje korita u razdoblju 1968. – 1979. prosječno je iznosilo čak 50 % (Kiss i András, 2017). Izgradnja hidroelektrana imala je i veliki utjecaj na protočni režim Drave: trajanje vodostaja ispod 0 cm se povećalo za 70 %, a trajanje visokog vodostaja se smanjilo s 15 na 3 dana (Kiss i dr., 2011).

Geomorfološke promjene korita Cetine od kraja 19. stoljeća na temelju povijesnih karata i aerofotogrametrijskih snimki istražile su Pavlek i Faivre (2020): u razdoblju između 1850. i 1950., zabilježena je progradacija ušća koja je povezana s povećanim donosom sedimenta iz flišnog zaleđa radi intenzifikacije poljoprivrede i deforestacije. Progradacija ušća u istom

razdoblju zabilježena je i na istarskim tekućicama s flišnim zaleđem, Raši i Mirni (Benac i dr., 2017). Na Cetini je nakon izgradnje sustava hidroelektrana zbog znatnoga smanjenja srednjih protoka od 90 % na odsječcima toka nizvodno od brane Prančevići došlo do sužavanja korita od 40 do 55 %, te smanjenja površine prudova za oko 85 % (Pavlek i Faivre, 2020).

Geomorfološka obilježja porječja i toka Kupe istražili su Frančišković-Bilinski i dr. (2012): osim granulometrijskog sastava sedimenta, oblika korita, obilježja protoka i morfodinamike reljefnih oblika u koritu, istraženi su i ljudski utjecaji na korito poput izgradnje brana, obaloutvrda i jaružanja. Morfološko stanje tekućica u porječju Ilove prema smjernicama ODV-a istražili su Plantak i dr. (2016): od ukupno 534 km vodotokâ kanalizirano je njih oko 250 km, što znači da je njihovo prirodno stanje sasvim izmijenjeno ljudskim utjecajima.

Hidromorfološki monitoring prema odobrenoj metodologiji u skladu s provedbom ODV-a u Hrvatskoj se sustavno provodio od 2017. do 2020. godine. Monitoringom je obuhvaćeno više od 500 vodnih tijela te je stvorena baza podataka o obilježjima hidrologije, uzdužne povezanosti i morfologije tekućica (Vučković i dr., 2018; 2019; 2021). Prema rezultatima monitoringa, samo četvrtina od tristotinjak analiziranih vodnih tijela u Panonskoj Hrvatskoj postigla je dobro stanje za sva tri elementa kakvoće (hidrologiju, morfologiju i uzdužnu povezanost). Posljedice kanaliziranja tekućica posebno se ogledaju u nezadovoljavajućim ocjenama morfoloških pokazatelja, poput promjena u geometriji korita (tlocrtni oblik, poprečni presjek), uklanjanju priobalne vegetacije i ograničavanju bočnoga kretanja rijeke (Pavlek i dr., 2023). Naime, sustavno isušivanje naplavnih ravnica i izgradnja kanala za odvodnju u Slavoniji se provodi od kraja 19. stoljeća (Živaković-Kerže, 2004), zbog čega su rijeke srednje veličine velikim dijelom kanalizirane (Čanjevca i dr., 2022).

U Dinaridskoj ekoregiji (jadranski slijev i dio crnomorskoga slijeva koji se nalazi u Gorskoj Hrvatskoj) ustanovljeno je da samo petina od oko 150 istraženih vodnih tijela zadovoljava uvjete dobrog stanja za sva tri elementa kakvoće, prvenstveno zbog velikoga broja pregrada na tekućicama bilo radi iskorištavanja hidroenergetskog potencijala ili zaštite od (bujičnih) poplava (Vučković i dr., 2018; 2019; 2021). Navedene pregrade mijenjaju i hidrološki režim tekućica te uzrokuju ujezerenja (Bonacci i Roje-Bonacci, 2003; Frančišković-Bilinski i dr., 2012).

Rijeka Orłjava do sada nije bila predmet hidromorfoloških znanstvenih istraživanja, izuzev radova Čanjevca (2012) i Čanjevca i Orešića (2015) o novijim promjenama protočnih režima i

protoka, kojim je utvrđeno statistički značajno smanjenje srednjih protoka na postaji Pleternica-most u razdoblju 1990.-2009.

#### **1.4. Ciljevi i hipoteze istraživanja**

Osnovni ciljevi ove disertacije su analiza hidromorfoloških promjena rijeke Orljave te procjena osjetljivosti rijeke na antropogene i prirodne čimbenike tih promjena. Orljava, najveća tekućica Požeške kotline, jedna je od rijetkih nizinskih rijeka srednje veličine u Hrvatskoj koja nije u potpunosti kanalizirana. Zahvaljujući toj činjenici, kao i prirodnoj dinamici rijeke, na Orljavi je moguće pratiti aktivne promjene u morfologiji korita rijeke. Međutim, budući da je porječje Orljave izloženo čestim poplavama koje prijete lokalnom stanovništvu i poljoprivrednim aktivnostima u naplavnoj ravnici, provode se brojne hidrotehničke mjere obrane od poplava kao što su izgradnja stepenica i obaloutvrda te uklanjanje priobalne vegetacije. Bitno je naglasiti da se u okviru ovoga rada morfološke promjene korita rijeke promatraju u širem smislu značenja, što se odnosi na promjene koje su dio prirodne dinamike kao i na promjene u morfološkom tipu rijeke prema Brierleyju i Fryirs (2005).

Ovo istraživanje, koje uključuje rekonstrukciju morfoloških promjena korita od kraja 19. stoljeća, identifikaciju uzročno-posljedičnih veza i procjenu osjetljivosti rijeke, omogućit će bolje razumijevanje hidromorfoloških obilježja i procesa te će pružiti temelje za donošenje informiranih odluka o upravljanju rijekom. Također, s obzirom na značajne ljudske utjecaje, posljednji cilj istraživanja jest predložiti novi pristup upravljanju rijekom koji će ublažiti postojeće izazove te predložiti mjere obnove za one odsječke koji imaju najveći potencijal za poboljšanje sadašnjeg hidromorfološkog stanja.

**Specifični ciljevi** istraživanja su:

1. Analizirati hidromorfološke promjene rijeke Orljave od kraja 19. stoljeća.
2. Analizirati i interpretirati ključne prirodne i ljudske čimbenike kao uzroke detektiranih promjena.
3. Razviti metodologiju za procjenu osjetljivosti rijeke Orljave.
4. Odrediti najznačajnije mjere ublažavanja sadašnjeg hidromorfološkog stanja i potencijal obnove prirodne dinamike rijeke Orljave.

Na temelju dosadašnjih istraživanja hidromorfoloških promjena tekućica te provedenog preliminarnog pregleda toka Orljave na kartama treće vojne izmjere Habsburške Monarhije iz

druge polovine 19. stoljeća i ortofoto kartama Državne geodetske uprave (2011. – 2011.), formirane su sljedeće **hipoteze**:

1. Na rijeci Orljavi postoje značajne hidromorfološke promjene od kraja 19. stoljeća.
2. Morfološke promjene korita rijeke prvenstveno su posljedica ljudskog utjecaja.
3. Uklanjanje priobalne vegetacije utječe na pojačanu stopu erozije obala i promjenu tlocrtnog oblika rijeke.
  - a) Udio vegetacije na obalama rijeke negativno je povezan sa stopom bočnog kretanja rijeke.
  - b) Udio vegetacije na obalama rijeke negativno je povezan s promjenom u širini aktivnog korita.
4. Osjetljivost odsječaka rijeke povezana je s nagibom korita i širinom pojasa meandriranja.
  - a) Osjetljivost odsječaka rijeke pozitivno je povezana s nagibom korita.
  - b) Osjetljivost odsječaka rijeke pozitivno je povezana sa širinom pojasa meandriranja i indeksom vijugavosti.

Dosadašnja istraživanja pokazala su da je antropogeni utjecaj ključan za promjene u hidrolomorfološkim obilježjima tekućica (Downs i Piégay, 2019; Gregory, 2006). Budući da su antropogene promjene hidromorfoloških obilježja rijeka u Panonskoj Hrvatskoj zabilježene već od kraja 19. stoljeća (Živaković-Kerže, 2004), pretpostavka je da su i na Orljavi tada postojali značajni ljudski utjecaji (**hipoteza 1**). Međutim, vrhunac promjena kao što su kanaliziranje i izravnavanje toka očekuje se tek od sredine 20. stoljeća, u skladu s dosadašnjim istraživanjima tekućica na području Europe (Downs i Piégay, 2019). S obzirom na to da Orljava protječe kroz poljoprivredni kraj, pretpostavlja se da su promjene rijeke većinom uzrokovane hidrotehničkim mjerama za obranu od poplava i odvodnju, odnosno antropogenim utjecajima (**hipoteza 2**).

Preliminarnim pregledom toka Orljave na ortofoto kartama nizvodno od grada Pleternice uočeno je antropogeno uklanjanje vegetacije 2011. godine te povećana morfodinamika rijeke u sljedećim godinama. U literaturi se odsutnost vegetacije na obalama rijeka često povezuje s intenziviranjem erozije obala (Bertoldi i dr., 2015; Pollen-Bankhead i dr., 2009), migracijom korita (Micheli i dr., 2004; Rusnák i Lehotský, 2014), širenjem korita (Brooks i Brierley, 1997; Poepl i dr., 2020), te prijelazom iz jednostavnog u složeni tip korita (Gurnell, 2014; Tal i Paola, 2010). U skladu s time, testirana je **hipoteza 3**, kojom se pretpostavlja da manji udio

vegetacije na obalama rijeke utječe na veće stope erozije obala i promjenu u obliku korita. Preciziranjem hipoteze – **3.a**, kao glavni morfometrijski pokazatelj određena je stopa bočnog kretanja korita, koja uključuje i eroziju i taloženje sedimenata te sveobuhvatnije odražava ukupni utjecaj priobalne vegetacije na dinamiku rijeke. Također, podhipotezom **3.b** pretpostavlja se da manji udio vegetacije na obalama rijeke utječe na veće promjene u širini korita.

Prema literaturi su tekućice u aluvijalnim ravnicama koje nisu reljefno ograničene podložnije morfološkim promjenama, odnosno imaju veći stupanj osjetljivosti (Reid i Brierley, 2015). Veći nagib korita omogućuje veću snagu toka, koja je glavni pokretač morfoloških promjena, primjerice intenzivnijih erozijskih procesa i migracije korita (Alber i Piégay, 2017; Kiss i Andrási, 2017). U skladu s time, formirana je i testirana **hipoteza 4.a**.

Širina pojasa meandriranja odnosi se na širinu prostora u određenom razdoblju unutar kojeg meandri rijeke migriraju. Rijeke sa širokim pojasom meandriranja imaju više prostora za bočno kretanje, što znači da su sklone većoj osjetljivosti na promjene u okolišnim uvjetima (Fryirs i Brierley, 2013; Magdaleno i Fernández-Yuste, 2011). **Hipotezi 4.b** dodana je i pretpostavka o pozitivnoj vezi osjetljivosti rijeke s indeksom vijugavosti. Naime, na rijekama meandrirajućeg tipa korita, veća zakrivljenost meandara utječe na jačanje procesa bočne erozije i migracije korita (Bertalan i dr., 2019; Hickin i Nanson, 1975; Hooke, 2023), što se potencijalno može ogledati i u samom indeksu vijugavosti istraživanog odsječka rijeke.

## **1.5. Prostorno-vremenski okvir istraživanja**

Šire područje istraživanja predstavlja porječje rijeke Orljave, za koje su istražena osnovna fizičkogeografska obilježja, kao i pokazatelji ljudskih utjecaja na hidromorfologiju. Prema metodološkom okviru REFORM (Gurnell i dr., 2016), provedena je delineacija toka Orljave na manje prostorne jedinice (odsječke).

U prvom dijelu istraživanja, za sve odsječke rijeke od ulaska u Požešku kotlinu do ušća istražena su morfološka obilježja te je procijenjena njihova osjetljivost na temelju povijesnih i suvremenih kartografskih izvora i aerofotogrametrijskih snimaka (Tab. 1.2.). Uzvodno od Požeške kotline tok je preuzak za provedbu pouzdanih analiza povijesnih morfoloških promjena pomoću kartografskih i aerofotogrametrijskih izvora podataka. Kao najstariji pouzdani izvor podataka korištene su karte treće vojne izmjere Habsburške Monarhije iz 1879./1882. godine, a kao najrecentniji ortofoto karte iz 2019. godine, koje su bile najnoviji dostupan izvor u

trenutku početka ovog dijela analize. Prema tome, vremenski okvir ovog dijela istraživanja jest 1879./1882. – 2019. Hidrološka obilježja istražena su na temelju podataka sa stanica u porječju. Najdulji niz pripada postaji Pleternica-most (1946. – 2013.), a ostale korištene postaje su Požega (1977. – 2022.) i Frkljevci (1999. – 2022.).

Određene morfološke pokazatelje nije bilo moguće izmjeriti na svim odsječcima rijeke, jer je u uzvodnim dijelovima toka rijeka previše uska, a priobalna vegetacija previše gusta za npr. analizu promjene širine korita. Zbog toga su odabrani odsjeci između postaje Frkljevci (nizvodno od Pleternice) i Čosinog mlina kod Brodskog Drenovca na kojima je preliminarnom analizom utvrđena najveća dinamika morfoloških promjena korita. Na tim odsječcima provedena su detaljnija mjerenja morfometrijskih pokazatelja u razdoblju 1966. – 2021. te statističke analize njihove povezanosti s prirodnim i antropogenim faktorima promjena (testiranje hipoteza 3 i 4). Za statističke analize, kao vremenski okvir određeno je razdoblje 2001. – 2021. zbog dostupnosti aerofotogrametrijskih snimaka zadovoljavajuće prostorne rezolucije i točnosti, te neprekinutog niza hidroloških podataka s postaje Frkljevci.

Treći dio istraživanja sastoji se od terenskog istraživanja provedenog u razdoblju 2021./2022. – 2024. na odabranim lokacijama meandara rijeke u srednjem i donjem toku. Promjene korita na pojedinačnim meandrima istražene su na temelju snimanja bespilotnom letjelicom i mjerenja poprečnih profila korita.

Tab. 1.2. Prostorno-vremenski okvir triju osnovnih dijelova istraživanja

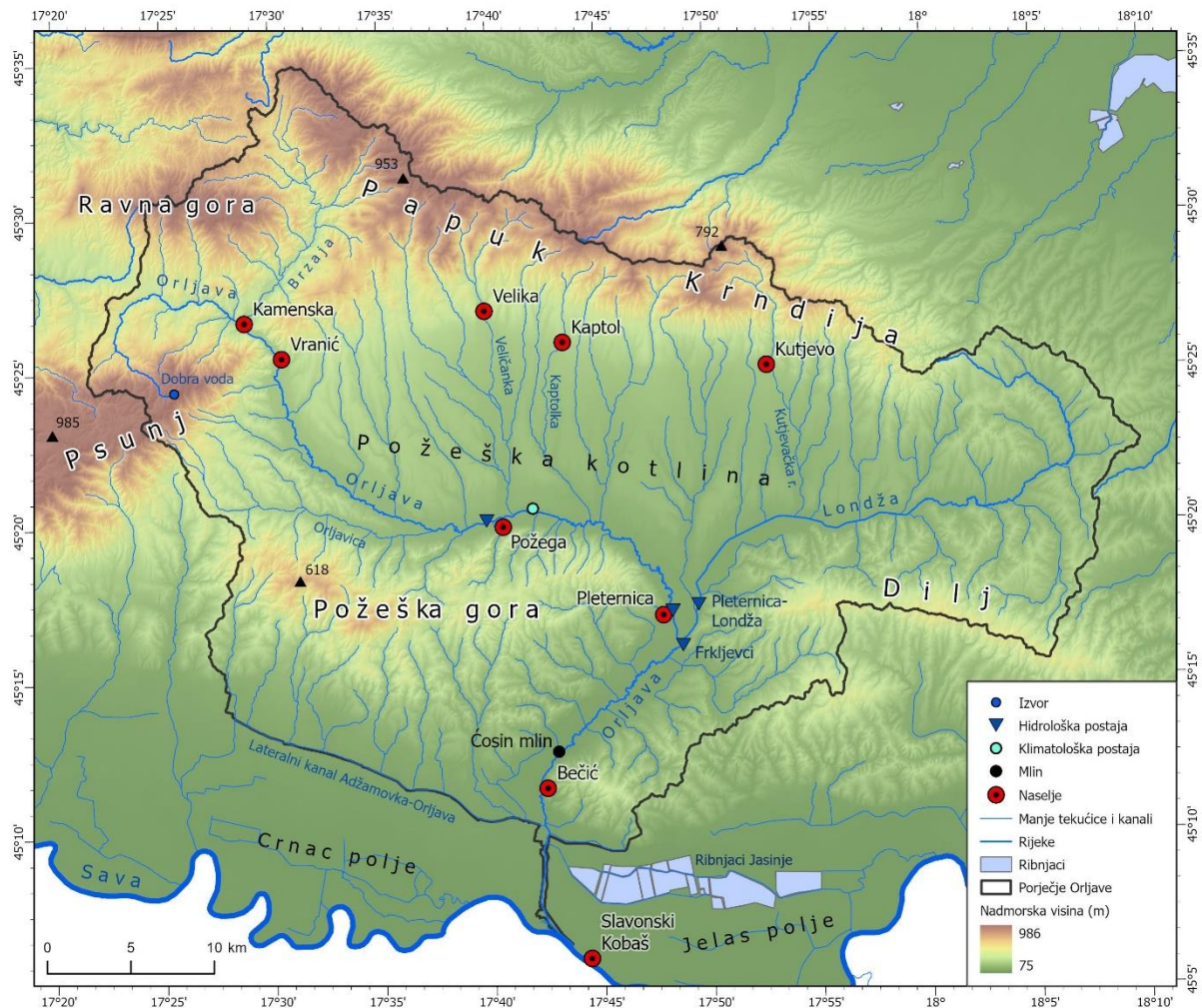
| Područje istraživanja                                       | Razdoblje istraživanja | Izvori podataka                                                    |
|-------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Tok Orljave (odsjeci) od ulaska u Požešku kotlinu do ušća   | 1879./1882. – 2019.    | Povijesne i suvremene topografske karte, ortofoto karte            |
| Tok Orljave (odsjeci) od postaje Frkljevci do Čosinog mlina | 1966. – 2021.          | Aerofotogrametrijske snimke, ortofoto karte                        |
| Pet lokacija meandara u srednjem i donjem toku              | 2021./2022. – 2024.    | Snimanje bespilotnom letjelicom, mjerenje poprečnih profila korita |

## 2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Porječje rijeke Orljave nalazi se u središnjem dijelu Slavonije, okruženo slavonskim gorama Psunjem (985 m), Ravnom gorom (856 m), Papukom (953 m), Krndijom (792 m), Dilj gorom (471 m) i Požeškom gorom (618 m). Između gora smještena je Požeška kotlina, čije tekućice Orljava odvodnjava prema rijeci Savi (Sl. 2.1). Ukupna površina porječja iznosi otprilike 1611 km<sup>2</sup>. Njegove granice velikim su dijelom određene položajem razvodnice na gorskim grebenima slavonskih gora. U najnižvodnijem dijelu porječja, koji se nalazi u naplavnoj ravnici Save, razvodnicu je teže odrediti radi melioracijskih zahvata. Izgradnjom lateralnog kanala Adžamovka-Orljava, tekućice južnih padina Požeške gore odvodnjavaju se u Orljavu, iako bi prirodno trebale izravno teći u rijeku Savu kroz Crnac polje. Također, zapadni obodni kanal Jelas polja (jugoistočno od naselja Bečić) odvodnjava se u Orljavu. S druge strane, dio vode iz Orljave preusmjerava se u ribnjake Jasinje u Jelas polju.

Toponim Orljava na topografskoj karti mjerila 1: 25 000 Državne geodetske uprave (list Mijači, 4517-2-2-2, 2003.) najuzvodnije se javlja nakon sutoka dvaju gorskih potoka, Čikotske rijeke i Čelije, na obroncima Psunja kod naselja Rogulje. Dulji izvorišni tok prema navedenoj karti jest Čikotska rijeka, čiji se izvor Dobra voda nalazi na 800 m nadmorske visine, što dakle treba uzeti i za izvor same rijeke Orljave. Nakon 18,5 km, kod Kamenske se u Orljavu ulijeva lijevi pritok Brzaja, koja odvodnjava najzapadniji dio Papuka. Zanimljivo je da je Brzaja na sutoku čak veličinom korita i protokom veća, no vjerojatno je tekućica nakon sutoka zadržala naziv Orljava radi važnosti njezine uzvodne doline kojom prema zapadu prolazi prometni put za Pakrac i Lipik. Nakon ulaska u Požešku kotlinu nizvodno od napuštenog naselja Vranić, Orljava prima brojne pritoke koji se slijevaju s obronaka slavonskih gora. Od desnih pritoka najveća je Orljavica, a od lijevih Veličanka i Kaptolka. Nakon 45 km toka kroz Požešku kotlinu, Orljava nizvodno od Pleternice prima svoj najveći pritok, rijeku Londžu. Duljina Londže je 49,6 km, a površina njenog porječja približno 480 km<sup>2</sup>, što je oko 30 % ukupne površine porječja Orljave. Nakon doline između Požeške i Dilj gore, Orljava ulazi u aluvijalnu ravnicu Save u koju se ulijeva blizu Slavanskog Kobaša nakon ukupno 93,4 km toka (Čanjevac i dr., 2022).





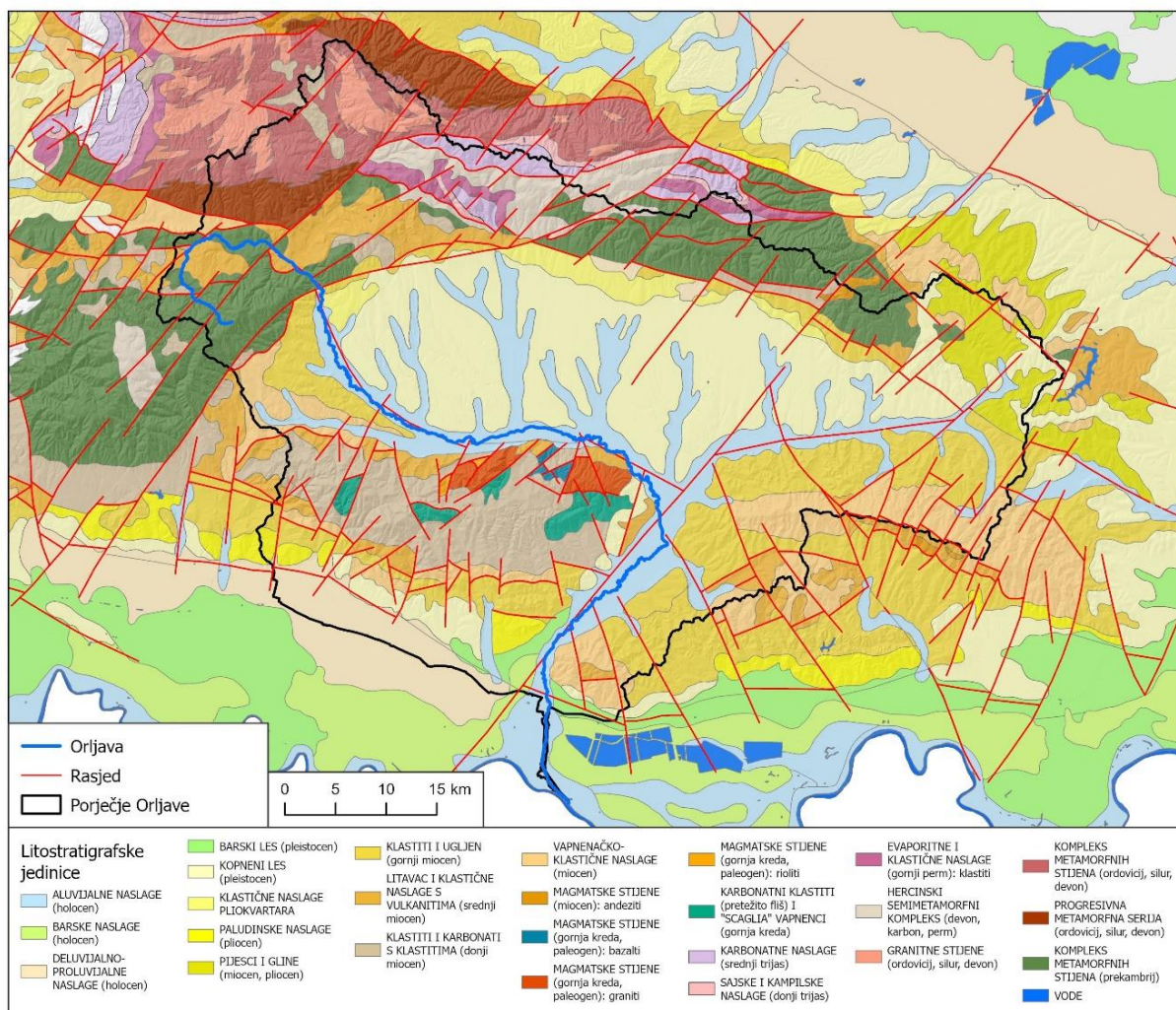
Sl. 2.1. Porječje Orłave. Kartografska podloga: DGU, DEM10

O najznačajnijem obilježju rijeke Orłave najviše govori njeno vlastito ime, koje dolazi od glagola *oriti se*, odnosno biti bučan. Orłava se može povezati i s riječima poput tutnjavine, grmljavine, ili bučnog prolaženja (Hrvatski jezični portal, n.d.). Prema tome, glavno obilježje rijeke Orłave jest upravo pojava bujičnih poplava u njenom porječju te posljedična dinamičnost fluvijalnogeomorfoloških procesa.

## 2.1. Geološka i geomorfološka obilježja

Porječje Orljave nalazi se u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena, koji se počeo oblikovati u ranom miocenu u sklopu tektonskih kretanja vezanih uz alpsku orogenezu (Pavelić i Kovačić, 2018). Najstarije stijene u jezgrama Psunja, Papuka i Krndije pripadaju kompleksu magmatskih (gabro, granitoidi) i metamorfnih stijena (gnajs, amfiboliti, škriljevci, mramori i migmatiti) iz razdoblja prekambrija i ranog paleozoika (HGI, 2009; Sl. 2.2). Ta kristalinska jezgra slavonskih gora dio je velike tektonske jedinice Tisia Mega-Unit, koja čini bazu Panonskog taložnog bazena. Smatra se da se litosferni fragment Tisia Mega-Unit tijekom srednje jure odvojio od Euroazijske ploče te tektonskim kretanjima za vrijeme alpske orogeneze došao na svoju sadašnju poziciju (Balen i dr., 2015). Sedimentne stijene iz razdoblja mezozoika manje su rasprostranjene, a čine ih karbonatne i klastične naslage iz razdoblja trijasa na području Papuka te karbonatni klastiti (pretežito fliš) te „scaglia“ vapnenci iz gornje krede na području Požeške gore. Mlađe magmatske stijene (gornja krede, paleogen, miocen), postanka vezanog uz alpsku orogenezu i formaciju današnjeg Panonskog bazena, većinom se nalaze na obroncima Požeške gore. Niža brežuljkasta područja, pogotovo u istočnom dijelu porječja Orljave (Krndija, Dilj gora), većinom su izgrađena od miocenskih klastičnih naslaga (konglomerati, pješčenjaci, šljunci, ugljen) s manjim ili većim udjelom karbonata. Područje Požeške kotline ispunjeno je pleistocenskim kopnenim lesom te holocenskim aluvijalnim naslagama u riječnim dolinama (HGI, 2009). Litološka građa porječja koja se velikom većinom sastoji od nepropusnih naslaga pogoduje razvoju guste mreže površinskih tokova.

Budući da se porječje nalazi u tektonskom bazenu, ispresijecano je brojnim rasjedima duž kojih su se izdignuli gorski masivi Psunja, Papuka i jezgre ostalih manjih gora. Položaj doline Orljave u Požeškoj kotlini određen je položajima rasjeda na sjevernim padinama Požeške gore. Također, položaj doline između Pleternice i Bečića određen je položajem rasjeda između Požeške i Dilj gore u smjeru sjeveroistok-jugozapad. Međutim, budući da su navedeni rasjedi prekriveni debelim aluvijalnim naslagama, njihov izravan utjecaj na recentne geomorfološke karakteristike korita rijeke je zanemariv.



Sl. 2.2. Geološka karta porječja Orpljave s označenim litostratigrafskim jedinicama i rasjedima. Izvor: HGI, 2009.

Prema geomorfološkoj regionalizaciji Hrvatske (Bognar, 2001), porječje Orpljave pripada megageomorfološkoj regiji Panonskog bazena, te makrogeomorfološkoj regiji Slavonsko gromadno gorje s Požeškom zavalom i nizinom Save. Na razini mezoregija, sjeverni dio porječja se nalazi u gorskoj skupini Papuka, zapadni dio u gorskom masivu Psunja, središnji dio u Požeškoj zavali i gorskom masivu Požeške i Dilj gore, a južni dio porječja u mezoregiji doline Save.

Sukladno navedenoj geomorfološkoj regionalizaciji i hipsometrijskim obilježjima, u porječju Orpljave moguće je izdvojiti nekoliko glavnih reljefnih cjelina: gorske masive slavonskih gora Papuka i Psunja, pobrđa Požeške i Dilj gore, Požešku kotlinu te naplavnu ravnicu Save. U sjeverozapadnom dijelu porječja, gorski masivi Psunja i Papuka nadmorske visine veće od 500 m zauzimaju 11,4 % površine (Tab. 2.1). Pobrđa Požeške i Dilj gore na jugu i jugoistoku



uglavnom su nižih nadmorskih visina (200-500 m), no strmih su nagiba i raščlanjena kratkim usječenim dolinama (Sl. 2.3). Požeška kotlina, smještena u središnjem dijelu porječja, izdužena je u smjeru istok-zapad. Reljef rubnih dijelova kotline raščlanjen je brojnim tokovima, pogotovo na sjeverozapadu, gdje su doline duboko usječene u lesne brežuljke na predgorskoj stepenici Papuka. Međutim, dno Požeške kotline blagih je nagiba, nagnuto prema jugu u smjeru otjecanja prema rijeci Savi. Područja ispod 200 m zauzimaju ukupno 40,7 % površine porječja te se većinom nalaze u naplavnoj ravnici Orljave nizvodno od Požege, te u naplavnoj ravnici Londže u istočnom dijelu kotline.

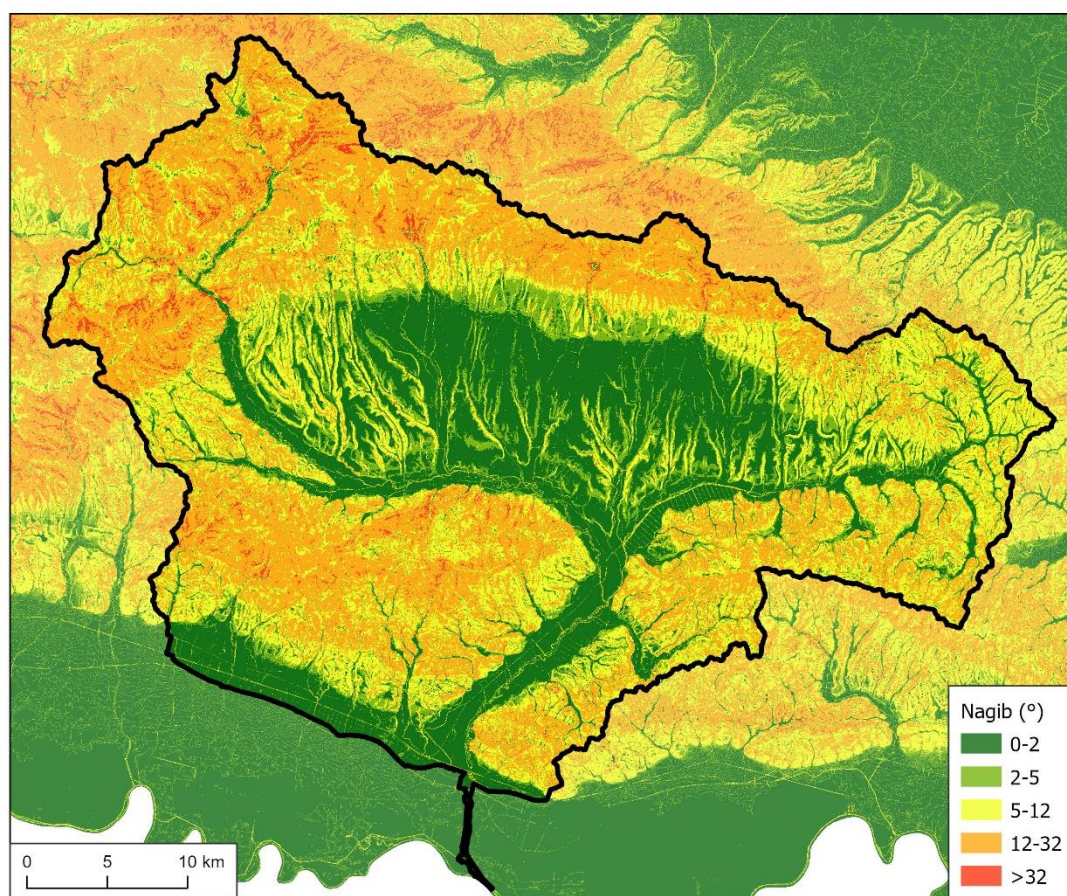
Tab. 2.1. Raspodjela nadmorskih visina i nagiba u porječju Orljave

| Nadmorska visina (m) | % površine porječja | Nagib (°) | % površine porječja |
|----------------------|---------------------|-----------|---------------------|
| < 100                | 0,89                | 0-2       | 25,00               |
| 100-150              | 13,58               | 2-5       | 12,94               |
| 150-200              | 26,22               | 5-12      | 27,57               |
| 200-300              | 28,06               | 12-32     | 32,81               |
| 300-500              | 19,91               | > 32      | 1,65                |
| > 500                | 11,40               |           |                     |

Iako se otprilike 70 % porječja nalazi ispod 300 m nadmorske visine, skoro 60 % površine nalazi se u razredima nagiba 5-12° i 12-32° (Sl. 2.3), što označava nagnuti, i jako nagnuti teren (Tab. 2.1). Takvi strmi nagibi ponajprije su vezani uz gorske masive i pobrđa, odnosno uz područja veće raščlanjenosti reljefa, gdje dolazi do snažne erozije, spiranja i izrazitih padinskih procesa. Razvijena drenažna mreža i veliki nagibi mogu dovesti do pojave bujica i bujičnih poplava. S druge strane, četvrtinu porječja prekrivaju ravnice (0-2°), poglavito na području kotline i u dolini Orljave nizvodno od Pleternice, u kojima se materijal donesen iz viših područja dijelom taloži, a dijelom ponovno aktivira procesima fluvijalne erozije i akumulacije.

Dolinu Orljave na temelju geoloških i geomorfoloških obilježja možemo podijeliti na dva osnovna dijela: gornji tok do ulaska u Požešku kotlinu, te srednji i donji dio toka u aluvijalnim naslagama od ulaska u kotlinu do ušća u Savu. U gornjem toku rijeka prolazi područjem prekambrijskih metamorfnih stijena i miocenskih klastičnih naslaga sa značajnim udjelom karbonata. Riječna dolina je u najuzvodnijem dijelu reljefno ograničena, strmih dolinskih strana s karakterističnim „V“ presjekom. Veća dolinska proširenja vezana su uz miocenske klastične

naslage, dok se reljefno ograničeni dijelovi toka nalaze u područjima prekambrijskih metamorfita. Od ulaska u Požešku kotlinu pa do ušća u Savu, dolina Orljave je u potpunosti oblikovana u holocenskim aluvijalnim naslagama. Reljefna neograničenost doline omogućuje slobodno meandriranje rijeke. Granulometrijski sastav dna korita se smanjuje od izvora do ušća; u dijelu toka uzvodno od Požege prevladava krupni šljunak (16-32 mm), a nizvodno od Pleternice sitni šljunak (4-8 mm). Detaljnija hidromorfološka obilježja korita po istraživanim odsječcima opisana su u poglavlju 3.1.2.

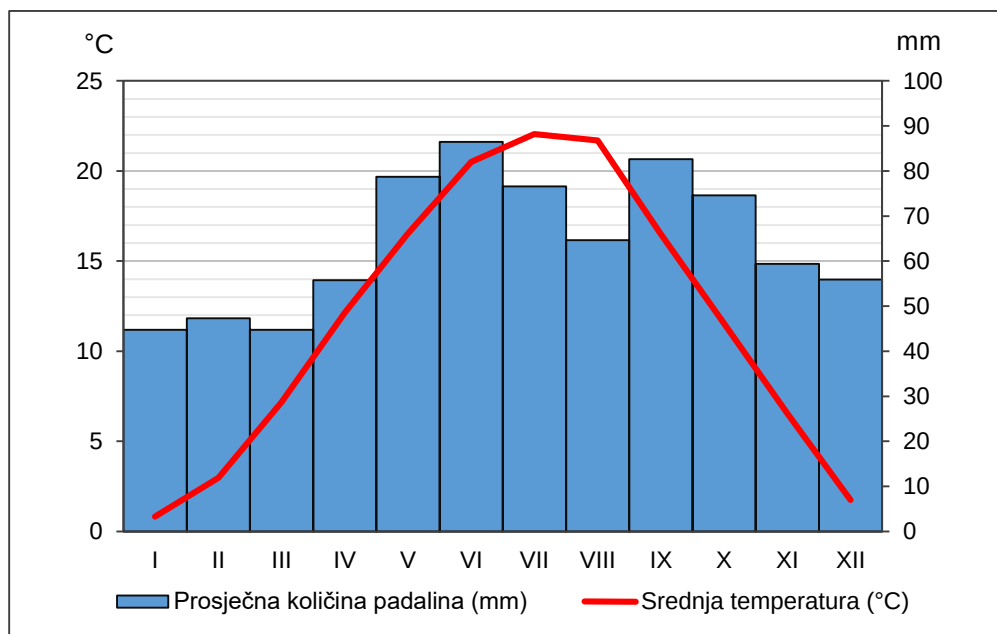


Sl. 2.3. Nagib reljefa u porječju Orljave. Izvor: prema DGU, DEM10

## 2.2. Klimatska obilježja

Prema Köppenovoj klasifikaciji, klima u porječju Orljave pripada umjereno toploj vlažnoj klimi s toplim ljetima (Cfb) (Filipčić, 1998). Glavno obilježje Cfb klime su umjereno hladne zime u kojima temperatura najhladnijeg mjeseca ne prelazi  $-3^{\circ}\text{C}$ , umjereno topla ljeta u kojima temperatura najtoplijeg mjeseca ne prelazi  $22^{\circ}\text{C}$ , te ravnomjeran raspored padalina tijekom godine. Na klimatološkoj postaji Požega u razdoblju 1997.-2020., srednja srpanjska temperatura iznosila je točno  $22^{\circ}\text{C}$ , a siječanjska oko  $1^{\circ}\text{C}$  (Sl. 2.4). Prosječna godišnja količina padalina iznosila je 772 mm. Najviše padalina zabilježeno je u toplijem dijelu godine. Od travnja do rujna palo je u prosjeku 445 mm, odnosno 57,7 % godišnje količine padalina. Najvlažniji mjesec bio je lipanj (86 mm), a najsuši siječanj (45 mm). Takva raspodjela padalina obilježje je kontinentalnog padalinskog režima.

Glavni modifikatorski utjecaj na padalinski režim u porječju ima reljef. Prosječno veće količine padalina (900-1100 mm) zabilježene su na područjima više nadmorske visine, odnosno u gorskim masivima i pobrdima. Zbog konfiguracije reljefa i utjecaja kontinentalnosti, u kotlini su tijekom toplog dijela godine česta grmljavinska nevremena tijekom kojih u kratko vrijeme mogu pasti velike količine padalina (Pletikapić i dr., 2017).



Sl. 2.4. Godišnji hod temperature i padalina u Požegi u razdoblju 1997.-2020. Izvor: Državni hidrometeorološki zavod

Zbog prekida u radu klimatološke postaje Požega u razdoblju 1985.-1997. nije moguće detaljno analizirati godišnje kretanje količine padalina od početka rada postaje (1961.) do danas.

Međutim, na osnovi podataka koji su dostupni (1961.-1984., 1998.-2020.), nije utvrđen trend povećanja ili smanjenja količine padalina u porječju. Na najbližoj meteorološkoj postaji Slavonski Brod, Filipčić i dr. (2013) ustanovili su blagi trend porasta u količini padalina u razdoblju 1950.-2010. od 2,2 mm u deset godina.

### 2.3. Osnovni morfometrijski elementi porječja i toka

Geološka podloga i razvoj reljefa glavne su odrednice morfometrijskih obilježja porječja, poput njegovog oblika, hipsometrijskih odnosa i nagiba, te oblika i gustoće riječne mreže. Morfometrijska obilježja porječja utječu na erozijsko-sedimentacijske procese te protok vode i prijenos sedimenta u porječju, zbog čega su važni čimbenici u interpretaciji hidromorfoloških obilježja i procesa u tekućicama (Fryirs i Brierley, 2013).

U tablici Tab. 2.2 prikazani su osnovni morfometrijski elementi porječja Orljave. Duljina porječja izračunata je kao udaljenost od najviše točke na razvodnici do izlaza glavne tekućice iz porječja (prema Riđanović, 1993) te iznosi 55,2 km.

Tab. 2.2. Osnovni morfometrijski elementi porječja Orljave

|                                   |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| <b>Površina</b>                   | 1610,91 km <sup>2</sup> |
| <b>Opseg</b>                      | 242,42 km               |
| <b>Duljina</b>                    | 55,20 km                |
| <b>Cirkularnost</b>               | 0,35                    |
| <b>Maksimalna širina</b>          | 62,80 km                |
| <b>Minimalna širina</b>           | 0,30 km                 |
| <b>Najviša nadmorska visina</b>   | 953 m                   |
| <b>Najniža nadmorska visina</b>   | 90 m                    |
| <b>Prosječna nadmorska visina</b> | 280 m                   |
| <b>Indeks reljefa</b>             | 863 m                   |
| <b>Relativni reljef</b>           | 15,63                   |
| <b>Prosječni pad</b>              | 10°                     |
| <b>Koeficijent asimetrije</b>     | 0,20                    |

Cirkularnost je izmjerena kao omjer površine porječja i površine kruga jednakoga opsega kao što je opseg porječja. Porječja s omjerima manjim od 0,4 smatraju se izduženima i pod

utjecajem geološke strukture, dok se porječja s cirkularnosti koja je blizu vrijednosti 1 smatraju okruglim. Iako porječje Orljave djeluje okruglo zbog svog položaja u Požeškoj kotlini, njegova crikularnost iznosi samo 0,35, vjerojatno zbog značajne izduženosti porječja u smjeru istok-zapad (62,8 km). Najmanja širina porječja izmjerena je na najnižvodnijem dijelu toka Orljave prije ušća u Savu (300 m).

Nadalje, apsolutna razlika u nadmorskoj visini porječja iznosi 863 m, dok prosječni pad po jedinici duljine porječja, odnosno relativni reljef, iznosi 15,63 m. Prosječni nagib za cijelo porječje iznosi 10°, što spada u kategoriju nagnutih terena na kojima se javlja pojačano spiranje i kretanje masa. Porječje Orljave izrazito je asimetrično, s koeficijentom asimetrije od 0,20. Koeficijent asimetrije računa se prema formuli:

$$K_a = \frac{(F_l - F_d)}{F} : 2 \quad (2.1)$$

gdje je  $K_a$  koeficijent asimetrije,  $F_l$  površina lijeve strane porječja,  $F_d$  površina desne strane porječja i  $F$  ukupna površina porječja (prema Riđanović, 1993). Desna strana porječja je manja, te na nju otpada 30 % ukupne površine. Lijeva strana porječja je veća radi najvećeg pritoka, Londže. Zahvaljujući nepropusnoj geološkoj podlozi, riječna mreža je dendritična i gusta (više od 1 km tokova po km<sup>2</sup> porječja). Međutim, budući da Orljava i Londža teku južnim rubovima Požeške kotline, riječna mreža u kotlini je asimetrična: pritoci s Papuka i Krndije su dulji u odnosu na one s Požeške i Dilj gore.

Osnovni hidrografski elementi rijeke Orljave prikazani su u tablici Tab. 2.3. Orljava izvire na 800 m nadmorske visine (toponim Dobra voda, izvor Čikotske rijeke), a ulijeva se u Savu na 90 m. Apsolutni pad rijeke iznosi 710 m, a relativni pad 7,60 m po riječnom kilometru. Koeficijent razvijenosti, odnosno omjer duljine tekućice i zračne udaljenosti od izvora do ušća jest 2,29.

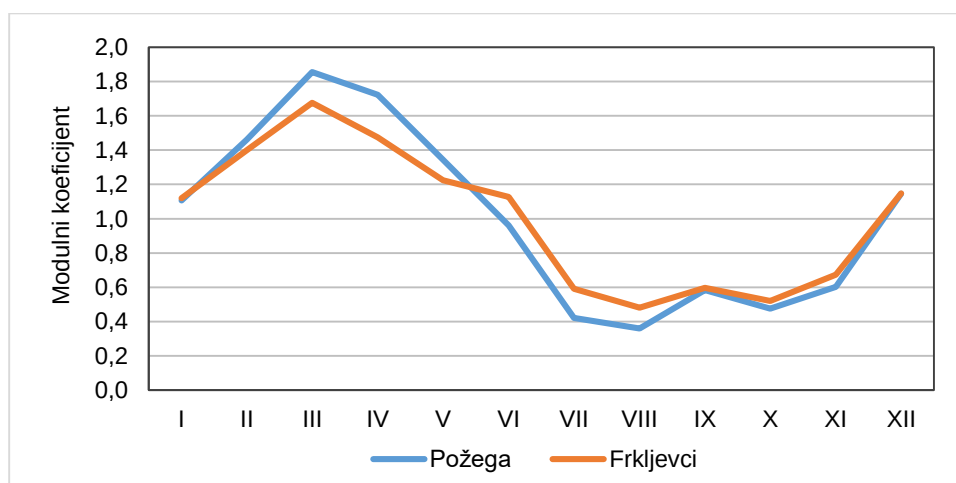
Tab. 2.3. Osnovni morfometrijski elementi rijeke Orljave

|                                 |                         |
|---------------------------------|-------------------------|
| <b>Duljina</b>                  | 93,4 km                 |
| <b>Nadmorska visina izvora</b>  | 800 m                   |
| <b>Nadmorska visina ušća</b>    | 90 m                    |
| <b>Apsolutni pad</b>            | 710 m                   |
| <b>Relativni pad</b>            | 7,60 m km <sup>-1</sup> |
| <b>Koeficijent razvijenosti</b> | 2,29                    |



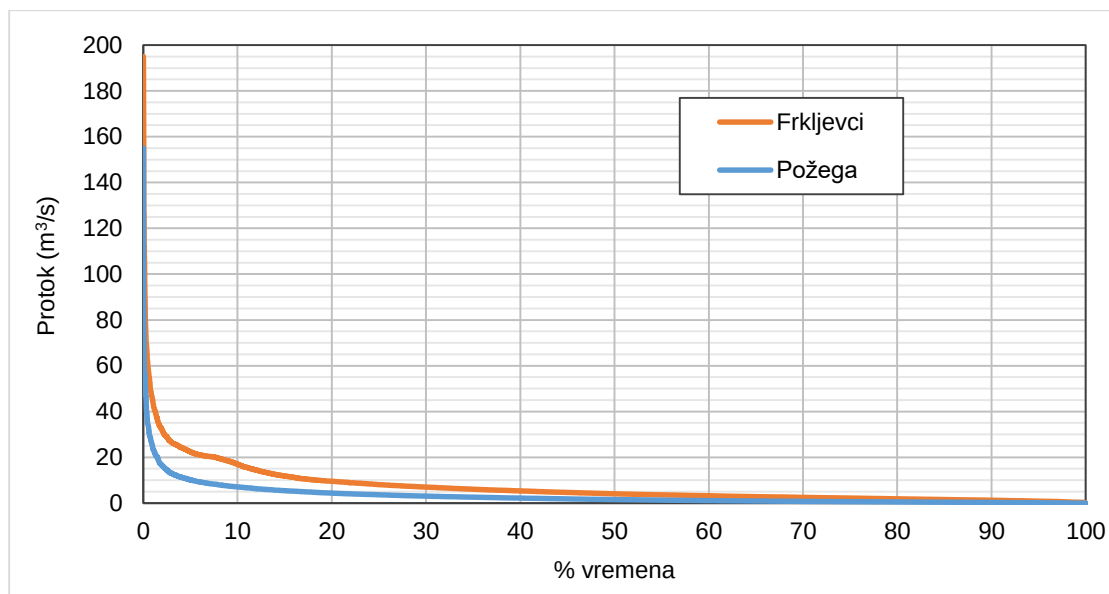
## 2.4. Hidrološka obilježja

Hidrološka obilježja Orljave analizirana su na temelju podataka o srednjim dnevnim protocima s hidroloških postaja Požega, Pleternica most, Frkljevci i Pleternica (postaja na rijeci Londži) (Sl. 2.1). Protočni režim Orljave pripada panonskom kišno-snježnom tipu (Čanjevac, 2013), što znači da u prihrani tekućice, osim kiše, važnu ulogu ima i sniježnica. Režim je u razdoblju 1999. – 2022. bio jednostavnog tipa, odnosno s jednim izraženim maksimumom i minimumom protoka tijekom godine (Sl. 2.5). Na obje analizirane postaje maksimum se javljao tijekom ožujka (Požega: 1,85, Frkljevci: 1,68), vezano uz otapanje snijega u višim dijelovima porječja. Minimum se javljao u kolovozu (Požega: 0,36, Frkljevci: 0,48), za vrijeme manjih količina padalina i visokih temperatura. Na postaji Požega i maksimumi i minimumi su bili izraženiji nego na postaji Frkljevci.



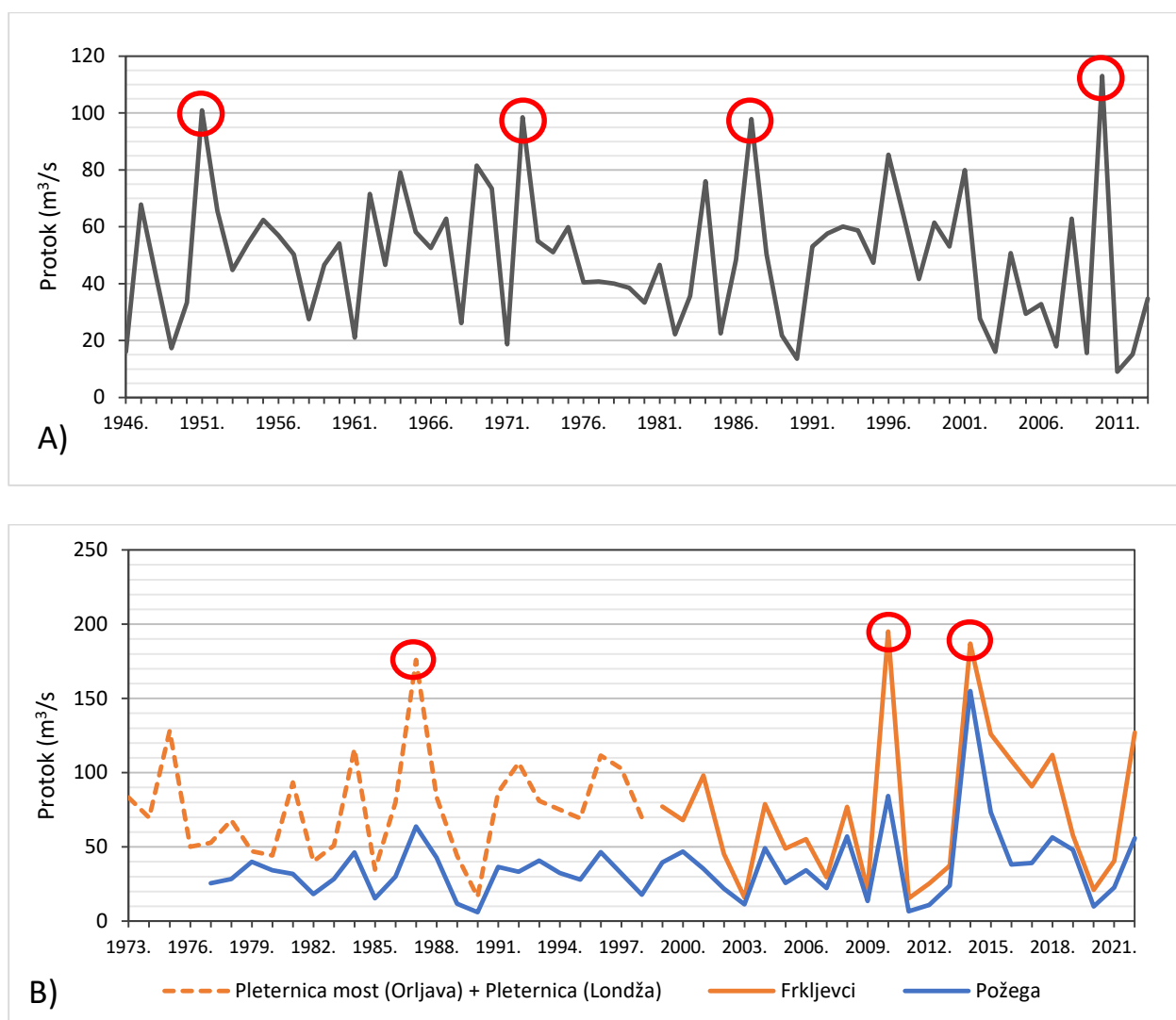
Sl. 2.5. Modulni koeficijenti na stanicama Požega i Frkljevci u razdoblju 1999. – 2022. Izvor: Državni hidrometeorološki zavod

Važno hidrološko obilježje Orljave jest varijabilnost protoka. Na postaji Požega u razdoblju 1999. – 2022. srednji protok iznosio je  $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Prema krivulji trajanja protoka (Sl. 2.6), više od 90 % vremena u navedenom razdoblju protok je iznosio manje od  $7,1 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{10}$ ). Minimum protoka izmjeren 4. 9. 2003. iznosio je 0, što znači da rijeka u ovom dijelu toka može čak i presušiti (iako vrlo rijetko). S druge strane, najveći izmjereni protok 16. 5. 2014. iznosio je čak  $227,1 \text{ m}^3/\text{s}$ , što je otprilike sedamdeset puta više od izračunatog srednjaka. Na postaji Frkljevci u istom razdoblju srednjak je iznosio  $7,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Više od 90 % vremena protok je bio manji od  $17 \text{ m}^3/\text{s}$  (Sl. 2.6). Minimum protoka izmjeren 25. 9. 2003. bio je  $0,043 \text{ m}^3/\text{s}$ , a maksimum izmjeren 16. 5. 2014. iznosio je  $209,3 \text{ m}^3/\text{s}$ , što je trideset puta više od srednjaka.



Sl. 2.6. Krivulja trajanja srednjih dnevnih protoka na postajama Požega i Frkljevci u razdoblju 1999. – 2022. Izvor: Državni hidrometeorološki zavod

U istraživanjima geomorfoloških promjena tekućica, potrebno je detaljnije analizirati kretanje maksimuma protoka kroz godine, budući da značajne morfološke promjene riječnih korita i naplavnih ravnica većinom nastaju kao posljedica pojave velikih protoka, odnosno poplava. Na Orljavi, najdulji niz podataka o protoku moguće je analizirati na postaji Pleternica most, koja je bila operativna od 1946. do 2013. godine. Budući da su podaci o maksimalnim dnevnim protocima na hidrološkim postajama u porječju dostupni tek od 2000. (Frkljevci), odnosno 2001. godine (Požega, Pleternica-most), analizirani su srednji godišnji maksimumi određeni na temelju dnevnih srednjaka protoka (Sl. 2.7). Na postaji Pleternica most u analiziranom razdoblju nije utvrđen značajan trend povećanja ili smanjenja srednjih maksimalnih protoka. Međutim, moguće je istaknuti četiri godine koje se izdvajaju veličinom protoka: 1951., 1972., 1987. i 2010. U prve tri navedene godine zabilježeni su srednji maksimumi od oko  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , dok je 2010. on iznosio  $113 \text{ m}^3/\text{s}$ . Budući da je postaja Pleternica most prestala s radom 2013., najrecentnije razdoblje potrebno je analizirati na postaji Frkljevci, koja se nalazi nizvodno od ušća Londže u Orljavu.



Sl. 2.7. Kretanje srednjih godišnjih maksimuma na (A) postaji Pleternica most u razdoblju 1946. – 2013., i (B) postajama Frkljevci i Požega u razdoblju 1973. – 2022. Crveni kružići označavaju značajne poplave. Izvor: Državni hidrometeorološki zavod

Podaci s Frkljevaca dostupni su od 1999., zbog čega su podaci postaje Pleternica most na Orljavi i Pleternica na Londži zbrojeni kako bi se niz produljio za razdoblje 1973. – 1998. Na zbrojenim podacima postaja Pleternica most i Pleternica – Londža ističe se poplava 1987., a na Frkljevcima poplave 2010. i 2014. godine. Na postaji Požega najznačajnija poplava u promatranom razdoblju je ona iz 2014. godine. Dakle, od početka 21. stoljeća na Orljavi su se dogodile dvije značajne poplave, u lipnju 2010. i u svibnju 2014. godine. Prema izmjenjenim maksimalnim dnevnim protocima na Frkljevcima, poplava iz 2014. je bila veća ( $209,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) u odnosu na onu iz 2010. ( $203 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Obje poplave su procijenjene na poplave 20-godišnjeg povratnog perioda, na temelju ekstrapolacije podataka s postaje Frkljevci (Vidaković Šutić i dr., 2017). Također, obje poplave obilježio je brz rast maksimalnih protoka, koji ukazuje na

bujičan karakter hidroloških obilježja rijeke: tijekom poplave 2010., maksimalni protok je u roku 48 sati narastao s 25 na 203 m<sup>3</sup>/s, dok je za poplave 2014. u roku 24 sata narastao od 30 do 209,3 m<sup>3</sup>/s (Vidaković Šutić i dr., 2017).

Tijekom poplave 2010., od 30. svibnja do 7. lipnja, na području cijele doline Orljave u Požeškoj kotlini i nizvodno od Pleternice poplavljena su mnoga naselja, poljoprivredna područja i prometnice. Sveukupno je poplavljeno preko 2000 ha i 100-tinjak kuća. U značajnoj opasnosti našao se grad Pleternica, čije je intenzivno plavljenje zaustavljeno iskopom odteretnog kanala, kao i izradom "zečjih" nasipa oko pojedinih kuća (Pletikapić i dr., 2017).

Velika poplava 2014. godine bila je rezultat intenzivne ciklone koja je zahvatila srednju i jugoistočnu Europu, uzrokujući obilne poplave u cijeloj regiji. Na području porječja Orljave, najveći intenzitet plavljenja zabilježen je od 15. do 24. svibnja 2014., kada je u oko 500 stambenih objekata u Pleternici i njenoj okolini voda prekrila podruma i prizemlja do visine od 0,5 m, na nekim mjestima i do 0,8 m. Također, poplavljeno je oko 2000 ha poljoprivrednih površina, s vodom dubokom oko 0,5 m, koja se povukla unutar 2-3 dana. Cestovni i željeznički promet bio je prekinut radi oštećenja na prometnicama i pruzi između Pleternice i Novoselaca (Pletikapić i dr., 2017). Na području cijelog porječja poplava je uzrokovala štete na hidrotehničkim građevinama (mostovi, obaloutvrde, stepenice). Također, upravitelji voda izvijestili su o značajnoj eroziji obala rijeke (Hrvatske vode, 2014).

Nažalost, radi nepotpunih nizova podataka nije moguće napraviti empirijski izračun povratnog perioda poplava za dulje istraživano razdoblje, tj. od sredine 20. stoljeća do danas, no dostupni podaci postaje Pleternica most upućuju da su se veće poplave, s vrijednostima protoka sličnim onima iz 2010., od sredine 20. do početka 21. stoljeća događale svakih dvadesetak godina (1951., 1972., 1987., 2010.). Treba napomenuti da je na postaji Pleternica most najveći protok zabilježen za poplave 1987., a ne 2010. Nažalost, 2014. više nije bilo mjerenja pa je nemoguće usporediti podatke i ustvrditi je li poplava iz 2014. najveća u povijesti mjerenja na Orljavi.

Raščlanjen reljef velikih nagiba, gusta drenažna mreža, te česta pojava intenzivnih padalina pridonose pojavi bujičnih poplava u porječju, kako na samoj rijeci Orljavi, tako i na njenim pritocima, pogotovo onima koji se slijevaju s Papuka i Požeške gore. Primjerice, početkom lipnja 2021., šire područje Grada Požege zahvatile su bujične poplave poslije intenzivnih oborina na potocima s Požeške gore. Poplave su uzrokovale značajnu štetu na stambenim objektima i prometnicama (tportal, 2021), a slični događaji ponovili su se i 2022. i 2023. (Pejaković, 2022; Mandarić, 2023).

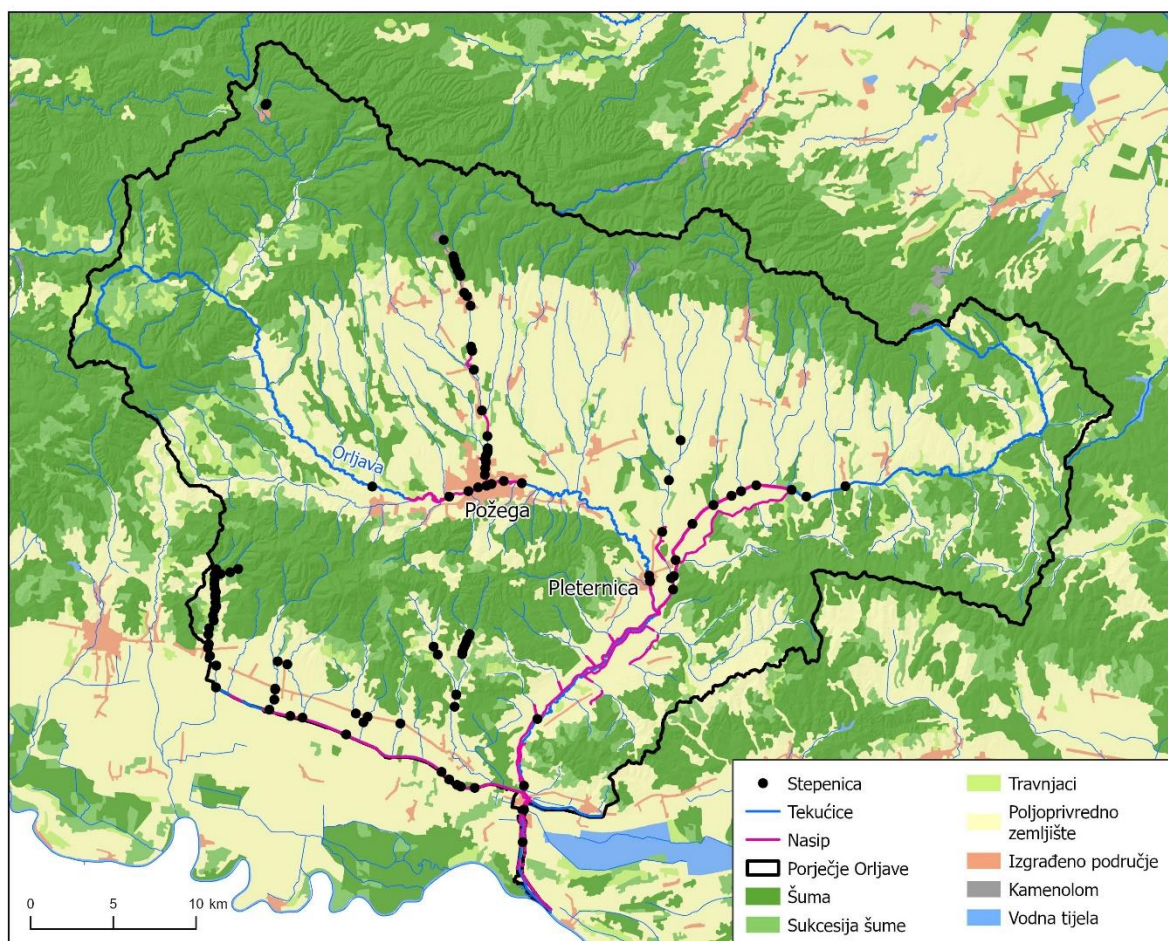
## 2.5. Zemljišni pokrov i ljudski utjecaji

Zemljišni pokrov važno je obilježje porječja jer utječe na količinu i intenzitet otjecanja te erozijsko-sedimentacije procese. U područjima prekrivenima šumama površinsko otjecanje je općenito manje, jer krošnje drveća pridonose većoj intercepciji padalina i evapotranspiraciji, a korijenje omogućuje veću infiltraciju vode u tlo. Posljedično, stope erozije tla manje su u šumama u usporedbi s površinama prekrivenima rjeđom vegetacijom. Brojna su istraživanja pokazala da su količina površinskog otjecanja i stope erozije tla veće na poljoprivrednim površinama u usporedbi sa šumama, ali i travnjacima i grmljem (Garcia-Ruiz i dr., 2013; Keesstra i dr., 2007).

U porječju Orljave, šume prekrivaju 46 % površine, prvenstveno na gorama i pobrđima koje okružuju Požešku kotlinu (Sl. 2.8). S druge strane, poljoprivredne površine, koje se većinom nalaze na području kotline i riječnih dolina, prekrivaju 41 % površine (EEA, 2018). Sukcesija šume, odnosno područja u zarastanju koja se uglavnom nalaze u brežuljkastim dijelovima porječja prekrivaju 7 %, travnjaci oko 4 %, a izgrađena područja 2 % površine porječja. Na širem području porječja, odnosno na području Požeško-slavonske županije, u razdoblju 1985.-2013. zabilježen je porast šumskog pokrova i smanjenje poljoprivrednog zemljišta, pogotovo u visinskoj zoni 200-400 m, vezan uz depopulaciju i zapuštanje poljoprivrednih površina, dok je u nizinama zabilježena poljoprivredna intenzifikacija (Jogun i dr., 2019). Iako u okviru ovog istraživanja nije provedena detaljna analiza promjene zemljišnog pokrova u porječju, vizualnom usporedbom porječja na ortofoto karti prije 1968. (DGU, 1968) sa stanjem iz 2011. lako se mogu uočiti trendovi koje su dokazali Jogun i dr. (2019).

Rijeka Orljava najvećim dijelom svoga toka teče kroz poljoprivredno područje. Područje Požeške kotline naseljeno je već od prapovijesnog doba, a tijekom antike bilo je poznato kao važno poljoprivredno područje „Vallis aurea“ (Potrebica, 2012). Prema tome, ljudski utjecaji na okoliš poput deforestacije zasigurno su počeli već i prije antičkog doba. Također, tekućice velike energije toka poput onih u porječju Orljave vrlo su pogodne za izgradnju mlinova. Podatak o velikom broju mlinova na potoku Veličanki možemo naći u zapisima iz 16. stoljeća (Andrić, 2009). Prema karti prve vojne izmjere Habsburške Monarhije iz 1781.-1783. (Arcanum maps, n.d.), na Orljavi je u gornjem toku ucrtano sedam mlinova, a na srednjem i donjem dijelu toka njih preko dvadeset, pogotovo u najnižvodnijem dijelu od Bečića do ušća. Tijekom 19. stoljeća broj mlinova je u srednjem i donjem dijelu toka dodatno porastao na oko dvadeset i pet prema karti treće vojne izmjere iz 1879.-1882. (Arcanum maps, n.d.). Za potrebe

mlinova često je bio probijan kraći ravni dovodni kanal do mlinske stepenice i kotača, a glavno korito je teklo oko mlina. Na Orljavi se do danas zadržalo još svega nekoliko mlinova, i to uglavnom turističke funkcije, a mlinske stepenice i dovodni kanali su većinom razrušeni i zapušteni.



Sl. 2.8. Zemljišni pokrov i hidrotehničke građevine u porječju Orljave. Izvor: Corine Land Cover 2018 (EEA); prostorna baza podataka hidrotehničkih građevina (Hrvatske vode)

Značajniji ljudski utjecaji na morfologiju korita i naplavne ravnice uključuju hidrotehničke mjere koje se provode u cilju zaštite od poplava: kanaliziranje korita, izgradnju nasipa, obaloutvrda i stepenica te presijecanje meandara (izravnavanje korita). U dolini Orljave opsežniji hidrotehnički radovi započeli su sredinom 20. stoljeća kako bi se naselja i poljoprivredne površine zaštitili od česte pojave bujičnih poplava (Krpan, 1995).

Kanaliziranje tekućica podrazumijeva izravnavanje i produbljivanje riječnog korita kako bi se povećao kapacitet protoka unutar korita i time smanjio rizik od poplava. Ta hidrotehnička mjera u potpunosti mijenja hidrološka i geomorfološka svojstva i procese u koritu: prirodna

heterogenost geomorfoloških oblika korita zamjenjuje se uniformnošću trapezoidnog poprečnog profila, koji dovodi do ujednačenijih obilježja protoka. Na Orljavi kanaliziranje korita provedeno je u dijelovima toka u kojima rijeka prolazi kroz gušće naseljena područja, tj. kroz gradove Požegu i Pleternicu (Sl. 2.9C), te u najnižvodnijem dijelu toka južno od Bečića. Mjere kanaliziranja mogu biti manje ili više intenzivne. Opsežno je kanalizirano oko 17 km toka Orljave (s izrazitim promjenama oblika i poprečnog presjeka korita), dok su manje intenzivne mjere, uključujući izravnavanje, provedene na dodatnih 13 km, što ukupno čini oko 30 km toka.

Kod Požege i nizvodno od Pleternice do ušća također su izgrađeni i nasipi (Sl. 2.8). Kod Požege oni se nalaze usko uz rijeku, što je omogućilo širenje grada na naplavnoj ravnici, te duljina na desnoj obali iznosi 7,9 km, a na lijevoj 6,8 km. Od Pleternice do Bečića širina između nasipa iznosi od 220 do 250 m, dok nizvodno nasipi omeđuju rijeku mjestimice i na manjoj udaljenosti od 100 m. Ukupna duljina nasipa od Pleternice do ušća je 20,2 km na desnoj obali, i 11,8 na lijevoj. Nasipi su izgrađeni i u donjem dijelu toka Londže koji je kanaliziran. Najnižvodniji nizinski tokovi pritoka poput Veličanke, Kaptolke i Vrbove također su kanalizirani.

Na dijelovima toka gdje je lokalno potrebno spriječiti bočnu eroziju grade se obaloutvrde, koje se uglavnom izvide kamenim nabačajem (Sl. 2.9A). Dubinska i bočna erozija lokalno se nastoji umanjiti izgradnjom stepenica, poprečnih građevina kojima se podiže i stabilizira razina dna korita. Najviše stepenica nalazi se na području Požege (Sl. 2.8), na dijelu toka koji je kanaliziran. Kod Pleternice se nalaze dvije stepenice, od kojih je uzvodnija izgrađena još 1926. g. za potrebe male hidroelektrane (Sl. 2.9B). Instalirane snage 220 kW, hidroelektrana danas osigurava električnu energiju za javnu rasvjetu i gradske ustanove Grada Pleternice. Preostalih pet stepenica (jedna uzvodno od Požege, i četiri nizvodno od Pleternice) nalaze se na lokacijama mlinova s kraja 19. stoljeća. Dvije najnižvodnije stepenice, visine preko 5 m, reguliraju razinu vode u koritu u cilju preusmjerenja dijela protoka u ribnjake Jasinje (Sl. 2.9D). Zbog toga je protok na nizvodnom dijelu Orljave prije ušća u Savu značajno smanjen te rijeka u ljetnim mjesecima može i presušiti. Detaljnija obilježja ljudskih utjecaja na hidromorfologiju odsječaka rijeke opisana su u poglavlju 3.1.2.





Sl. 2.9. Ljudski utjecaji na morfologiju korita: A) obaloutvrda od kamenog nabačaja, B) stepenica u Pleternici, C) kanalizirano korito u Pleternici, D) stepenica nizvodno od Bečića



### 3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Rad je metodološki podijeljen na tri dijela definirana prostorno-vremenskim okvirom istraživanja te slijedeći predložene korake u teorijskom okviru za analizu hidromorfologije tekućica predstavljenu kroz projekt REFORM. Prvo je riječni tok podijeljen (delineiran) na odsječke na temelju obilježja morfologije i nagiba korita, širine riječne doline, te umjetnih prepreka u uzdužnoj povezanosti (brane, mlinske stepenice) prema Gurnell i dr. (2016). Na odsječcima od ulaska u Požešku kotlinu do ušća istražene su dugoročne morfološke promjene korita od kraja 19. stoljeća do 2019. na temelju kartografskih izvora podataka i aerofotogrametrijskih snimaka. Analizirane su duljina korita i indeks vijugavosti, kao glavni pokazatelji antropogenih promjena, odnosno kanaliziranja rijeke, te stopa bočnog kretanja. Nakon što su odsječci podijeljeni na prirodne i one znatno promijenjene antropogenim djelovanjem (npr. kanalizirani odsječci), potencijalna osjetljivost na promjene procijenjena je na temelju osnovnih hidromorfoloških svojstava svakog odsječka (Reid i Brierley, 2015). Specifična osjetljivost odsječaka procijenjena je na temelju brzine bočnog kretanja u razdoblju 2001. – 2019., koja je uzeta kao pokazatelj osjetljivosti rijeke na promjene jer predstavlja glavno geomorfološko obilježje meandrirajućeg tipa rijeka poput Orljave (Gomes i dr., 2023; Reid i Brierley, 2015; Wheeler i dr., 2022).

Na dva odsječka između Frkljevaca i Ćosinog mlina, gdje je veća širina korita omogućila detaljniju analizu geomorfoloških promjena, provedena je objektna klasifikacija zemljišnog pokrova naplavne ravnice. Time je djelomično automatiziran proces vektorizacije reljefnih oblika u koritu te je dodatno istražena dinamika vegetacijskog pokrova. Uzroci različite specifične osjetljivosti odsječaka rijeke kroz vrijeme (stope bočnog kretanja) istraženi su statističkim analizama antropogenih i prirodnih čimbenika promjena u razdoblju 2001. – 2021.

Posljednji dio rada jest terensko istraživanje određenih lokacija meandara u srednjem i donjem toku rijeke pomoću bespilotne letjelice i GNSS prijemnika. Cilj terenskih istraživanja bio je istražiti kratkoročne geomorfološke promjene korita, prvenstveno bočnu eroziju, na manjim prostornim jedinicama. Izmjerene promjene interpretirane su u skladu s hidromorfološkim obilježjima pojedine lokacije. Kroz statističko testiranje veza između geomorfoloških pokazatelja, upotpunjena je slika osjetljivosti rijeke na promjene i na razini meandra.

### 3.1. Analize na razini cijelog toka

#### 3.1.1. Izvori podataka

Morfološke promjene korita na razini cijelog toka Orljave od kraja 19. stoljeća istražene su na temelju povijesnih i suvremenih topografskih karata, ortofoto karata i aerofotogrametrijskih snimaka. Najstariji izvor podataka, topografske karte treće vojne izmjere Habsburške Monarhije s kraja 19. stoljeća (Tab. 3.1), preuzete su u JPG formatu podataka od austrijske državne institucije koja je odgovorna za službenu izmjeru i geoinformacije (njem. *Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen*, BEV). Listovi koji pokrivaju porječje Orljave izrađeni su 1879. i 1882. godine te su georeferencirani u koordinatnom sustavu ETRS89 / UTM Zone 33N: EPSG:25833, koji je komplementaran sa službenim koordinatnim sustavom Republike Hrvatske (HTRS96 TM). Međutim, budući da su listovi karata originalno napravljeni u poliedarskoj projekciji, moguća su veća odstupanja u horizontalnoj točnosti. Horizontalna točnost karata treće vojne izmjere u usporedbi s topografskom kartom u mjerilu 1 : 25 000 Državne geodetske uprave (DGU), koja je korištena preko WMS (engl. *Web Mapping Service*) kartografskog servisa DGU, izmjerena je srednjim kvadratnim odstupanjem minimalno 15 geografskih koordinata kontrolnih točaka po listu (engl. *root mean square error*, *RMSE*). Točnost georeferenciranja iznosi prosječno 25 m, što se slaže s vrijednostima navedenima u literaturi za topografske karte s kraja 19. stoljeća (Pavlek i Faivre, 2020; Scorpio i dr., 2015). RMSE se računa prema formuli:

$$\Delta_i = \sqrt{(x_{REF,i} - x_{A,i})^2 + (y_{REF,i} - y_{A,i})^2} \quad (3.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2}{n}} \quad (3.2)$$

gdje  $x$  i  $y$  označavaju geografske koordinate točke  $i$  izmjerene na referentnoj (REF) i analiziranoj karti (A),  $\Delta_i$  je njihova razlika, a  $n$  označava ukupan broj točaka.

Aerofotogrametrijske snimke iz 1966. preuzete su kao georeferencirane TIFF datoteke od Državne geodetske uprave (DGU) u koordinatnom sustavu HTRS96, a ostali kartografski izvori korišteni su preko WMS (engl. *Web Mapping Service*) kartografskog servisa DGU (DGU, 2001; 2011.; 2014-2016; 2017; 2019; 2021). Za digitalizaciju korita na području cijelog toka rijeke korištene su karte treće vojne izmjere (1879./1882.), snimke iz 1966., topografska karta mjerila 1 : 25 000 godine izvornika 2001. i digitalni ortofoto iz 2019. Sukladno navedenim izvorima podataka, određena su četiri razdoblja istraživanja geomorfoloških promjena rijeke:

1879./1882. – 1966., 1966.-2001., i 2001. – 2019., te ukupno razdoblje 1879./1882. – 2019. Na taj način su obuhvaćena tri osnovna razdoblja povijesnih hidromorfoloških promjena tekućica koja se izdvajaju u literaturi (Downs i Piégay, 2019; Scorpio i dr., 2015): 1850.-1950., 1950.-2000. i 2000.-danas. Ostale digitalne ortofoto karte su korištene kao dodatni izvor podataka za analizu recentnih promjena korita na istraživanim lokacijama meandara.

Tab. 3.1. Korišteni kartografski i aerofotogrametrijski izvori podataka na cijeloj duljini toka

| Godina                                 | Vrsta izvora                             | Mjerilo | Rezolucija | RMSE             | Izvor podataka |
|----------------------------------------|------------------------------------------|---------|------------|------------------|----------------|
| 1879.<br>1882.                         | 3. vojna izmjera Habsburške Monahije     | 1:25000 | 2 m        | ~ 25 m           | BEV            |
| 1966.                                  | Pankromatske aerofotogrametrijske snimke | 1:5000  | 0.5 m      | 2 m              | DGU            |
| 2001.                                  | Topografska karta                        | 1:25000 | 2 m        | Referentna karta | DGU            |
| 2011.,<br>2014., 2017.<br>2019., 2021. | Digitalna ortofoto karta                 | 1:5000  | 0.5 m      | < 1 m            | DGU            |

Hidrološki i meteorološki podaci preuzeti su od Državnog hidrometeorološkog zavoda. Hidrološka obilježja Orljave, prvenstveno srednji i maksimalni godišnji protoci, istraženi su na temelju podataka sa postaja Požega (1977. – 2022.), Pleternica-most (1946. – 2013.) i Frkljevci (1999. – 2022.), te postaje Pleternica na rijeci Londži (1973. – 2022.).

Za morfometrijske analize na razini porječja korišten je digitalni model reljefa prostorne rezolucije 10 m stvoren na temelju oblaka točaka, preuzet od DGU (DEM10). Prostorni podaci o hidrotehničkim građevinama u porječju (stepenice, nasipi, obaloutvrde, brane itd.) preuzeti su u shp formatu od Hrvatskih voda.

### 3.1.2. Delineacija riječnog toka

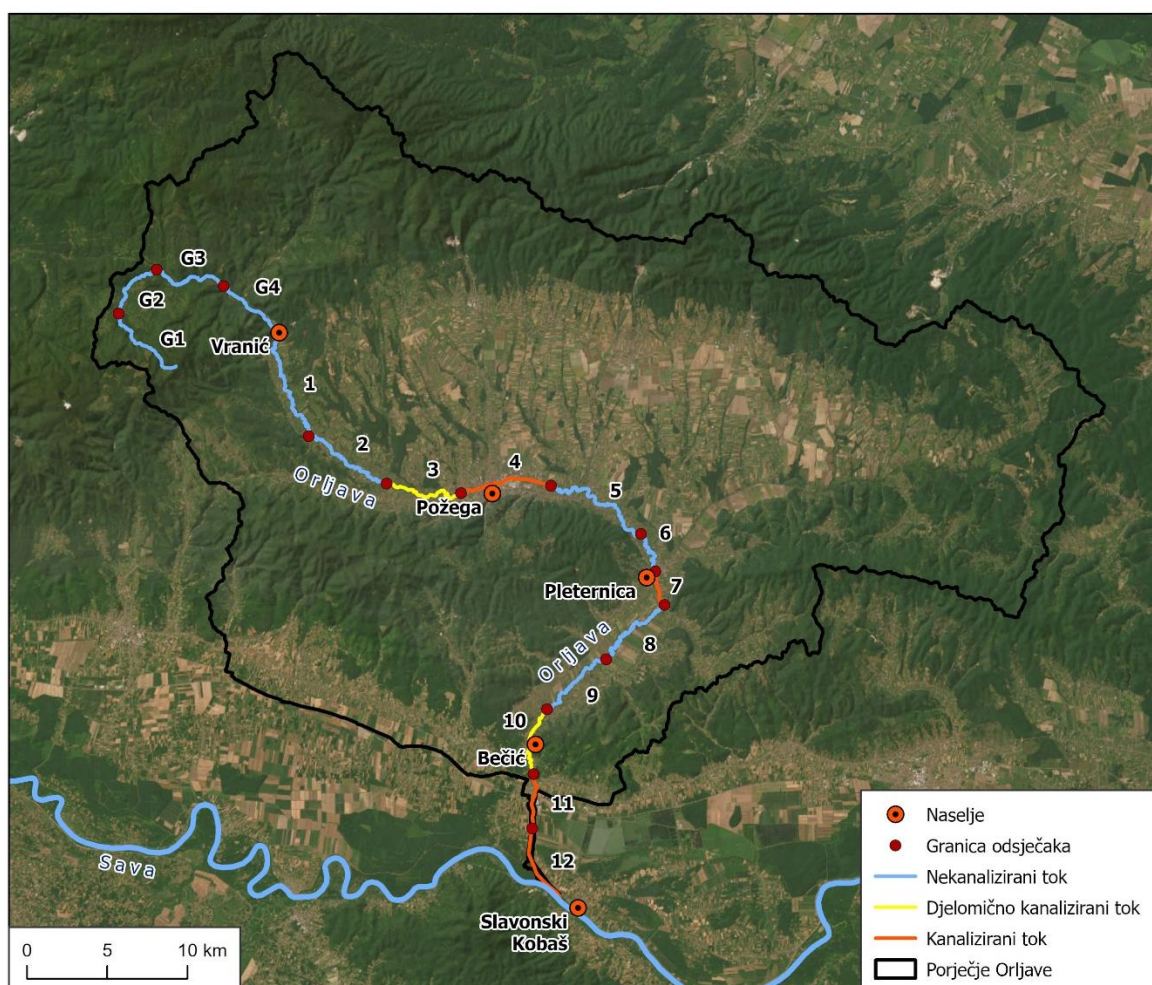
Na rijeci Orljavi, odsječci su prema Gurnell i dr. (2016) određeni (delineirani) na temelju obilježja morfologije i nagiba korita, širine riječne doline, te umjetnih prepreka u uzdužnoj povezanosti (brane, mlinske stepenice). Određeno je ukupno šesnaest odsječaka, od toga četiri u gornjem toku (G1-G4), te dvanaest u srednjem i donjem toku rijeke (1-12) (Tab. 3.2., Sl. 3.1). Kao granice odsječaka većinom su uzete lokacije stepenica, zbog njihovog utjecaja na razinu dna korita, obilježja protoka vode i uzdužnog prijenosa sedimenta. Na odsječcima na kojima

nema stepenica kao granice su uzete promjene u morfologiji korita i riječne doline (npr. povećanje vijugavosti ili promjena u smjeru pružanja doline) te pritoci (npr. utok Londže).

Četiri odsječka u gornjem toku rijeke nalaze se u krajobraznoj jedinici slavonskih gora i pobrđa, koje su građene od prekambrijskih metamorfnih stijena te miocenskih klastičnih naslaga s vulkanitima (HGI, 2009). U prvom odsječku (G1) tok je kanjonski, karakterističnog „v“ oblika doline, a nagib iznosi prosječno 70 m/km (Sl. 3.2). Nizvodno od naselja Rogulje (G2), dolina se proširuje na oko 170 m te tok počinje slobodno meandrirati. U odsječku G3 Orljava prolazi kraćim dolinskim suženjem (Sl. 3.3A), nakon čega ulazi u prostraniju dolinu kod Kamenske, prosječne širine 280 m, gdje joj se sa sjevera pridružuje važan prtok Brzaja. Koliko se može utvrditi s topografskih i ortofoto karata, u navedenim odsječcima gornjeg toka ljudski utjecaji nisu značajni: priobalna vegetacija uz korito je kontinuirana te nema umjetnih prepreka (stepenica, brana).

Početak odsječka 1 određen je položajem rasjeda između metamorfnih i klastičnih stijena na ulasku u Požešku kotlinu kod napuštenog naselja Vranić. Morfološki tip korita je prijelazni između jednostavnog i složenog, što znači da se radi o dinamičnom dijelu toka koji je obilježen čestim promjenama morfologije, bočnim kretanjem, te bočnim i središnjim prudovima (Sl. 3.3B). Sediment dna korita je krupni šljunak ( $> 8$  mm), a nagib iznosi 4 m/km. Od hidrotehničkih mjera provodi se lokalno izravnavanje korita, no priobalna vegetacija je većinom kontinuirana. Nizvodni odsječak 2 određen je promjenom smjera kretanja toka prema jugoistoku. Sličnih je obilježja kao i odsječak 1, no zbog veće blizine naselja ljudski utjecaji su značajniji, prvenstveno u vidu djelomičnog uklanjanja priobalne vegetacije i presijecanja meandara.

Odsječak 3 omeđen je dvjema stepenicama. Tok je značajnije izravnat te dijelom kanaliziran, pogotovo u nizvodnijem dijelu prema Požegi. Priobalna vegetacija je također dijelom uklonjena. U ovom dijelu toka u Orljavu se ulijeva prtok Orljavica. Nizvodni odsječak 4 prolazi područjem grada Požege, zbog čega je u potpunosti kanaliziran i bez priobalne vegetacije te omeđen nasipima na obje obale (Sl. 3.3C). U ovom odsječku nalazi se ukupno 6 stepenica kojima se regulira dubinska i bočna erozija korita snižavanjem lokalnih erozijskih baza.



Sl. 3.1. Delineacija odsječaka na toku rijeke Orłjave

U odsječcima 5 i 6 rijeka nije kanalizirana, međutim zbog blizine poljoprivrednih površina njeno bočno kretanje nije potpuno slobodno. Priobalna vegetacija u odsječku 5 je prorijeđena budući da se ponekad uklanja u sklopu hidrotehničkih mjera zaštite od poplava. U odsječku 6 priobalna vegetacija je u potpunosti uklonjena nakon 2014. godine te se i dalje redovito uklanja (Sl. 3.3). Granica između odsječaka 5 i 6 određena je promjenom u morfologiji korita, odnosno porastom vijugavosti korita u odsječku 6.

Na nizvodnoj granici odsječaka 6 nalazi se brana male hidroelektrane Pleternica, koja predstavlja značajan prekid u uzdužnom toku vode i prijenosu sedimenta. Brana, visine oko 3,5 m, također povisuje lokalnu erozijsku bazu uzvodno. Odsječak 7 prolazi područjem grada Pleternice te je u potpunosti kanaliziran bez priobalne vegetacije te se u njegovom središnjem dijelu nalazi jedna stepenica.

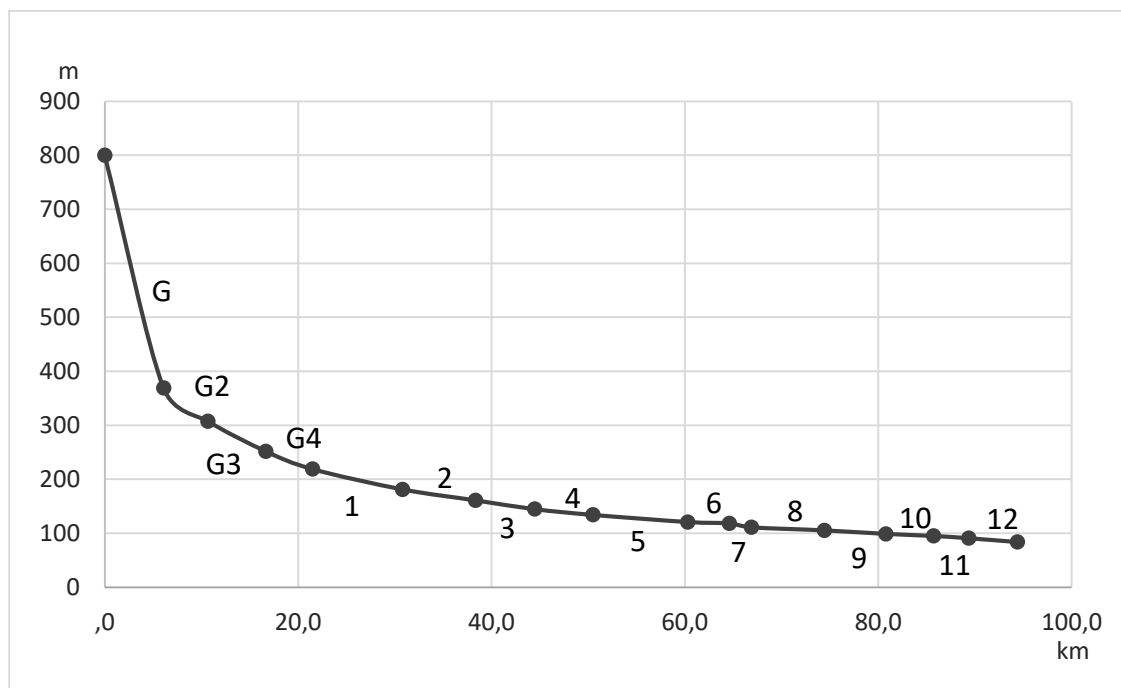
Tab. 3.2. Obilježja odsječaka

| Odsječak  | Duljina<br>2019.<br>(km) | Nagib<br>(m km <sup>-1</sup> ) | Prosječna<br>širina<br>doline (km) | Umjetne<br>prepreke (uzv. i<br>nizv. granica) | Ostali ljudski utjecaji                                                                        |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>G1</b> | 6,08                     | 70,85                          | kanjon,<br>< 10 m                  | nema                                          | nisu značajni                                                                                  |
| <b>G2</b> | 4,58                     | 13,44                          | 0,17                               | nema                                          | nisu značajni                                                                                  |
| <b>G3</b> | 5,98                     | 9,31                           | 0,13                               | nema                                          | nisu značajni                                                                                  |
| <b>G4</b> | 4,85                     | 6,83                           | 0,28                               | nema                                          | nisu značajni                                                                                  |
| <b>1</b>  | 9,30                     | 4,03                           | 1,12                               | nema                                          | lokalno izravnavanje korita (presijecanje meandara), priobalna vegetacija većinom kontinuirana |
| <b>2</b>  | 7,56                     | 2,68                           | 1,15                               | stepenica nizv.                               | lokalno izravnavanje korita (presijecanje meandara), priobalna vegetacija većinom kontinuirana |
| <b>3</b>  | 6,12                     | 2,67                           | 1,3                                | stepenice uzv. i nizv.                        | izravnavanje korita na većem dijelu odsjeka, djelomično uklonjena priobalna vegetacija         |
| <b>4</b>  | 6,02                     | 1,76                           | 1,09                               | stepenice (uzv. + 5)                          | u potpunosti kanalizirano korito, uklonjena priobalna vegetacija                               |
| <b>5</b>  | 8,47                     | 1,56                           | 1,52                               | nema                                          | priobalna vegetacija djelomično uklonjena nakon 2014.                                          |
| <b>6</b>  | 5,63                     | 0,44                           | 1,99                               | brana nizv.                                   | priobalna vegetacija u potpunosti uklonjena nakon 2014.                                        |
| <b>7</b>  | 2,31                     | 3,17                           | 2,01                               | brana uzv., stepenica                         | u potpunosti kanalizirano korito, uklonjena priobalna vegetacija                               |
| <b>8</b>  | 7,55                     | 0,75                           | 2,78                               | stepenica do 2016. nizv.                      | priobalna vegetacija u potpunosti uklonjena 2011., presijecanje meandara                       |
| <b>9</b>  | 6,34                     | 1,02                           | 2,09                               | stepenice uzv. i nizv. *                      | priobalna vegetacija u potpunosti uklonjena 2011., presijecanje meandara                       |
| <b>10</b> | 4,95                     | 0,78                           | 1,43                               | stepenice uzv. i nizv.                        | izravnavanje korita, presijecanje meandara, priobalna vegetacija većinom kontinuirana          |
| <b>11</b> | 3,63                     | 1,17                           | -                                  | stepenice uzv. i nizv.                        | izravnavanje korita, priobalna vegetacija većinom kontinuirana                                 |
| <b>12</b> | 5,04                     | 1,39                           | -                                  | stepenica uzv.                                | izravnavanje korita, priobalna vegetacija većinom kontinuirana                                 |

\*stepenica na uzv. granici uništena 2016., a na nizvodnoj granici postojala do 1990-ih te ponovno izgrađena 2016.

Na početku odsječka 8, Orljava prima svoj najveći pritok, Londžu. Nizvodno rijeka teče između dvaju nasipa koji su međusobno udaljeni oko 250 m. Od ljudskih utjecaja najznačajniji su presijecanje meandara i uklanjanje priobalne vegetacije 2011. godine. Na nizvodnom kraju odsječka 8 do 2016. godine nalazila se mlinska stepenica (mlin Ganoci), koja je uzrokovala uzvodni uspor toka od oko 1,5 km (vizualno procijenjeno na temelju morfologije, odnosno proširenja korita na ortofoto kartama). Nizvodni odsječak 9 omeđen je nasipom samo s desne strane, dok se s lijeve strane poljoprivredne površine prostiru do samih obala rijeke (Sl. 3.3E). Na nizvodnoj granici odsječka 2016. godine je rekonstruirana stepenica koja je prethodno uništena tijekom rata 1990-ih (Ćosin mlin). Uzvodno od stepenice dolazi do uspora toka u duljini od oko 700 m (procijenjeno na temelju proširenja korita). Hidrotehničke mjere također uključuju presijecanje meandara i uklanjanje priobalne vegetacije. Morfološki tip korita je vijugav s bočnim prudovima.

U odsječku 10 korito je značajnije izravnavano, no priobalna vegetacija je većinom kontinuirana. Odsječci 11 i 12 najnižvodniji su dijelovi toka, a nalaze se u dolini rijeke Save. Potpuno su kanalizirani (Sl. 3.3F), te se na njima nalazi nekoliko stepenica visine preko 5 m kojima se regulira razina vode u ribnjacima u Jelas polju. Stepenice uzrokuju uspor (ujezerenje) u odsječku 11.



Sl. 3.2. Longitudinalni profil rijeke Orljave od izvora do ušća (na temelju DEM10)





Sl. 3.3. Različiti tipovi korita Orljave po odsječcima, A) *step-pool* morfologija (odsječak G3), B) prijelazni tip s bočnim i središnjim prudovima (odsječak 1), C) kanalizirano korito u Požegi (odsječak 4), D) meandrirajuće korito (odsječak 6), E) vijugavo/ meandrirajuće korito s bočnim prudovima (odsječak 9) F) kanalizirano korito kod Lužana (odsječak 11)



### 3.1.3. Vektorizacija i analiza morfoloških obilježja korita

S obzirom na prostornu rezoluciju i horizontalnu točnost korištenih izvora podataka, te geomorfološka obilježja rijeke, na Orljavi su promjene u morfološkim pokazateljima općenito istražene nizvodno od danas napuštenog zaseoka Vranić na ulazu u Požešku kotlinu (odsječci 1-12). Nizvodno od Vranića rijeka je dovoljno široka (10 m) da se crta sredine korita može zadovoljavajuće točno vektorizirati na temelju korištenih izvora podataka. Za svaki odsječak i za svaku mjernu godinu (1879./1882., 1966., 2001., 2019.), analizirana su sljedeća morfološka obilježja:

1. **Duljina korita**, izmjerena prema vektoriziranoj crti sredine korita pod vodom, koja je uzeta kao aproksimacija talvega korita (Hohensinner i dr., 2021; Kiss i Blanka, 2012).
2. **Indeks vijugavosti** rijeke (engl. *sinuosity index*) u odsječcima 1-9 izračunat je kao omjer ukupne duljine riječnoga toka i crte sredine riječne doline (Alber i Piégay, 2017; Richard i dr., 2005), koja je aproksimirana pomoću DEM10 i Valley bottom GIS alata iz skupa alata Fluvial Corridor Toolbox (Roux i dr., 2015). U navedenom alatu dolinsko se dno određuje na temelju ulaznog DEM-a, mreže tekućica i empirijski definirane visinske granične vrijednosti ispod koje se, relativno u odnosu na nadmorsku visinu korita, procjenjuje površina naplavne ravnice. U ovom istraživanju, visinska granična vrijednost za dijelove toka uzvodno od Požege postavljena je na 5 m, a nizvodno od Požege na 10 m na temelju iterativnog testiranja. U odsječcima 10-12, indeks vijugavosti procijenjen je na temelju općenitoga smjera pružanja rijeke jer se u tom dijelu toka Orljava nalazi u aluvijalnoj dolini Save (nije moguće definirati dolinsko dno) (Bertalan i dr., 2019).

U razdoblju 2001. – 2019. za svih dvanaest odsječaka dodatno je analizirana

3. **Stopa bočnog kretanja rijeke**, procijenjena na temelju razlike u položaju između početne i završne crte sredine korita u promatranom razdoblju. Udaljenost između dviju crta sredine izmjerena je pomoću okomito konstruiranih presjeka korita svakih 10 m na početnu crtu sredine (Dominguez Ruben i dr., 2021; Galia i dr., 2023). Dijeljenjem ukupne duljine svih presjeka s duljinom korita početne godine podijeljenom s deset (1), što ustvari predstavlja ukupan broj konstruiranih presjeka, dobivena je apsolutna vrijednost bočnog kretanja u promatranom razdoblju (jednadžba 3.3). Dijeljenjem te apsolutne vrijednosti s brojem godina u promatranom razdoblju izračunata je prosječna brzina bočnog kretanja u metrima godišnje (m/god). Treba naglasiti da u mjerenje nisu

uključeni umjetno presječeni meandri budući da oni ne predstavljaju prirodno kretanje rijeke nego ljudski utjecaj (Bertalan i dr., 2019). Također, duljine presjeka kraće od 0.5-2 m (ovisno o analiziranim izvorima podataka) izuzete su iz analize budući da su kraće od prosječne horizontalne greške u georeferenciranju (tab 3.1).

$$BK = \frac{\sum Dp}{\frac{Dk}{10}} \quad (3.3)$$

gdje je BK bočno kretanje, Dp duljina poprečnih presjeka, a Dk duljina korita.

Stopa bočnog kretanja nije računata za ranija razdoblja zbog nekoliko razloga. Kao prvo, stariji izvori podataka imaju slabiju razlučivost (pogotovo arhivske aerofotogrametrijske snimke iz 1966). Također, na starijim izvorima teže je procijeniti radi li se o antropogenim ili prirodnim promjenama korita. Na kraju, najstarije istraživano razdoblje (1879./1882. – 1966.) dosta je dugačko (preko osamdeset godina), što u slučaju analize bočnog kretanja može biti problem jer se različiti smjerovi promjene pružanja toka mogu međusobno poništiti. Tako dugačko razdoblje također otežava interpretaciju rezultata, pogotovo s obzirom na činjenicu da ni na topografskim niti katastarskim kartama iz 19. st. nije prikazana priobalna vegetacija, koja se smatra važnim čimbenikom morfoloških obilježja korita (Gurnell, 2014; Tal i Paola, 2010).

Također, širinu toka nije bilo moguće analizirati zbog premale širine korita rijeke i guste priobalne vegetacije na dijelu toka uzvodno od Pleternice (odsječci 1-6).

#### 3.1.4. Procjena osjetljivosti rijeke

Procjena osjetljivosti rijeke Orljave na morfološke promjene provedena je po uzoru na Reid i Brierley (2015) u dva osnovna koraka za ukupno dvanaest delinearanih odsječaka rijeke:

1. **Klasifikacija potencijalne osjetljivosti svakog odsječka** na temelju ljudskih utjecaja, oblika i nagiba korita, sedimenta dna te pojavnosti geomorfoloških oblika u koritu. Odsječci su prvo klasificirani u dvije osnovne grupe: odsječke pod snažnim antropogenim utjecajima (tj. kanalizirane odsječke) i odsječke pod blažim antropogenim utjecajem (tj. nekanalizirane odsječke). Nakon toga je na temelju ostalih navedenih morfoloških obilježja osjetljivost svakog odsječka klasificirana kao visoka (V), umjerena (U) ili niska (N) (Tab. 3.3). Svi kanalizirani odsječci su svrstani u razred niske osjetljivosti ( $N_k$ ) budući da im je bočno kretanje antropogeno ograničeno. U prirodi bi neosjetljivi odsječci rijeke bili oni koji se nalaze u reljefno ograničenim dolinama tj. klancima (kanjonima). Međutim, svi istraživani odsječci Orljave nalaze se

u reljefno neograničenoj aluvijalnoj ravnici. Granični uvjeti između tipova V i U određeni su na temelju kriterija odvajanja rijeka isprepletenog i meandrirajućeg tipa korita prema Schummu (1977) i Rinaldiju i dr., (2016). Potencijalna osjetljivost je dakle odraz morfoloških obilježja svakog morfološkog tipa korita rijeke.

2. **Klasifikacija specifične osjetljivosti odsječaka** na temelju veličine izmjerenih promjena korita na kartama i aerofotogrametrijskim snimkama. Kao glavni morfološki pokazatelj osjetljivosti uzeto je bočno kretanje rijeke jer je to glavno morfološko obilježje meandrirajućeg tipa rijeka (Gomes i dr., 2023; Reid i Brierley 2015; Wheeler i dr., 2022). Osjetljivost na razini odsječaka rangirana je od I (neosjetljiv) do III (vrlo osjetljiv) na temelju brzine bočnog kretanja rijeke u razdoblju 2001. – 2019. Razredi su određeni na temelju prirodnih prekida u podacima (engl. *natural breaks*) i *k-means* klasteriranja u softveru SPSS (IBM, 2023).

Ukupna osjetljivost za svaki odsječak izražena je kombiniranjem rangova potencijalne osjetljivosti i specifične osjetljivosti odsječaka (npr. V-II bi označavalo odsječak visoko potencijalno osjetljivog morfološkog tipa koji pokazuje umjerenu osjetljivost). U odsječcima za koje je ustanovljena visoka osjetljivost, morfološke promjene korita detaljnije su istražene te su provedene statističke analize kako bi se razjasnile veze između čimbenika koji utječu na morfološka obilježja i osjetljivost odsječaka (hipoteze 3 i 4), što je opisano u idućem poglavlju.

Tab. 3.3. Potencijalna osjetljivost morfoloških tipova korita rijeke Orljave

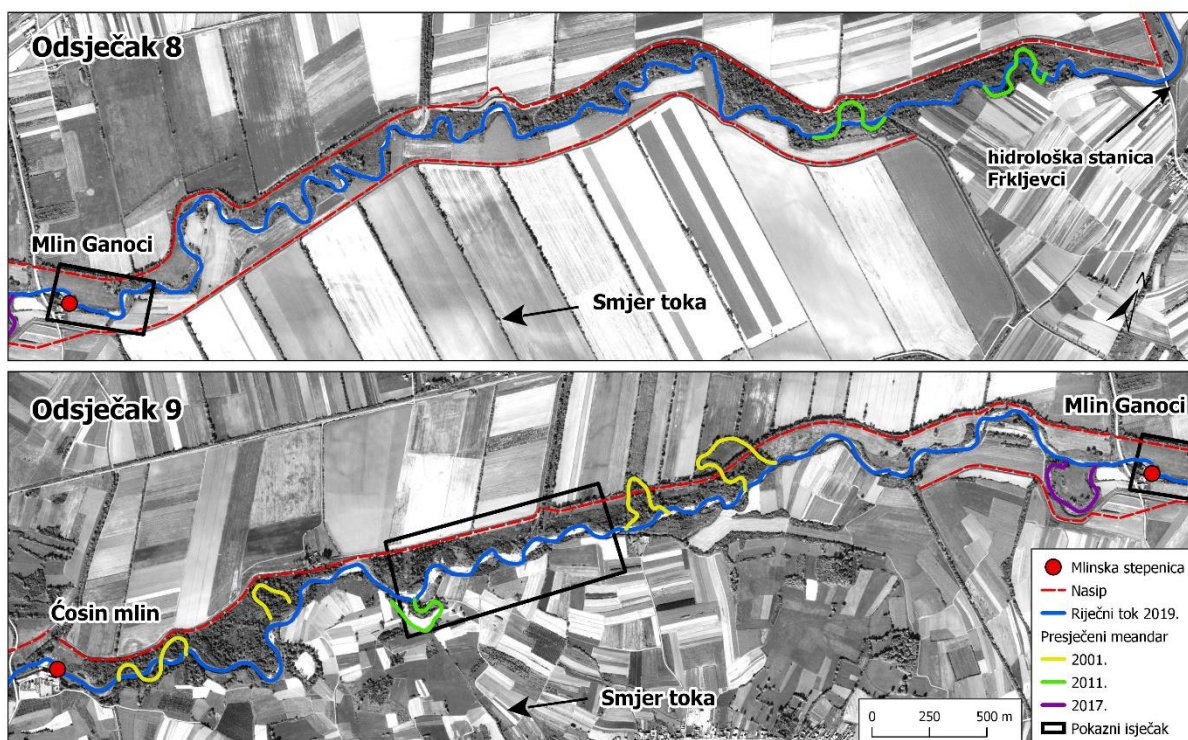
| Potencijalna osjetljivost    | Morfološka obilježja rijeke                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>N<sub>k</sub> – niska</b> | kanalizirano korito homogenog trapezoidnog presjeka, umjetno ograničeno bočno kretanje                                                                                                                                     |
| <b>U – umjerena</b>          | nagib korita < 0,2 % (2 m/km), vijugav do meandrirajući tip korita, sitni šljunak (2-8 mm), bočni prudovi, aktivno bočno kretanje, no manjeg intenziteta nego u tipu „V“                                                   |
| <b>V – visoka</b>            | nagib korita > 0,2 % (2 m/km), prijelazni tip korita između meandrirajućeg i isprepletenog, krupni šljunak (8-64 mm), bočni i središnji prudovi, aktivno bočno kretanje i probijanje novih rukavaca preko naplavne ravnice |

### **3.2. Analize na odsječcima od Frkljevaca do Čosinog mlina**

Detaljnije analize geomorfoloških promjena korita i zemljišnog pokrova na naplavnoj ravnici provedene su na odsječcima 8 i 9 u donjem toku rijeke nizvodno od hidrološke stanice Frkljevci. Navedeni odsječci su odabrani kao pogodni jer u ovom dijelu toka rijeka nije kanalizirana te je korito dovoljno široko kako bi se analizirale promjene u njenoj geometriji i pojavnosti fluvijalnih reljefnih oblika.

Istraživani odsječci dugi su otprilike 14 km. Na desnoj obali tok je u potpunosti omeđen nasipom u duljini od 10,4 km, dok se s lijeve strane nasip pruža 5,2 km do početnog dijela odsjeka 9. Nasipi su izgrađeni 1980-ih godina te je pritom korito u odsjeku 9 djelomično izravnavano presijecanjem dvaju većih složenih meandara (Sl. 3.4). Širina naplavne ravnice između nasipa je otprilike 250 m, a prosječna širina aktivnog korita je 20 m. Oblik korita je jednostavan, u rasponu od vijugavog do meandrirajućeg, s pojavom prostranih bočnih prudova. Obaloutvrda u ovom dijelu toka nema, tako da je bočno kretanje rijeke unutar nasipa slobodno. Na desnoj strani naplavne ravnice prevladavaju umjetno zasađena i prirodna drvenasta vegetacija i travnjaci, dok se na lijevoj uglavnom prostiru poljoprivredne površine.

U prethodnom desetljeću na hidrološkoj postaji Frkljevci zabilježena je pojava dviju značajnih poplava, u lipnju 2010. ( $Q_{\max} = 203 \text{ m}^3/\text{s}$ ), i u svibnju 2014. ( $Q_{\max} = 209,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Tijekom poplave 2010. godine, visoki protok bio je usporen u proučavanim odsječcima zbog guste drvenaste vegetacije na obalama rijeke, što je ugrozilo uzvodna naselja, pogotovo grad Pleternicu. Budući da u uzvodnom riječnom koridoru koji je izmijenjen ljudskim utjecajima nema prirodnih retencijskih područja, upravitelji voda odlučili su 2011. ukloniti vegetaciju s riječnih obala u istraživanim odsječcima kako bi povećali protočnost i kapacitet korita. Također, nekoliko meandara je umjetno presječeno jer su počeli erodirati obližnje nasipe. Tijekom poplave 2014., upravitelji voda izvijestili su o značajnoj eroziji obala, posebno u istraživanim odsječcima odnosno dijelovima rijeke nizvodno od Frkljevaca, gdje je obalna vegetacija uklonjena 2011. godine (Hrvatske vode, 2014).



Sl. 3.4. Hidrotehničke građevine i mjere na istraživanim odsječcima 8 i 9 (godine presijecanja meandara označavaju godinu kad je presječni meandar zapažen na zračnoj snimci, a ne kada je mjera provedena)

Proučavani odsječci delineirani su na temelju položaja dviju mlinskih stepenica zbog njihovog utjecaja na obilježja protoka i prijenosa sedimenta (Sl. 3.4). Obje stepenice postojale su krajem 18. stoljeća (Arcanum, n.d.). Međutim, uzvodna je stepenica (mlin Ganocija) probijena 2016. uslijed manjka održavanja, dok je nizvodna rekonstruirana iste godine nakon što je srušena tijekom rata 1990-ih (Ćosin mlin). Stepenice u koritu općenito uzrokuju povišenje lokalne erozijske baze, uzvodno usporenje protoka vode i povećano taloženje sedimenta te ograničenje u prijenosu sedimenta nizvodno (Poepl i dr., 2015).

### 3.2.1. Izvori podataka

Za analizu morfoloških promjena korita i zemljišnog pokrova u riječnom koridoru na odsječcima između hidrološke postaje Frkljevci i Čosinog mlina korištene su aerofotogrametrijske snimke te ortofoto i topografske karte iz ukupno devet mjernih godina (Tab. 3.4). Sve aerofotogrametrijske snimke i digitalni ortofoto 2009. preuzeti su od DGU kao TIFF datoteke, dok je topografska karta iz 1980. godine korištena putem WMS kartografskog servisa DGU (DGU, 1980). Digitalni ortofoto iz 2009., kao i sve snimke osim onih iz 2001., bile su izvorno georeferencirane u HTRS96 koordinatnom sustavu. Snimke iz 2001. su georeferencirane u HTRS96 sustav pomoću referentnih točaka prema topografskoj karti iz 2001. u ArcGIS Pro-u (Esri, 2018). Snimke iz razdoblja 2011. – 2021. su obrađene pomoću softvera Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, 2021) te su izrađeni digitalni modeli površina i ortofoto modeli. Postupak obrade snimaka u Agisoftu je detaljno opisan u poglavlju 3.2.2.

Tab. 3.4. Korišteni kartografski i aerofotogrametrijski izvori podataka za odsječke od Frkljevaca do Čosinog mlina (Brodski Drenovac)

| Godina                            | Vrsta izvora                | Mjerilo | Rezolucija | Vrsta snimke        | RMSE greška |
|-----------------------------------|-----------------------------|---------|------------|---------------------|-------------|
| 1966.                             | Aerofotogrametrijske snimke | 1:5000  | 0.5 m      | Pankromatska        | 2 m         |
| 1980.                             | Topografska karta           | 1:5000  | 1 m        | -                   | 1 m         |
| 2001.                             | Aerofotogrametrijske snimke | 1:5000  | 0,4 m      | Pankromatska        | 0,5 m       |
| 2009.                             | Digitalni ortofoto          | 1:5000  | 0,5 m      | RGB* kompozit       | 0,5 m       |
| 2011., 2014., 2017., 2019., 2021. | Aerofotogrametrijske snimke | 1:5000  | 0,3 m      | RGB, NIR* kompoziti | 0,3-0,5 m   |

\*RGB – Red, Green, Blue; NIR – engl. *near infrared* (bliskoinfracrveni spektar)

Datumi snimanja poznati su jedino za snimke iz razdoblja 2011. – 2021., koje su snimljene tijekom ljetnih (2011., 2021.) i jesenskih mjeseci (2014., 2017., 2019.) u doba niskih i srednjih protoka (pojednosti o snimkama i podaci o dnevnim vodostajima i protocima na dane snimanja za razdoblje 2011. – 2021. prikazani su u dodatnoj tablici A1 u prilogima). Za snimke iz 1966. i 2001., kao ni za snimke na temelju kojih je napravljen ortofoto 2009. nije poznat točan datum

snimanja. Za potrebe analize, na temelju stanja vegetacije na snimkama i ortofotu pretpostavljeno je da su snimanja bila provedena sredinom kalendarske godine. Također, prema širini korita pod vodom, pretpostavljeno je da su snimke snimljene za vrijeme niskih ili srednjih vodostaja te su prema tome pogodne za analizu.

Na temelju izvora podataka, za analizu geomorfoloških promjena korita na odsječcima između Frkljevaca i Čosinog mlina određeno je devet mjernih godina (1966., 1980., 2001., 2009., 2011., 2014., 2017., 2019., 2021.) i sedam mjernih razdoblja (1966. – 1980., 1980. – 2001., 2001. – 2011., 2011. – 2014., 2014. – 2017., 2017. – 2019., 2019. – 2021.).

### **3.2.2. Obrada aerofotogrametrijskih snimki**

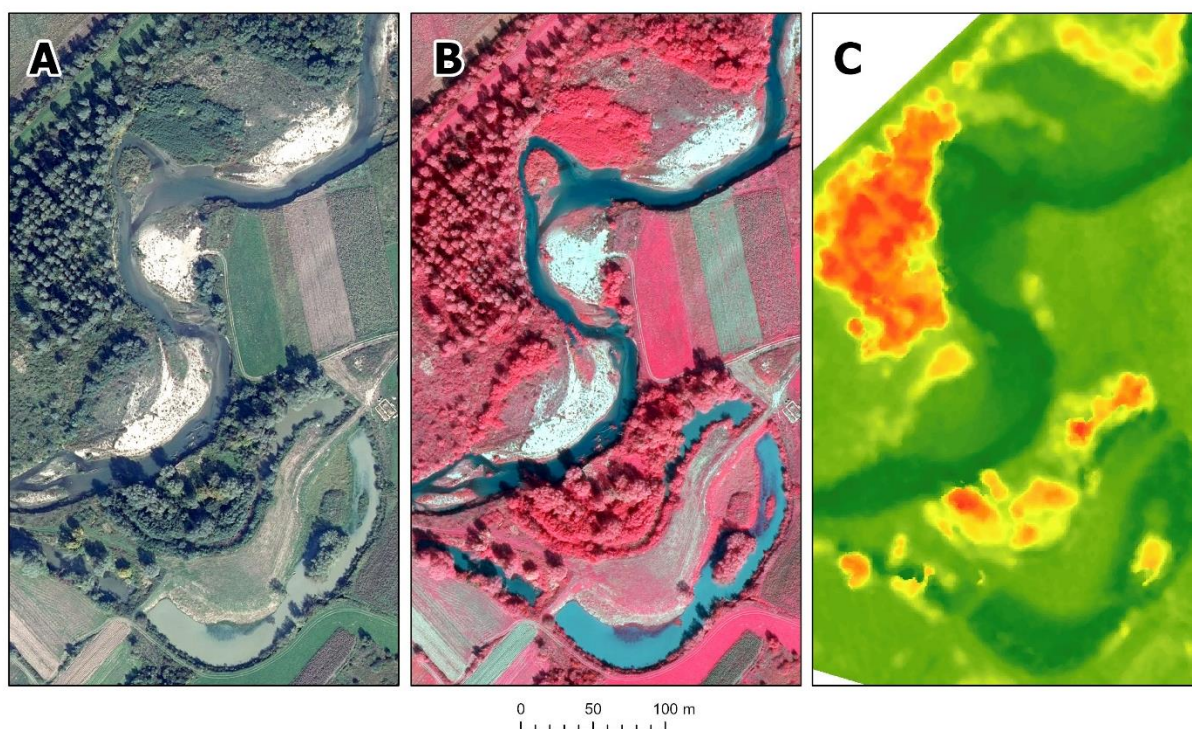
Aerofotogrametrijske snimke DGU iz 2011., 2014., 2017., 2019. i 2021. preuzete su u TIFF formatu kao RGB i NIR (bliskoinfracrveni) kompoziti prostorne razlučivosti između 0,25 i 0,30 m. Za 2014. godinu bio je dostupan samo RGB kompozit.

Digitalni modeli površine (engl. *digital surface model*, DSM) i ortofoto RGB i NIR kompoziti za svaku godinu izrađeni su pomoću softvera Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, 2021, Sl. 3.5). Početna orijentacija snimaka uspostavljena je na temelju parametara vanjske orijentacije dobivenih iz senzorskog sustava kamere (engl. *photo alignment*). Vezne točke na svim snimkama automatski su identificirane pomoću algoritma *Structure from Motion* (SfM). SfM omogućava rekonstrukciju 3D oblika objekta ili scene na temelju niza 2D slika snimljenih iz različitih kutova, te se vrlo često koristi za stvaranje trodimenzionalnih modela i u geomorfološkim istraživanjima (James i dr., 2019). Slike su dodatno rektificirane na temelju 20 kontrolnih točaka (engl. *ground control points*) utvrđenih na snimkama iz 2019. kao referentne godine, kako bi se poboljšalo međusobno poravnavanje modela. Nakon orijentacije snimaka, generirani su gusti oblaci točaka (engl. *dense point cloud*) primjenom *Aggressive* načina filtriranja, koji su zatim korišteni za izradu DSM-a prostorne rezolucije 1 m. Na temelju DSM-a generirani su ortofoto modeli prostorne rezolucije 0,30 m, što je bila najdetaljnija moguća rezolucija s obzirom na ulaznu rezoluciju snimaka (0,25–0,30 m). Korištenjem algoritma *mosaic blending mode* tijekom izrade ortofota, originalne DN (*Digital Number*) vrijednosti aerofotogrametrijskih snimaka zadržane su u konačnim modelima (8-bita).

Ortofoto modeli su dodatno poravnati u ArcGIS Pro-u metodom najbližeg susjeda (engl. *nearest neighbour*) kako bi se osiguralo savršeno preklapanje piksela (alat *Resample, Snap Raster*). Konačna točnost ortorektifikacije procijenjena je na temelju 20 kontrolnih točaka za



validaciju modela (engl. *check points*). U odnosu na 2019. kao referentnu godinu (koja je u početku analize predstavljala najrecentnije dostupne georeferencirane podatke) horizontalna točnost ortofoto modela iz ostalih godina iznosila je 0,30-0,50 m. Budući da te vrijednosti otprilike odgovaraju rezoluciji snimaka (0,30 m), utjecaj greške u ortorektifikaciji na klasifikaciju zemljišnog pokrova i analize geomorfoloških obilježja rijeke može se smatrati zanemarivim.



Sl. 3.5. Isječak riječnog koridora Orljave na RGB ortofoto kompozitu za 2017. (A), NIR ortofoto kompozitu za 2017. (B), DDSM-u za 2017. (C)

Iz ortofoto kompozitnih RGB i NIR modela izdvojena su četiri različita kanala: crveni (Red), zeleni (Green), plavi (Blue) i bliski infracrveni (NIR). Na temelju tih kanala izračunati su normalizirani vegetacijski indeks (engl. *Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) i normalizirani indeks vode (engl. *Normalized Difference Water Index*, NDWI) prema formulama:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (3.4)$$

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (3.5)$$

NDVI i NDWI važni su indeksi koji se koriste u daljinskim istraživanjima za klasifikaciju zemljišnog pokrova jer učinkovito ističu značajke vegetacije i vode (Jia i dr., 2020; Modica i



dr., 2021; Nguyen i dr., 2019). NDVI je vrlo učinkovit u procjeni gustoće i stanja vegetacije: zdrava vegetacija reflektira više NIR i manje vidljivog crvenog svjetla, što rezultira višim NDVI vrijednostima (Pettorelli i dr., 2005). Na taj način NDVI pomaže u razlikovanju područja s vegetacijom i područja bez vegetacije. S druge strane, voda reflektira više zelene svjetlosti i apsorbira više NIR svjetlosti, što rezultira višim vrijednostima NDWI za vodna tijela (McFeeters, 1996). Prema tome, NDVI i NDWI su komplementarni indeksi koji zajedno omogućuju detaljniju i točniju klasifikaciju zemljišnog pokrova: na primjer, područja s visokim NDVI i niskim NDWI vjerojatno će biti gusta vegetacija, dok su područja s niskim NDVI i visokim NDWI vjerojatno vodna tijela.

Nadalje, DSM-ovi su u ArcGIS Pro-u preuzorkovani korištenjem metode najbližeg susjeda od izvorne veličine piksela od 1 m do 0,30 m kako bi odgovarali razlučivosti ortofoto snimaka (alat *Resample, Snap Raster*). Okomita točnost DSM-ova procijenjena na temelju kontrolnih točaka prema referentnoj godini 2019. kretala se od 0,4 m (2017.) do 0,9 m (2014.). Osim toga, da bi se dobio raster koji predstavlja relativnu visinu piksela naplavne ravnice u odnosu na prosječnu razinu vode u riječnom koritu, izrađen je digitalni model površina bez trenda (engl. *detrended digital surface model*, DDSM) slijedeći metodologiju Demarchija i dr. (2016). *Shapefile* crte sredine korita iz 2019. preuzet je iz GIS baze podataka o hrvatskim rijekama koju su izradili Čanjevaca i dr. (2022) ručnom vektorizacijom topografskih karata i ortofoto snimaka. Podaci o nadmorskoj visini iz DSM-a 2019. dodani su točkama koje sačinjavaju liniju crte sredine korita iz 2019. (alat *Add Surface Information*). Raster koji predstavlja silazni trend visine riječnog korita zatim je linearno interpoliran na temelju tih točaka pomoću alata *Trend* u ArcGIS Pro-u (Esri, 2018). Konačno, DDSM je stvoren oduzimanjem rastera trenda od izvornog DSM-a. Isti raster trenda korišten je za sve godine, uz pretpostavku da se opći trend u visini riječnog korita vjerojatno neće značajno promijeniti u razdoblju od 10 godina.

### **3.2.3. Objektно-orientirana klasifikacija zemljišnog pokrova**

Kartiranje geomorfoloških i vegetacijskih jedinica riječnih korita i naplavnih ravnica na temelju podataka daljinskih istraživanja može se automatizirati primjenom metoda klasifikacije zemljišnog pokrova (Carbonneau i dr., 2020; Casado i dr., 2015; Rabanaque i dr., 2022). Tradicionalni pristup temeljen na pikselima uglavnom se koristi za analize većih rijeka na temelju satelitskih podataka (Schwenk i dr., 2017; Boothroyd i dr., 2021). Međutim, povećana dostupnost podataka visoke razlučivosti dovela je do razvoja i veće upotrebe objektno-

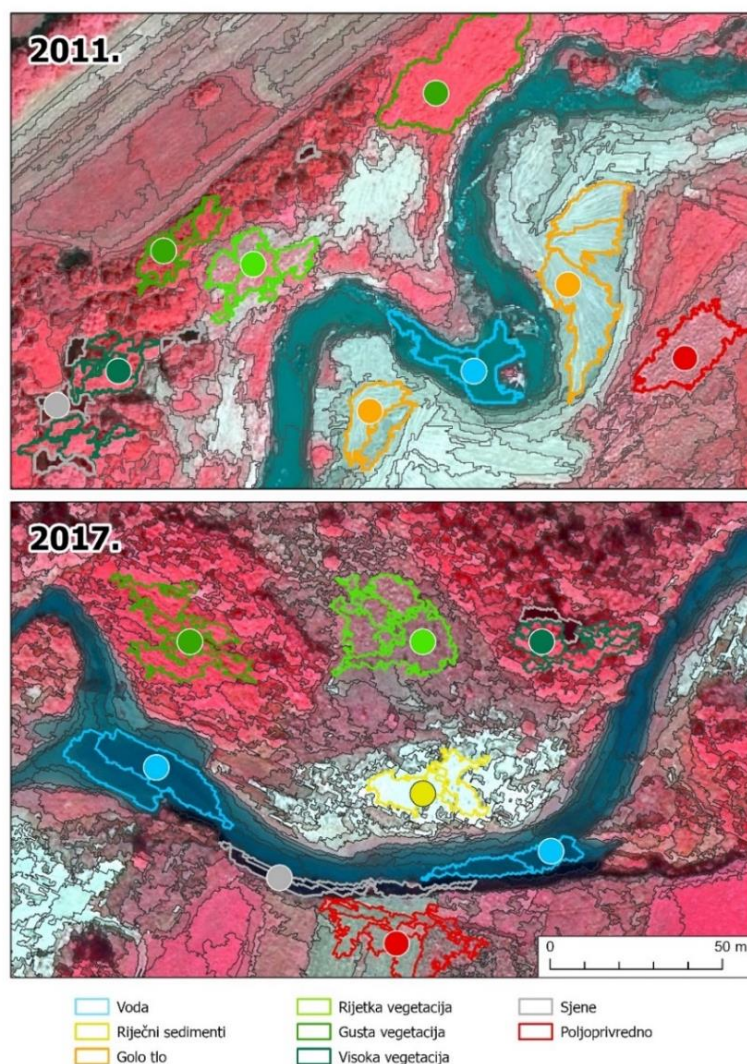
orijentiranih pristupa klasifikaciji zemljišnog pokrova (Blaschke i dr., 2014; Tormos i dr., 2012).

Geografska objektno-orijentirana analiza slike (engl. *geographic object-based image analysis*, GEOBIA) uključuje segmentaciju slike u zasebne objekte ili regije na temelju određenih kriterija homogenosti, uključujući spektralna obilježja, oblik, veličinu i teksturu (Blaschke i dr., 2014). Veličina objekata kontrolira se parametrima poput mjerila, težinskih koeficijenata boje i oblika, te kompaktnosti (Trimble, 2014). Ti se objekti zatim klasificiraju u različite klase ili kategorije. GEOBIA pristup je koristan kada su predmeti od interesa veći od pojedinačnih piksela, budući da u klasifikaciji uzima u obzir cjelokupna svojstva objekta, a ne isključivo pojedinačne piksele. Svojstva objekata na temelju kojih se provodi klasifikacija između ostalih uključuju spektralna, geometrijska, kontekstualna (hijerarhija, obilježja susjedstva) i tekstualna obilježja, a njihove vrijednosti za cijeli objekt moguće je izračunati različitim matematičkim operacijama (srednjak, standardna devijacija, maksimum, minimum i sl.). Prema tome, GEOBIA nudi prednosti u odnosu na pristupe temeljene na pikselima u vidu boljeg razmatranja prostornog konteksta, boljeg upravljanja miješanim pikselima, korištenju drugih obilježja osim onih spektralnih te lakšoj integraciji različitih izvora podataka, poput LiDAR-a, multispektralnih i hiperspektralnih snimaka (Blaschke i dr., 2014). To je posebno važno za riječne koridore koje karakterizira velika prostorna heterogenost (Harvey i Gooseff, 2015).

Demarchi i dr. (2016) predstavili su poluautomatiziranu metodologiju za kartiranje jedinica riječnog krajobraza na temelju snimaka visoke rezolucije i LiDAR podataka koristeći objektnu klasifikaciju. Tormos i dr. (2012) koristili su objektnu klasifikaciju za regionalno kartiranje zemljišnog pokrova unutar riječnih koridora iz multispektralnih snimaka i tematskih podataka. Osim riječnih i močvarnih okoliša (Granger i dr., 2021; Kutz i dr., 2022; Nguyen i dr., 2019), GEOBIA se pokazala uspješnom u kartiranju vrsta drveća i usjeva (Deur i dr., 2021; Modica i dr., 2021), kartiranju zemljišnog pokrova u urbanim sredinama (Valozić, 2014; Young i dr., 2023) te u analizi promjena zemljišnog pokrova na razini regija (Da Cunha i dr., 2020; Houphlet i dr., 2023).

U ovom istraživanju, segmentacija ortofota i objektno orijentirana klasifikacija zemljišnog pokrova provedene su pomoću softvera eCognition® Developer (Trimble, 2014). Kao područje provedbe klasifikacije određena je naplavna ravnica između dvaju nasipa na odsječcima toka između Frkljevaca i Čosinog mlina (na dijelovima ravnice gdje nema nasipa na lijevoj obali, širina područja na lijevoj obali određena je proporcionalno vizualnom procjenom s obzirom na

širinu desne obale). Segmentacija je uključivala šest ulaznih slojeva: četiri spektralna kanala (crveni, zeleni, plavi, NIR) i dva indeksa (NDVI i NDWI). Parametri za korišteni algoritam segmentacije (engl. *multi-resolution segmentation*) određeni su na temelju vizualne procjene (tab. A2, prilozi). Konačni parametar mjerila segmentacije (engl. *scale*) iznosio je 30 te je uspješno izdvojio najmanje objekte u riječnom koridoru značajne za istraživanje (npr. riječne prudove i razlike u vegetacijskom pokrovu na riječnim prudovima; Sl. 3.6). Za usporedbu, Demarchi i dr. (2016) koristili su parametar mjerila 40 za segmentaciju slika riječnog krajobraza prostorne rezolucije 40 cm. Veći ponderi u segmentaciji dani su NIR, NDVI i NDWI slojevima budući da su oni najvažniji u razlikovanju vodenih tijela i klasa vegetacije (McFeeters, 1996; Nguyen i dr., 2019; Modica i dr., 2021).



Sl. 3.6. Klase zemljišnog pokrova u riječnom koridoru prikazane na segmentiranim NIR ortofotima iz 2011. i 2017. (poligoni predstavljaju objekte proizvedene segmentacijom)

Objektna klasifikacija provedena je u dva koraka. Korak 1 uključivao je klasifikaciju objekata u pet osnovnih klasa zemljišnog pokrova: vodu, golo tlo, gustu vegetaciju, rijetku vegetaciju i sjene (Tab. 3.5). Uzorci za treniranje modela prikupljeni su ručno (otprilike između 1000 i 1500 uzoraka po sceni, pokrivajući 5-6 % proučavanog područja). Statistika uzoraka za treniranje prikazana je u tab. A3 (prilozi). Značajke objekata korištene u klasifikaciji uključivale su spektralne karakteristike: aritmetičku sredinu i standardnu devijaciju četiriju kanala (crveni, zeleni, plavi, NIR) i dva indeksa (NDVI i NDWI), svjetlinu (engl. *brightness*) i maksimalnu razliku (engl. *maximum difference*). Objekti su klasificirani pomoću algoritama strojnog učenja *Support Vector Machine* (SVM) i *Random Forest* (RF) (tab. A4, prilozi).

SVM je nadzirani neparametarski klasifikatorski algoritam koji traži optimalnu hiperravninu ili skup hiperravnina koje najbolje odvajaju uzorke za treniranje koji pripadaju različitim klasama u višedimenzionalnom prostoru. Podatkovne točke najbliže hiperravnini poznate su kao potporni vektori (engl. *supporting vectors*) (Mountrakis i dr., 2011). RF je metoda stabla odlučivanja koja nasumično stvara šumu koja se sastoji od mnogo međusobno neovisnih stabala odlučivanja. Sva su stabla uvježbana s istim značajkama, ali na različitim setovima za uvježbavanje koji su izvedeni iz izvornog, koristeći agregaciju pokretačkog sustava (Cutler i dr., 2007). Konačna klasifikacija za svaku godinu odabrana je na temelju najboljih rezultata procjene točnosti. Dodavanje geometrijskih i tekstualnih značajki nije značajno poboljšalo klasifikaciju i uzrokovalo je produljeno vrijeme obrade.

Tab. 3.5. Klasifikacijska shema korištena u istraživanju

| Klasa zemljišnog pokrova |                          | Opis klase                                                                       |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Korak 1                  | Korak 2                  |                                                                                  |
| Voda                     | Voda                     | Voda u i izvan riječnog korita (npr. mrtvice)                                    |
| Golo tlo                 | Golo tlo                 | Golo tlo izvan korita                                                            |
|                          | Riječni sediment         | Riječni prudovi u koritu bez vegetacije (pijesak, šljunak)                       |
| Gusta vegetacija         | Gusta vegetacija (niska) | Gusta zeljasta i drvenasta vegetacija                                            |
|                          | Visoka vegetacija        | Drveće više od 7 m iznad srednje razine vode u koritu                            |
| Rijetka vegetacija       | Rijetka vegetacija       | Rijetka zeljasta vegetacija                                                      |
| Sjene                    | Sjene                    | Sjene na vodi, tlu, vegetaciji                                                   |
| -                        | Poljoprivredno zemljište | Poljoprivredno zemljište (sastoji se od guste i rijetke vegetacije te golog tla) |

U koraku 2 odvojene su još dvije klase pomoću DDSM-a i dva posebna skupa pravila. Objekti klasificirani kao golo tlo u koraku 1 reklasificirani su kao riječni sedimenti ako su imali vrijednost DDSM-a manju od 2 m. Visina od 2 m od prosječne razine vode u koritu predstavljala je gornju granicu riječnih obala, a utvrđena je temeljem terenskih procjena. S druge strane, objekti klasificirani kao gusta vegetacija u koraku 1 reklasificirani su kao visoka vegetacija ako je vrijednost DDSM bila veća od 7 m.

Također, nakon provedene klasifikacije pokrenuto je nekoliko procesa dorade (engl. *refinement*). Objekti klase sjene koji su bili potpuno okruženi gustom ili rijetkom vegetacijom reklasificirani su u odgovarajuću vegetacijsku klasu, dok su oni s više od 50 % opsega koji graniči s vodom reklasificirani u vodu (većinom predstavljajući sjene drveća nad koritom). Na taj je način udio površine sjena smanjen za 30-50 %. Nadalje, objekti klasificirani kao voda s brojem piksela manjim od 200, koji u velikoj većini predstavljaju pogreške u klasifikaciji vode, spojeni su s najvećom susjednom klasom. Obje granične vrijednosti u procesu dorade određene su na temelju iterativnog testiranja.

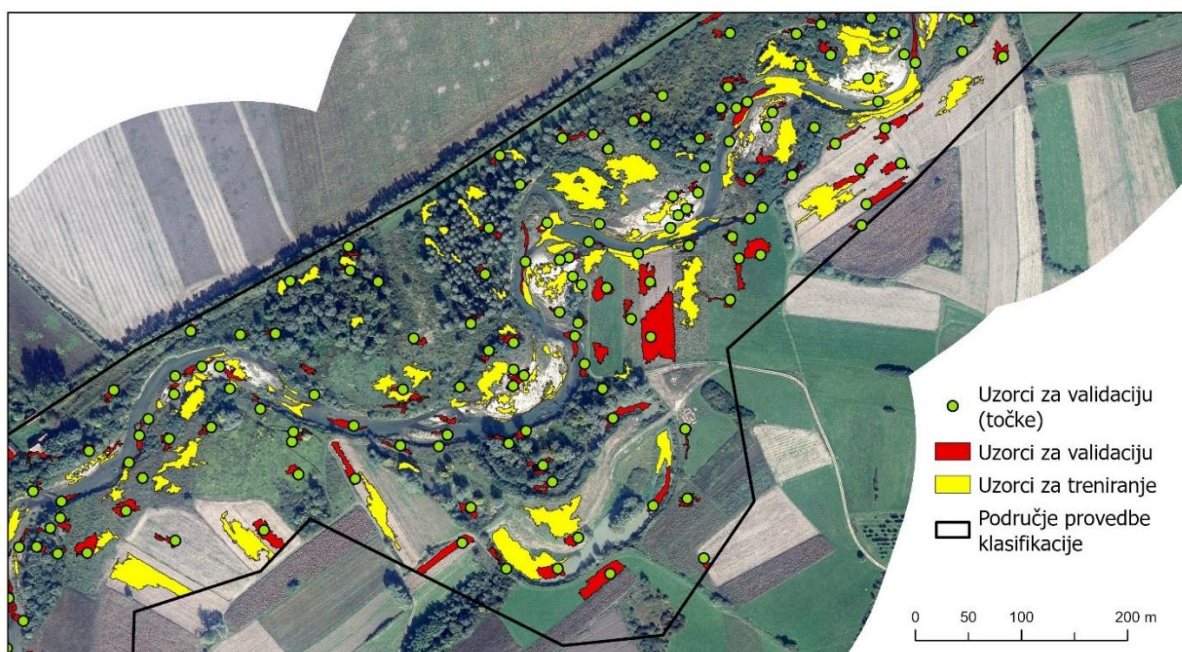
Za godine 2011. i 2014., zbog manje kvalitete snimaka, objekti klasificirani kao voda i riječni sedimenti su dodatno ručno ispravljeni u ArcGIS Pro-u. Za 2014., 37 % klase voda vektorizirano je ručno zbog nedostatka NIR kanala i visoke refleksije na površini vode koja je smanjila točnost klasifikacije. Konačno, poljoprivredno zemljište u potpunosti je vektorizirano ručno. Budući da se sastoji od guste i rijetke vegetacije (različitih vrsta usjeva i travnjaka) i golog tla, ovu je klasu algoritmima strojnog učenja bilo teško razlikovati bez detaljnih topografskih podataka, koji nisu bili dostupni za ovo istraživanje.

#### *3.2.3.1. Procjena točnosti klasifikacije i delineacija riječnog koridora*

Proizvedene karte zemljišnog pokrova uvezene su u ArcGIS Pro kao vektorske datoteke. Uzorci za validaciju klasifikacije proizvedeni su u ArcGIS Pro-u stvaranjem nasumično raspoređenih točaka u svakoj klasi, s njihovim brojem proporcionalnim relativnoj površini klase (Sl. 3.7). Točke su prostorno spojene s odgovarajućim segmentiranim objektom (poligonom). Ukupan broj točaka za validaciju za svaku analiziranu godinu odgovarao je omjeru 30:70 u odnosu na broj uzoraka za treniranje (tab. A3, prilozi). Točnost klasifikacije ispitana je na temelju nekoliko mjera točnosti izračunatih iz matrice konfuzije: korisničke točnosti (engl. *user's accuracy* – UA), proizvodne točnosti (engl. *producer's accuracy* – PA), ukupne točnosti (engl. *overall accuracy* – OA), i Kappa koeficijenta (K) (Carbonneau i dr., 2020; Story i Congalton, 1986).



Sve navedene mjere moguće je izračunati pomoću alata *Compute Confusion Matrix* u ArcGIS Pro-u.



Sl. 3.7. Uzorci za treniranje i validaciju te područje provedbe klasifikacije prikazani na RGB ortofoto kompozitu iz 2017.

Korisnička točnost odnosi se na vjerojatnost da su objekti koji su klasificirani kao određena klasa na karti zaista te klase i na terenu. Izračunava se kao postotak ispravno klasificiranih uzoraka za određenu klasu od ukupnog broja uzoraka koji su klasificirani kao ta klasa. Proizvodna točnost mjeri vjerojatnost da su objekti na terenu određene klase ispravno klasificirani u karti. Izračunava se kao postotak ispravno klasificiranih uzoraka za određenu klasu od ukupnog broja uzoraka koji pripadaju toj klasi na terenu. Nadalje, ukupna točnost je postotak svih ispravno klasificiranih uzoraka u odnosu na ukupni broj uzoraka i predstavlja mjeru opće uspješnosti klasifikacije cijele klasificirane scene. Kappa koeficijent je statistička mjera koja kvantificira razinu slaganja između klasificirane scene i referentnih podataka (stvarnih podataka) uzimajući u obzir slučajnu šansu za slaganje. Vrijednosti kappa koeficijenta kreću se od -1 do 1, gdje 1 označava savršeno slaganje, 0 označava slaganje koje je jednako slučajnom, a negativne vrijednosti ukazuju na slaganje koje je lošije od slučajnog (Story i Congalton, 1986).

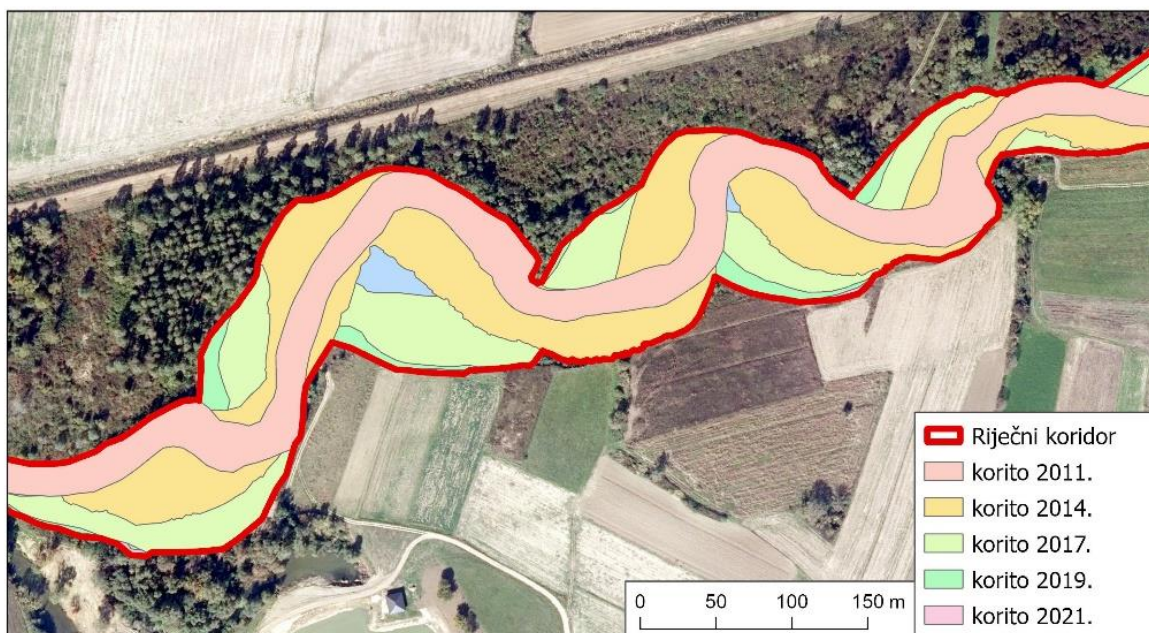
Nadalje, mjera F1 (Carbonneau i dr., 2020; Gašparović i Dobrinić, 2020), definirana kao ponderirana harmonijska sredina UA i PA, dodatno je izračunata pomoću jednadžbe (3.6):

$$F1 = 2 \times \frac{PA \times UA}{PA + UA} \quad (3.6)$$

Procjena točnosti za visoku vegetaciju nije bila izvediva zbog nedostatka podataka o visini stabala. Ova klasa je stoga u procjeni točnosti spojena s gustom vegetacijom.

Matrica promjene zemljišnog pokrova stvorena je preklapanjem vektorskih slojeva karata zemljišnog pokrova iz uzastopnih godina pomoću alata *Tabulate Intersection* u ArcGIS Pro-u. Dobivena unakrsna tablica (tab. A5, prilozi) prikazuje apsolutne i relativne podatke o svim zabilježenim promjenama između klasa izraženima u jedinicama površine (m<sup>2</sup>) i postotcima od ukupne površine te klase u početnoj godini analize. Osim promjena, tablica uključuje i podatke o površinama koje su zadržale svoju klasu u promatranom razdoblju (tj. o područjima bez promjene).

Treba naglasiti da su promjene zemljišnog pokrova analizirane na području riječnog koridora, koje je za potrebe ovog istraživanja definirano kao područje migracije aktivnog korita (Piégay i dr., 2005) u razdoblju 2011. – 2021. Aktivno riječno korito sastoji se od područja korita pod vodom i prudova bez vegetacije (Martínez-Fernández i dr., 2017; Scorpio i Piégay, 2021). Prema tome, područje riječnog koridora određeno je u ArcGIS Pro-u spajanjem poligona klase vode, koja predstavlja korito pod vodom, i klase riječnog sedimenta, koja predstavlja prudove bez vegetacije, iz svih analiziranih godina (Sl. 3.8). Budući da je cilj istraživanja bio usredotočiti se na promjene u riječnom okolišu, uključujući oblike reljefa i strukturu vegetacije, područje istraživanja za analizu promjena ograničeno je na tako definirani riječni koridor jer je šire poplavno područje uglavnom prekriveno poljoprivrednim površinama i umjetno zasađenom drvenastom vegetacijom. Prosječna širina riječnog koridora u odsječku 8 iznosi 26 m, a u odsječku 9 iznosi 46 m.



Sl. 3.8. Delineacija riječnog koridora preklapanjem poligona aktivnog korita iz analiziranih godina

### 3.2.4. Vektorizacija i analiza morfoloških obilježja korita

Morfološka obilježja korita na temelju karata i aerofotogrametrijskih snimki iz 1966., 1980., 2001. i 2009. vektorizirana su ručno u ArcGIS Pro-u u koordinatnom sustavu HTRS96. Za aerofotogrametrijske snimke iz razdoblja 2011. – 2021. obilježja korita i priobalna vegetacija izdvojeni su poluautomatski na temelju proizvedenih karata zemljišnog pokrova uz ručne korekcije u ArcGIS Pro-u. Analizirana su sljedeća obilježja:

4. **Duljina korita**, izmjerena prema vektoriziranoj crti sredine korita pod vodom, koja je uzeta kao aproksimacija talvega korita (Hohensinner i dr., 2021; Kiss i Blanka, 2012).
5. **Indeks vijugavosti** rijeke, izračunat kao omjer ukupne duljine riječnoga toka i crte sredine riječne doline (Alber i Piégay, 2017; Richard i dr., 2005),
6. **Širina aktivnog korita**, gdje aktivno korito predstavlja površinu korita pod vodom i prudove bez vegetacije (Martínez-Fernández i dr., 2017; Scorpio i Piégay, 2021). Širina aktivnog korita izračunata je dijeljenjem površine aktivnog korita s njegovom središnjicom. Polygon aktivnog korita vektoriziran je ručno ili poluautomatski (ovisno o izvoru podataka), a njegova središnjica je konstruirana pomoću alata *Centerline* u *Fluvial Corridor Toolbox*-u za GIS (Roux i dr., 2015).



7. **Udio drvenaste vegetacije na riječnim obalama**, uključujući i lijevu i desnu obalu (Hajdukiewicz i Wyżga, 2019; Martínez-Fernández i dr., 2017). Budući da vegetacija nije prikazana na topografskim kartama, za 1980. godinu nije bilo moguće analizirati ovo obilježje.

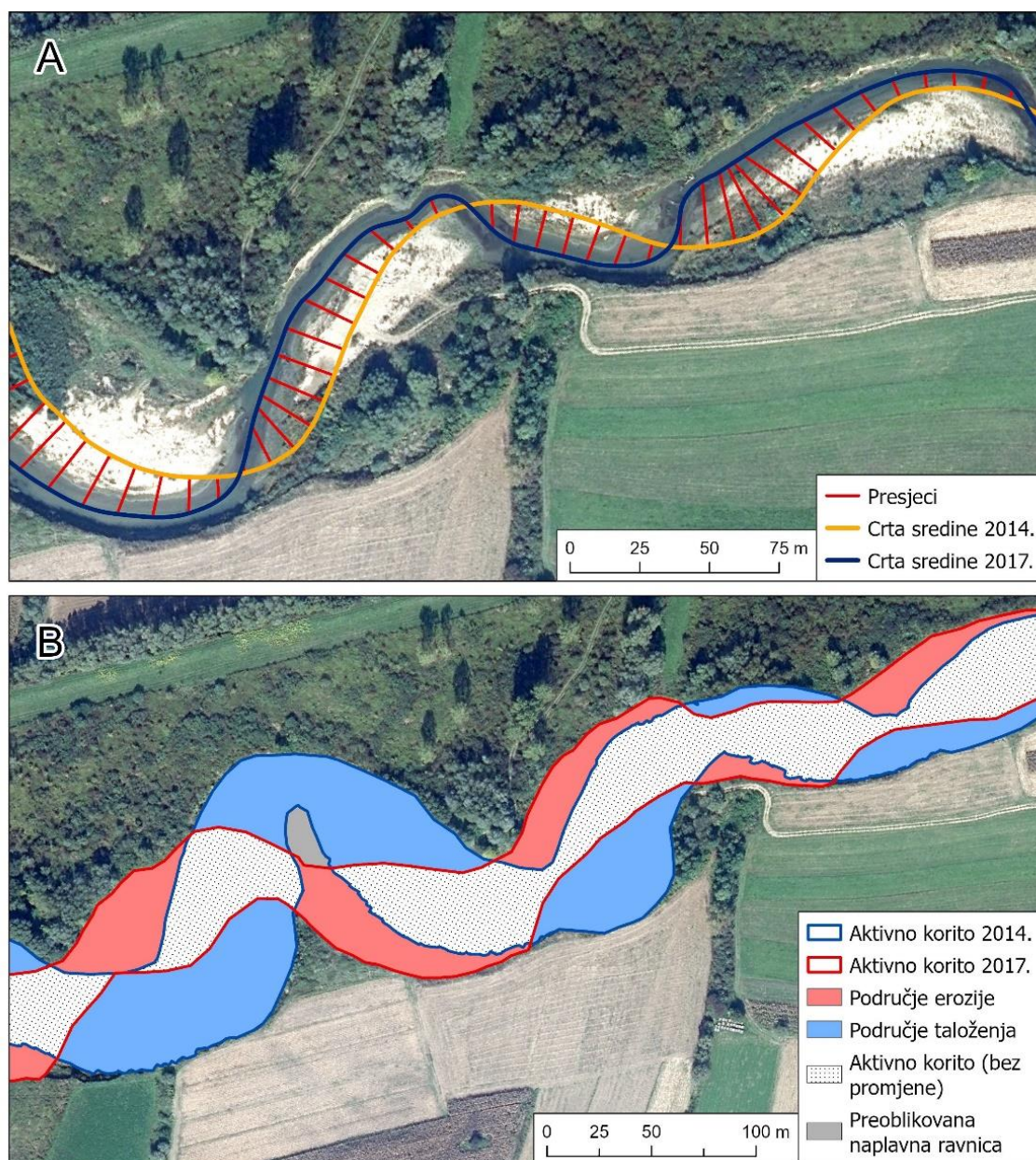
U razdobljima između mjernih godina, također su analizirana sljedeća dva obilježja:

8. **Bočno (lateralno) kretanje korita**, procijenjeno na temelju razlike u položaju između početne i završne crte sredine korita u promatranom razdoblju, koja je izmjerena pomoću okomito konstruiranih presjeka korita svakih 10 m na početnu crtu sredine (Dominguez Ruben i dr., 2021; Galia i dr., 2023; Sl. 3.9A). Dijeljenjem ukupne duljine svih presjeka s duljinom korita početne godine podijeljenom s deset (1), što ustvari predstavlja ukupan broj konstruiranih presjeka, dobivena je apsolutna vrijednost bočnog kretanja u promatranom razdoblju (jednadžba 3.7). Dijeljenjem te apsolutne vrijednosti s brojem godina u promatranom razdoblju izračunata je prosječna brzina bočnog kretanja u metrima godišnje (m/god). Treba naglasiti da u mjerenje nisu uključeni umjetno presječeni meandri budući da oni ne predstavljaju prirodno kretanje rijeke nego ljudski utjecaj (Bertalan i dr., 2019). Također, duljine presjeka kraće od 0.5-2 m (ovisno o analiziranim izvorima podataka) izuzete su iz analize budući da su kraće od prosječne horizontalne greške u georeferenciranju (Tab. 3.4).

$$BK = \frac{\sum Dp}{\frac{Dk}{10}} \quad (3.7)$$

gdje je BK bočno kretanje, Dp duljina poprečnih presjeka, a Dk duljina korita.

9. **Površine područja erozije i taloženja** izračunate su preklapanjem poligona aktivnog korita iz uzastopnih godina prema metodologiji prikazanoj u radu Rusnáka i Lehotskog (2014). Područja erozije predstavljaju dijelove aktivnog korita iz završne godine promatranog razdoblja koja su u početnoj godini bili dio naplavne ravnice (Sl. 3.9B). Područja taloženja pak predstavljaju dijelove aktivnog korita iz početne godine razdoblja koja u završnoj godini više nisu dio aktivnog korita. Također je moguće izdvojiti dijelove korita koji su aktivni u obje promatrane godine (odnosno područja bez promjene), kao i preoblikovani dio naplavne ravnice koji se nalazi između aktivnih korita početne i završne godine. Dijelovi poligona aktivnog korita koji predstavljaju umjetno presječene meandre izuzeti su iz analize.



Sl. 3.9. A) Mjerenje lateralnog kretanja rijeke pomoću poprečnih presjeka, B) mjerenje površina erozije i taloženja na temelju preklapanja poligona aktivnog korita iz uzastopnih godina (podloga: ortofoto iz 2017. godine)

### **3.2.5. Statističke analize povezanosti potencijalnih čimbenika i morfoloških promjena korita**

Odnosi između prirodnih (hidroloških) i antropogenih čimbenika i geomorfoloških pokazatelja promjena matematički su modelirani i statistički testirani kako bi se provjerila valjanost hipoteza 2, 3 i 4:

2. Morfološke promjene korita rijeke prvenstveno su posljedica ljudskog utjecaja.
3. Uklanjanje priobalne vegetacije utječe na pojačanu stopu erozije obala i promjenu tlocrtnog oblika rijeke.
  - a) Udio vegetacije na obalama rijeke negativno je povezan sa stopom bočnog kretanja rijeke.
  - b) Udio vegetacije na obalama rijeke negativno je povezan sa širinom aktivnog korita.
4. Osjetljivost odsječaka rijeke povezana je s nagibom korita i širinom pojasa meandriranja.
  - a) Osjetljivost odsječaka rijeke pozitivno je povezana s nagibom korita.
  - b) Osjetljivost odsječaka rijeke pozitivno je povezana sa širinom pojasa meandriranja i indeksom vijugavosti.

Statističke analize provedene su na odsječcima između Frkljevaca i Čosinog mlina na temelju podataka iz razdoblja 2001. – 2021. jer su kompletni hidrološki podaci za postaju Frkljevci dostupni od 2000., a najranije aerofotogrametrijske snimke DGU zadovoljavajuće horizontalne točnosti od 2001. godine. Također, osim za najranije godine (2001. i 2009.), snimke su u analiziranom razdoblju dostupne za svake dvije do tri godine, čime je omogućen dovoljno precizan i kompletan skup podataka potreban za statističke analize.

Kako bi se testirao dominantan utjecaj antropogenih čimbenika na morfološke promjene korita (hipoteza 2), prvo je bilo potrebno analizirati prirodne čimbenike, od kojih je najvažnija magnituda i učestalost poplava (Schumm, 1977; Hooke, 2022). Naime, tijekom velikih protoka, dolazi do erozije riječnih obala, uklanjanja vegetacije, širenja korita i formiranja riječnih prudova (Bertoldi i dr., 2009; Rusnák i dr., 2016). Zbog toga se u radovima koji istražuju promjene korita tekućica često analizira trajanje protoka iznad određene granične vrijednosti (engl. *duration of flows over threshold*) i veličina i kretanje maksimalnih godišnjih protoka (Bertalan i dr., 2019; Hooke i Yorke, 2011; Kiss i Blanka, 2012). Budući da je preliminarnom analizom ortofoto karata DGU primijećeno povećanje morfodinamike rijeke u razdoblju nakon

2011., prvi cilj statističkih analiza bio je testirati jesu li vrijednosti maksimalnih protoka i trajanja velikih protoka bile značajno veće u desetljeću 2011. – 2021. u usporedbi s prethodnim desetljećem 2001. – 2011.

Za rijeke vijugavog do meandrirajućeg tipa, kakav je morfološki tip korita Orljave u istraživanim odsječcima, stopa bočnog kretanja izdvojena je kao najvažniji morfološki pokazatelj osjetljivosti (Reid i Brierley, 2015; Wheeler i dr., 2022). Taj je pokazatelj analiziran kao zavisna varijabla u odnosu na hidrološka obilježja, priobalnu vegetaciju i druge morfološke pokazatelje (širina, nagib korita, indeks vijugavosti) (hipoteze 3 i 4). Analiziranjem odnosa između stopa bočnog kretanja i ostalih navedenih varijabli provedena je kvantitativna procjena osjetljivosti rijeke, odnosno procjena osjetljivosti bočnog kretanja rijeke na promjene u potencijalnim uzročnim faktorima (kontrolnim varijablama). Svi statistički testovi i analize provedeni su u softveru SPSS® Statistics 29 (IBM, 2023).

U vezi hipoteze 4, potrebno je naglasiti da je tijekom analize geomorfoloških pokazatelja zaključeno da pojas meandriranja nije lako precizno odrediti, iako mu je definicija relativno jednostavna – širina obuhvata naplavne ravnice u kojem se proteže meandrirajući tok rijeke (Parish Geomorphic, 2004). Primjerice, García-Martínez i Rinaldi (2022) su definirali aktivni pojas korita (koji se može poistovjetiti sa širinom pojasa meandriranja) kao područje naplavne ravnice koje je izravno pod utjecajem bočnog kretanja korita te je omeđeno zamišljenom linijom koja povezuje sve konkavne (strme) obale meandara. Međutim, nedoumice se mogu javiti u slučaju složenih meandara: je li potrebno povezati baš sve konkavne obale, ili slijediti generalni trend pružanja korita (Parish Geomorphic, 2004)?

Indeks vijugavosti predstavlja robusniji i pouzdaniji pokazatelj jer se određuje na temelju duljine korita i duljine središnjice doline, koje je jednostavnije i preciznije odrediti. Budući da rijeke s većim indeksom vijugavosti obično imaju širi pojas meandriranja (García-Martínez i Rinaldi, 2022), u analizi je kao nezavisna varijabla korišten samo indeks vijugavosti, čija se povezanost s osjetljivošću rijeke posredno dovela u vezu i sa širinom pojasa meandriranja.

### 3.2.5.1. Analiza hidroloških podataka

Trajanje velikih protoka u ovom istraživanju izračunato je u odnosu na graničnu vrijednost protoka s povratnim razdobljem od 1,1 godine, što u literaturi predstavlja geomorfološki efektivni protok (Leopold i dr., 1964; Simon i dr., 2004), a koristi se za rijeke slične veličine u Panonskom bazenu (Bertalan i dr., 2019; Kiss i Blanka, 2012). Geomorfološki efektivni protok (engl. *dominant formative discharge, effective discharge*) u teoriji označava onu veličinu protoka koja je najučinkovitija za transport sedimenta i koja ima najveći utjecaj na geomorfologiju rijeke, uključujući oblikovanje korita, obala i naplavnih ravnica (Fryirs i Brierley, 2013). Veličina protoka s povratnim razdobljem od 1,1 godine ne mora nužno stvarati najveće morfološke promjene na Orljavi, ali trajanje protoka iznad određene kritične vrijednosti općenito se pokazalo kao glavna odrednica geomorfološke učinkovitosti određene poplave (Fryirs i Brierley, 2013).

Veličina protoka povratnog razdoblja od 1,1 godine ( $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) procijenjena je na nizu maksimalnih godišnjih protoka s postaje Frkljevci u razdoblju 2001. – 2021. koristeći empirijsku formulu Čegodajeva (prema Žugaj, 2000):

$$p = \frac{n+0,4}{m-0,3} \quad (3.8)$$

Gdje je  $p$  povratno razdoblje,  $n$  je ukupan broj članova niza, a  $m$  je rang određenog protoka kada su svi godišnji maksimalni protoci poredani od najvećeg prema najmanjem. Trajanje protoka iznad  $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$  u postotcima, kao i maksimalne vrijednosti protoka, izračunate su za svaku pojedinačnu kalendarsku godinu u razdoblju 2001. – 2021., kao i za razdoblja između datuma snimanja aerofotogrametrijskih snimaka korištenih u istraživanju.

Nizovi maksimalnih godišnjih protoka i trajanja protoka iznad 1,1 -godišnjeg povratnog razdoblja za desetljeće 2001. – 2011. i 2011. – 2021. analizirani su Mann-Whitney U-testom kako bi se utvrdilo postoji li statistički značajna razlika u srednjacima navedenih pokazatelja između dva desetljeća. Mann-Whitney U-test je neparametarski statistički test koji se koristi za usporedbu distribucija dvaju nezavisnih uzoraka, u slučaju kada podaci nisu normalno distribuirani (Shapiro-Wilk testom dokazana je distribucija podataka koja odstupa od normalne za sva četiri hidrološka niza).

### 3.2.5.2. Korelacijske analize

Često korištene statističke metode za razumijevanje odnosa između dvije ili više varijabli su korelacijske analize i linearni regresijski modeli. Korelacijska analiza mjeri snagu i smjer povezanosti između dvije ili više varijabli. S druge strane, linearna regresija modelira odnos između zavisne varijable i jedne ili više nezavisnih varijabli, s ciljem predviđanja vrijednosti zavisne varijable na temelju linearne jednadžbe koja opisuje kako promjene u nezavisnoj varijabli utječu na zavisnu varijablu. Uvjeti za obje metode uključuju linearni odnos među varijablama i nezavisnost podataka (mjerjenja). Za regresijski model, dodatni uvjeti su homoskedastičnost (konstantna varijanca reziduala<sup>2</sup>), normalna distribucija reziduala i odsutnost multikolinearnosti među nezavisnim varijablama (Burt i dr., 2009).

Jednostavna regresijska analiza, koja proučava odnos između jedne zavisne i jedne nezavisne varijable, često se upotrebljava u fluvijalnoj geomorfologiji: od razvoja kvantitativne geomorfologije 1960-ih koristi se za analizu geometrije korita, poput odnosa između protoka i širine ili dubine korita koje su prvi istražili Leopold i Maddock (1953). Ukoliko se u analizu uključi više nezavisnih varijabli, radi se o multivarijantnoj regresijskoj analizi. Takvi statistički modeli često se koriste za istraživanje utjecaja različitih hidroloških i geomorfoloških obilježja porječja i korita na određene morfometrijske pokazatelje poput bočnog kretanja (Alber i Piégay, 2017; Nicoll i Hickin, 2010) ili promjena u širini korita (Liébault i dr., 2002). U navedenim radovima istraživano je više rijeka u zasebnim porječjima, koje se dakle mogu uzeti kao nezavisna promatranja. Međutim, u nekim se radovima regresijski modeli koriste za utvrđivanje hidrološko-geomorfoloških veza i na razini odsječaka jedne rijeke (npr. Richard i dr., 2005). U tom slučaju treba paziti da ne dođe do pojave zavisnosti između izmjerenih podataka i narušavanja uvjeta za provedbu regresijske analize.

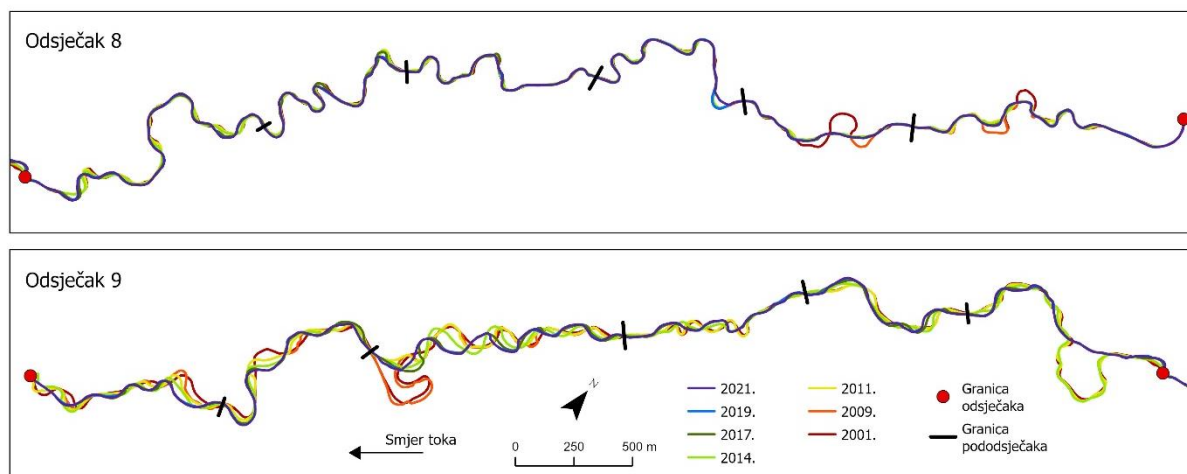
U ovom istraživanju, odnosi među varijablama prvo su istraženi korelacijskom analizom kako bi se testirale hipoteze 3 i 4. Korelacijska analiza ujedno je poslužila i za istraživanje multikolinearnosti među nezavisnim varijablama koju je potrebno isključiti za potrebe regresijske analize. Potrebno je naglasiti da je unutar istraživanih odsječaka 8 i 9 provedena dodatna prostorna delineacija na dvanaest pododsječaka prosječne duljine 1 km (šest u odsječku 8 i šest u odsječku 9), kako bi se dublje istražila varijabilnost u (bio)geomorfološkim

---

<sup>2</sup> Reziduali predstavljaju razliku između stvarnih (observiranih) vrijednosti i procijenjenih (predviđenih) vrijednosti. Drugim riječima, rezidual je odstupanje pojedine promatrane vrijednosti od vrijednosti koju model predviđa.



obilježjima (Sl. 3.10). Granice pododsječaka su određene na temelju stabilnih točaka u koritu (dijelova korita u kojima bočno kretanje u razdoblju 2001. – 2021. nije bilo izraženo). Sličnu metodu delineacije upotrijebili su Hooke i York (2010) u istraživanju promjena u morfološkim parametrima meandara.



Sl. 3.10. Delineacija pododsječaka unutar odsječaka 8 i 9

Korelacijske analize su provedene za svaki odsječak posebno (8 i 9), na temelju mjerenja za 6 pododsječaka. Idealno bi bilo analizirati i usporediti rezultate korelacije među varijablama u razdoblju stabilne priobalne vegetacije (2001. – 2011.) i u razdoblju oporavka vegetacije nakon uklanjanja (2011. – 2021.), kako bi se jasnije istražio utjecaj priobalne vegetacije na geomorfološke procese u koritu. Međutim, za razdoblje 2001. – 2011. nije bilo dovoljno podataka (nema snimki za svake 2-3 godine u tom desetljeću). Usprkos tome, provedene su analize na tri skupa podataka koji su sačinjeni na temelju broja pododsječaka (6) i broja uključenih podrazdoblja koja su određena između datuma snimanja aerofotogrametrijskih snimki DGU (2001. – 2009., 2009.-2011., 2011. – 2014., 2014. – 2017., 2017. – 2019. i 2019. – 2021.):

1. **skup podataka (razdoblje 2001. – 2021.):** 36 parova podataka (6 pododsječaka \* 6 podrazdoblja) uključuje desetljeće stabilne priobalne vegetacije (2001-2011.) i desetljeće nakon njenog uklanjanja (2011. – 2021.).
2. **skup podataka (razdoblje 2011. – 2021.):** 24 parova podataka (6 pododsječaka \* 4 podrazdoblja) predstavlja razdoblje nakon uklanjanja vegetacije
3. **skup podataka (razdoblje 2014. – 2021.),** 18 parova podataka (6 pododsječaka \* 3 podrazdoblja) – predstavlja razdoblje nakon probijanja mlinske stepenice na granici dvaju odsječaka



Navedena tri skupa podataka su testirana da bi se ispitalo kako određeni događaji (uklanjanje i rast vegetacije te uklanjanje stepenice) utječu na geomorfološke procese u koritu. Analizom se nastojalo utvrditi jesu li veze među varijablama značajno različite u nekom od tih skupova podataka, što bi sugeriralo da je određeni događaj značajno promijenio dotadašnju dinamiku.

Istraživane hidrološke i geomorfološke varijable popisane su u tablici Tab. 3.6. U analizu su uključene sve varijable kako bi se istovremeno testirale hipoteze 3 i 4, te multikolinearnost među nezavisnim varijablama. Normalnost distribucije podataka za istraživane varijable provjerena je Shapiro-Wilk testom. Budući da su za većinu varijabli utvrđene distribucije koje se razlikuju od normalne, za korelacijsku analizu korišten je Spearmanov koeficijent korelacije, koji ne zahtijeva normalnu distribuciju za statističku pouzdanost. Također, linearnost podataka ispitana je dijagramom rasipanja. Budući da je za bočno kretanje utvrđena nelinearna povezanost s drugim varijablama, ta je varijabla transformirana logaritmiranjem po bazi 10 (Kui i dr., 2017; Richard i dr., 2005). U svim analizama korištena je razina značajnosti od 0,05, što znači da je vjerojatnost pogrešnog odbacivanja nulte hipoteze (kada je ona zapravo istinita) 5 %. U korelacijskoj analizi, nulta hipoteza pretpostavlja da između dviju varijabli ne postoji značajna korelacija.

Tab. 3.6. Varijable korištene u korelacijskoj analizi i linearnom mješovitom modelu

| Varijabla                                                                      | Objašnjenje                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Stopa bočnog kretanja (log)</b>                                             | Izračunata za razdoblje, log. transformirana                                                                                                                               |
| <b>Trajanje protoka 1.1- povratnog razdoblja (25,5 m<sup>3</sup>/s)</b>        | Izračunato za razdoblje                                                                                                                                                    |
| <b>Maksimalni godišnji protok</b>                                              | Izračunat za razdoblje                                                                                                                                                     |
| <b>Indeks vijugavosti</b>                                                      | Na početnoj godini razdoblja                                                                                                                                               |
| <b><math>\Delta</math> indeksa vijugavosti (stopa promjene godišnje)</b>       | Izračunata za razdoblje                                                                                                                                                    |
| <b>Širina aktivnog korita</b>                                                  | Na početnoj godini razdoblja                                                                                                                                               |
| <b><math>\Delta</math> širine akt. korita (stopa promjene godišnje)</b>        | Izračunata za razdoblje                                                                                                                                                    |
| <b>Udio drvenastih obala (%)</b>                                               | Na početnoj godini razdoblja                                                                                                                                               |
| <b><math>\Delta</math> drvenastih obala (promjena u % drv. obala godišnje)</b> | Izračunata za razdoblje                                                                                                                                                    |
| <b>Nagib korita</b>                                                            | Razlika u razini dna korita između početne i završne točke pododsječka na temelju geodetskog snimanja iz 2012. podijeljena s duljinom korita pododsječka iz početne godine |
| <b>Snaga toka</b>                                                              | Maksimalni godišnji protok $\times$ nagib korita                                                                                                                           |
| <b>Specifična snaga toka</b>                                                   | Maksimalni godišnji protok $\times$ nagib korita / širina korita                                                                                                           |

\* napomena: razdoblje se odnosi na razdoblje između datuma snimanja aerofotogrametrijskih snimaka

### 3.2.5.3. *Linearni mješoviti modeli*

Pri dijeljenju odsječaka na manje pododsječke može doći do problema pseudoreplikacije, odnosno pojave zavisnosti u mjerenjima između pododsječaka zbog njihove međusobne povezanosti i činjenice da su svi pododsječci dio jednog većeg odsječaka koji je geomorfološki relativno homogen. Problem pseudoreplikacije u podacima može se riješiti upotrebom linearnih mješovitih modela (engl. *linear mixed model*, LMM; Kui i dr., 2016; Marshall i dr., 2024). Linearni mješoviti modeli su proširenja linearnih regresijskih modela za podatke koji su prikupljeni i sažeti u grupama. LMM se sastoji od dva dijela: fiksnih i slučajnih efekata. Fiksni efekti (engl. *fixed effects*) predstavljaju opće efekte koji se primjenjuju na cijelu populaciju, odnosno klasične nezavisne varijable u modelu. Odnos između zavisne varijable i nezavisnih varijabli mjeri se koeficijentima koji mogu varirati s obzirom na jednu ili više grupirajućih varijabli, odnosno slučajne efekte (engl. *random effects*). Ovi modeli su posebno korisni u situacijama gdje su podaci sakupljeni iz više izvora ili su strukturirani u klasterima, kao što su longitudinalne studije ili studije s ponovljenim mjerenjima. Prednost LMM je njihova sposobnost da se nose s nestalnim podacima i različitim varijancama među grupama. Na taj način LMM pružaju fleksibilniji pristup analizi složenih podataka u usporedbi s tradicionalnim linearnim modelima (Jiang i Nguyen, 2021).

Linearni mješoviti modeli (LMM) često se koriste u ekologiji kako bi se izbjegao problem nedostatka nezavisnosti među prikupljenim podacima, budući da ekološki procesi i organizmi često djeluju i utječu jedni na druge unutar istih okolišnih uvjeta i prostora (Bolker i dr., 2009; Jiang i Nguyen, 2021). U fluvijalnoj geomorfologiji upotreba LMM nije česta. U literaturi je dostupno nekoliko radova koji koriste LMM za istraživanje odnosa između obilježja priobalne vegetacije i geomorfologije korita (Allen i dr., 2018; Kui i dr., 2017), i utjecaja drvnih ostataka na dinamiku korita (Marshall i dr., 2024). U navedenim radovima, veze između varijabli analizirane su na razini odsječaka jedne rijeke. Kui i dr. (2016) koristili su segmente duljine 500 m, raspoređene na međusobnoj udaljenosti od 500 m, te su Moranovim indeksom (engl. *Global Moran's I*; Burt i dr., 2009) isključili njihovu prostornu autokorelaciju. Marshall i dr. (2024) su podijelili istraživani dio rijeke na jednake segmente od 2 km te su Kruskal-Wallis testom utvrdili značajnu varijaciju u medijanima varijabli između segmenata. U oba istraživanja, „segment“ je korišten kao slučajni efekt u modelima, kako bi se kontrolirale razlike u topografiji i hidraulici među segmentima (Kui i dr., 2016) ili kako bi se uzela u obzir višestruke mjerenja tijekom vremena unutar istog segmenta i blizina drugih segmenata (Marshall i dr., 2024).

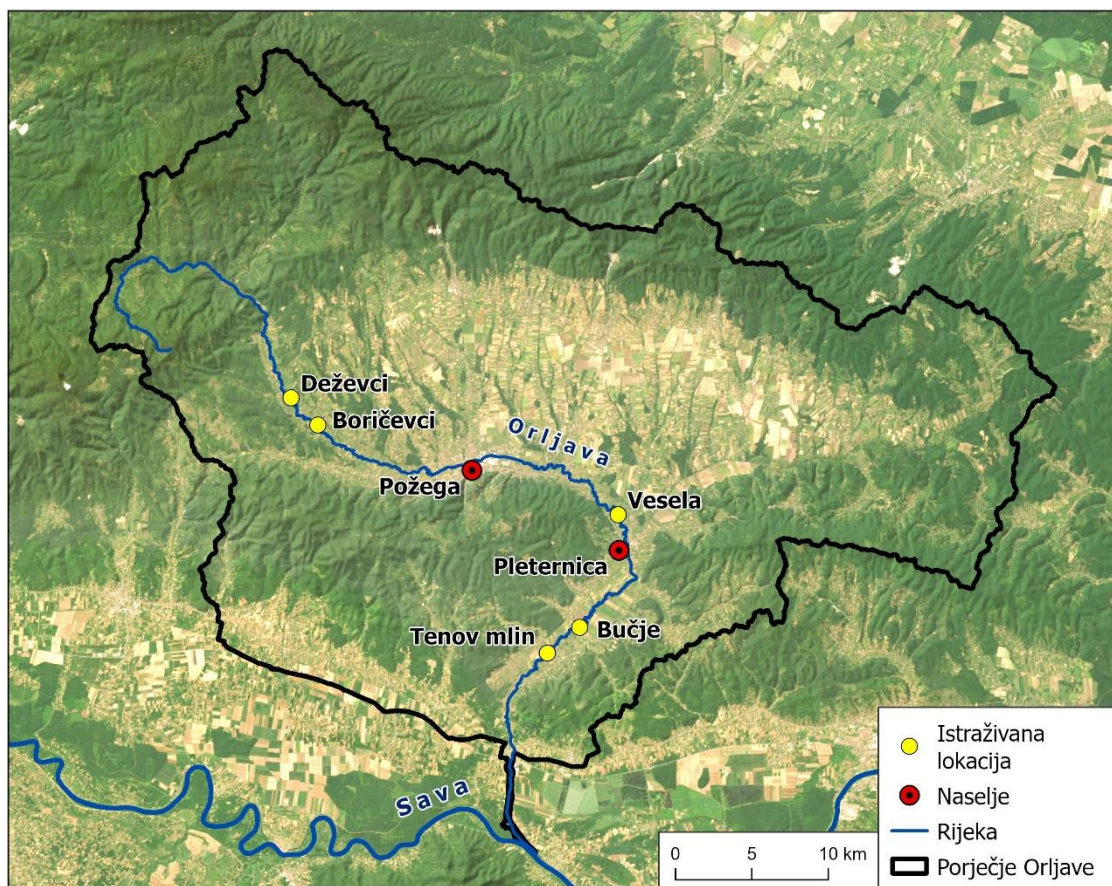
U ovom istraživanju stvoreni su linearni mješoviti modeli sa zavisnom varijablom „stopa bočnog kretanja rijeke“, a kao nezavisne varijable uključene su sve ostale varijable iz tablice 3.6. Međutim, nezavisne varijable za koje je korelacijskom analizom utvrđena jaka povezanost ( $\rho > 0.7$ ; Burt i dr., 2009), npr. trajanje protoka i maksimalni protoci, nisu istovremeno uključivane u model kako bi se izbjegla multikolinearnost. Vrijednosti varijabli za pododsječke za različita podrazdoblja testirana su Kruskal-Wallis testom kako bi se istražilo jesu li pododsječci međusobno značajno različiti: test se pokazao značajan za varijable nagib korita, indeksa vijugavosti, i snagu toka. Udio drvenaste priobalne vegetacije nije se značajno razlikovao među pododsječcima, budući da je na cijelom odsječku vegetacija uklonjena 2011. te zatim postepeno rasla (prema tome, za tu varijablu postoji određeni vremenski trend). Po uzoru na Kui i dr. (2016) i Marshall i dr. (2024), u modelima je "pododsječak" tretiran kao slučajni efekt kako bi se uzele u obzir razlike u geomorfološkim obilježjima pododsječaka, ali i njihova međusobna blizina.

S druge strane, šest podrazdoblja su tretirana kao varijabla ponovljenih mjerenja (engl. *repeated measurements*), čime su uzete u obzir varijacije u protocima između razdoblja i trend rasta vegetacije. Kao tip kovarijance (način na koji se modelira kovarijanca, tj. odnos između varijanca dviju ili više varijabli u linearnim mješovitim modelima) odabran je autoregresivni član prvog reda (engl. *autoregressive first-order*), kako bi se osiguralo da sekvencijalna korelacija geomorfoloških pokazatelja u pododsječcima ne utječe na rezultate modela (Kui i dr., 2017; Lindsey i Lambert, 1995). Sekvencijalna korelacija podrazumijeva da mjerenja geomorfoloških obilježja uzeta u različitim godinama unutar istog pododsječka/odsječka mogu biti povezana zbog postojanja vremenskog trenda. Uključivanje autoregresivnog tipa kovarijance u model pomaže u prilagodbi vremenskoj korelaciji i osigurava da ona ne iskrivljuje rezultate ili dovede do netočnih zaključaka. Također, taj tip kovarijance je odabran jer je osiguravao normalnu distribuciju reziduala.

Najbolji model s mješovitim efektima odabran je na temelju najniže vrijednosti Akaikeovog informacijskog kriterija, prilagođenog za male uzorke (AICc; Burnham i Anderson, 2004; Marshall i dr., 2024). Modeli su stvoreni za razdoblje 2001. – 2021. samo za odsječak 9 (ukupno 36 podataka po varijabli) jer su u odsječku 8 veze među varijablama bile preslabe da bi se stvorio pouzdan model.

### 3.3. Terensko istraživanje promjena korita na razini meandra

Morfološke promjene korita Orljave na razini meandra istražene su na ukupno pet lokacija. Dvije lokacije određene su u srednjem toku rijeke uzvodno od Požege: prva kod naselja Deževci, a druga kod Boričevaca. Treća lokacija nalazi se u blizini naselja Vesela nizvodno od Požege. Posljednje dvije lokacije nalaze se nizvodno od Pleternice, jedna kod mosta preko rijeke blizu naselja Bučje, a posljednja nizvodno od Tenovog mlina (Sl. 3.11).



Sl. 3.11. Lokacije istraživanih meandara na rijeci Orljavi

Cilj terenskih istraživanja bio je istražiti čimbenike kratkoročnih morfoloških promjena korita, prvenstveno bočne erozije na vanjskim dijelovima meandara. Prema tome, glavni kriteriji za odabir lokacija bili su što izraženija prirodnost rijeke, odnosno što manji ljudski utjecaji koji ograničavaju bočno kretanje, te recentna dinamičnost geomorfoloških procesa koja je preliminarno vizualno procijenjena pomoću ortofota DGU iz razdoblja 2011. – 2021. Niti na jednoj lokaciji ne postoje obaloutvrde te je bočno kretanje rijeke većinom neograničeno, što omogućava praćenje razvoja meandara. Međutim, budući da Orljava protječe poljoprivrednim područjem, ljudski utjecaji se ne mogu posve isključiti te na svakoj lokaciji postoje u određenoj

mjeri. Također, lokacije su izabrane na različitim dijelovima toka s drugačijim sastavom sedimenta dna korita i strukturom obala (drvenasta ili zeljasta vegetacija), kako bi se obuhvatila drugačija hidrološka i (bio)geomorfološka obilježja i procesi. Na kraju, bitan kriterij za odabir položaja istraživanih lokacija bila je i pristupačnost terenskim vozilom.

Terensko istraživanje sastojalo se od snimanja šireg područja odabranog meandra bespilotnom letjelicom, mjerenja kontrolnih točaka i poprečnih profila korita pomoću RTK-GNSS prijemnika (engl. *Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System*) te uzimanja uzoraka sedimenta s riječnih obala i prudova. Istraživanje je provedeno u ukupno šest terenskih izlazaka, koji su većinom obavljani u rano proljeće ili sredinom jeseni, u vrijeme nižih vodostaja i prije odnosno nakon glavnog vegetacijskog razdoblja (Tab. 3.7). Snimanje profila nije bilo moguće tijekom proljetnih mjeseci radi relativno viših vodostaja. Uzimanje uzoraka sedimenta te terensko određivanje granulometrijskog sastava na prudovima obavljeno je tijekom izlaska 22./23. 10. 2023.

Tab. 3.7. Datumi terenskih istraživanja i obavljene aktivnosti

| Datum terenskog istraživanja | Deževci | Boričevci | Vesela | Bučje | Tenov mlin |
|------------------------------|---------|-----------|--------|-------|------------|
| 15.12.2021.                  | -       | -         | -      | S     | S          |
| 25.03.2022.                  | S       | S         | S      | S     | S          |
| 18.10.2022.                  | P       | P         | -      | S, P  | S, P       |
| 30.03.2023.                  | S       | S         | S      | S     | S          |
| 22./23.10.2023.              | S, P    | S, P      | S, P   | S, P  | S, P       |
| 07.05.2024.                  | S       | S         | S      | S     | S          |

S – snimanje bespilotnom letjelicom, P – mjerenje profila

### 3.3.1. Prikupljanje i obrada prostornih podataka

Tijekom prva dva terenska izlaska, snimanje bespilotnom letjelicom odrađeno je uređajem DJI Phantom 4 Pro v.20, a tijekom idućih četiriju izlazaka uređajem DJI Phantom 4 RTK (Sl. 3.12). Obje letjelice dijele iste specifikacije kamere: tip je 1" CMOS s 20 megapiksela, žarišna duljina je 8.8 mm / 24 mm (ekvivalent 35 mm formatu), a rezolucija slike u omjeru 4:3 jest 4864 × 3648 piksela. Razlika između letjelica jest što je RTK model opremljen RTK modulom koji koristi fazne razlike GNSS satelitskih signala za centimetarski precizno određivanje položaja, što je znatno točnije od standardnog GNSS sustava, koji ima preciznost od nekoliko metara.



RTK modeli bespilotnih letjelica mogu se spojiti na CROPOS<sup>3</sup> sustav putem interneta koristeći GNSS prijemnik koji je ugrađen u letjelicu. Povezivanjem s CROPOS-ovim centrom za obradu podataka primaju se korekcijski podaci u stvarnom vremenu, što omogućuje određivanje položaja s točnošću od jednog centimetra.

Površine područja snimanja iznosile su od 1,5 do 4 ha, ovisno o lokaciji. Po misiji je snimljeno između 200 i 500 snimaka s visine od 50 m, s preklapanjem od 70 % i pod kutom od 90 stupnjeva. Snimanje Pro v2.0 modulom koordinirao je snimatelj, dok su za snimanje RTK modelom korištene planirane misije i opcija *2D Photogrammetry* koja omogućuje automatsko planiranje trase kretanja letjelice s određenim preklapom snimaka nakon unosa željene površine snimanja. Na svakoj lokaciji je prilikom snimanja prikupljeno deset točaka za terensku kontrolu te deset točaka za provjeru modela pomoću RTK-GNSS prijemnika Trimble Catalyst DA2, koji je također spojen na CROPOS sustav. Točke za terensku kontrolu su preventivno prikupljane i u slučaju korištenja RTK modula bespilotne letjelice, jer se RTK signal ponekad može izgubiti tijekom leta.



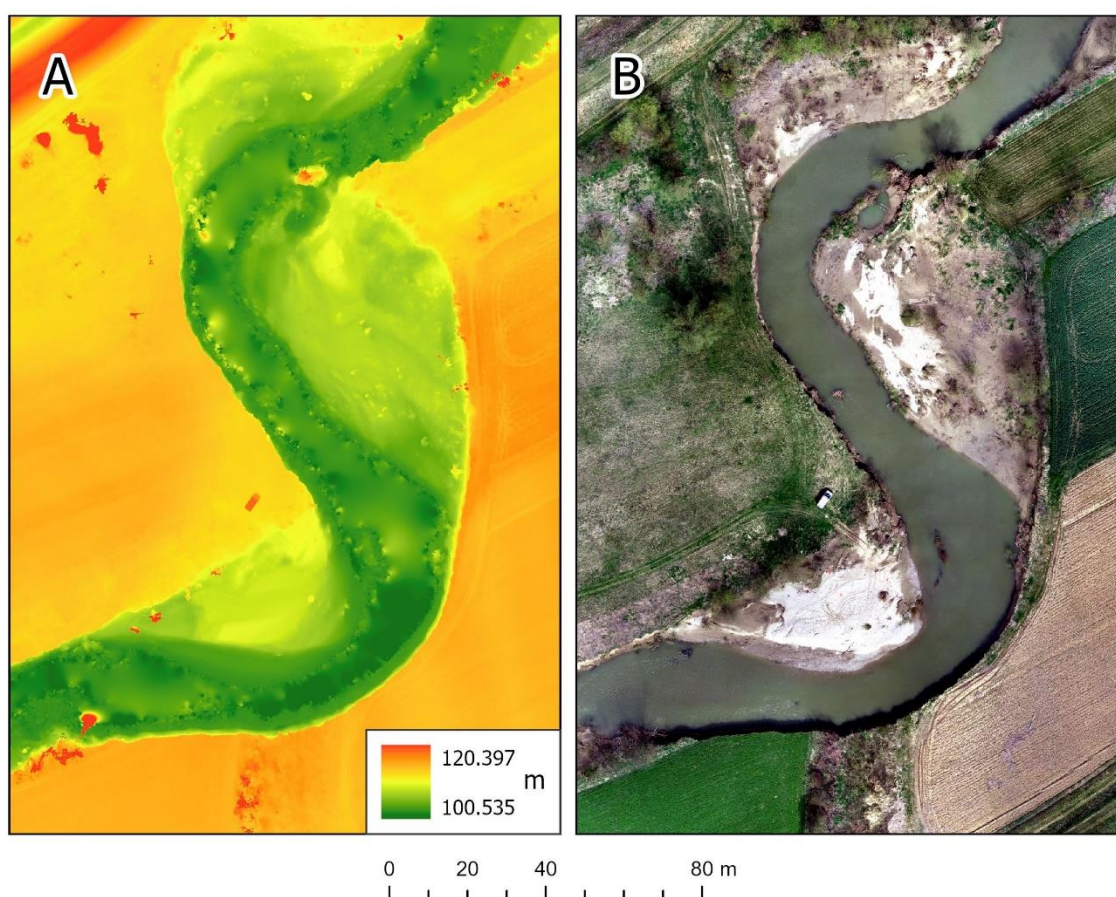
Sl. 3.12. Snimanje bespilotnom letjelicom na odabranim lokacijama meandara Orłjave

Snimke su obrađene u softveru Agisoft Metashape Professional te su dobiveni digitalni modeli površine te ortofoto modeli (Agisoft LLC, 2021), koristeći tijek rada opisan u poglavlju 3.2.2. Nakon početne orijentacije snimaka na temelju parametara vanjske orijentacije dobivenih iz

---

<sup>3</sup> CROPOS (*Croatian Positioning System*) je mreža stalnih GNSS referentnih stanica koja omogućuje precizno satelitsko pozicioniranje na teritoriju Hrvatske (cropos.hr)

senzorskog sustava kamere, snimke su dodatno rektificirane na temelju deset točaka za terensku kontrolu. Gusti oblaci točaka generirani primjenom *Aggresive* načina filtriranja, korišteni su za izradu DSM-a prostorne rezolucije 5 cm. Na temelju DSM-a generirani su ortofoto modeli prostorne rezolucije 1 cm (Sl. 3.13). Točnost modela ispitana je mjerenjem greške srednjeg kvadratnog odstupanja (engl. *root mean square error*, RMSE) između koordinata točaka za provjeru i odgovarajućih koordinata točaka na modelu. Utvrđena je horizontalna točnost od otprilike 5 cm, te vertikalna točnost od 10 cm, što su očekivane vrijednosti s obzirom na specifikacije korištene letjelice (DJI, 2024).



Sl. 3.13. Digitalni model površina (A) i digitalni ortofoto model (B) generirani na temelju snimaka prikupljenih bespilotnom letjelicom na lokaciji Bučje 30. 3. 2023.

Poprečni profili korita izmjereni su pomoću RTK-GNSS prijemnika Trimble Catalyst DA2 (Sl. 3.14). Točne lokacije mjerenih profila dijelom su određene na temelju lokacija poprečnih profila iz geodetskog snimanja rijeke koje je provedeno 2012. godine. Profili su u navedenom snimanju mjereni svakih dvjestotinjak metara prateći tok rijeke. Snimanje je izvršeno pomoću GPS-CROPOS sustava mjerenja i tahimetrijskom metodom, a detaljni podaci o premjeru



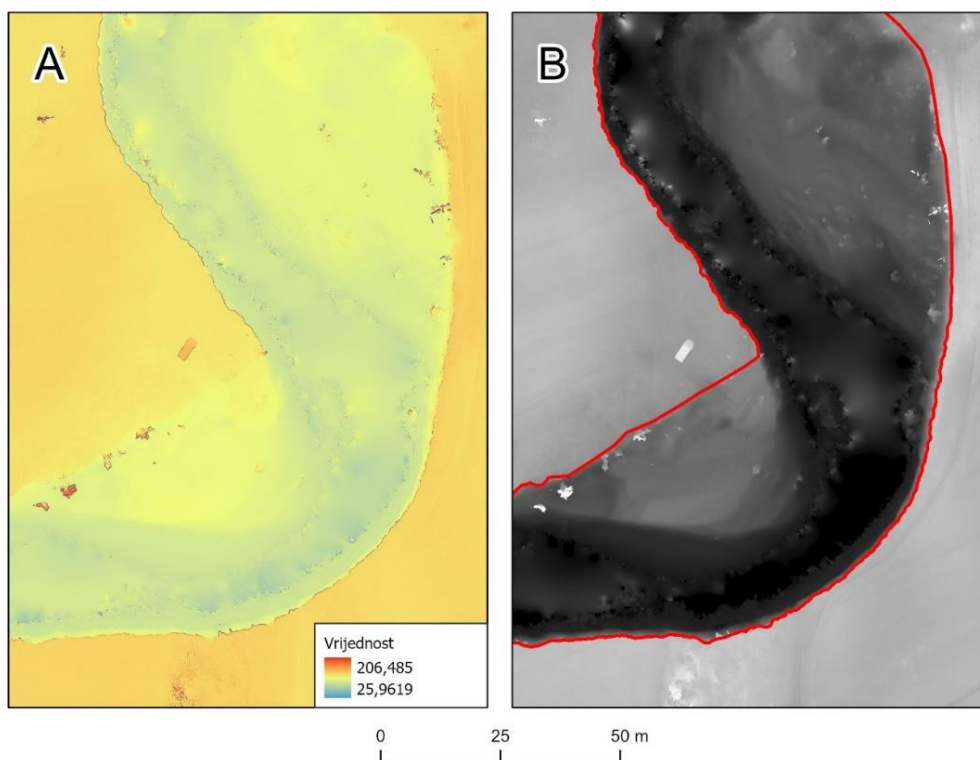
ustupljeni su od strane Hrvatskih voda. Mjerenje profila korita 2022. i/ili 2023. na istim lokacijama kao i 2012. omogućilo je usporedbu stanja razine dna korita u tom desetogodišnjem/jedanaestogodišnjem razdoblju. Međutim, s obzirom da su promjene korita na Orljavi vrlo dinamične, lokacije mnogih profila iz 2012. se danas nalaze na „suhom“, odnosno na naplavnoj ravnici. Prema tome, na svakoj lokaciji su po mogućnosti izmjerena još po tri profila, na početnoj i završnoj infleksijskoj točki postojećeg meandra, te na njegovoj sredini. Mjerenje profila na infleksijskim točkama omogućava procjenu nagiba korita u istraživanom meandru, a usporedba profila po njegovoj središnjoj osi omogućuje bolje razumijevanje procesa formiranja meandra i njegove evolucije kroz vrijeme. Potrebno je napomenuti da je prevelika dubina korita na nekim lokacijama onemogućila mjerenje svih planiranih profila. U slučajevima kada su mjerenja GNSS prijamnikom bila onemogućena radi otežanog pristupa koritu, poprečni profili su procijenjeni na temelju DSM modela dobivenih iz bespilotne letjelice. Dubina korita je u tim slučajevima procijenjena jedino na profilima gdje je rijeka dovoljno plitka da se vidi dno, odnosno na lokacijama Deževci i Boričevci.



Sl. 3.14. Prikupljanje točaka za terensku kontrolu (lijevo), mjerenje poprečnog profila korita (desno)

### 3.3.2. Vektorizacija i analiza morfoloških obilježja korita

Nakon obrade snimaka, morfološka obilježja korita su analizirana u ArcGIS Pro-u. Linije riječnih obala koje su prekrivene rijetkom, niskom vegetacijom vektorizirane su automatski primjenom *Laplacian edge detection* filtera (5x5) iz skupine *Convolution* funkcija u ArcPro-u. *Laplacian* filter primjenjuje Laplaceovu transformaciju na raster kako bi identificirao područja gdje se intenzitet svjetlosti brzo mijenja, što ukazuje na prisutnost rubova. Ovaj filter koristi drugu derivaciju intenziteta slike za naglašavanje rubova, pri čemu se nulte točke druge derivacije tretiraju kao rubovi (Sl. 3.15A). Rezultat je novi raster koji jasno prikazuje rubove objekata unutar originalnog rastera, olakšavajući daljnju analizu (Esri, 2018). Kako bi se automatizirao cjelokupni proces izdvajanja obalnih linija, uspostavljen je radni proces koji uključuje filtriranje, reklasifikaciju i prorjeđivanje rastera koristeći *Model Builder*. Međutim, vektorizaciju riječnih obala prekrivenih drvenastom vegetacijom nije bilo moguće provesti automatskim procesima jer vegetacija prekriva rubove obala. Pružanje tih obalnih linija procijenjeno je vizualno na temelju ortofota i DSM-a (što je bilo moguće s obzirom na to da su snimke snimane izvan glavnog vegetacijskog razdoblja) te je digitalizirano manualno.



Sl. 3.15. *Laplacian edge detection* filter primijenjen na DSM (A), DSM s vektoriziranim obalnim linijama (B)

Ostali geomorfološki fluvijalni oblici također su vektorizirani manualno: korito pod vodom, bočni i središnji prudovi, berme<sup>4</sup>, i strme obale. Na istraživanim lokacijama posebno su analizirane **stope bočne erozije**, koje su izražene kao:

- **Površina erodirane naplavne ravnice**, izračunata kao površina između dvije uzastopne obalne linije (Hooke i Yorke, 2010; Kiss i dr., 2013).
- **Povlačenje obale** (engl. *bank retreat*), prosječno i maksimalno, izračunato kao udaljenost između dvije uzastopne obalne linije na temelju okomito konstruiranih presjeka na početnu obalnu liniju (Kiss i dr., 2013; Rusnák i dr., 2019).

Kako bi se istražene lokacije i različita razdoblja između terenskih izlazaka međusobno usporedila, izračunate su relativne vrijednosti:

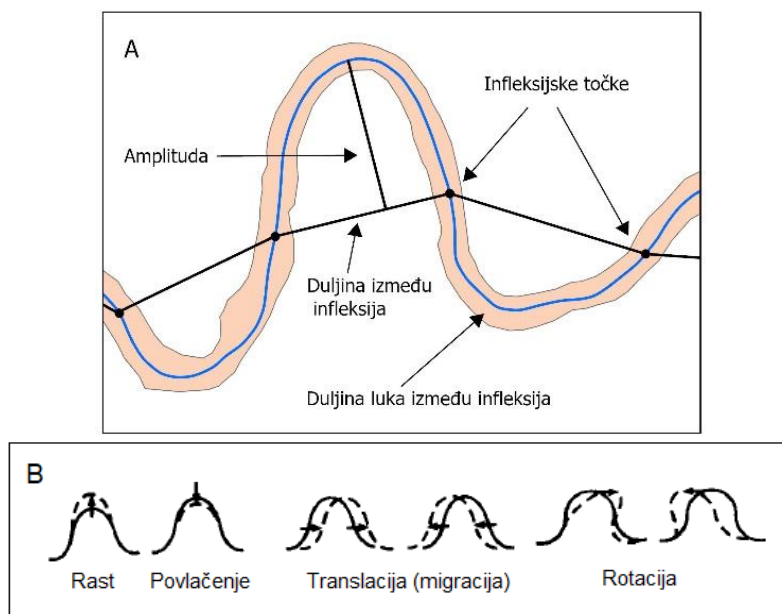
- **Prosječna mjesečna površina erozije naplavne ravnice** (površina erodirane naplavne ravnice podijeljena s brojem mjeseci između terenskim izlazaka).
- **Prosječno mjesečno povlačenje obalne linije** (prosječno povlačenje obale podijeljeno s brojem mjeseci između terenskim izlazaka). Budući da je u izračun prosječnog povlačenja obale već uzeta u obzir duljina erodirajuće obale, ovaj pokazatelj omogućuje izravnu usporedbu podataka između lokacija s različitim duljinama analiziranih obala.

Kako bi se analizirao odnos bočne erozije i morfometrijskih parametara meandara, za svaki meandar izmjerena je širina aktivnog korita, duljina luka između infleksija po crti sredine korita, duljina između infleksija i amplituda (Hooke i Yorke; Hooke, 2022). Također, indeks vijugavosti na meandru izračunat je kao omjer duljine luka između infleksijskih točaka po crti sredine korita i duljine između infleksijskih točaka (Sl. 3.16A). Tipovi razvoja meandra, nizvodna migracija (translacija), rast i rotacija, opisani su prema Hooke (1984) (Sl. 3.16B).

Osim podataka prikupljenih tijekom terenskih izlazaka 2021.-2024., za svaku lokaciju opisan je recentan razvoj korita od 2001. godine na temelju topografske karte TK25, aerofotogrametrijskih snimaka iz 2001., i digitalnih ortofota DGU iz razdoblja 2011. – 2021.

---

<sup>4</sup> (engl. *berm, bench*), akumulacijski fluvijalni oblik koji se razlikuje od prudova po relativno ravnoj površini koja je prekrivena vegetacijom, i strmim rubovima



Sl. 3.16. Morfometrijski pokazatelji na meandru (A), osnovni tipovi razvoja meandra prema Hooke (1984) (B)

Kako bi se utvrdili faktori morfoloških promjena istraživanih meandara, rezultati morfoloških analiza su uspoređeni s dostupnim hidrološkim podacima (maksimumi protoka) i hidromorfološkim obilježjima korita, poput prekrivenosti obala drvenastom vegetacijom, geometrijom korita (indeksom vijugavosti, širinom aktivnog korita), koja utječe na brzinu i turbulentnost toka, te ljudskim utjecajima. Treba napomenuti da su hidrološki podaci DHMZ-a u trenutku pisanja ovog rada bili dostupni za razdoblje do kraja 2022., što znači da detaljna interpretacija rezultata terenskih istraživanja za 2023. i 2024. godinu u vidu hidroloških obilježja nije bila moguća. Povezanost povlačenja obale s morfometrijskim pokazateljima (indeks vijugavosti, širina korita) je istražena Spearmanovim koeficijentom korelacije.

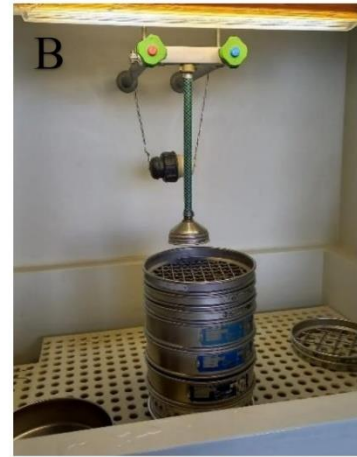
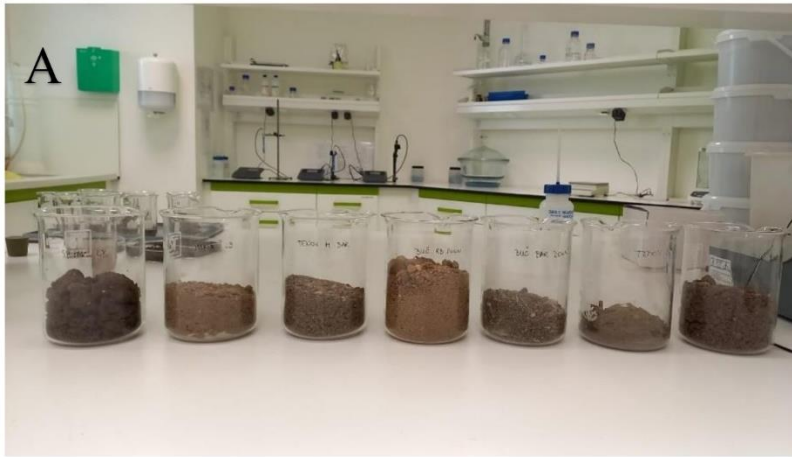
### 3.3.3. Granulometrijske analize sedimenta

Granulometrijski sastav sedimenta dna korita na lokacijama Deževci i Boričevci procijenjen je Wolmanovom methodom (Wolman, 1954), koja se često koristi za procjenu sastava sedimenta u šljunkovitim koritima (Fryirs i Brierley, 2013; Kidova i dr., 2021). Prema toj metodi, istraživač na temelju slučajno prikupljenog uzorka s terena (otprilike 100 zrna šljunka) mjerenjem kraće osi zrna procjenjuje medijalni promjer uzorka ( $D_{50}$ ). To je veličina zrna koja dijeli distribuciju na dva jednaka dijela prema masi. Zrna za uzorke prikupljena su uzduž šljunčanih prudova, kako bi se obuhvatili i uzvodni dijelovi pruda s krupnijim sedimentom i nizvodni dijelovi na kojima se u pravilu taloži sitniji sediment.

Sastav dna korita na drugim lokacijama, kao i struktura sedimenta obala, procijenjena je metodom mokrog sijanja. Uzorci sedimenta obala prikupljeni su na dijelu obale koji je u trenutku uzorkovanja najviše erodirao, a za sedimente dna uzduž pruda. Za svaku lokaciju prikupljen je jedan uzorak za sediment dna i jedan za sediment obale. S obzirom na prirodne varijacije u veličini sedimentnih čestica, jedan uzorak po lokaciji zasigurno nije dovoljan za potpunu karakterizaciju sedimentne strukture riječnog dna i obala. Ipak, cilj ovog uzorkovanja i analize bio je pružiti grubi pregled granulometrijskog sastava na odabranim lokacijama, ističući osnovne razlike u njihovim obilježjima.

Mokro sijanje uzoraka sedimenta provedeno je u laboratoriju Geografskog odsjeka na Sveučilištu u Beču. Postupak se sastojao od nekoliko koraka. Uzorci su prvo u potpunosti osušeni u pećnici u trajanju od 24 sata te su nakon toga izvagani na preciznoj vagi. Zatim je svakom od uzoraka dodana destilirana voda kako bi se slijepljene granule sedimenta razmočile i razdvojile. Potom je provedeno mokro sijanje pomoću sedam sita promjera otvora 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 630  $\mu$ m, 200  $\mu$ m, i 63  $\mu$ m u skladu s Wentworthovom klasifikacijom (1922) (tab. 3.8). Frakcije koje su ostajale na određenim sitima su nakon sijanja stavljene u zasebne posudice na sušenje (Sl. 3.17c). Osušene frakcije su nakon toga pojedinačno izvagane na preciznoj vagi. Masa silta i gline (frakcija manja od 0,063 mm) izračunata je oduzimanjem mase uzorka nakon prosijavanja od mase osušenog originalnog uzorka s terena.





Sl. 3.17. Uzorci s terena (A), mokro sito (B), prosijani uzorci (C)

Tab. 3.8. Tip sedimenta prema veličini zrna, modificirano prema Wentworth (1922)

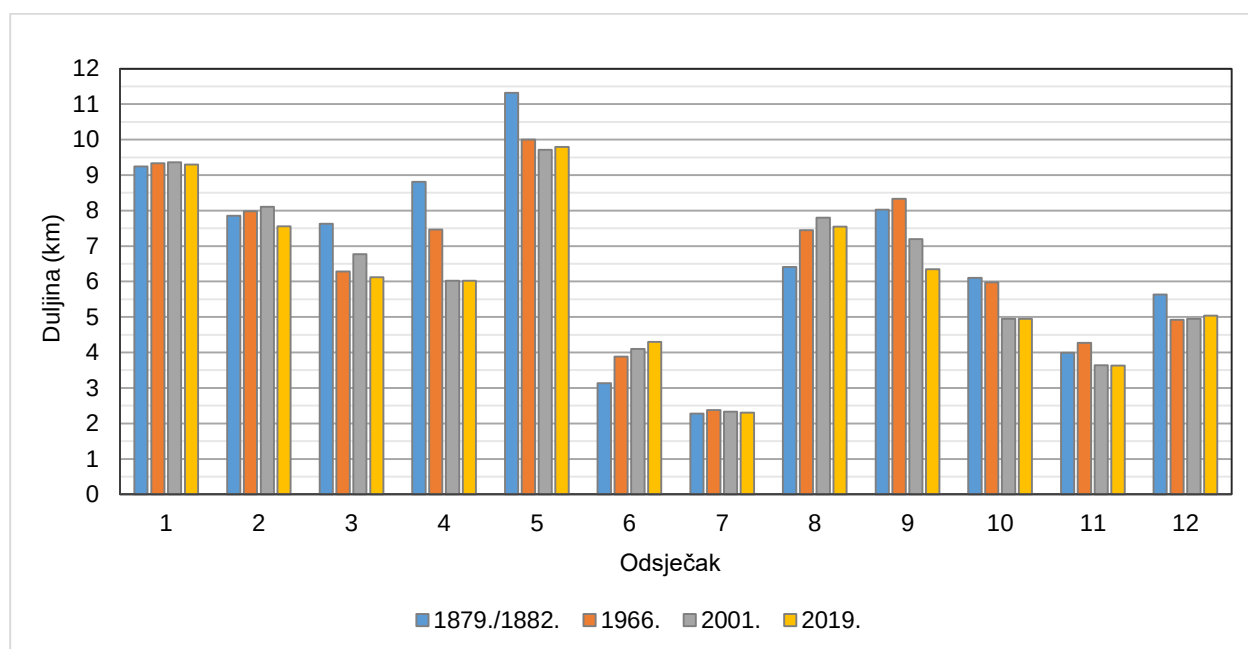
| Veličina zrna (mm) | Tip sedimenta          |
|--------------------|------------------------|
| 32-64              | Jako krupni šljunak    |
| 16-32              | Krupni šljunak         |
| 8-16               | Srednje krupni šljunak |
| 4-8                | Sitni šljunak          |
| 2-4                | Jako sitni šljunak     |
| 0,63-2             | Krupni pijesak         |
| 0,2-0,63           | Srednje krupni pijesak |
| 0,063-0,2          | Sitni pijesak          |
| < 0,063            | Silt i glina           |



## 4. REZULTATI

### 4.1. Promjene korita na razini cijelog toka u razdoblju 1879./1882. – 2019.

Od kraja 19. stoljeća do 2019. godine, na toku Orljave od ulaska u Požešku kotlinu (kod Vranića) do ušća u Savu zabilježene su značajne promjene u duljini toka i indeksu vijugavosti. Općenito, istraživani odsječci rijeke međusobno se razlikuju u duljini toka budući da su određeni na temelju hidromorfoloških kriterija (Sl. 4.1). Međutim, moguće je izdvojiti dva stabilna odsječka, 1 i 7, u kojima se duljina nije značajno mijenjala (tj. promjena je manja od 1 %). Od kraja 19. stoljeća do 2019., u odsječcima 6 i 8 zabilježene su pozitivne promjene, a u ostalim odsječcima negativne promjene u duljini toka.

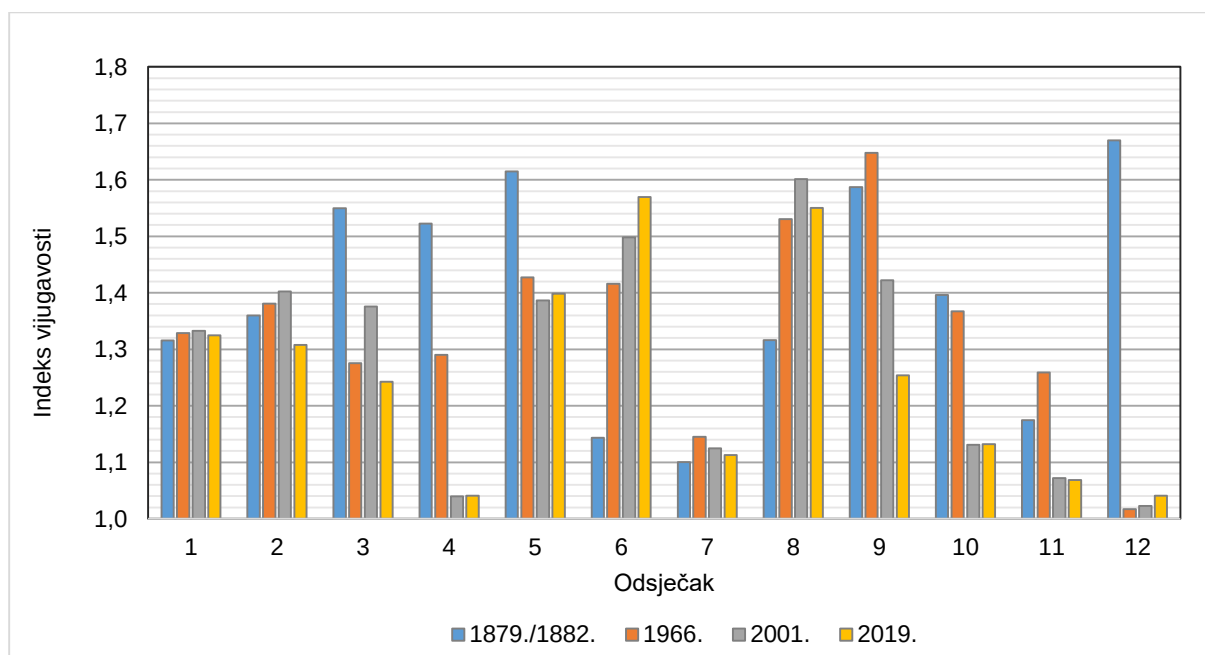


Sl. 4.1. Duljina toka Orljave po odsječcima u razdoblju od 1879./1882. do 2019.

Odsječke je međusobno prikladno usporediti pomoću vrijednosti indeksa vijugavosti (Sl. 4.2), koji predstavlja odnos duljine korita i duljine doline. Indeks vijugavosti općenito se koristi kao kriterij za određivanje morfološkog oblika korita rijeka. Ako je indeks veći od 1,05, rijeka je vijugava, a ako je veći od 1,5, ona je meandrirajućega oblika korita (Bertalan i dr., 2019; Rinaldi i dr., 2016). Prema tome, Orljava je krajem 19. stoljeća u odsječcima 1, 2, 6-8 te 10 i 11 imala vijugav oblik, a u odsječcima 3-5, 9 i 12 meandrirajući. Međutim, treba naglasiti da su već tijekom 19. stoljeća na rijeci postojali značajni ljudski utjecaji, poput mlinskih stepenica i lokalnog izravnivanja i preusmjeravanja toka, što znači da stanje krajem 19. stoljeća ne

predstavlja nenarušeno, prirodno stanje rijeke. Posebno nizak indeks vijugavosti zabilježen je u odsječcima 6 (1,14) i 7 (1,10), dok su za uzvodne i nizvodne odsječke zabilježene veće vrijednosti. Moguće je da su na odsječcima 6 i 7 već krajem 19. stoljeća bile provedene mjere izravnavanja korita. Toj pretpostavci pridonosi i činjenica da je na karti prve vojne izmjere s kraja 18. stoljeća (Arcanum maps, n.d.), koja je za potrebe ovog rada samo vizualno analizirana (odnosno nisu izvršena mjerenja), tok u tim odsječcima prikazan sličnog oblika kao i na karti treće vojne izmjere.

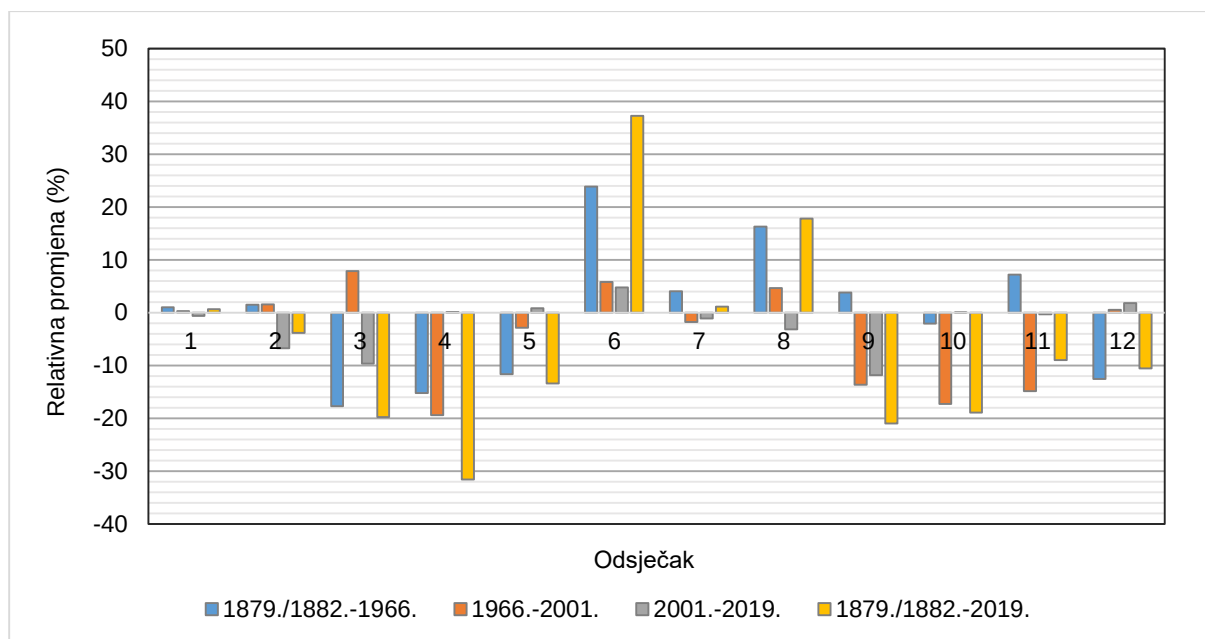
Najveći indeks vijugavosti krajem 19. stoljeća zabilježen je na najnižvodnijem odsječku 12 (1,67). Međutim, već na karti treće vojne izmjere vidljiva je izgradnja novog korita i kanala istočno od prirodnog toka, zbog čega je u sljedećoj mjernoj godini 1966. u tom odsječku izmjerena najmanja vrijednost indeksa vijugavosti (1,02). Najveći indeks vijugavosti 1966. godine zabilježen je u odsječku 9 (1,65), a 2001. i 2019. godine u odsječku 8 (1,60, 1,55). Najmanje vrijednosti 2001. i 2019. godine zabilježene su u kanaliziranim odsječcima 4 (1,04) i 12 (1,02, 1,04).



Sl. 4.2. Indeks vijugavosti toka Orljave po odsječcima u razdoblju od 1879./1882. do 2019.

Analizom relativnih promjena istraživanih pokazatelja u razdobljima između mjernih godina, u većini odsječaka zabilježeno je smanjenje duljine toka i indeksa vijugavosti (Sl. 4.3). Najveći intenzitet skraćivanja toka i smanjenja vijugavosti zabilježen je u odsječcima 3, 4 i 9. Odsječci 3 i 4 nalaze se na području grada Požege, te je na njima djelomično (3) ili potpuno (4) provedeno

izravnavanje i kanaliziranje toka do 1966. godine. Općenito najveće skraćenje toka zabilježeno je u odsječku 4: duljina toka 2019. godine bila je 31,6 % kraća u odnosu na stanje s kraja 19. stoljeća jer su presječeni mnogi meandri prilikom izravnavanja korita (Sl. 4.4). Na odsječcima 9 i 10 izravnavanjem korita tok je u razdoblju 1879./1882. – 2019. skraćen za oko 20 %, dok je u odsječcima 11 i 12 tok skraćen za oko 10 %.



Sl. 4.3. Relativne promjene u duljini i indeksu vijugavosti toka Orljave po odsječcima u razdoblju od 1879./1882. do 2019.

Pozitivne promjene u ukupnom razdoblju istraživanja 1879./1882. – 2019. zabilježene su u odsječcima 6 i 8. Najveći porast u duljini i indeksu vijugavosti u ovim odsječcima zabilježen je u prvom razdoblju istraživanja 1879./1882.-1966. Do navedenog porasta vjerojatno je došlo oporavkom morfologije rijeke nakon izravnavanja korita, odnosno ponovnim razvojem meandara. Međutim, također je moguće da je rijeka u odsječku 6 zaista prirodno bila manje vijugava. Nagib rijeke ovdje je promijenjen radi brane male hidroelektrane u Pleternici, koja je izgrađena 1926. godine. Moguće je da je rijeka počela više vijugati radi smanjenja nagiba nakon izgradnje brane na nizvodnoj granici odsječka, kojom je podignuta razina dna korita (lokalna erozijska baza).

U odsječcima 1 i 7 niti u jednom razdoblju nisu zabilježene značajne promjene, odnosno promjene veće od 5 %. Navedeni odsječci su po karakteru vrlo različiti: odsječak 1 predstavlja tok rijeke u relativno prirodnom stanju, bez provedenih većih hidrotehničkih mjera poput kanaliziranja toka. Njemu možemo nadodati i nizvodni odsječak 2, u kojem su ljudski utjecaji

također slabiji, a zabilježene promjene u razdoblju 1879./1882. – 2019. su manje od 5 %. S druge strane, odsječak 7 je potpuno kanaliziran, vjerojatno već od kraja 18. stoljeća jer protječe područjem grada Pleternice. Kanaliziranje toka onemogućuje bočno kretanje rijeke, što je razlog stabilnosti ovog odsjeka.

Ako gledamo ukupno, duljina Orljave se u srednjem i donjem toku (analizirani odsječci 1-12) u razdoblju 1879./1882. – 2019. smanjila za 9,3 %. Glavni razlog tomu je kanaliziranje i izravnavanje toka rijeke na području grada Požege i najnižvodnijeg dijela toka prije ušća u Savu. Godine 2019. oko 30 % srednjeg i donjeg toka rijeke bilo je kanalizirano.



Sl. 4.4. Kanaliziranje korita na području Požege, usporedba pružanja korita 1879. i 2001. Kartografska podloga: treća vojna izmjera 1879., list 5859-4; topografska karta u mjerilu 1:25000, list Požega, izvornik iz 2001.

## 4.2. Potencijalna i specifična osjetljivost odsječaka rijeke

Odsječci rijeke Orljave klasificirani su u tri osnovne kategorije potencijalne i specifične osjetljivosti u skladu s njihovim hidromorfološkim obilježjima i izmjerenim stopama bočnog kretanja u razdoblju 2001. – 2019. U nisko osjetljive odsječke ( $N_k$ ) ubrojeni su svi u potpunosti ili pretežno kanalizirani odsječci: 3 i 4 na području grada Požege, 7 kod Pleternice, i 10, 11 i 12 u donjem toku rijeke (Tab. 4.1). Na tim odsječcima su prethodno zabilježene negativne promjene u duljini toka i indeksu vijugavosti od kraja 19. stoljeća. Na odsječcima 4, 7, 11 i 12 također su zabilježene niske stope bočnog kretanja u razdoblju 2001. – 2019., niže od 0,2 m/god (Sl. 4.5), što je očekivano s obzirom da je kanaliziranjem toka bočno kretanje korita umjetno onemogućeno. Prema tome, ti su odsječci klasificirani kao specifično nisko osjetljivi (I).

Tab. 4.1. Klasifikacija potencijalne i specifične osjetljivosti odsječaka rijeke Orljave

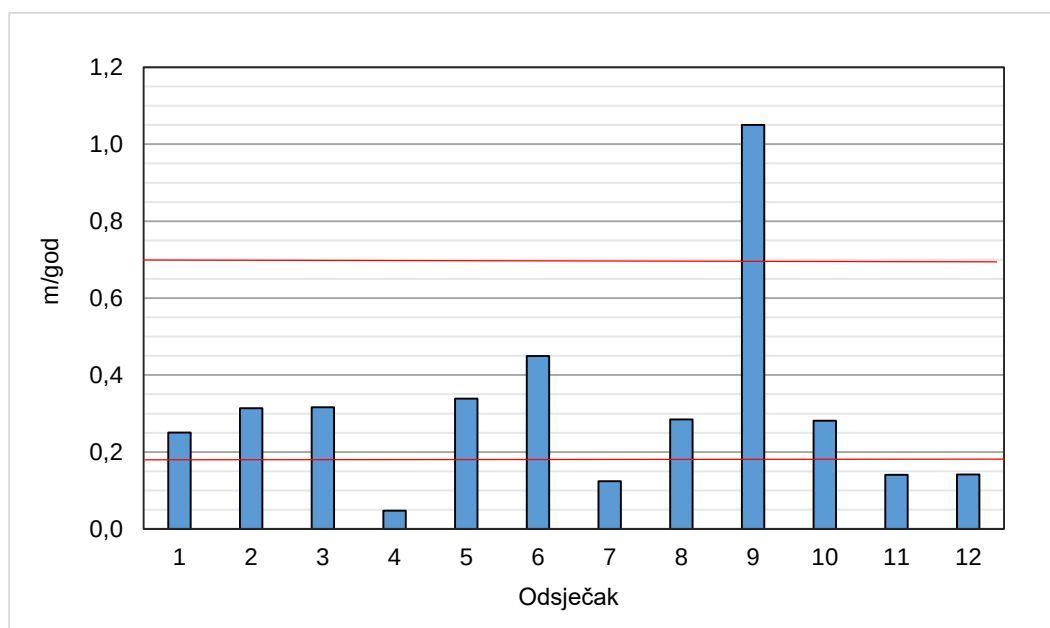
| Odsječak | Potencijalna osjetljivost | Specifična osjetljivost |
|----------|---------------------------|-------------------------|
| 1        | V                         | II                      |
| 2        | V                         | II                      |
| 3        | $N_k$                     | II                      |
| 4        | $N_k$                     | I                       |
| 5        | U                         | II                      |
| 6        | U                         | II                      |
| 7        | $N_k$                     | I                       |
| 8        | U                         | II                      |
| 9        | U                         | III                     |
| 10       | $N_k$                     | II                      |
| 11       | $N_k$                     | I                       |
| 12       | $N_k$                     | I                       |

Kao potencijalno umjereno osjetljivi (U) klasificirani su odsječci 5, 6, 8 i 9. U tim odsječcima rijeka je vijugavog do meandrirajućeg tipa korita, nagiba manjeg od 0,2 % te bočno neograničena (izuzev nasipa u odsječcima 8 i 9). U svim navedenim odsječcima osim 9, specifična osjetljivost također je procijenjena kao umjerena na temelju izmjerenih stopa bočnog kretanja od 0,28 do 0,45 m/god (Sl. 4.5). Međutim, odsječak 9 ističe se veličinom stope bočnog kretanja od 1,05 m/god, što je više nego tri puta više od prosjeka svih odsječaka (0,31 m/god).



Zbog toga je odsječak 9 klasificiran kao specifično vrlo osjetljiv (III). Uzroci visoke specifične osjetljivosti odsjeka 9 u usporedbi s odsječkom 8 istraženi su u idućem poglavlju 4.3. Razlog iznadprosječnih stopa bočnog kretanja u odsječcima 6 i 9 vjerojatno leži u antropogenom uklanjanju priobalne vegetacije u sklopu mjera zaštite od poplava tijekom i nakon 2011. godine.

Odsjeci 1 i 2 klasificirani su kao potencijalno visoko osjetljivi (V) zbog morfoloških obilježja korita koje je u tom dijelu toka u prijelaznom tipu između isprepletenog i meandrirajućeg. Taj tip korita općenito obilježavaju dinamične promjene u geometriji i pružanju korita, uključujući bočno kretanje i promjene u širini, stvaranje novih rukavaca probijanjem obala, te razvoj središnjih i bočnih prudova, zbog čega se taj tip korita u literaturi klasificira kao potencijalno visoko osjetljiv (Reid i Brierley, 2015; Rinaldi i dr., 2016). Međutim, specifična osjetljivost ovih odsjeka na temelju izmjerenih stopa bočnog kretanja procijenjena je kao umjerena (II, 0,25-0,31 m/god), te je čak blago ispodprosječna. Razlog umjerenog bočnog kretanja u ovim odsječcima rijeke može biti postojanje većinom kontinuiranog pojasa riparijske vegetacije i općenito manjih ljudskih utjecaja (Tab. 3.2).



Sl. 4.5. Stope bočnog kretanja odsjeka rijeke u razdoblju 2001. – 2019. Crvene linije predstavljaju prirodne prekide u podacima.

### **4.3. Promjene zemljišnog pokrova i morfologije korita u razdoblju 1966. – 2021. (odsječci na potezu Frkljevci – Čosin mlin)**

#### **4.3.1. Procjena točnosti klasifikacije zemljišnog pokrova**

Prema kriterijima koje je usvojio Anderson (1976), ukupna točnost klasifikacije zemljišnog pokrova pokazala se vrlo dobrom (preko 85 %) za sve godine osim za 2014. (Tab. 4.2). Najveća ukupna točnost (OA) procijenjena je za 2021. (92,94 %), a vrijednosti kappa koeficijenta kreću se od 0,66 (2014.) do 0,88 (2019.). Općenito, vrijednosti kappa koeficijenta veće od 0,6 smatraju se dobrom točnosti klasifikacije, a vrijednosti veće od 0,8 vrlo dobrom točnosti (Story i Congalton, 1986). Oba korištena algoritma strojnog učenja, RF i SVM, uspješno su klasificirali zemljišni pokrov na istraženom području, s malim razlikama u ukupnoj točnosti (1-3 %). Klase voda i golo tlo općenito su se pokazale kao najtočnije, s najvećim vrijednostima F1 mjere, koje se većinom kreću oko 90 %. Klasa voda uglavnom je imala veću proizvodnu točnost od korisničke, što znači da je površina vode u vrlo maloj mjeri precijenjena jer su druge klase, pogotovo rijetka vegetacija i sjene, u nekim slučajevima klasificirane kao voda. Međutim, budući da su svi pokazatelji točnosti za vodu vrlo visoki (>80 %), te greške se mogu smatrati zanemarivima.

U 2014., niža korisnička točnost klase vode (80 %) zabilježena je zbog klasifikacije mokrih travnjaka prekrivenih rijetkom vegetacijom u vodu. Međutim, ta područja leže izvan istraživanog riječnog koridora u kojem je provedena analiza promjena zemljišnog pokrova. Nadalje, niža ukupna točnost za 2014. (75,65 %) uglavnom je posljedica zabune između klase guste i rijetke vegetacije. Stoga rezultate za vegetacijske klase u 2014. treba uzeti s oprezom. Proizvodna točnost guste vegetacije procijenjena je na 55,67 %, a korisnička točnost rijetke vegetacije na 63,16 %, što znači da je površina guste vegetacije vjerojatno podcijenjena u odnosu na rijetku vegetaciju (tj. da je gusta vegetacija dijelom pogrešno klasificirana kao rijetka vegetacija).

Općenito, u godinama 2011., 2017., 2019. i 2021. rijetka vegetacija i riječni sedimenti pokazali su najmanju točnost, odnosno najniže vrijednosti F1 mjere. Rijetka vegetacija uglavnom se brkala s gustom vegetacijom i sjenama, dok su riječni sedimenti zamijenjeni s rijetkom vegetacijom. U 2021. godini, koja je pokazala najbolje ukupne rezultate, klasa sjene zabilježila je najnižu ocjenu F1 u odnosu na prethodne proučavane godine (79,41, Tab. 4.2). To može biti zbog doba dana kada su snimke snimljene, karakteristika piksela objekata sjena i općenite



strukture analiziranog zemljišnog pokrova. Vizualna procjena pokazala je da se sjene uglavnom brkaju s gustom vegetacijom (npr. sjene grmlja na drugom grmlju), što ovu pogrešku čini zanemarivom.

Tab. 4.2. Procjena točnosti klasifikacije zemljišnog pokrova

| Klasa zemljišnog pokrova |        |        |                   |          |                     |                  |       |        |      |           |
|--------------------------|--------|--------|-------------------|----------|---------------------|------------------|-------|--------|------|-----------|
| Godina                   |        | Voda   | Riječni sedimenti | Golo tlo | Rijetka vegetacija. | Gusta vegetacija | Sjene | OA (%) | K    | Algoritam |
| 2011.                    | PA (%) | 96,30  | *                 | 93,67    | 90,32               | 75,59            | 92,31 | 85,20  | 0,79 | RF        |
|                          | UA (%) | 83,87  | *                 | 92,50    | 72,54               | 96,99            | 80,00 |        |      |           |
|                          | F1 (%) | 89,65  | *                 | 93,08    | 80,46               | 84,96            | 85,71 |        |      |           |
| 2014.                    | PA (%) | 96,55  | 87,50             | 76,92    | 93,41               | 55,67            | 80,00 | 75,65  | 0,66 | RF        |
|                          | UA (%) | 80,00  | 87,50             | 76,92    | 63,16               | 91,13            | 90,57 |        |      |           |
|                          | F1 (%) | 87,50  | 87,50             | 76,92    | 75,36               | 69,11            | 84,96 |        |      |           |
| 2017.                    | PA (%) | 97,56  | 84,21             | 82,61    | 84,98               | 88,55            | 77,94 | 86,63  | 0,79 | SVM       |
|                          | UA (%) | 85,11  | 80,00             | 92,68    | 79,20               | 89,69            | 98,15 |        |      |           |
|                          | F1 (%) | 90,91  | 82,05             | 87,36    | 81,99               | 89,12            | 86,89 |        |      |           |
| 2019.                    | PA (%) | 95,83  | 79,17             | 88,89    | 89,82               | 89,45            | 80,30 | 88,33  | 0,84 | SVM       |
|                          | UA (%) | 88,46  | 90,48             | 96,55    | 79,79               | 91,60            | 92,98 |        |      |           |
|                          | F1 (%) | 92,00  | 84,44             | 92,56    | 84,51               | 90,51            | 86,18 |        |      |           |
| 2021.                    | PA (%) | 92,59  | 92,86             | 97,73    | 90,67               | 95,82            | 69,23 | 92,94  | 0,88 | RF        |
|                          | UA (%) | 100,00 | 92,86             | 95,56    | 80,95               | 95,21            | 93,10 |        |      |           |
|                          | F1 (%) | 96,15  | 92,86             | 96,63    | 85,53               | 95,51            | 79,41 |        |      |           |

Kratice: OA – overall accuracy, K – Kappa koeficijent, F1 – F1 mjera; PA – producer's accuracy; UA – user's accuracy.

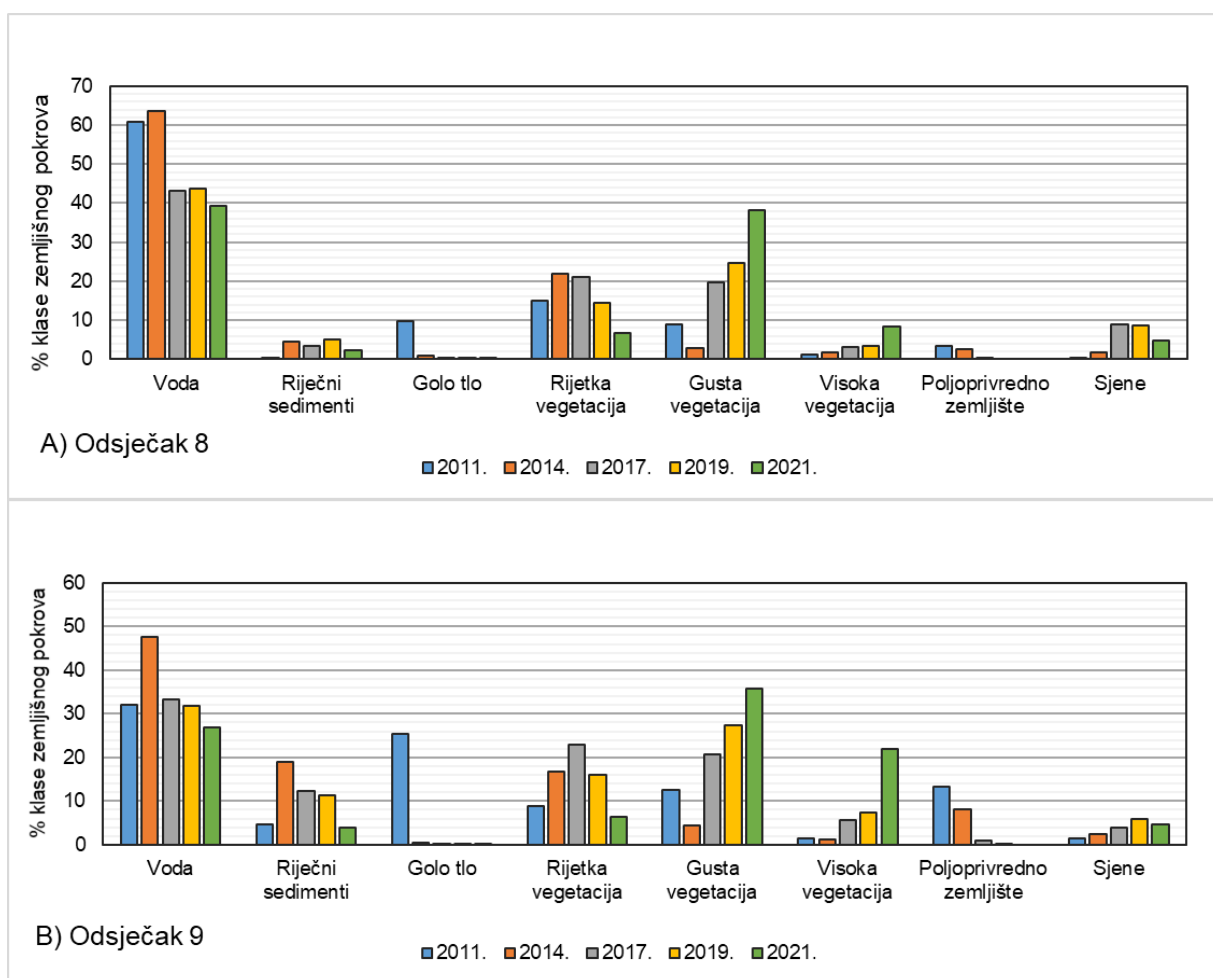
\* ručno vektorizirano 2011.

#### 4.3.2. Promjene u zemljišnom pokrovu riječnog koridora (2011. – 2021.)

Na oba analizirana odsječka voda je uglavnom bila prevladavajuća klasa (Sl. 4.6). Udio površine vode u riječnom koridoru bio je posebno visok u odsječku 8 uzvodno od mlinске stepenice u razdoblju 2011. – 2014. (61-64 %). U 2011. godini, kada je uklonjena priobalna vegetacija, značajna količina riječnog koridora bila je prekrivena golim tlom, posebno na odsječku 9 (25 %), dok je rijetka vegetacija zauzimala više površine od golog tla u odsječku 8 (15 %). Uklanjanje vegetacije vjerojatno je provedeno u fazama, počevši od uzvodnog dijela, tako da se do datuma snimanja u odsječku 8 vjerojatno uspjela razviti rijetka vegetacija na obalama rijeke.

U 2014. godini zabilježeno je povećanje površine klasa vode i riječnih sedimenata u oba odsječka, dok je smanjenje golog tla iznosilo više od 90 % (Sl. 4.6). Povećanje površina pod

vodom u odsječku 9 iznosilo je 48 %, a površine pod riječnim sedimentima narasle su skoro četiri puta. S druge strane, površine pod gustom vegetacijom su se više nego upola smanjile u odnosu na stanje iz 2011. na oba odsječka. Na aluvijalnom grafu koji prikazuje prijelaze između klasa zemljišnog pokrova između 2011. i 2014. godine (slike Sl. 4.7A i Sl. 4.7E), moguće je pratiti navedene promjene. U odsječku 9 njihova magnituda bila je veća; dominantna promjena bila je pretvaranje golog tla u vodu (Sl. 4.7E). Konkretno, 60 % područja pod vodom u 2014. godini nastalo je erozijom klasa naplavne ravnice iz 2011. (prvenstveno golog tla, poljoprivrednog zemljišta, rijetke i guste vegetacije). S druge strane, odsječak 8 bio je stabilniji s obzirom na promjene u klasi vode (zabilježeno je blago povećanje od 3 %).



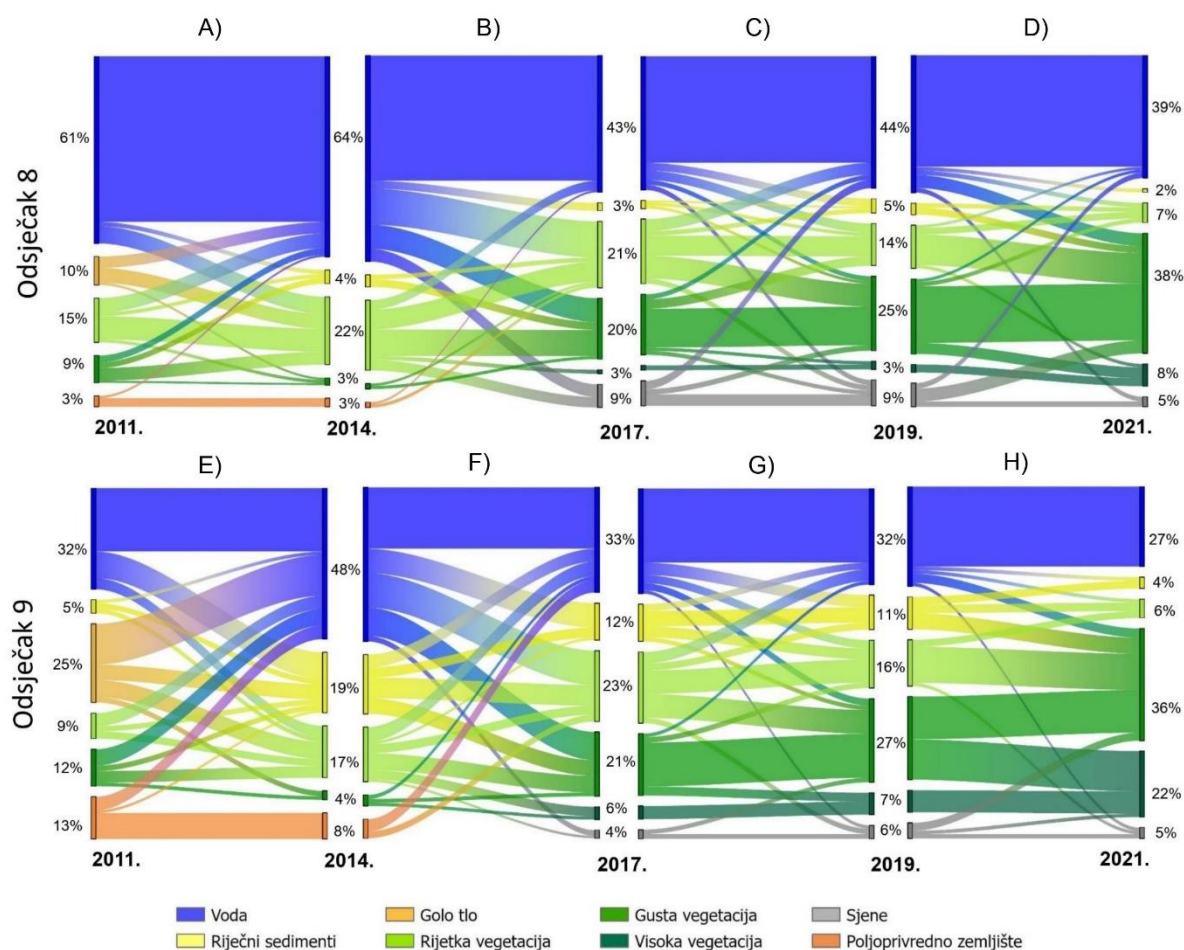
Sl. 4.6. Površinski udjeli klasa zemljišnog pokrova u riječnom koridoru u odsječku 8 (A) i odsječku 9 (B)

Navedene promjene moguće je prostorno analizirati na odabranim isječcima karata zemljišnog pokrova iz istraživanih godina (Sl. 4.8). Na odsječku 9 u 2014. godini, vidi se značajno proširenje aktivnog korita u odnosu na 2011. Površine pod vodom su se povećale, a sediment s erodiranih riječnih obala ušao je riječni u sustav i akumulirao se u koritu tvoreći velike

fluvijalne prudove (Sl. 4.8B – 2014.). Osim lokalno isprepletenih dijelova korita, koje karakterizira pojava središnjih prudova, morfološki oblik korita ostao je vijugav do meandrirajući (kao i u 2011.). Međutim, uočena je nizvodna migracija meandra. S druge strane, odsječak 8 ostao je morfološki stabilniji; pružanje korita se nije značajno mijenjalo, niti su uočeni prostrani prudovi.

Tijekom razdoblja 2014. – 2017. promjene zemljišnog pokrova primijećene su na 74,5 % cijelog riječnog koridora: to je dakle najdinamičnije proučavano razdoblje (Tab. A5, prilozi). Površina aktivnog korita (vode i riječnih sedimenata) smanjila se za oko 30 %, te je višestruko povećana površina guste i visoke vegetacije (Sl. 4.6). Prema tome, dominantne promjene zemljišnog pokrova u oba odsječka bili su prijelazi iz vode u rijetku ili gustu vegetaciju, i iz rijetke u gustu ili visoku vegetaciju, što ukazuje na općeniti rast vegetacije u riječnom koridoru u ovom razdoblju (Sl. 4.7B i 4.7F). Važno je napomenuti da su zbog niže točnosti vegetacijskih klasa u 2014. (osobito u vidu podcjenjivanja površine guste vegetacije) ove promjene vegetacijskog pokrova možda procijenjene kao intenzivnije nego što su uistinu bile. Međutim, procijenjeni postotci promjena zasigurno odražavaju postojeće trendove, budući da su nesigurnosti klasifikacije mnogo niže od veličine procijenjenih promjena u zemljišnom pokrovu.

Također, analizom karata iz 2014. i 2017. mogu se uočiti procesi migracije i sužavanja korita, pogotovo u odsječku 9: područje korita pod vodom iz 2014. većim se dijelom ispunilo sedimentom i stabiliziralo rastom vegetacije (Sl. 4.8). Fluvijalni prudovi migrirali su nizvodno, i iako su još uvijek prostrani, djelomično su stabilizirani rastom vegetacije, što znači da se područje prudova bez vegetacije (klasa riječnog sedimenta) smanjilo. Više od 30 % površine korita pod vodom u 2017. nastalo je erozijom klasa naplavne ravnice i korita, uglavnom rijetke vegetacije, poljoprivrednog zemljišta i riječnih sedimenata. Sužavanje korita bilo je posebno intenzivno u odsječku 8: površine pod vodom smanjile su se s 64 % površine 2014. na 43 % površine 2017., što vjerojatno ukazuje na nestanak ujezerenja nakon probijanja mlinске stepenice na nizvodnom kraju odsječka 2016. godine.

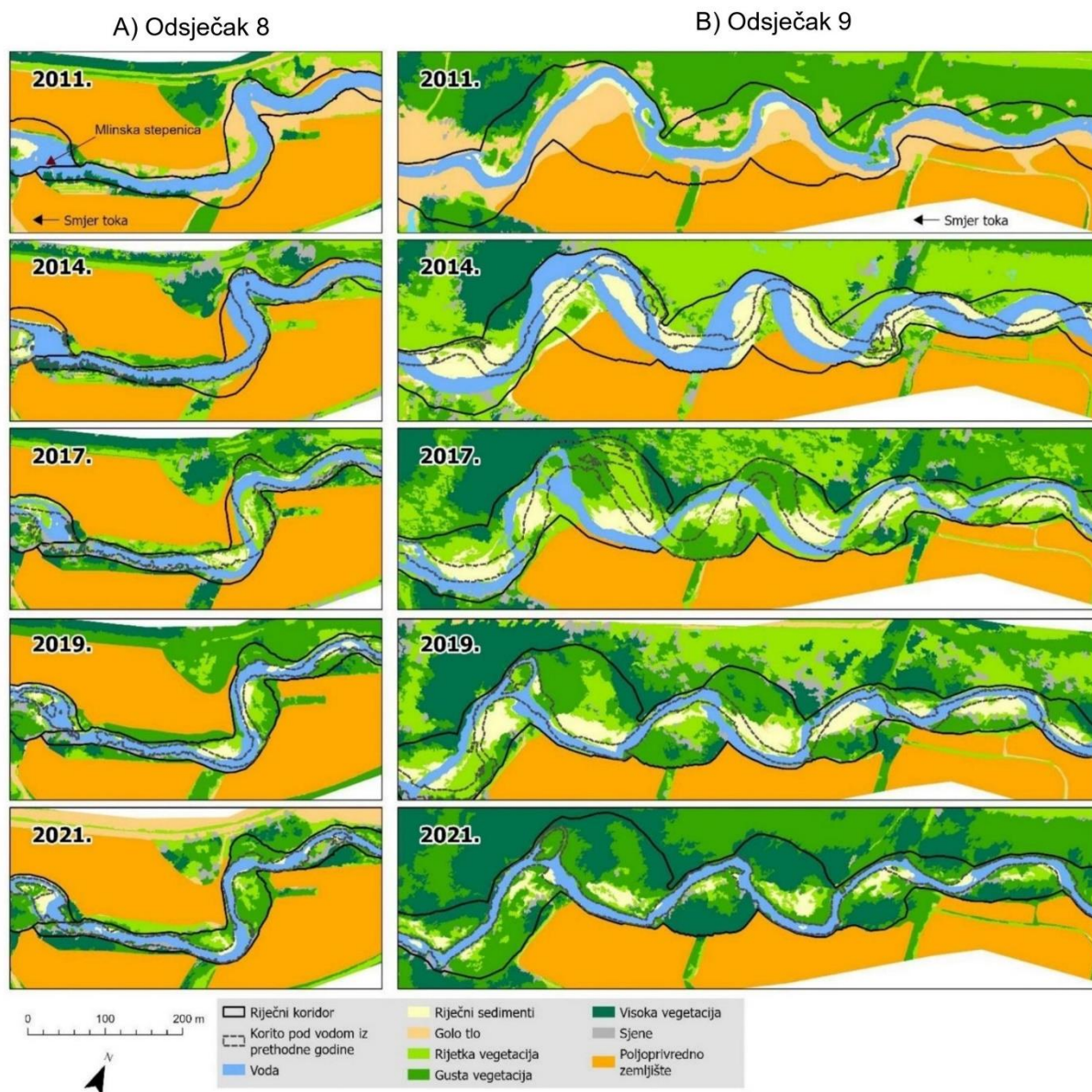


Sl. 4.7. Prijelazi između klasa zemljišnog pokrova u odsječku 8 (A-D) i 9 (E-H) između proučavanih godina (debljina veza odnosi se na količinu promjene, a postoci predstavljaju udjele klasa zemljišnog pokrova u određenoj godini; manje promjene između klasa isključene su iz dijagrama radi jasnoće prikaza)

U razdoblju 2017. – 2019. zabilježen je daljnji porast guste i visoke vegetacije, iako manji nego u prethodnom razdoblju (Sl. 4.6). Promjena pokrova je primijećena u 43 % riječnog koridora (Tab. A5, prilozi), a uglavnom se sastojala od prijelaza iz rijetke u gustu vegetaciju u oba odsjeka (Sl. 4.7C i Sl. 4.7G). Međutim, područja vegetacijskih klasa zapravo su bila najstabilnija u ovom razdoblju. Površine pod vodom također se nisu značajno mijenjale. S druge strane, povećanje od 52 % u površini riječnih sedimenata zabilježeno je u odsječku 8, uglavnom uzvodno od mlinske stepenice koja je probijena 2016. (Sl. 4.8A). Iako je taj porast značajan ako se gleda klasa kao takva, riječni sedimenti u odsječku 8 su kroz istraživana razdoblja općenito zauzimali vrlo mali dio površine riječnog koridora (najviše 5 %, procijenjen upravo za 2019.). S druge strane, u odsječku 9 površina riječnih sedimenata se 2019. neznatno smanjila.



Migracija korita nizvodno može se pratiti na isječcima karata (Sl. 4.8B), iako nije više tako značajna kao u prethodnom razdoblju.



Sl. 4.8. Promjene u zemljišnom pokrovu u koridoru rijeke Orłave u A) odsječku 1 i B) odsječku 2 (pokazni isječci označeni na Sl. 3.4)

Značajna druga faza rasta vegetacije može se pratiti u posljednjem proučavanom razdoblju, 2019. – 2021. Dominantni prijelazi zemljišnog pokrova u oba odsječka bili su iz rijetke u gustu vegetaciju, te iz guste u visoku vegetaciju (Tab. A5, Sl. 4.7D i Sl. 4.7G). U odsječku 9 gusta vegetacija postala je dominantna klasa u riječnom koridoru, premašujući površine pod vodom. Površina visoke vegetacije također se višestruko povećala (Sl. 4.6B). Nadalje, površina riječnih sedimenata smanjila se za 56-66 %, uglavnom prelaskom u rijetku i gustu vegetaciju. S druge

strane, više od 90 % površine pod vodom nije se promijenilo ni u jednu drugu klasu, što ukazuje na smanjenje migracije korita i njegovu stabilizaciju koja je potpomognuta rastom vegetacije na prudovima i riječnim obalama.

Promatrajući cijelo istraživano razdoblje 2011. – 2021. u oba odsječka, površine pod vodom smanjile su se za 26 %, poljoprivredne površine su potpuno nestale (s 4,71 ha u 2011. na 0 ha u 2021.), dok se površina guste vegetacije povećala 3,3 puta.

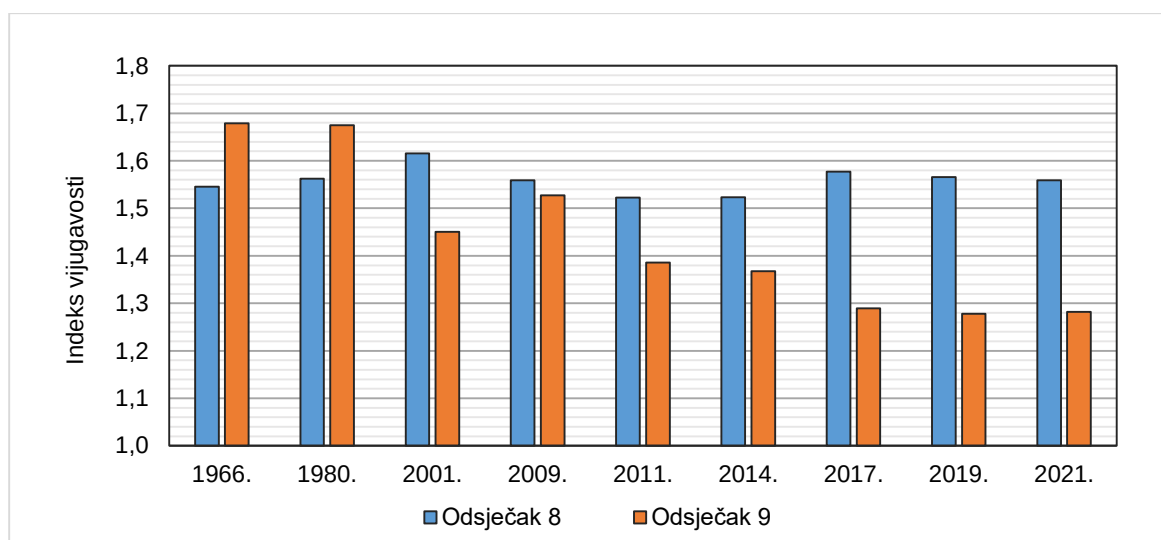
#### 4.3.3. Promjene u morfološkim obilježjima korita (1966. – 2021.)

Rezultati za analizirana geomorfološka obilježja korita (duljina, indeks vijugavosti, duljina presječenih meandara, širina aktivnog korita, stopa bočnog kretanja korita, površine područja erozije i taloženja te udio drvenaste vegetacije na obalama) prikazani su za dva istraživana odsječka i proučavane godine (1966., 1980., 2001., 2009., 2011., 2014., 2017., 2019., 2021.) ili međurazdoblja.

Indeks vijugavosti u proučavanom dijelu Orljave bio je najveći (1,68) 1966. i 1980. godine na odsječku 9, što odgovara meandrirajućem tipu korita (Sl. 4.9). Nakon 1980. godine, zbog hidrotehničkih mjera – presijecanja meandara, vijugavost rijeke se smanjila: 2021. godine bila je gotovo 25 % manja nego 1966. (1,28). Indeks vijugavosti odsječka 8 ostao je stabilniji tijekom proučavanih godina (1,52-1,62) jer duljina presječenih meandara nije bila tako velika kao u odsječku 9 (Tab. 4.3).

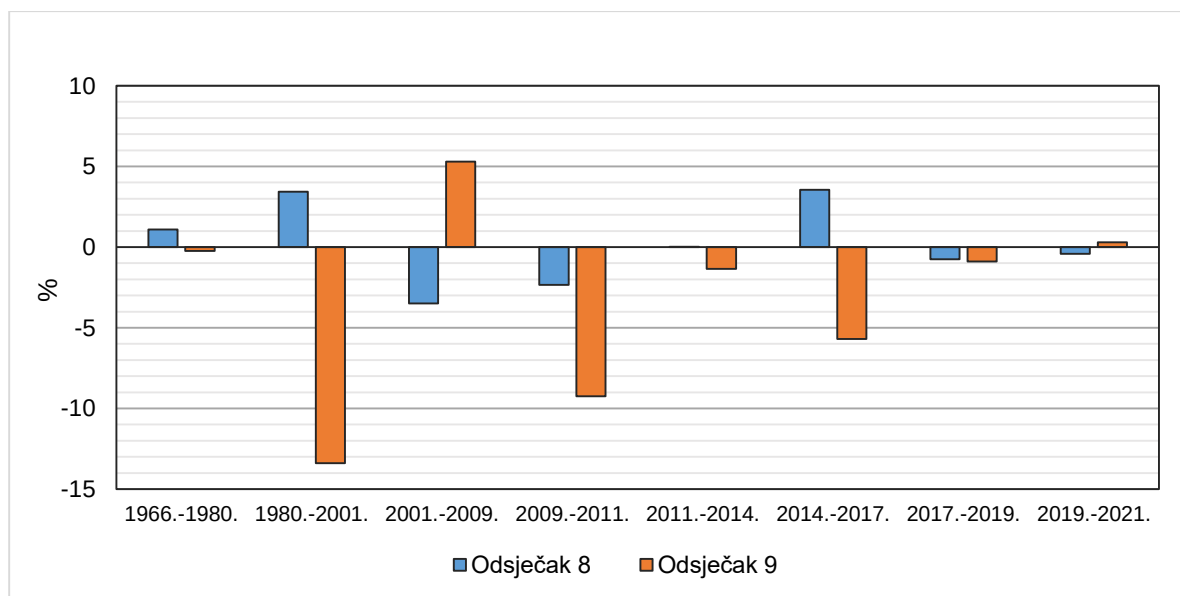
Tab. 4.3. Duljina korita, duljina presječenih meandara i indeks vijugavosti odsječaka 8 i 9

| Godina | Duljina korita (m) |            | Duljina presječenih meandara (m) |            | Indeks vijugavosti |            |
|--------|--------------------|------------|----------------------------------|------------|--------------------|------------|
|        | Odsječak 8         | Odsječak 9 | Odsječak 8                       | Odsječak 9 | Odsječak 8         | Odsječak 9 |
| 1966.  | 7450               | 8335       |                                  |            | 1,55               | 1,68       |
| 1980.  | 7531               | 8315       |                                  |            | 1,56               | 1,67       |
| 2001.  | 7790               | 7201       |                                  | 2117       | 1,62               | 1,45       |
| 2009.  | 7518               | 7582       |                                  |            | 1,56               | 1,53       |
| 2011.  | 7342               | 6881       | 1091                             | 512        | 1,52               | 1,39       |
| 2014.  | 7344               | 6788       |                                  |            | 1,52               | 1,37       |
| 2017.  | 7605               | 6402       |                                  | 611        | 1,58               | 1,29       |
| 2019.  | 7548               | 6344       |                                  |            | 1,57               | 1,28       |
| 2021.  | 7517               | 6364       |                                  |            | 1,56               | 1,28       |



Sl. 4.9. Indeks vijugavosti

Na slici Sl. 4.10 moguće je pratiti razdoblja u kojima se duljina korita i vijugavost rijeke najviše mijenjala. Sva značajna smanjenja duljine uglavnom su posljedica antropogenih presijecanja meandara. Za odsječak 8 smanjenje duljine i vijugavosti zabilježeno je u razdobljima 2001. – 2009. i 2009. – 2011., a za odsječak 9 u razdobljima 1980. – 2001., 2001. – 2011. i 2014. – 2017.

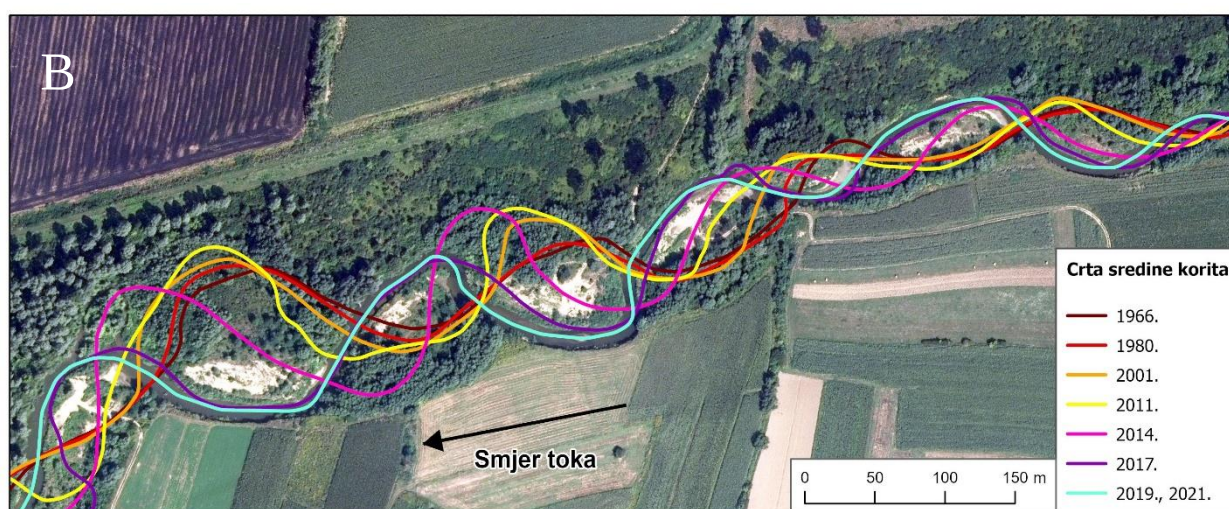
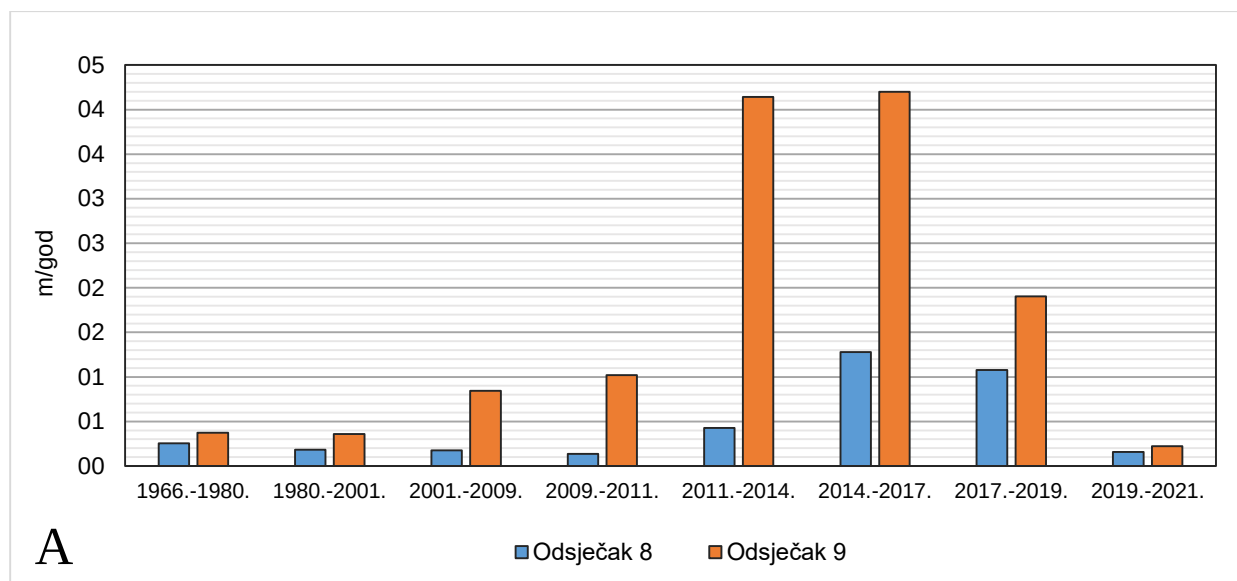


Sl. 4.10. Relativna razlika u duljini korita i indeksu vijugavosti u promatranim razdobljima

Stope bočnog kretanja korita općenito su bile niske od 1966. do 2011., uglavnom manje od 1 m godišnje u oba odsječka (Sl. 4.11A). Međutim, u razdoblju 2011. – 2014. u odsječku 9, stope su značajno porasle na više od 4 m godišnje (Sl. 4.11B). U idućem razdoblju 2014. – 2017.,



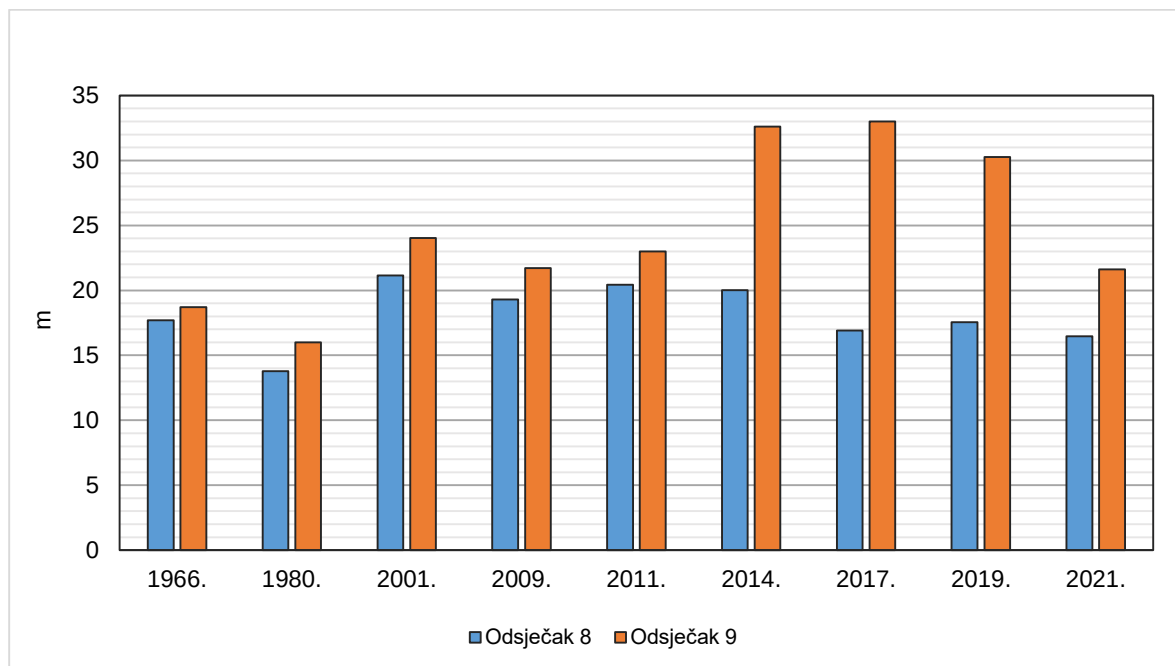
stope bočnog kretanja ostale su visoke, da bi nakon 2017. počele padati. Povećanje stopa bočnog kretanja bilo je daleko manje izraženo u odsječku 8. Tamo su najveće stope zabilježene u razdobljima 2014. – 2017. (1,28 m godišnje) i 2017. – 2019. (1,08 m godišnje).



Sl. 4.11. A) Stope bočnog kretanja (u metrima godišnje) u promatranim razdobljima; B) nizvodna migracija crte sredine korita u promatranim godinama u odsječku 9

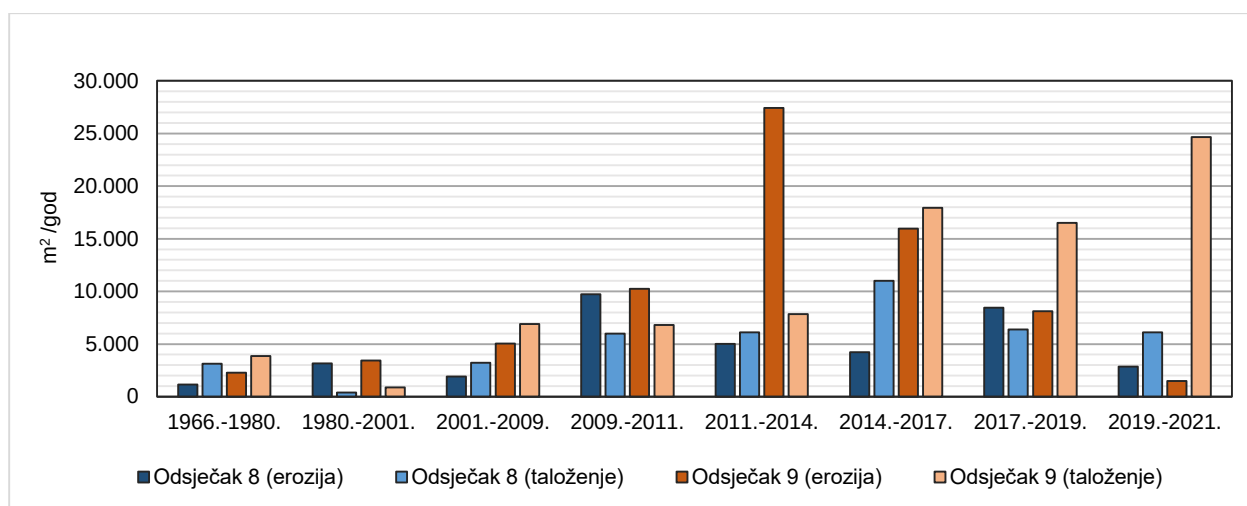
Aktivna širina korita općenito je tijekom promatranih godina bila veća u odsječku 9 (Sl. 4.12). Međutim, prije 2014. razlike između odsječaka nisu bile jako izražene (otprilike 10 %). Najmanje vrijednosti širine procijenjene su 1980. godine, no to može biti posljedica drugačijeg izvora podataka: unatoč velikom mjerilu, na topografskoj karti granice korita već su generalizirane u odnosu na snimku iz zraka. Stoga vrijednosti za 1980. godinu treba uzeti s oprezom. U 2014. godini u odsječku 9 zabilježen je značajan porast širine aktivnog korita, koji iznosi više od 40 %. Nakon 2017. zabilježen je postupni pad, te je 2021. širina korita dosegla

istu vrijednost kao i 2009. godine. U odsječku 8 varijacije širine aktivnog korita općenito su bile manje, no nakon 2014. zabilježeno je blago sužavanje korita od 17,5 %.



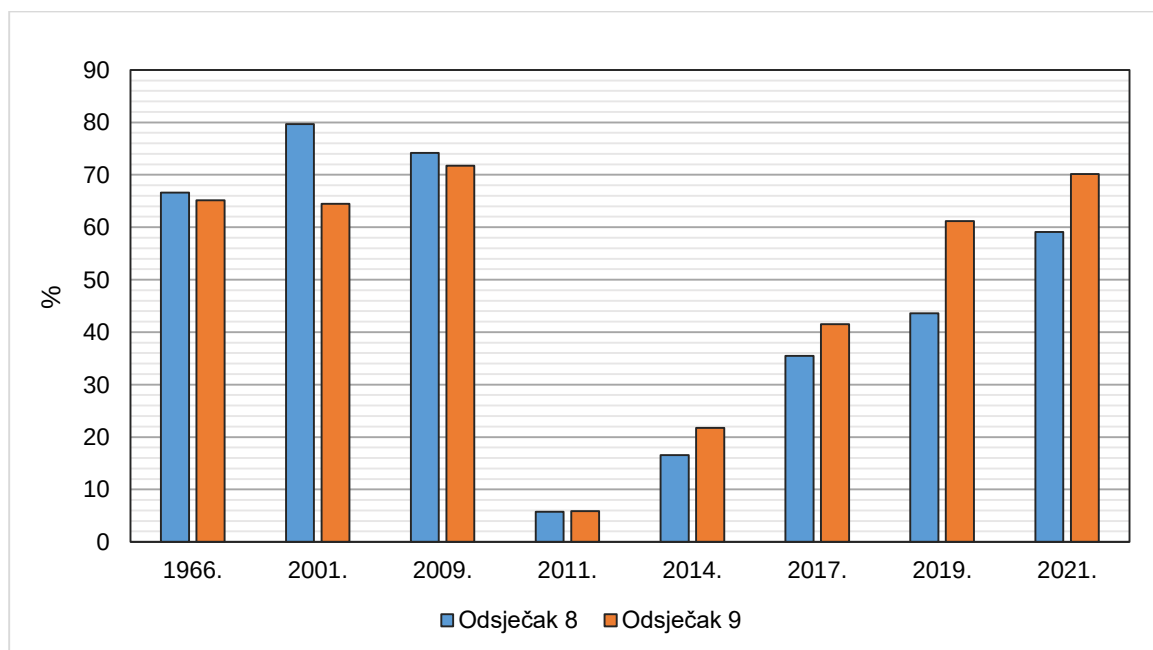
Sl. 4.12. Širina aktivnog korita u promatranim godinama

Što se tiče površina područja erozije i taloženja, najniže vrijednosti zabilježene su u prva dva razdoblja istraživanja, 1966. – 1980. i 1980-2001., u kojima su primijećene i niske stope bočnog kretanja i općenito slabija dinamika geomorfoloških procesa (Sl. 4.13). Značajan rast površina erozije u odsječku 9 može se vidjeti u razdoblju 2011. – 2014., što se može povezati s prethodno spomenutim povećanjem brzine bočnog kretanja i širine aktivnog korita u tom razdoblju. Tijekom 2011. – 2014. rijeka je erodirala više od 80.000 m<sup>2</sup> naplavne ravnice. U kasnijim razdobljima te su se stope smanjivale, a u 2019. – 2021. pale su na minimalnih 2.800 m<sup>2</sup> godišnje. U odsječku 8 područja erozije općenito su bila manja, a vrhunac su dosegla u razdoblju 2017. – 2019. Područja taloženja su pak dosegla maksimum u razdoblju 2014. – 2017., vjerojatno zbog probijanja mlinske stepenice 2016. godine i nestanka ujezerenja. U odsječku 9 najveća površina taloženja godišnje zabilježena je 2019. – 2021., što je razdoblje izražene stabilizacije korita i rasta vegetacije na prudovima i obalama.



Sl. 4.13. Površine erozije i taloženja u promatranim razdobljima

Godine 1966. drvenasta vegetacija pokrivala je oko 65 % riječnih obala u oba odsječka (Sl. 4.14). U 2001. taj je udio porastao na gotovo 81 % u odsječku 8, dok je u odsječku 9 ostao stabilan (65 %). Međutim, drastično smanjenje nakon uklanjanja vegetacije uzrokovano antropogenim djelovanjem zabilježeno je za oba odsječka u 2011.: postotak riječnih obala prekrivenih drvenastom vegetacijom bio je oko 5 %. Sljedećih godina ta je vrijednost postupno rasla, te je 2021. dosegla 60 % u odsječku 8 odnosno 70 % u odsječku 9.

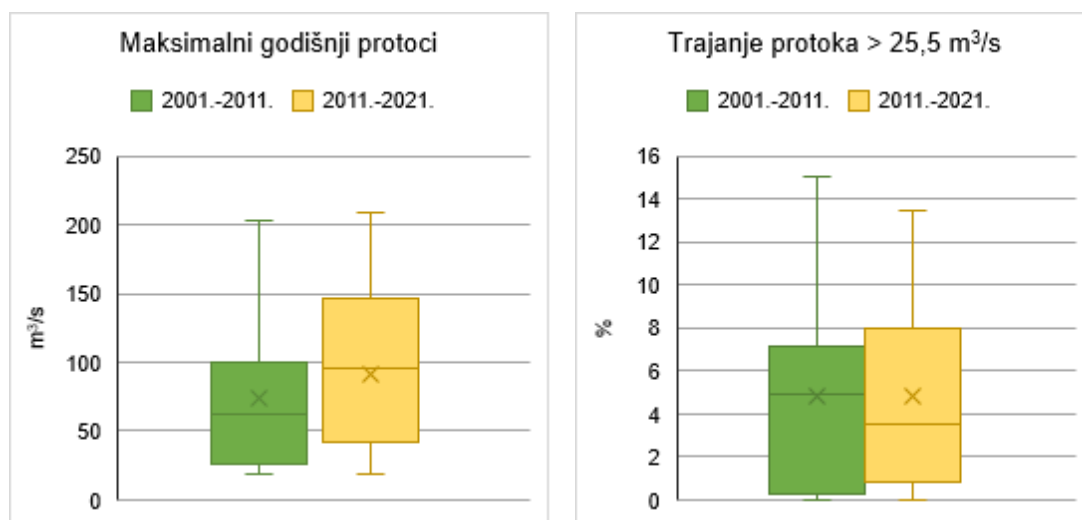


Sl. 4.14. Udjeli drvenaste vegetacije na riječnim obalama u promatranim godinama

#### 4.3.4. Prirodni i antropogeni čimbenici stope bočnog kretanja rijeke

##### 4.3.4.1. Analize protoka

Mann-Whitney U-testom analizirani su srednjaci maksimalnih godišnjih protoka i trajanja protoka iznad granične vrijednosti od  $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$  u razdobljima 2001. – 2011. i 2011. – 2021. Za obje hidrološke varijable test se pokazao kao statistički neznačajan ( $p > 0,05$ , Tab. 4.4), što govori da nema statističkih dokaza koji bi ukazali na značajnu razliku između srednjih vrijednosti analiziranih varijabli u razdobljima 2001. – 2011. i 2011. – 2021. Dakle, iako su u prosjeku maksimalni godišnji protoci u razdoblju 2011. – 2021. ( $91,84 \text{ m}^3/\text{s}$ ) bili malo viši nego u prethodnom desetljeću ( $73,27 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Sl. 4.15), statistički ta razlika nije značajna. Prosječne vrijednosti trajanja protoka većih od  $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$  bile su podjednake između proučavanih razdoblja (4,78 % i 4,80 %).



Sl. 4.15. Dijagrami raspona za maksimalne godišnje protoke i trajanje protoka većih od  $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$  u razdobljima 2001. – 2011. i 2011. – 2021. na hidrološkoj postaji Frkljevci

Tab. 4.4. Statistički pokazatelji provedenog U-testa

| Varijabla      | Maksimalni godišnji protok | Trajanje protoka > 25,5 m³/s |
|----------------|----------------------------|------------------------------|
| Mann-Whitney U | 46,500                     | 57,500                       |
| Wilcoxon W     | 112,500                    | 123,500                      |
| Z-vrijednost   | -0,920                     | -0,197                       |
| p-vrijednost   | 0,365                      | 0,847                        |

#### 4.3.4.2. Korelacijska analiza

Spearmanov koeficijent korelacije između svih istraživanih varijabli izračunat je za tri razdoblja proučavanja (2001. – 2021., 2011. – 2021. i 2014. – 2021.) i za dva odsječka zasebno kako bi se testirale hipoteze 3 i 4 te multikolinearnost među varijablama za potrebe regresijske analize. U Tab. 4.5 prikazani su koeficijenti korelacije za glavnu istraživanu zavisnu varijablu, stopu bočnog kretanja (ujedno i pokazatelj osjetljivosti rijeke). Također su prikazani i koeficijenti za promjene u širini korita kao važnog pokazatelja promjena u morfologiji korita, te udjela drvenaste vegetacije na obalama, kako bi se pokazao odnos te varijable s hidrološkim pokazateljima.

Vrijednosti Spearmanovog koeficijenta korelacije ( $\rho$ ) mogu se podijeliti u nekoliko osnovnih kategorija prema jačini veze (prema Schober i dr., 2018):

- 0,00 – 0,10 nema veze
- 0,10 – 0,39 slaba veza
- 0,40 – 0,69 umjerena veza
- 0,70 – 0,89 jaka veza
- 0,90 – 1,00 vrlo jaka veza

U razdoblju 2001. – 2021., čije prvo desetljeće obilježava stabilnost priobalne vegetacije, a drugo desetljeće rast vegetacije nakon gotovo potpunog uklanjanja, broj parova podataka iznosio je 36. U odsječku 8, stope bočnog kretanja nisu bile statistički značajno povezane niti s jednom varijablom. Promjena širine korita bila je umjereno negativno povezana s promjenom u indeksu vijugavosti ( $\rho = -0,534$ ), što je vjerojatno posljedica nestanka ujezerenja nakon probijanja stepenice 2016. nakon čega je uslijedilo sužavanje korita i povećanje vijugavosti. Također, postotak drvenaste priobalne vegetacije bio je negativno povezan s maksimalnim protokom ( $\rho = -0,459$ ). U odsječku 9 zabilježena je jaka negativna veza između stope bočnog kretanja i udjela obala s drvenastom vegetacijom ( $\rho = -0,822$ ). S druge strane, umjerena pozitivna veza zabilježena je između stope bočnog kretanja i promjene u širini korita ( $\rho = 0,590$ ) te hidroloških varijabli: trajanja protoka iznad  $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $\rho = 0,459$ ), maksimalnih protoka ( $\rho = 0,617$ ) i snage toka ( $\rho = 0,517$ ). Postotak drvenaste priobalne vegetacije negativno je korelirao s maksimalnim protocima ( $\rho = -0,473$ ) i promjenama u širini korita ( $\rho = -0,433$ ). Prema tome, negativna povezanost udjela drvenaste vegetacije na obalama sa stopom bočnog kretanja i širinom aktivnog korita (hipoteza 3) ustanovljena je samo za odsječak 9, koji se nalazi nizvodno od stepenice te u njemu nije bilo ujezerenja. S druge strane, negativne veze između udjela

drvenaste vegetacije na obalama i maksimalnih protoka zabilježene su za oba odsječka budući da niski protoci općenito omogućavaju rast i širenje vegetacije na obalama i u koritu.

U razdoblju 2011. – 2021., nakon uklanjanja priobalne vegetacije, broj parova podataka bio je 24. U odsječku 8, stopa bočnog kretanja bila je umjereno pozitivno povezana s trajanjem protoka iznad 25,5 m<sup>3</sup>/s ( $\rho = 0,495$ ). Korelacija s postotkom drvenastih obala ( $\rho = 0,007$ ) ili maksimalnim protokom ( $\rho = 0,129$ ) nije utvrđena, ali je izmjerena snažna negativna korelacija između potonjih varijabli ( $\rho = -0,872$ ). U odsječku 9, bočno kretanje je najsnažnije koreliralo s trajanjem protoka i maksimalnim protocima ( $\rho = 0,824$ ), te promjenom širine korita ( $\rho = 0,816$ ). Naime, bočno kretanje općenito uzrokuje značajnu eroziju riječnih obala i širenje korita uz formiranje prostranih riječnih prudova. S postotkom drvenaste priobalne vegetacije također je zabilježena jaka veza, ali u negativnom smjeru ( $\rho = -0,788$ ). Nadalje, promjene u širini korita bile su snažno pozitivno povezane s hidrološkim pokazateljima (trajanje protoka,  $\rho = 0,727$ ; maksimalni protoci  $\rho = 0,942$ ), i negativno povezane s udjelom drvenastih obala ( $\rho = -0,884$ ). Osim s bočnim kretanjem i promjenom širine, udio drvenaste vegetacije na obalama bio je snažno negativno povezan i s maksimalnim protocima ( $\rho = -0,878$ ) i trajanjem protoka ( $\rho = -0,700$ ). Dakle, veze koje su ustanovljene analizom prethodnog skupa podataka u ovom su skupu većinom potvrđene i pojačane. Posebno je potrebno istaknuti jačanje pozitivnih veza između stopa bočnog kretanja, promjena u širini korita i hidroloških pokazatelja u odsječku 9, što implicira jačanje utjecaja velikih protoka na morfološke promjene rijeke u uvjetima rijetke i nestabilne priobalne vegetacije.

U razdoblju 2014. – 2021., nakon probijanja mlinske stepenice na granici istraživanih odsječaka, broj parova podataka bio je 18. U odsječku 8, stope bočnog kretanja su zabilježile snažnu pozitivnu korelaciju s trajanjem protoka i maksimalnim protokom ( $\rho = 0,761$ ), te negativnu korelaciju s postotkom drvenaste priobalne vegetacije ( $\rho = -0,515$ ). Dakle, u ovom su skupu podataka veze koje su pretpostavljene hipotezom 3 ustanovljene i u odsječku 8, što implicira da je postojanje stepenice i ujezerenja imalo utjecaj na smanjenju osjetljivost rijeke na promjene u prethodnim razdobljima. Također, izmjerena je jaka negativna povezanost između udjela drvenaste priobalne vegetacije i hidroloških varijabli (trajanje protoka, maksimalni protok;  $\rho = -0,708$ ). U odsječku 9, i bočno kretanje i promjene u širini bile su snažno pozitivno povezane s trajanjem protoka i maksimalnim protocima ( $\rho = 0,905$ ;  $\rho = 0,879$ ), te negativno povezane s postotkom drvenaste priobalne vegetacije ( $\rho = -0,792$ ,  $\rho = -0,781$ ), kao i u prethodno analiziranom skupu podataka. Navedene varijable (bočno kretanje i promjene u širini) također su imale jaku međusobnu pozitivnu korelaciju ( $\rho = 0,802$ ).

Bitno je naglasiti da statistički značajne veze između nagiba korita ili indeksa vijugavosti i stope bočnog kretanja nisu zabilježene niti za jedan odsječak u niti jednom istraživanom razdoblju (skupu podataka), čime hipoteza 4 o pozitivnoj povezanosti osjetljivosti (bočnog kretanja) rijeke s nagibom korita i indeksom vijugavosti nije potvrđena.

Odnosi između stope bočnog kretanja i varijabli s kojima je uspostavljena najveća snaga korelacije (postotak drvenaste priobalne vegetacije i trajanje protoka iznad  $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) prikazani su na dijagramima rasipanja za oba odsječka i za sva istraživana razdoblja (Sl. 4.16 i Sl. 4.17).



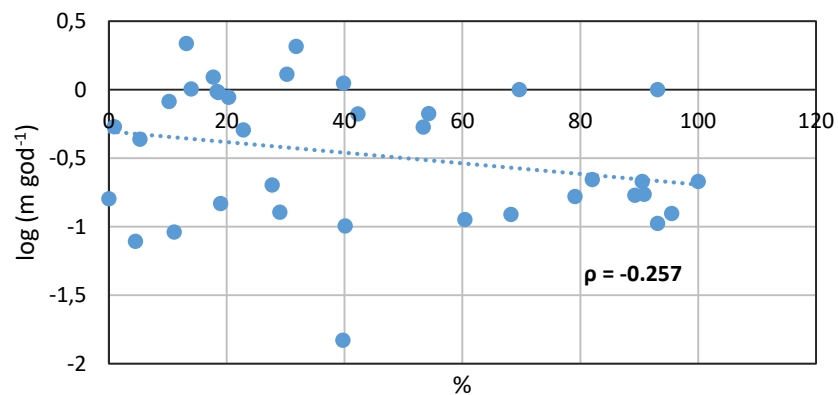
Tab. 4.5. Spearmanovi koeficijenti korelacije između istraživanih varijabli u odsječcima 8 i 9 u dvama istraživanim razdobljima (narančasta označava pozitivne veze, zelena negativne, a tamnija boja jače veze)

|                                                               |            |                  | Bočno kretanje | Indeks vijugavosti | Δ indeksa vijugavosti | Širina aktivnog korita | Δ širine aktivnog korita | % drvenaste priobalne vegetacije | Δ drvenaste priobalne vegetacije | Trajanje protoka > 25,5 m³/s | Maksimalni protoci | Nagib korita | Snaga toka | Specifična snaga toka |
|---------------------------------------------------------------|------------|------------------|----------------|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--------------------|--------------|------------|-----------------------|
| 2001. – 2021.                                                 | Odsječak 8 | Bočno kretanje   | 1,000          | 0,147              | 0,257                 | 0,084                  | 0,043                    | -0,257                           | 0,191                            | 0,247                        | 0,111              | -0,011       | -0,005     | -0,059                |
|                                                               |            | Δ širine         | 0,043          | 0,080              | -,534**               | -,454**                | 1,000                    | 0,254                            | -0,188                           | 0,034                        | 0,038              | -0,001       | 0,103      | 0,263                 |
|                                                               |            | % drvenaste veg, | -0,257         | 0,102              | -,357*                | -0,053                 | 0,254                    | 1,000                            | -,484**                          | -0,166                       | -,459**            | -0,170       | -,411*     | -,351*                |
|                                                               | Odsječak 9 | Bočno kretanje   | 1,000          | 0,068              | -0,101                | 0,225                  | ,590**                   | -,822**                          | ,361*                            | ,459**                       | ,617**             | 0,217        | ,517**     | ,340*                 |
|                                                               |            | Δ širine         | ,590**         | 0,066              | -0,134                | -,534**                | 1,000                    | -,433**                          | -0,213                           | ,620**                       | ,828**             | -0,093       | ,400*      | ,625**                |
|                                                               |            | % drvenaste veg, | -,822**        | -0,049             | -0,117                | -0,220                 | -,433**                  | 1,000                            | -,556**                          | -0,185                       | -,473**            | -0,087       | -0,287     | -0,181                |
| 2011. – 2021.<br>Nakon uklanjanja priobalne vegetacije        | Odsječak 8 | Bočno kretanje   | 1,000          | 0,185              | 0,257                 | 0,164                  | 0,194                    | 0,007                            | -0,125                           | ,495*                        | 0,129              | -0,092       | 0,035      | -0,075                |
|                                                               |            | Δ širine         | 0,194          | 0,055              | -,523**               | -,483*                 | 1,000                    | 0,277                            | 0,022                            | -0,307                       | -0,129             | -0,249       | -0,047     | 0,119                 |
|                                                               |            | % drvenaste veg, | 0,007          | 0,207              | -0,191                | -,676**                | 0,277                    | 1,000                            | 0,233                            | -,673**                      | -,872**            | -0,159       | -,668**    | -,423*                |
|                                                               | Odsječak 9 | Bočno kretanje   | 1,000          | 0,034              | -0,090                | -0,063                 | ,816**                   | -,788**                          | 0,093                            | ,824**                       | ,824**             | 0,138        | ,528**     | ,497*                 |
|                                                               |            | Δ širine         | ,816**         | -0,021             | 0,054                 | -,457*                 | 1,000                    | -,884**                          | -0,024                           | ,727**                       | ,942**             | -0,030       | ,439*      | ,641**                |
|                                                               |            | % drvenaste veg, | -,788**        | -0,150             | -0,098                | ,461*                  | -,884**                  | 1,000                            | -0,067                           | -,700**                      | -,878**            | 0,128        | -0,309     | -,528**               |
| 2014. – 2021.<br>Nakon proboja stopenice na granici odsječaka | Odsječak 8 | Bočno kretanje   | 1,000          | 0,181              | 0,317                 | 0,457                  | 0,046                    | -,515*                           | -0,296                           | ,761**                       | ,761**             | -0,063       | 0,447      | 0,150                 |
|                                                               |            | Δ širine         | 0,046          | 0,090              | -,653**               | -,684**                | 1,000                    | ,552*                            | 0,214                            | -0,289                       | 0,246              | -0,333       | -0,061     | 0,154                 |
|                                                               |            | % drvenaste veg, | -,515*         | 0,102              | -,750**               | -,697**                | ,552*                    | 1,000                            | 0,090                            | -,708**                      | -,708**            | -0,296       | -,544*     | -0,160                |
|                                                               | Odsječak 9 | Bočno kretanje   | 1,000          | 0,106              | -0,162                | 0,325                  | ,802**                   | -,792**                          | 0,137                            | ,905**                       | ,905**             | 0,104        | 0,418      | 0,286                 |
|                                                               |            | Δ širine         | ,802**         | -0,026             | 0,036                 | -0,034                 | 1,000                    | -,781**                          | 0,110                            | ,879**                       | ,879**             | -0,092       | 0,183      | 0,247                 |
|                                                               |            | % drvenaste veg, | -,792**        | -0,317             | -0,106                | 0,001                  | -,781**                  | 1,000                            | -0,278                           | -,787**                      | -,787**            | 0,162        | -0,115     | -0,164                |

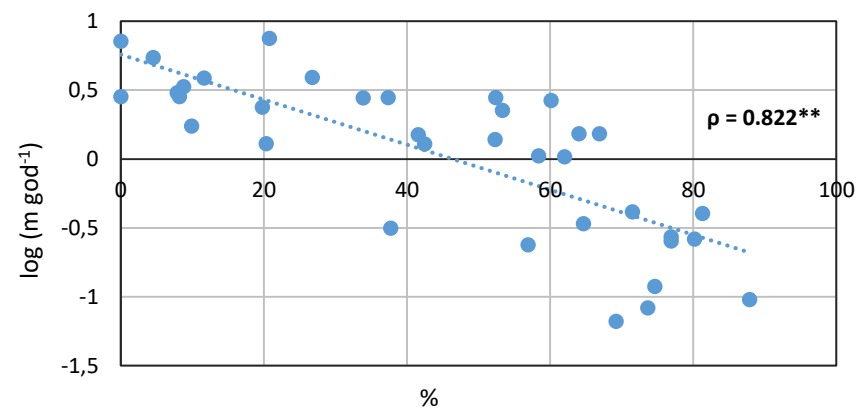
\* p-vrijednost < 0,05

\*\* p-vrijednost < 0,01

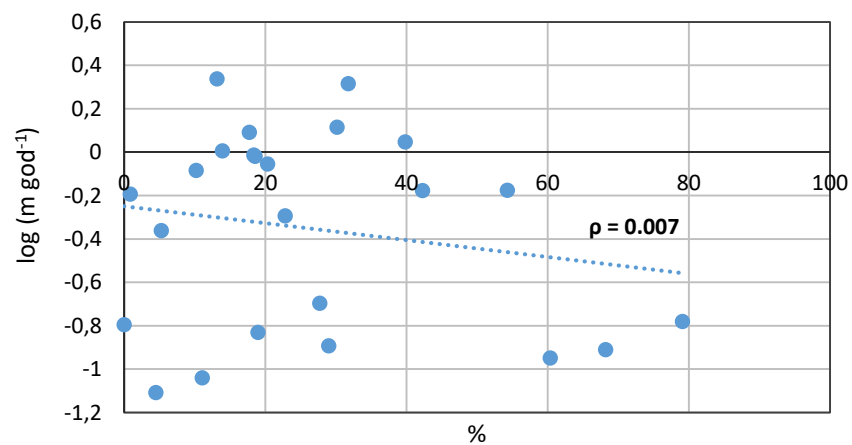
**A) Odsječak 8, 2001.-2021. (N=36)**  
Bočno kretanje vs % drvenastih obala - **ujezerenje**



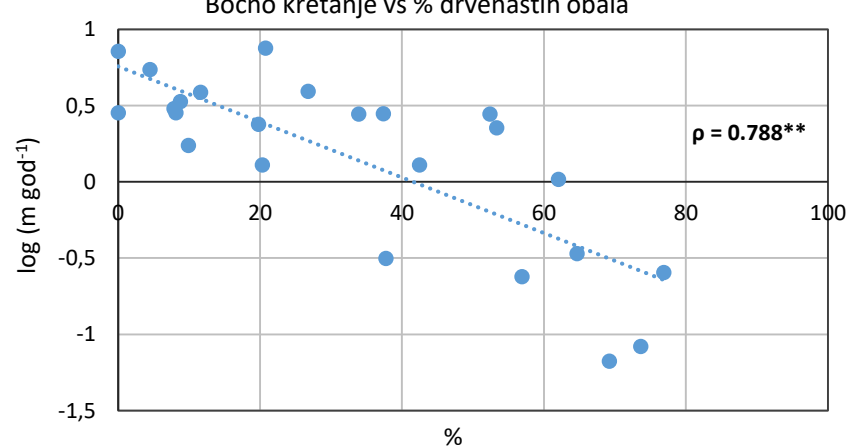
**B) Odsječak 9, 2001.-2021. (N=36)**  
Bočno kretanje vs % drvenastih obala

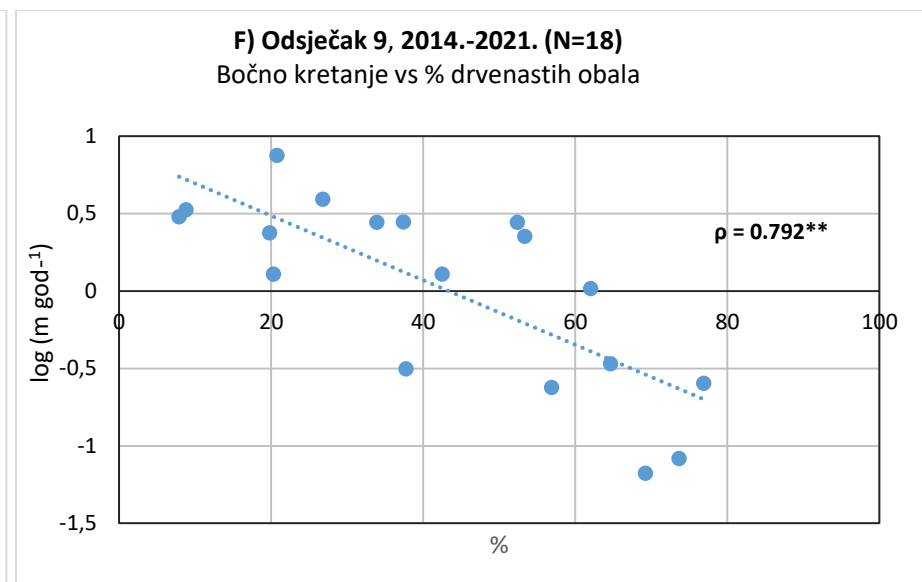
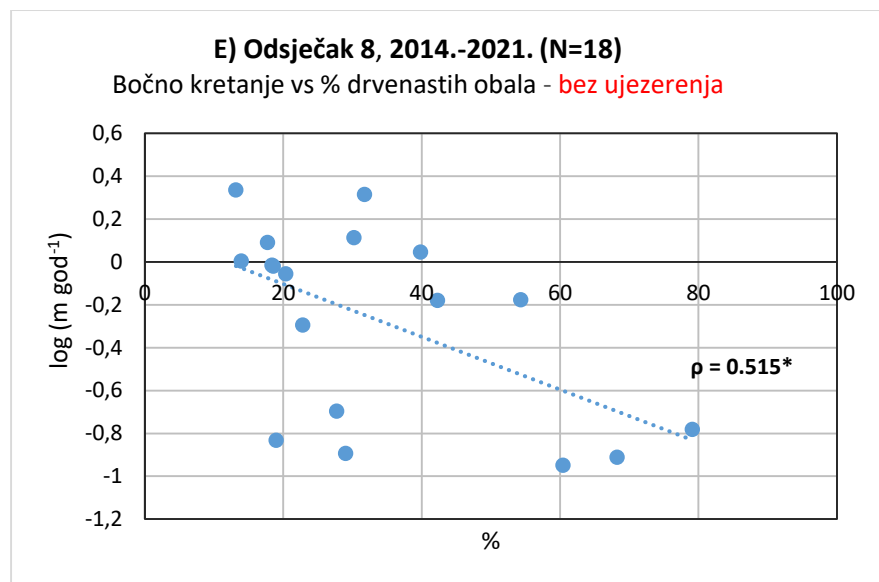


**C) Odsječak 8, 2011.-2021. (N=24), uklanjanje i rast vegetacije**  
Bočno kretanje vs % drvenastih obala - **ujezerenje**



**D) Odsječak 9, 2011.-2021. (N=24), uklanjanje i rast vegetacije**  
Bočno kretanje vs % drvenastih obala





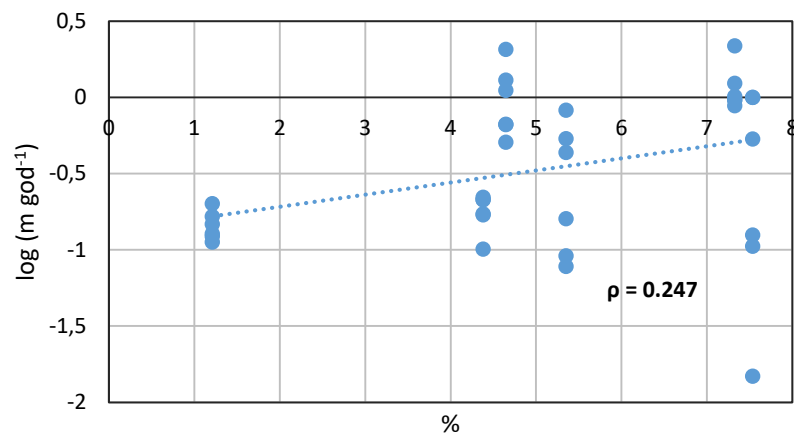
Sl. 4.16. Odnos logaritmirane stope bočnog kretanja i postotnog udjela drvenaste priobalne vegetacije u odsječcima 8 i 9 u istraživanim razdobljima

Veze između logaritmiranih stopa bočne migracije i postotka drvenaste vegetacije na riječnim obalama u oba odsječka imaju negativan smjer (Sl. 4.16). U odsječku 8, u razdobljima koja uključuju postojanje ujezerenja veze nisu statistički značajne. U razdoblju 2014. – 2021. kada je stepenica na granici odsječaka porušena te je nestalo ujezerenje, Spearmanov koeficijent korelacije između stope bočnog kretanja i postotka drvenastih obala u odsječku 8 pokazao je statistički značajnu negativnu vezu ( $\rho = -0.515$ ).

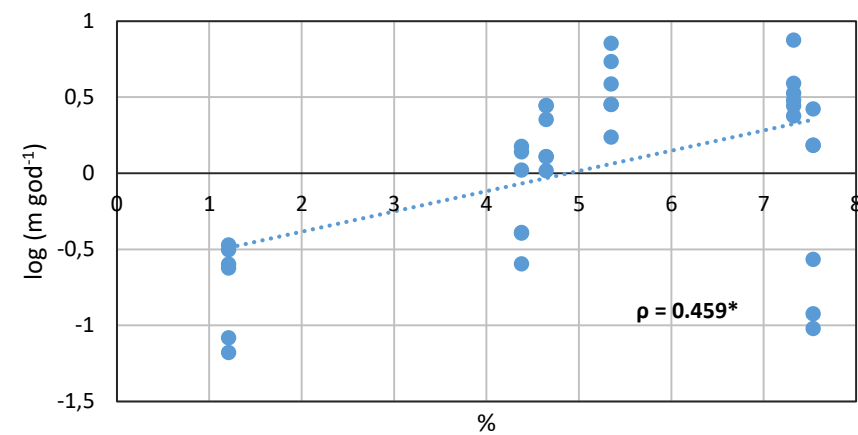
S druge strane, u odsječku 9, vrijednosti  $p$  kreću se od 0,822 do 0,788 i u razdoblju stabilne vegetacije na obalama, i u razdoblju rasta vegetacije nakon njenog uklanjanja 2011. godine. To ukazuje da je snaga povezanosti između bočne migracije rijeke i postotka drvenaste vegetacije na obalama stabilna u uvjetima bez ujezerenja, neovisno o tome je li vegetacija gusta ili se ponovno obnavlja nakon uklanjanja.

Nelinearna priroda veze između stopa bočnog kretanja i postotnog udjela drvenaste vegetacije na obalama implicira da se stope bočnog kretanja ne mijenjaju u izravnoj proporciji s promjenama u drvenastoj vegetaciji. Primjerice, na obalama s već niskim postotkom drvenaste vegetacije, čak i malo dodatno smanjenje može rezultirati značajnim povećanjem bočnog kretanja, dok na obalama s većim postotkom drvenaste vegetacije taj učinak može biti manje značajan.

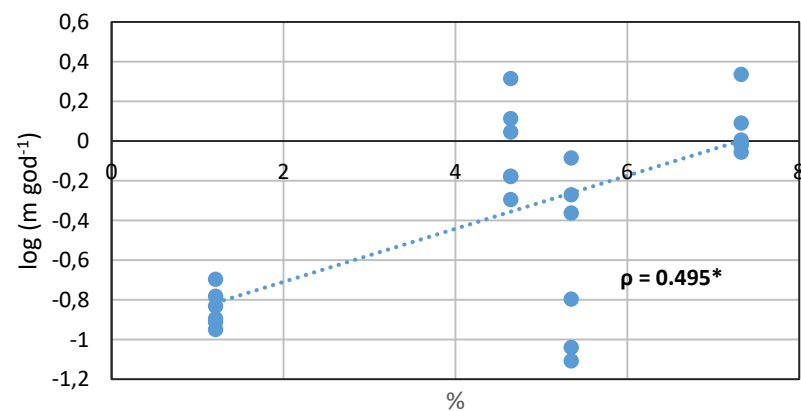
**A) Odsječak 8, 2001.-2021. (N=36)**  
Bočno kretanje vs trajanje protoka - **ujezerenje**



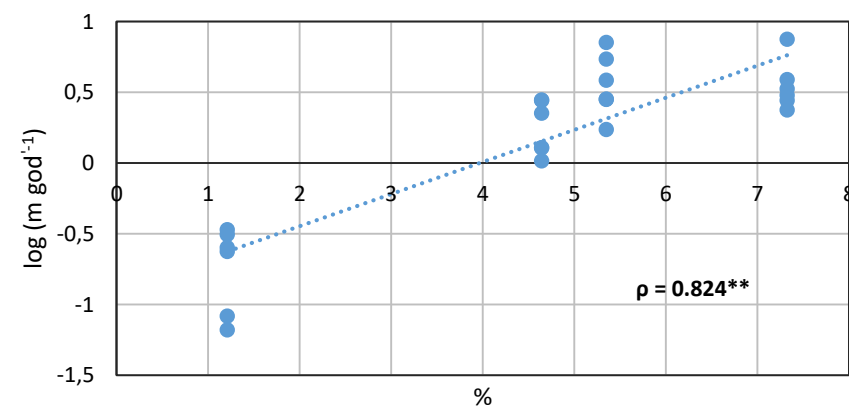
**B) Odsječak 9, 2001.-2021. (N=36)**  
Bočno kretanje vs trajanje protoka

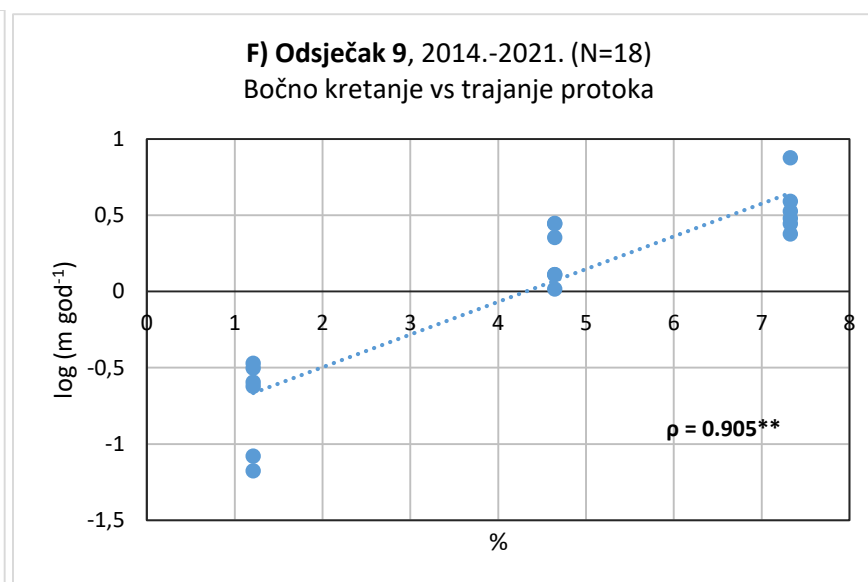
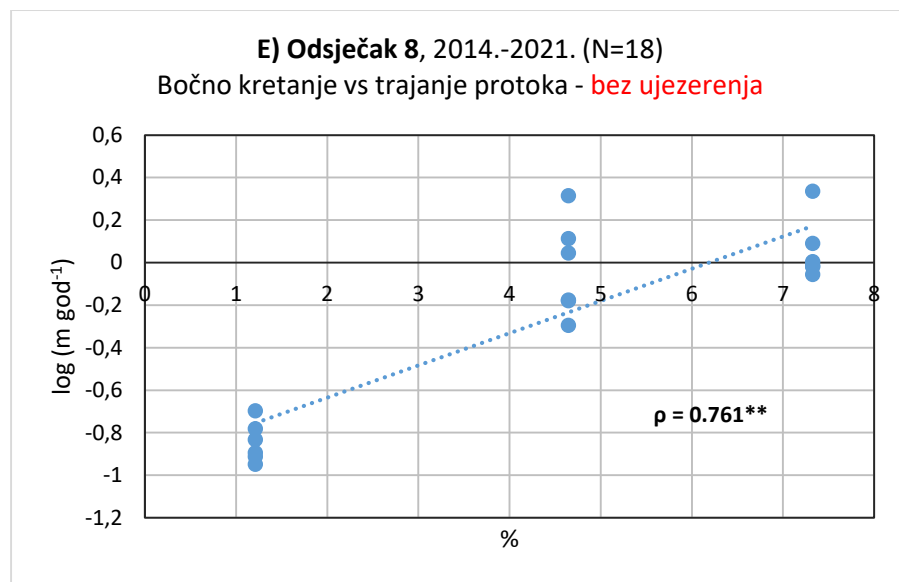


**C) Odsječak 8, 2011.-2021. (N=24)**  
Bočno kretanje vs trajanje protoka - **ujezerenje**



**D) Odsječak 9, 2011.-2021. (N=24),**  
uklanjanje i rast vegetacije  
Bočno kretanje vs trajanje protoka





Sl. 4.17. Odnos stope bočnog kretanja i trajanja protoka iznad 25,5 m<sup>3</sup>/s u odsječcima 8 i 9 u istraživanim razdobljima

Veze između stopa bočne migracije i trajanja protoka iznad  $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$  u oba odsječka imaju pozitivan smjer. Odnosi su slabiji u odsječku 8, posebice oni mjereni u razdobljima koja uključuju postojanje ujezerenja ( $\rho = 0,247$ ,  $\rho = 0,495$ ). U razdoblju 2014. – 2021. bez ujezerenja koeficijent determinacije u odsječku 8 porastao je na značajnih  $\rho = 0,761$ . U odsječku 9 vrijednost  $\rho$  bila je umjerena (0,459) u najdužem istraživanom vremenskom razdoblju (2001. – 2021.), koje uključuje i razdoblje stabilne, relativno guste drvenaste vegetacije na obalama (2001. – 2011.), kao i razdoblje rasta vegetacije nakon uklanjanja 2011. godine. U vremenskim razdobljima koja ne uključuju stabilno razdoblje 2001. – 2011.,  $\rho$  se povećao na 0,769 (2011. – 2021.) i 0,828 (2014. – 2021.).

Veze između stopa bočnog kretanja i kontrolnih varijabli (postotka drvenastih obala i trajanja protoka iznad  $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) jače su u odsječku 9, što znači da je taj odsječak geomorfološki osjetljiviji na promjene u ispitanim kontrolnim varijablama. Zanimljivo je primijetiti da se osjetljivost bočnog kretanja na promjene u trajanju protoka povećala u razdoblju nakon uklanjanja vegetacije (2011. – 2021.). Kao i slučaju drvenaste priobalne vegetacije, nelinearnost veze između stopa bočnog kretanja i trajanja protoka iznad  $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$  implicira da i malo povećanje u trajanju maksimalnih protoka (kada je njihova vrijednost već visoka) dovodi do velikog povećanja u stopama bočnog kretanja rijeke.



#### 4.3.4.3. Linearni mješoviti modeli

Linearni mješoviti modeli stvoreni su za odsječak 9 za razdoblje 2001. – 2021. kako bi se odredili glavni faktori koji utječu na stopu bočnog kretanja rijeke. Konačni model odabran je na temelju najniže vrijednosti AICc parametra (Tab. 4.6), te je uključio sljedeće nezavisne varijable (fiksne efekte): postotni udio drvenaste priobalne vegetacije, trajanje protoka iznad 25,5 m<sup>3</sup>/s, nagib korita i širinu korita. Koeficijenti navedenih varijabli su statistički značajni (Tab. 4.7). Postotni udio drvenaste vegetacije na obalama ima negativni koeficijent, čime se potvrdila njegova negativna veza s bočnim kretanjem rijeke, koja je prethodno ustanovljena Spearmanovim koeficijentom korelacije. Time je dodatno potvrđena hipoteza 3: veći udio drvenastih obala pogoduje manjem bočnom kretanju rijeke.

Ostale varijable imaju pozitivne koeficijente, što znači da većim stopama bočnog kretanja rijeke pogoduje dulje trajanje protoka (iznad 25,5 m<sup>3</sup>/s), veći nagib korita i veća širina korita. Time je potvrđena pozitivna veza između bočnog kretanja rijeke i trajanja protoka iznad 25,5 m<sup>3</sup>/s koja je ustanovljena i Spearmanovim koeficijentom korelacije. S druge strane, iako varijable nagib i širina korita nisu bile značajno povezane s bočnim kretanjem u korelacijskoj analizi, u linearnom mješovitom modelu statistički značajno pridonose objašnjavanju varijacija u bočnom kretanju rijeke. Odsustvo korelacije može biti rezultat nelinearnih odnosa ili interakcija između varijabli koje korelacijska analiza ne može otkriti. Linearni mješoviti model, međutim, može uzeti u obzir složenije efekte i varijabilnost između skupina, što omogućuje da nagib i širina korita postanu značajni čimbenici u objašnjavanju bočnog kretanja rijeke. Budući da nagib ima pozitivni koeficijent u modelu, time je potvrđena hipoteza 4a („osjetljivost odsječaka rijeke pozitivno je povezana s nagibom korita”).

Tab. 4.6. Prilagodba modela za zavisnu varijablu „stopa bočnog kretanja“

| Model (fiksni efekti)                                                       | AICc   |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1. % drvenaste vegetacije                                                   | 36,487 |
| 2. % drvenaste vegetacije + trajanje protoka                                | 26,781 |
| 3. % drvenaste vegetacije + trajanje protoka + nagib korita                 | 24,634 |
| 4. % drvenaste vegetacije + trajanje protoka + nagib korita + širina korita | 22,965 |

Tab. 4.7. Procjene parametara za model 4.

| Parametar        | Koeficijent | Std. greška | t-vrijednost | p-vrijednost |
|------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| <i>Intercept</i> | -0,672      | 0,272       | -2,470       | 0,019        |
| % drvenaste veg. | -0,013      | 0,002       | -8,574       | 0,000        |
| Trajanje protoka | 0,099       | 0,022       | 4,482        | 0,000        |
| Nagib korita     | 0,284       | 0,107       | 2,642        | 0,021        |
| Širina korita    | 0,017       | 0,007       | 2,573        | 0,016        |

## 4.4.Promjene korita na razini meandara

### 4.4.1. Lokacija Deževci

Najuzvodnija istraživana lokacija nalazi se 29 km nizvodno od izvora i 7,5 km nizvodno od ulaska rijeke u Požešku kotlinu, u blizini naselja Deževci, u prvom odsječku rijeke (1). Terenskim istraživanjem obuhvaćeno je područje jednog meandra duljine oko 150 m po crti sredine korita. U ovom dijelu rijeke, korito je prijelaznog oblika između jednostavnog i isprepletenog, što je posljedica dinamičnih geomorfoloških procesa radi relativno većeg nagiba korita na cijelom odsječku (4 m/km). Veličina sedimenta dna korita procijenjena Wolmanovom metodom iznosi  $D_{50} = 36$  mm, što znači da prevladava krupni šljunak (Sl. 4.18B). U strukturi obala dominiraju krupni i srednje krupni pijesak (0,2-2 mm, 58 %) sa značajnim udjelom šljunka (27 %) (Sl. 4.18A).

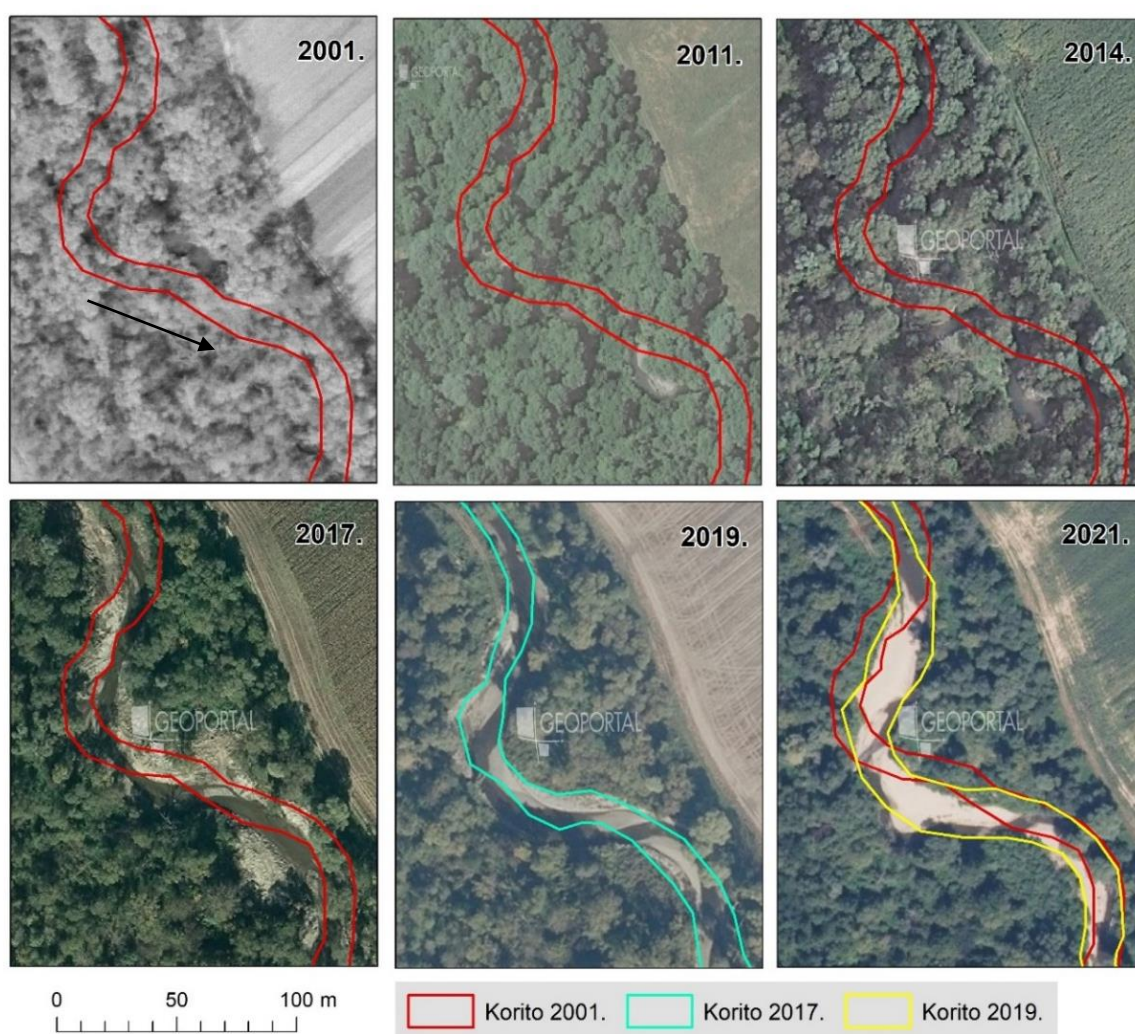


Sl. 4.18. Profil obale (A), struktura sedimenta na prudu (B), pogled nizvodno na istraživani meandar 2022. godine (C). Strelica prikazuje smjer toka.

Obale i naplavna ravnica uz istraživani meandar su 2001. godine bile prekrivene gustom drvenastom vegetacijom, te samo korito nije bilo vidljivo (njegov položaj na slici Sl. 4.19 prikazan je na temelju topografske karte TK25). Slično stanje zabilježeno je i deset godina kasnije, 2011. i 2014. godine (treba napomenuti da su snimke na temelju kojih je izrađen ortofoto 2014. snimljene nakon velike poplave u svibnju te godine). Međutim, na ortofotu iz 2017. vidljivo je pružanje korita pod vodom te gole obale s drvnim ostacima porušenih stabala (Sl. 4.19). Budući da se istraživana lokacija nalazi blizu poljske ceste i nizvodno od gaza koji



vodi na drugu obalu rijeke, dostupna je za vozila. Prema tome, vrlo je izgledno da je zamijećeno uklanjanje priobalne vegetacije ljudska intervencija, tim više što je od Hrvatskih voda dobivena informacija da se drveće uz cijelu duljinu Orljave povremeno uklanja kako bi se povećala protočnost i kapacitet korita. U usporedbi s položajem korita iz 2001., u 2017. je zamjetna nizvodna migracija meandra za otprilike 10 m izmjerena apsolutnim bočnim kretanjem crte sredine korita. Na ortofoto kartama iz 2019. i 2021. u koritu su se nalazili prostrani riječni prudovi, a širina aktivnog korita mjestimice je prelazila 25 m. Naplavna ravnica u koridoru širine od oko 150 m općenito je prekrivena gustom drvenastom vegetacijom, a u blizini lijeve obale rijeke nalaze se poljoprivredne površine.



Sl. 4.19. Recentne promjene korita Orljave na lokaciji Deževci u razdoblju 2001. – 2021.

Prvo terensko istraživanje i snimanje bespilotnom letjelicom na ovoj lokaciji provedeno je krajem ožujka 2022., a u listopadu iste godine izmjereno je ukupno pet poprečnih profila korita. Na temelju ortofoto modela izrađenog od snimaka prikupljenih bespilotnom letjelicom, kartirano je korito pod vodom, prostrani šljunčani bočni prudovi, kao i manji središnji prud na uzvodnom dijelu meandra (profil 3, Sl. 4.20). Prosječna širina aktivnog korita na meandru (između profila 2 i 5) 2022. godine iznosila je 19,8 m, s maksimalnih 29,8 m širine na profilu 4. Najuzvodniji profil 1 izmjeren je na istoj lokaciji geodetskog snimanja iz 2012., oko 100 m uzvodno od samog istraživanog meandra. Usporedbom sa stanjem iz 2012. nisu zabilježene značajne promjene, osim proširivanja desne obale za 2-3 m (Sl. 4.21). Profili 2 i 5 izmjereni su na približnim lokacijama infleksijskih točaka meandra, a profil 4 po njegovoj središnjici. Profil 3 izmjeren je na lokaciji središnjeg pruda u koritu kako bi se mogle pratiti njegove promjene.

Tijekom terenskog istraživanja u ožujku 2023. bespilotnom letjelicom je zabilježeno značajno povlačenje desne, erodirajuće obale meandra (Sl. 4.20). Analizom povlačenja obalne linije izračunato je da je površina erodirane naplavne ravnice u usporedbi sa stanjem snimljenim u ožujku 2022. iznosila ukupno 401,2 m<sup>2</sup>. Udaljenost linearnog povlačenja obale iznosila je prosječno 3,8 m, s maksimumom od 8,2 m na nizvodnom dijelu meandra. Kartiranjem bočnog pruda na meandru zabilježena je njegova nizvodna migracija od otprilike 15 m, međutim radi relativno višeg vodostaja u usporedbi sa snimanjem iz 2022. nije bilo moguća detaljna analiza promjena u njegovoj površini.

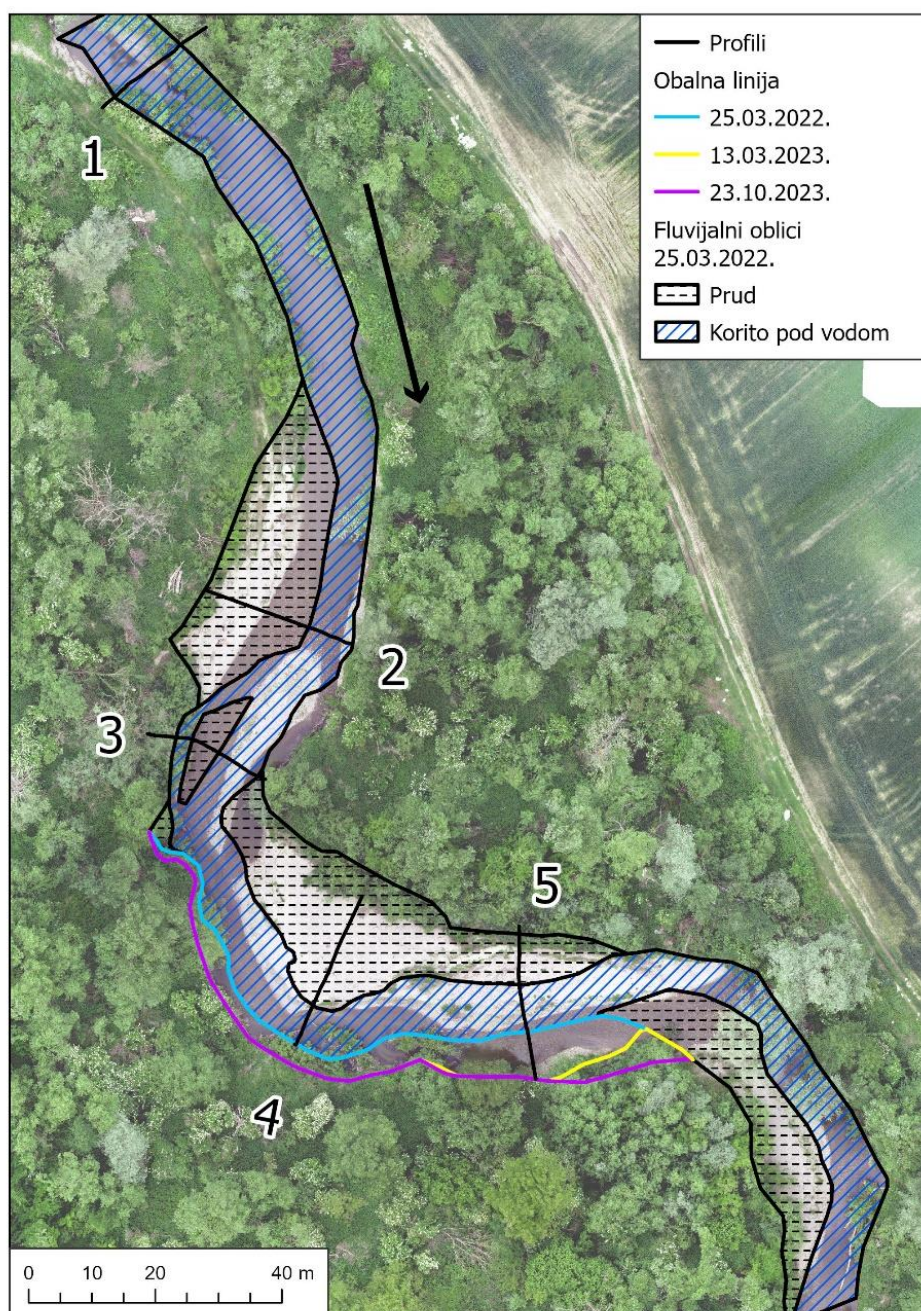
Sljedeće terensko istraživanje obavljeno je u listopadu 2023., kada su izmjereni poprečni profili i obavljeno je snimanje bespilotnom letjelicom. Tijekom tog terenskog izlaska na lokaciji su se nalazila građevinska vozila koja su upravo provodila hidrotehničke radove na koritu. Sediment s desnog bočnog pruda na početku istraživanog meandra je prebacivan na lijevu obalu, kako bi se, prema mišljenju upravljača vodama, obala zaštitila od bočne erozije (Sl. 4.22). Prema stanju iz 2022., korito je na tom profilu (2) bilo izrazito asimetrično: na lijevoj strani dubina je sezala do 184,6 m n.v., dok se na desnoj obali pružao prostrani šljunčani prud do visine od 186 m n.v. (Sl. 4.21). Hidrotehničkom intervencijom taj dio korita je proširen te je stvorena relativno ravna dionica ujednačenog poprečnog profila širine 14 m i prosječne dubine na 185,3 m n.v.. Nizvodni središnji prud također je „poravnat“ (profil 3). Međutim, umjetno stvorena morfologija korita nije se pokazala dugog vijeka. Tijekom posljednjeg terenskog istraživanja u svibnju 2024. zamijećene su značajne promjene. Usprkos nasipanom šljunkovitom sedimentu na lijevoj obali, rijeka je erodirala obje obale i dodatno proširila korito, što je zamjetno na profilu 2 (Sl. 4.21). Erodirani materijal s obala nataložio se u koritu čime se

njegova razina podigla za 0,3-0,4 m te se nizvodno formirao središnji prud (profil 3), 5 m ulijevo od nekadašnjeg pruda iz 2022.

Na profilima 4 i 5 zabilježene su promjene povezane s bočnim kretanjem korita na tom dijelu meandra. Na profilu 4 visina bočnog pruda u 2023. se povećala za 0,4-0,5 m, a talveg korita je migrirao ulijevo, te njegova konačna razina (niža od 184 m) nije mogla biti izmjerena radi prevelike dubine i drvnih ostataka koji su ograničavali pristup. Na profilu 5 talveg korita je 2023. migrirao za 5-7 m udesno, s neznatnom promjenom u razini dna (184,6-184,7 m), ali s promjenom u morfologiji (sužavanje). Profil najdubljeg dijela korita je 2022. godine na ovom profilu bio šireg, koritastog oblika, što je tipična morfologija meandra na točkama infleksije gdje je korito manje dubine i razvijaju se brzaci (engl. *riffle*). Migracijom korita 2023. godine na tom se profilu razvio asimetrični poprečni presjek (engl. *pool*) gdje je dublja strana bliže konkavnoj, strmoj obali. Takav poprečni presjek tipičan je za središnji dio meandra, gdje je zavojitost korita najveća. Također, na lokaciji korita pod vodom iz 2022., u 2023. nataložio se prud do visine od 185,9 m.

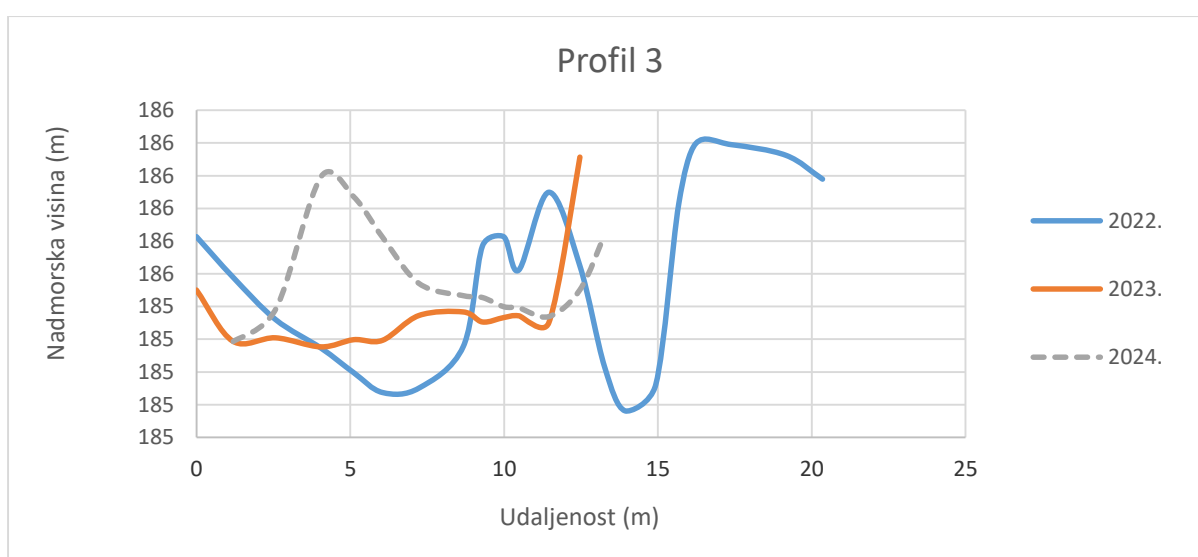
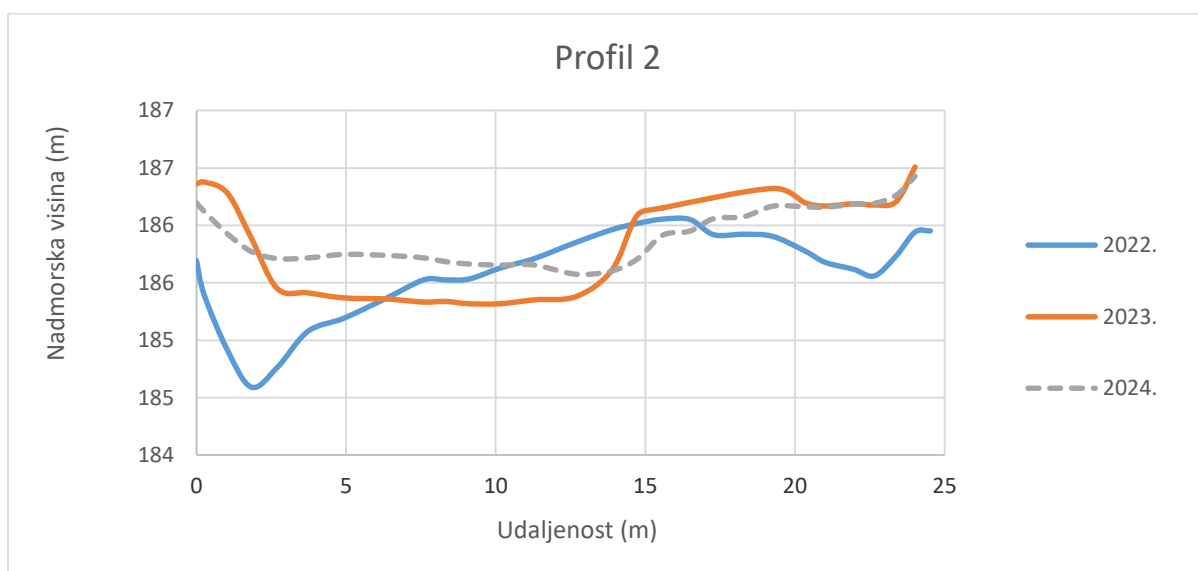
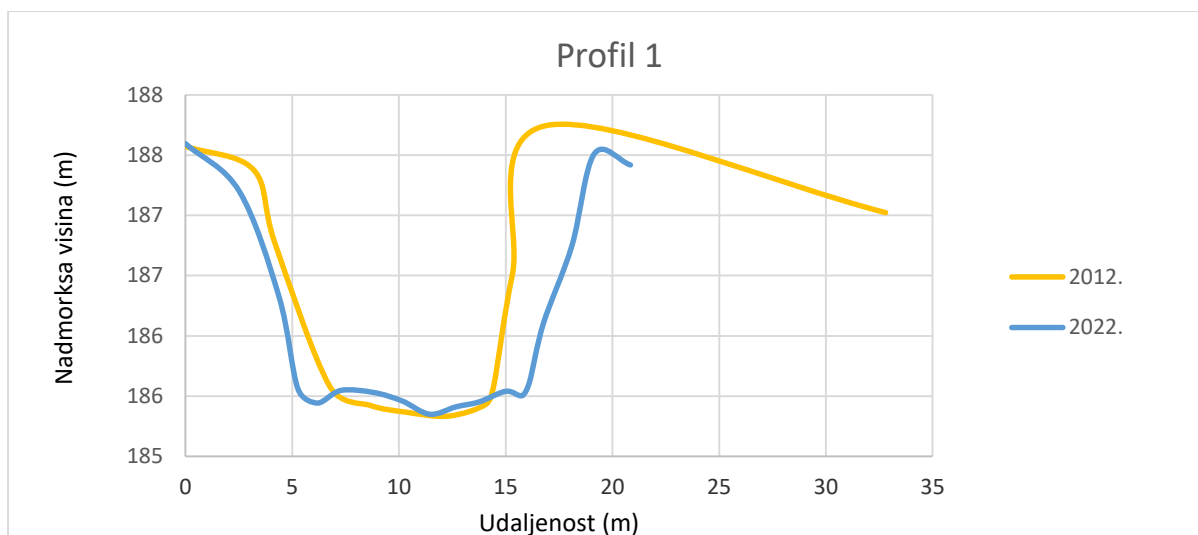
Značajnija bočna erozija obala od ožujka do listopada 2023. zabilježena je na najnižvodnijem dijelu erodirajuće desne obale, ukupne površine 64,3 m<sup>2</sup>. Od listopada 2023. do svibnja 2024. nisu zabilježene promjene u pružanju obala, niti značajne promjene u profilima 4 i 5. Ukupno bočno kretanje crte sredine korita na meandru od 2022. do 2024. je iznosilo 2,9 m, odnosno 1,45 m godišnje.

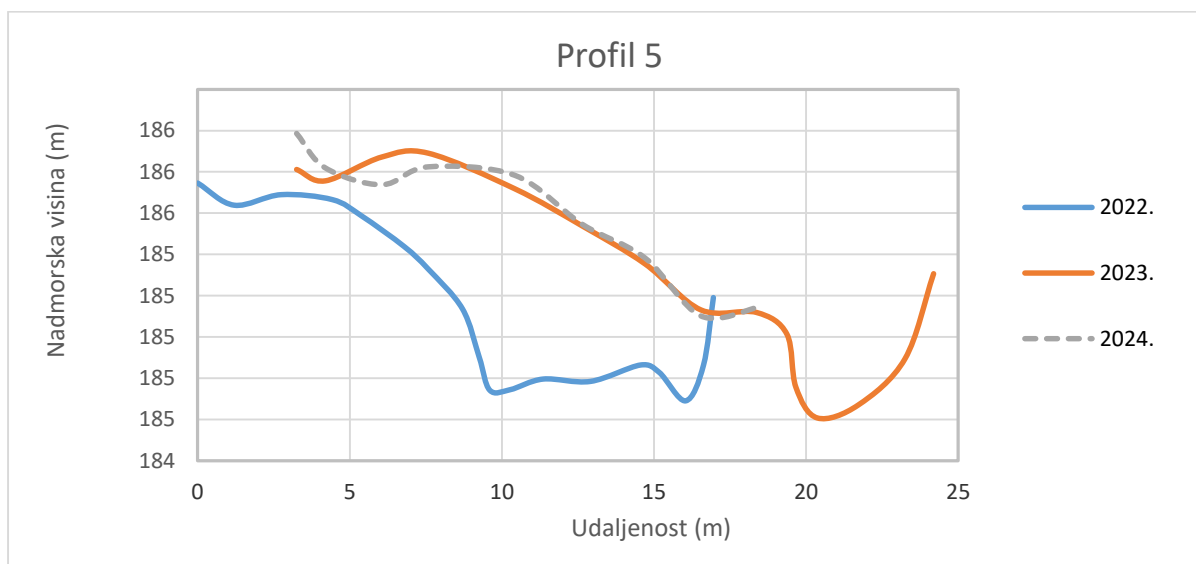
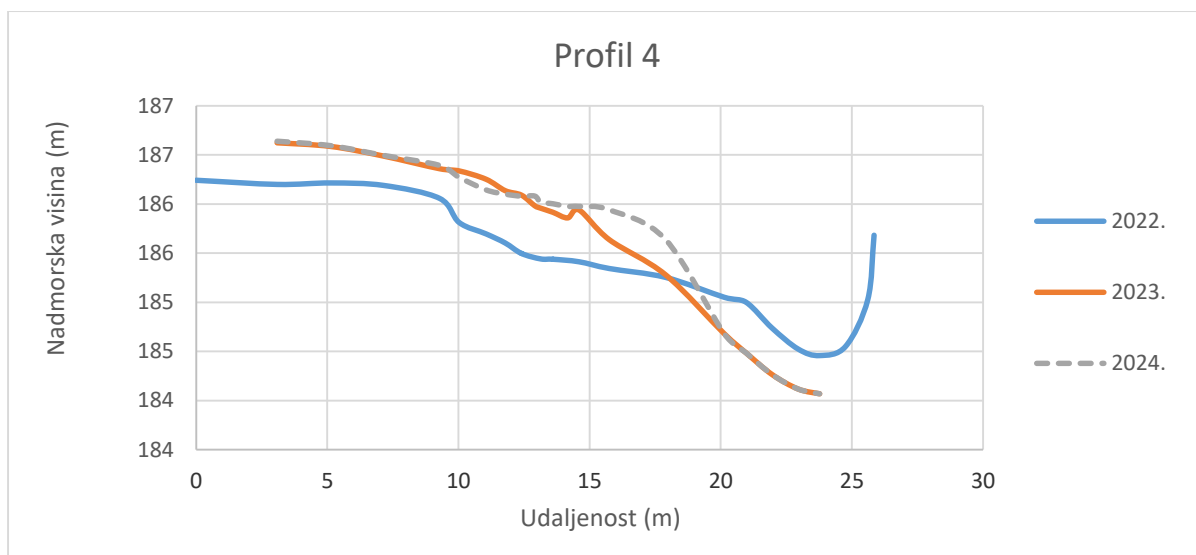




Sl. 4.20. Promjene korita na lokaciji Deževci od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 07.05.2024.







Sl. 4.21. Izmjereni profili na lokaciji Deževci. Isprekidane linije prikazuju profile procijenjene na temelju DSM modela dobivenog snimanjem bespilotnom letjelicom. Svi profili su orijentirani u smjeru toka rijeke (lijeva obala – desna obala).



Sl. 4.22. Snimka geomorfološkog stanja istraživanog meandra prije (A), u vrijeme hidrotehničkih radova u koritu (B) i šest mjeseci kasnije (C)

#### 4.4.2. Lokacija Boričevci

Sljedeća lokacija nalazi se 3,5 km nizvodno od Deževaca u odsječku rijeke broj 2 kod naselja Boričevci. Terenskim istraživanjem obuhvaćeno je područje dvaju meandara ukupne duljine od oko 230 m po crti sredine korita. U prvom meandru, strma, konkavna obala nalazi se na lijevoj strani te je prekrivena travom, u neposrednoj blizini poljoprivrednih površina. U nizvodnom meandru strma, erodirajuća obala je desna, te je prekrivena drvenastom vegetacijom (Sl. 4.23C). U ovom dijelu rijeke korito je kao i na prethodnoj lokaciji prijelaznog oblika između jednostavnog i isprepletenog. Nagib korita na cijelom odsječku iznosi 2,7 m/km. Veličina sedimenta dna korita procijenjena Wolmanovom metodom iznosi  $D_{50} = 35$  mm, što je neznatno manje nego na uzvodnoj lokaciji Deževci (Sl. 4.23B). U strukturi obala dominiraju krupni i srednje krupni pijesak (0,2-2 mm, 54,1 %), udio šljunka (frakcija  $> 2$  mm) je 24,1 %, a silta i gline 12,4 % (Sl. 4.23A).

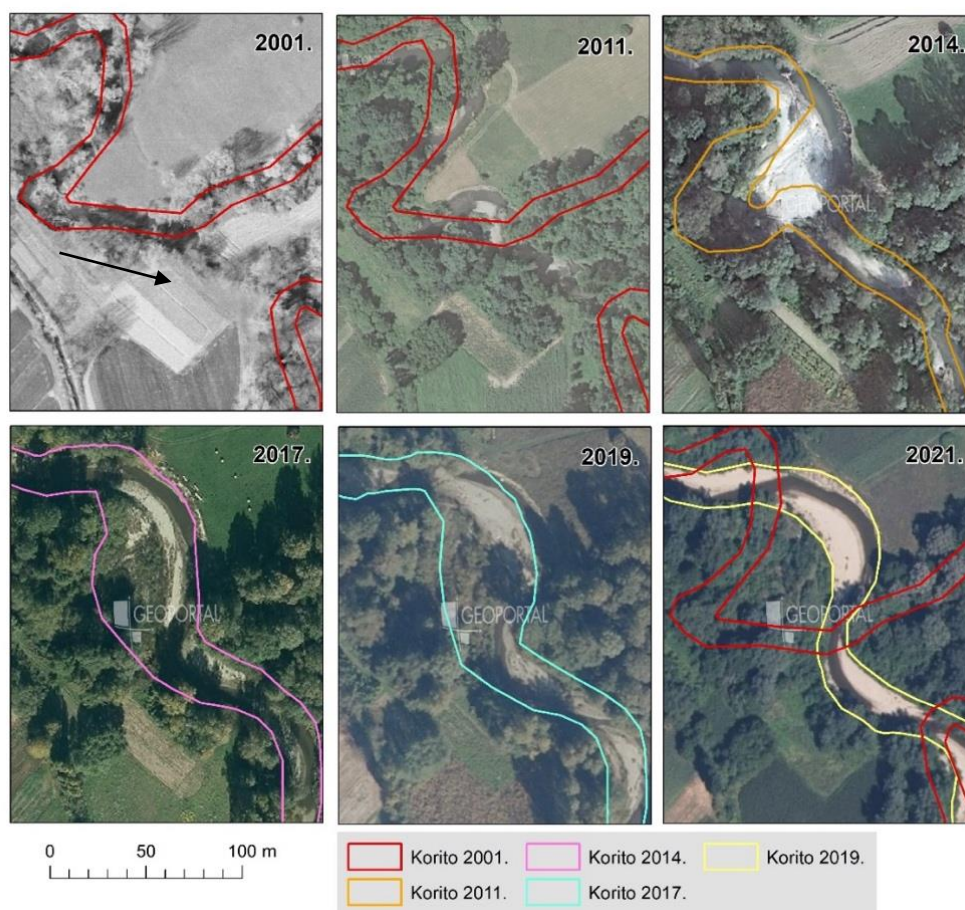




Sl. 4.23. Struktura strme obale uzvodnog meandra (A), struktura sedimenta na prudu (B), pogled iz bespilotne letjelice na istraživane meandre 30. 3. 2023. (C). Strelica – smjer toka.



Pružanje korita na istraživanoj lokaciji je 2001. godine bilo značajno drugačije nego u posljednjih deset godina (Sl. 4.24). Na lokaciji se u to vrijeme nalazio meandar lijevog skretanja, prilično oštrog zavoja. Obale su bile prekrivene uskim pojasom drvenaste vegetacije, dok su na naplavnoj ravnici prevladavale poljoprivredne površine. Godine 2011., crta sredine korita mjestimično je migrirala za 10-20 m, što je dovelo do sužavanja vrata meandra i erozije naplavne ravnice. Također, presječen je veći nizvodni meandar (koji u cijelosti nije prikazan na slikama), vrlo vjerojatno ljudskom intervencijom. Nakon velike poplave 2014., na ortofotu je vidljivo da je rijeka značajno promijenila pružanje korita: došlo je do prirodnog presijecanja meandra na njegovom vratu, te je na mjestu nekadašnje naplavne ravnice nastao meandar desnog skretanja. Na konveksnoj, blagoj obali novonastalog meandra formiran je prostran bočni prud. U sljedećim godinama, meandar je postupno migrirao bočnom erozijom, a na mjestu nekadašnjeg korita iz 2001. razvila se drvenasta vegetacija.



Sl. 4.24. Recentne promjene korita Orljave na lokaciji Boričevci u razdoblju 2001. – 2021.

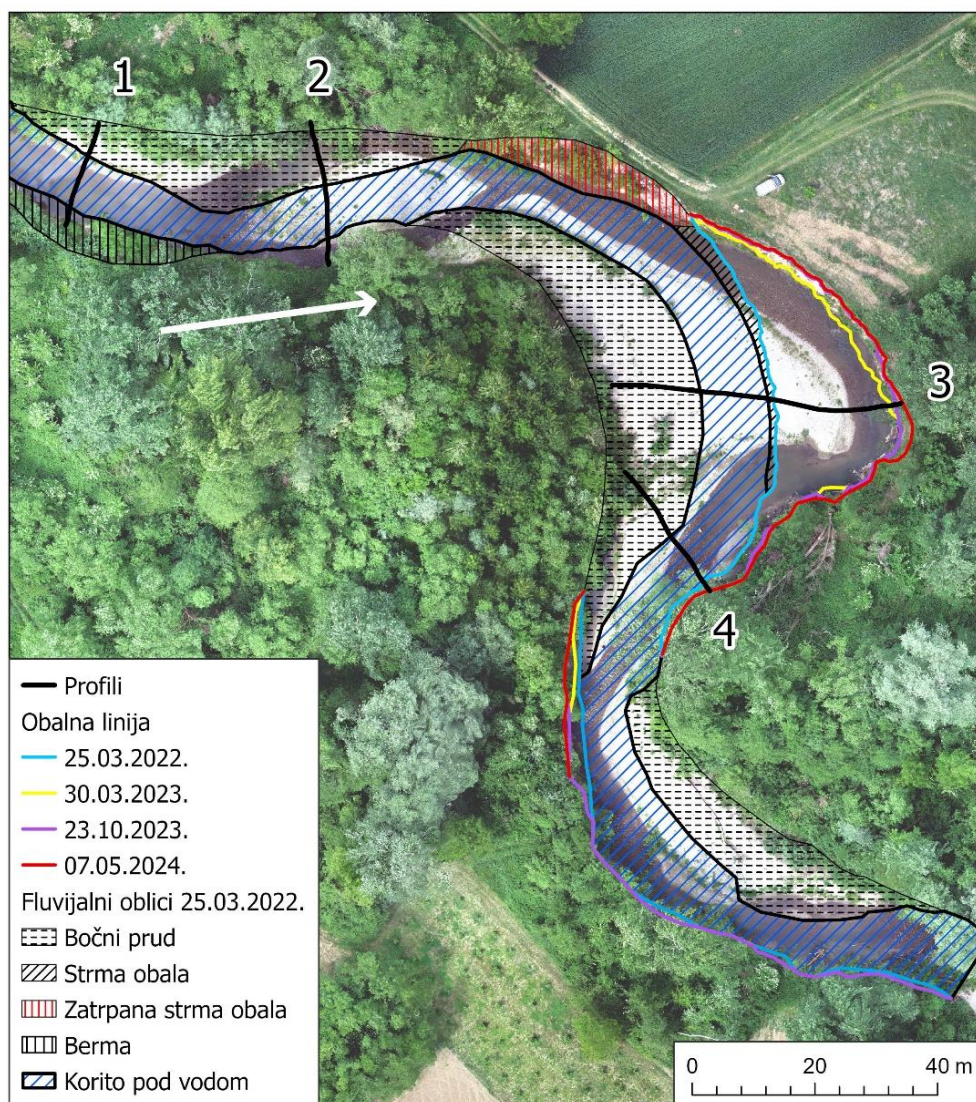
Prvo terensko istraživanje i snimanje bespilotnom letjelicom provedeno je krajem ožujka 2022., kada su kartirani fluvijalni reljefni oblici korita (prudovi, berma, obale) (Sl. 4.25). Također je posebno kartiran uzvodni dio lijeve strme obale na kojem je zabilježeno odlaganje otpada i građevinskog materijala, kojim lokalno stanovništvo vjerojatno pokušava spriječiti bočnu eroziju i zaštititi poljoprivredne površine. Prosječna širina aktivnog korita na uzvodnom meandru (između profila 2 i 4) 2022. godine iznosila je 23,1 m, s maksimalnih 27,5 m širine na profilu 3. Prosječna širina nizvodnog meandra (nizvodno od profila 4) iznosila je 16,5 m s maksimumom od 21,5 m. Najuzvodniji profil 1 izmjeren je na istoj lokaciji geodetskog snimanja iz 2012., oko 40 m uzvodno od istraživanog meandra. Usporedbom sa stanjem iz 2012. zabilježena je migracija korita udesno za 10-ak metara s povećanjem dubine od 0,4 m (Sl. 4.26).

Tijekom terenskog istraživanja u ožujku 2023. bespilotnom letjelicom zabilježena je intenzivna erozija lijeve strme obale meandra uz poljoprivredne površine (Sl. 4.25). Analizom povlačenja obalne linije izračunato je da je površina erodirane naplavne ravnice u usporedbi sa stanjem snimljenim u ožujku 2022. iznosila ukupno 682 m<sup>2</sup>. Udaljenost linearnog povlačenja obale iznosila je prosječno 7,3 m, s maksimumom od 20,3 m na profilu 3. Također je ustanovljena značajna promjena u morfologiji prudova i samog meandra. Na uzvodnoj infleksijskoj točki, gdje je poprečni presjek korita 2022. godine bio blago asimetričnog oblika (strma desna obala, blaga lijeva obala s bočnim prudom), 2023. godine razvio se središnji prud te je zabilježeno blago povišenje u razini dna korita (Sl. 4.26, profil 2), uz eroziju streme desne obale za 4-5 m. Na profilu 4 također je vidljiv razvoj središnjeg pruda uz pomicanje talvega korita ulijevo za 4,5 m. S druge strane, na središnjem profilu 3 vidljiva je značajna erozija naplavne ravnice uz pomicanje talvega korita ulijevo za dvadesetak metara te akumulacija materijala na desnoj blagoj obali, odnosno prudu, od 1,0 do 1,5 m.

Budući da se lokacija infleksijskih točaka na istraživanom meandru nije značajno mijenjala, njegov razvoj, odnosno promjene u morfologiji prvenstveno treba okarakterizirati kao rotaciju, a ne nizvodnu migraciju (ili translaciju, prema Hooke, 1984). Vršna točka meandra pomaknula se u smjeru istoka s porastom amplitude meandra od 32,5 m (2022.) na 54,3 m (2023.). Nadalje, intenzivna bočna erozija pridonijela je širenju aktivnog korita za prosječno 8 m (34,6 %) u odnosu na stanje iz 2022., s maksimalnih 49,1 m širine na profilu 3. S druge strane, prosječna širina nizvodnog meandra s drvenastom vegetacijom na obalama iznosila je 19 m, što je 15,2 % više nego 2022. Na tom meandru površina erodirane naplavne ravnice u razdoblju 2022.-2023. iznosila je ukupno 83 m<sup>2</sup>, s maksimalno izmjerenih 3,1 m povlačenja obale.

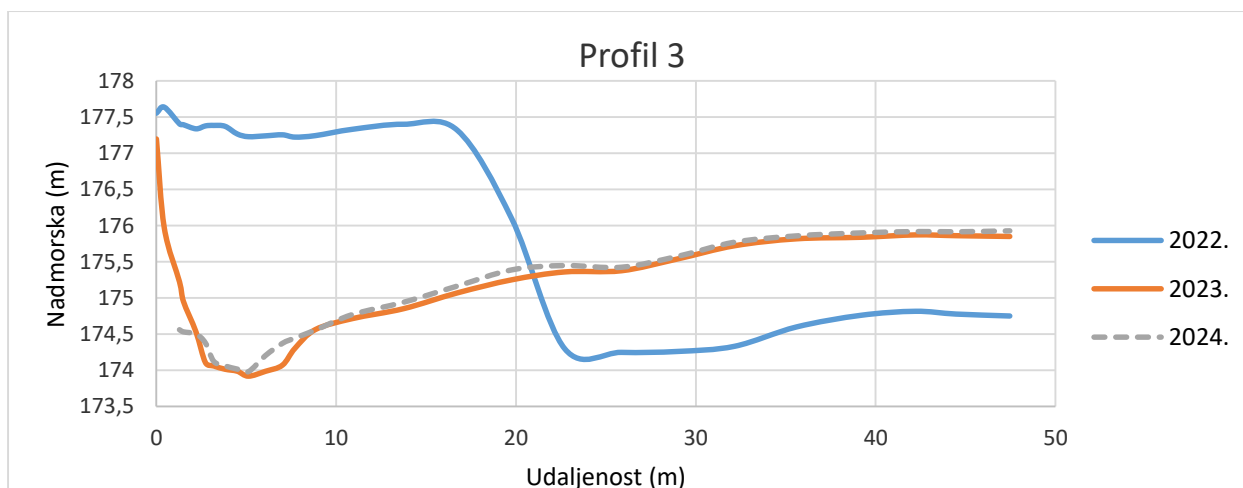
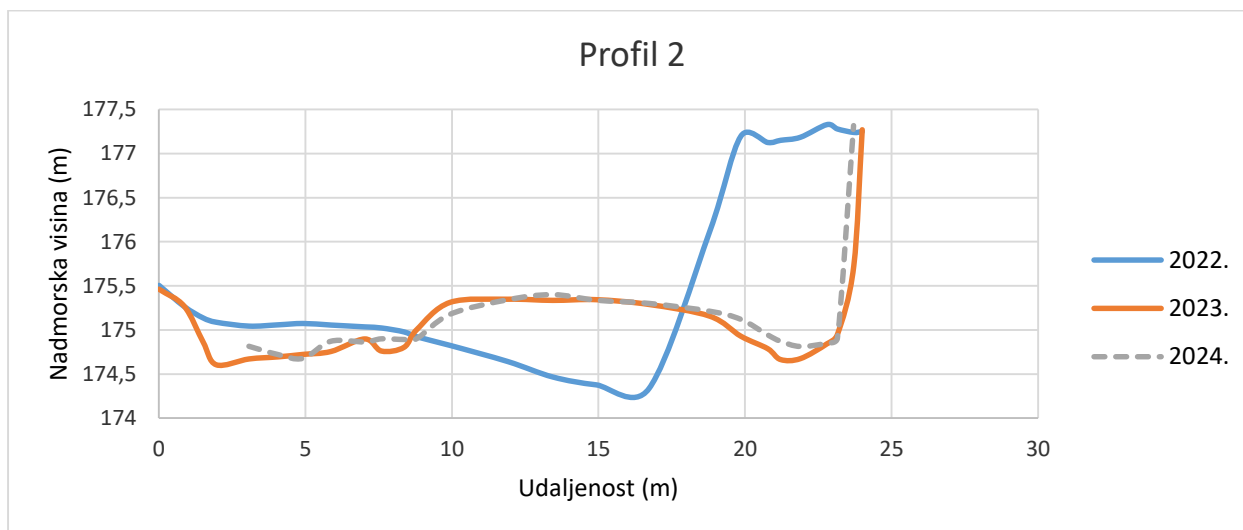
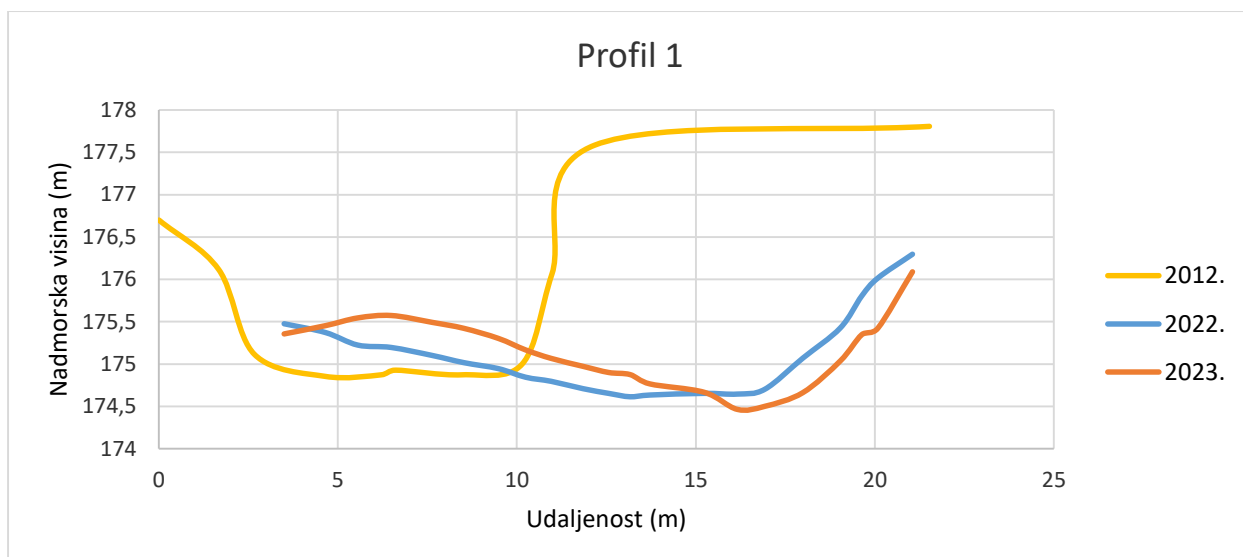


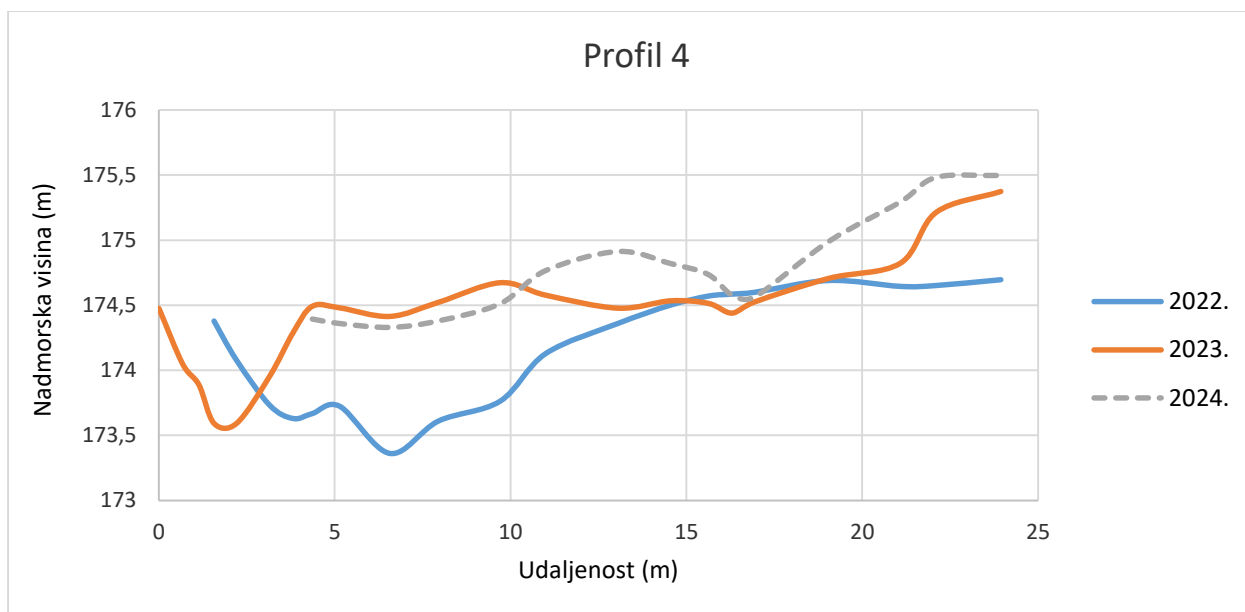
Tijekom terenskih istraživanja u listopadu 2023. i svibnju 2024. općenito su zabilježene manje vrijednosti erozije naplavne ravnice i povlačenja obalne linije. Također, nisu zabilježene značajne promjene u morfologiji korita, izuzev akumulacije sedimenta na središnjem prudu na profilu 4 (Sl. 4.26)



Sl. 4.25. Promjene korita Orljave na lokaciji Boričevci od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 7. 5. 2024.



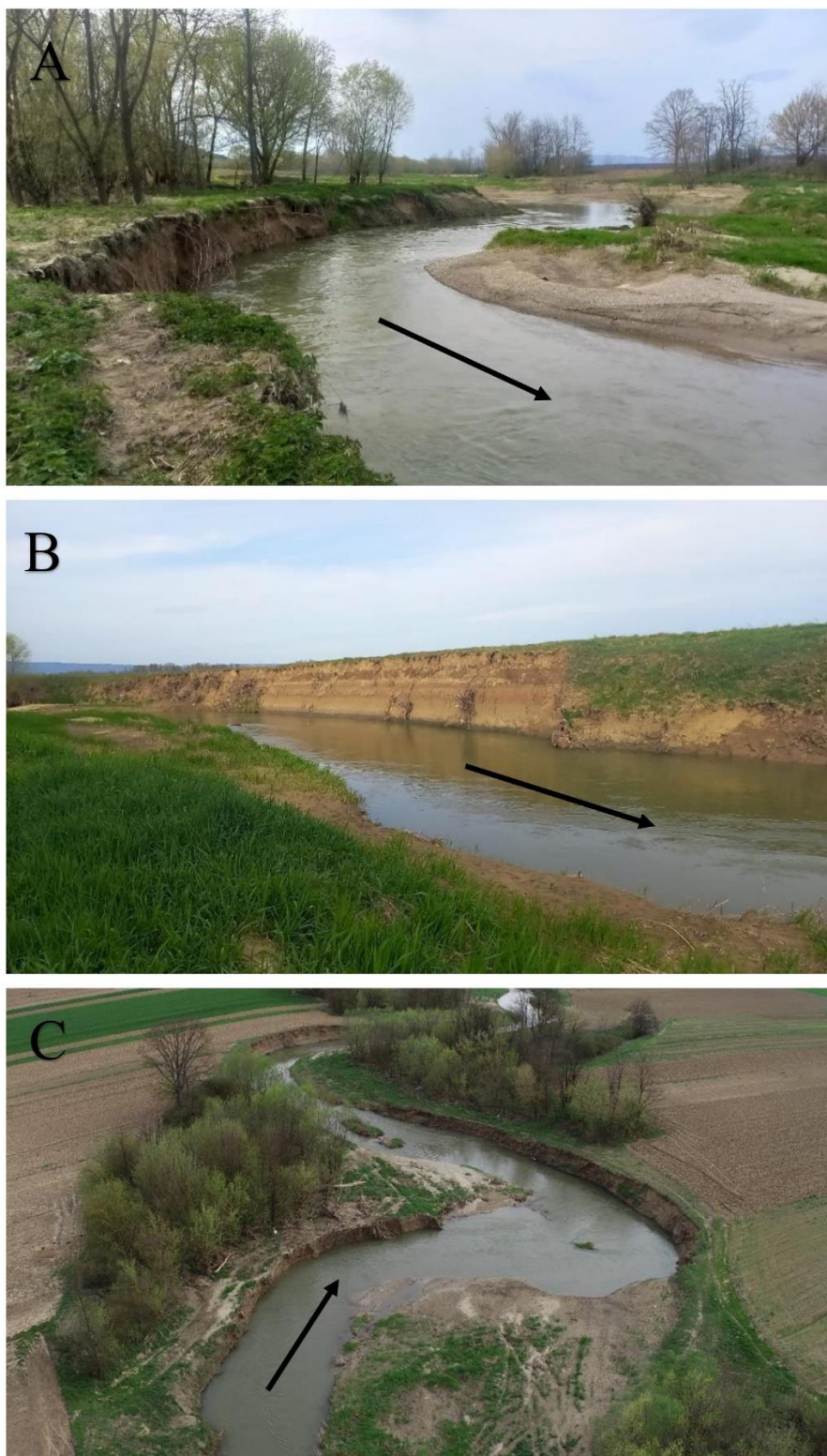




Sl. 4.26. Izmjereni profili na lokaciji Boričevci. Isprekidane linije prikazuju profile procijenjene na temelju DSM modela dobivenog snimanjem bespilotnom letjelicom. Svi profili su orijentirani u smjeru toka rijeke (lijeva obala – desna obala).

#### 4.4.3. Lokacija Vesela

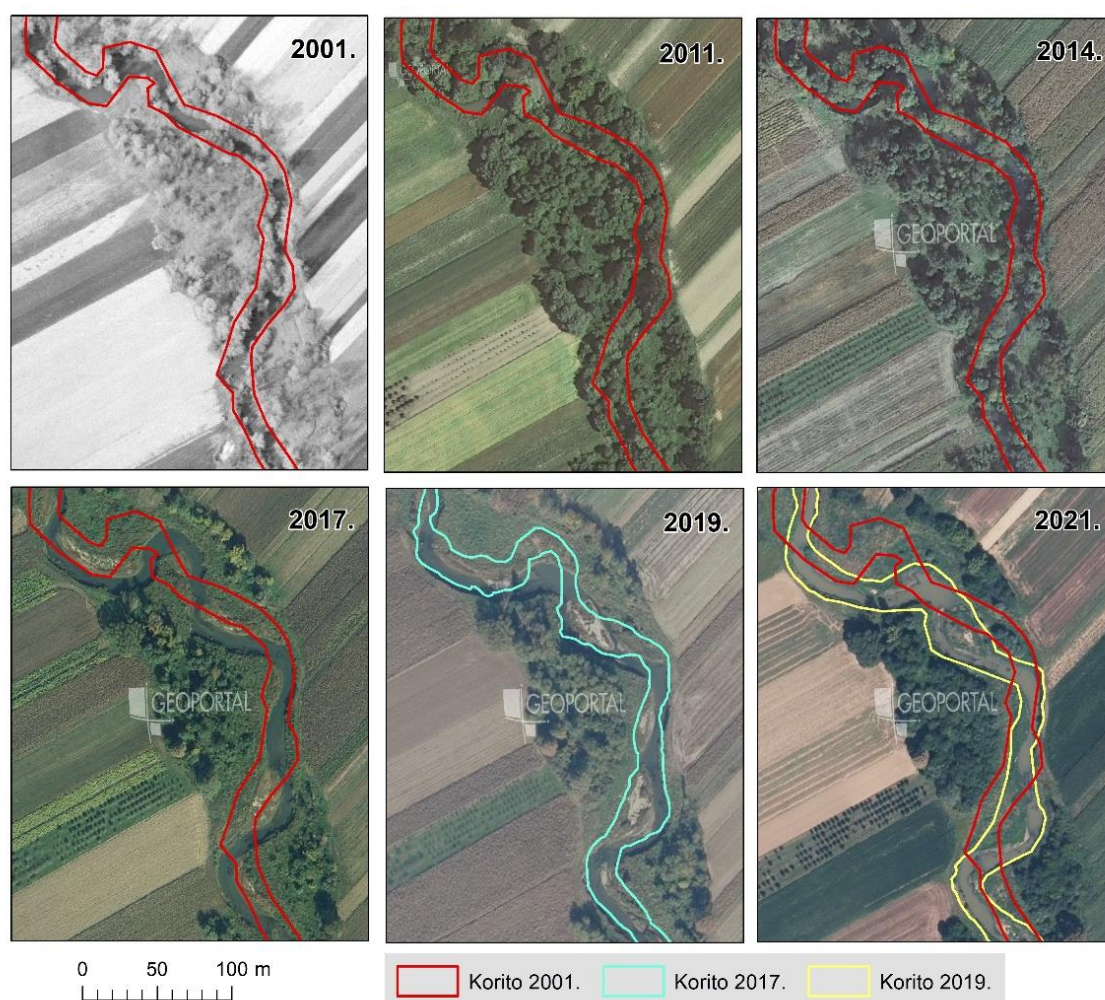
Lokacija Vesela nalazi se 12 km nizvodno od grada Požege u odsječku broj 6, blizu naselja Vesela. Terenskim istraživanjem obuhvaćena je duljina korita od oko 400 m, koja se sastoji od nekoliko kraćih meandara i jedne ravne dionice korita sa strmom lijevom obalom (Sl. 4.27). Oblik korita u odsječku 6 je općenito meandrirajući, međutim u uzvodnom dijelu istraživane lokacije nalazi se otok koji dijeli korito na dva rukavca. Sve obale prekrivene su zeljastom vegetacijom. Stope erozije naplavne ravnice i povlačenja obala analizirane su na desnoj strmoj obali u uzvodnom dijelu, te na lijevoj strmoj obali na središnjem i nizvodnom dijelu istraživane dionice korita. Nagib korita na odsječku 6 je prosječno 0,44 m/km. U strukturi obala na lokaciji dominiraju silt i glina (42,4 %), frakcija pijeska zastupljena je s 31,0 %, a šljunci s 19,6 %.



Sl. 4.27. Pogled uzvodno na strmu desnu obalu na uzvodnom dijelu istraživane lokacije (A), strma lijeva obala na središnjem ravnom dijelu istraživane lokacije (B), pogled nizvodno (C). Strelica – smjer toka.



Na lokaciji Vesela rijeka vijuga kroz koridor većinom zeljaste i dijelom drvenaste vegetacije, širine oko 100 m. Međutim, naplavna ravnica izvan tog koridora u potpunosti je prekrivena poljoprivrednim površinama, te se obale rijeke mjestimično nalaze tik uz polja. Godine 2001., obale rijeke su na istraživanoj lokaciji bile prekrivene rijetkom drvenastom vegetacijom, a prudovi nisu bili vidljivi (Sl. 4.28). Na ortofotima 2011. i 2014. pružanje korita ne može se jasno odrediti zbog gustoće vegetacije na obalama. Međutim, 2017. godine, nakon provedene hidrotehničke mjere uklanjanja priobalne vegetacije, pružanje korita pod vodom jasno se može kartirati. Između 2001. i 2019. godine bočno kretanje crte sredine korita na ovoj dionici iznosilo je ukupno 14 m, odnosno 0,78 m godišnje. Nadalje, 2019. godine u koritu se formiralo nekoliko bočnih prudova i jedan središnji prud na uzvodnom dijelu lokacije, koji se 2021. godine stabilizirao i pretvorio u otok.



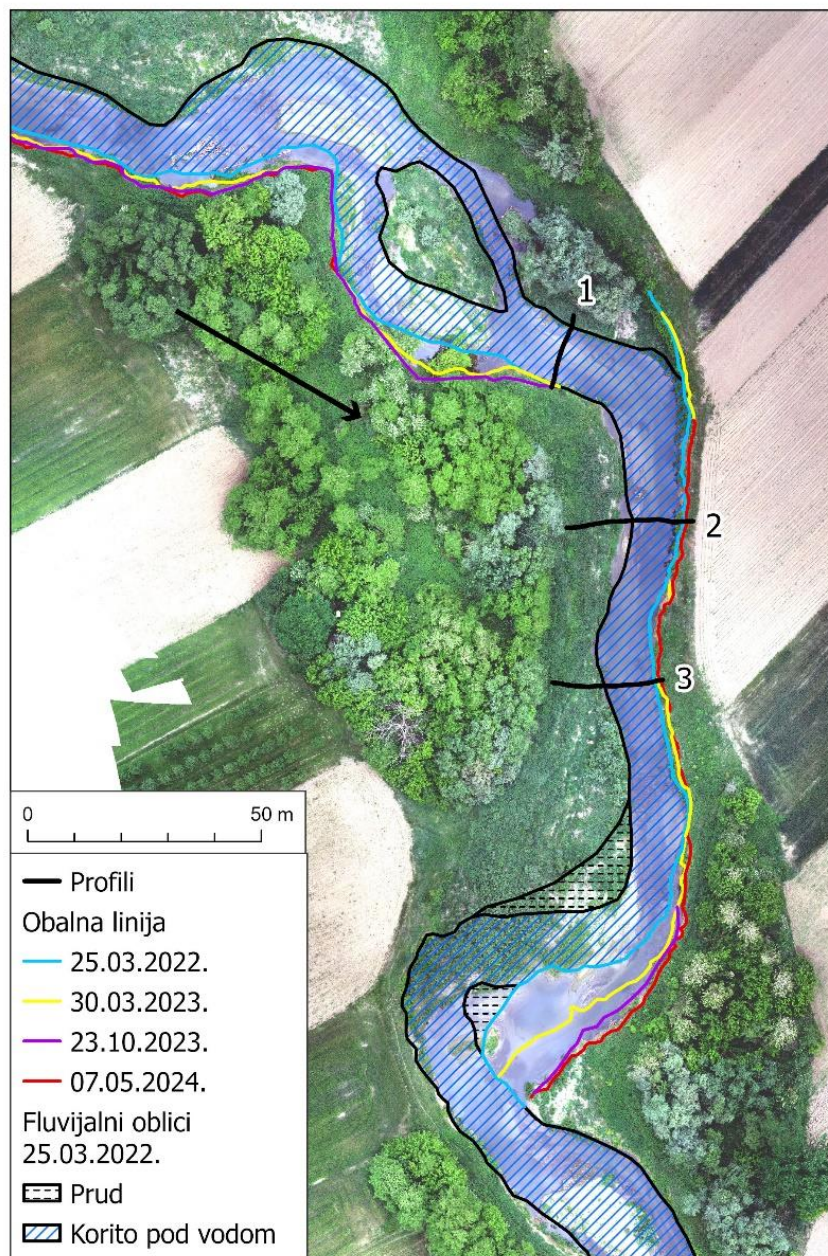
Sl. 4.28. Recentne promjene korita Orljave na lokaciji Vesela u razdoblju 2001. – 2021.

Na temelju snimanja bespilotnom letjelicom u ožujku 2022., na lokaciji su kartirani korito pod vodom i bočni prudovi. Širina korita je bila najveća uzvodno od otoka (23,2 m), dok je na ravnoj dionici korita uz strmu lijevu obalu širina dosežala otprilike 10 m. U ožujku 2023. zabilježena je značajna erozija strmih obala, od 372,8 m<sup>2</sup> na desnoj obali do 551,1 m<sup>2</sup> na lijevoj obali. Najveće povlačenje obale zabilježeno je na desnoj obali kod otoka (6,6 m), te nizvodno od ravne dionice korita na lijevoj obali (12,7 m) (Sl. 4.29). Na tom dijelu istraživane lokacije općenito su izmjerene najveće promjene korita: morfologija meandra lijevog skretanja promijenjena je erozijom blage, lijeve obale, i stvaranjem novog korita presijecanjem toka preko pruda (engl. *chute cut-off*). Bočno kretanje u samom meandru iznosilo je prosječno 4,3 m, a maksimalna širina aktivnog korita povećala se s 21,8 na 31,7 m. Na području nekadašnjeg korita pod vodom u vršnom dijelu meandra iz 2022. nataložio se sediment, kojeg je kasnije prekrila zeljasta vegetacija (Sl. 4.29).

U listopadu 2023. zabilježene su sljedeće površine erozije naplavne ravnice: 109,7 m<sup>2</sup> za desnu obalu i 290,2 m<sup>2</sup> za lijevu obalu. Na posljednjem terenskom istraživanju u svibnju 2024. značajnija erozija naplavne ravnice zabilježena je samo u nizvodnom dijelu lijeve obale kod meandra lijevog skretanja (77,6 m<sup>2</sup>) (Sl. 4.29). Tijekom dvije godine terenskih istraživanja na lokaciji, a i u usporedbi sa stanjem na ortofotima 2017.-2021., utvrđeno je da se površina drvenaste vegetacije na naplavnoj ravnicu nije širila, što znači da se zeljasta vegetacija uz rijeku redovito kosi.

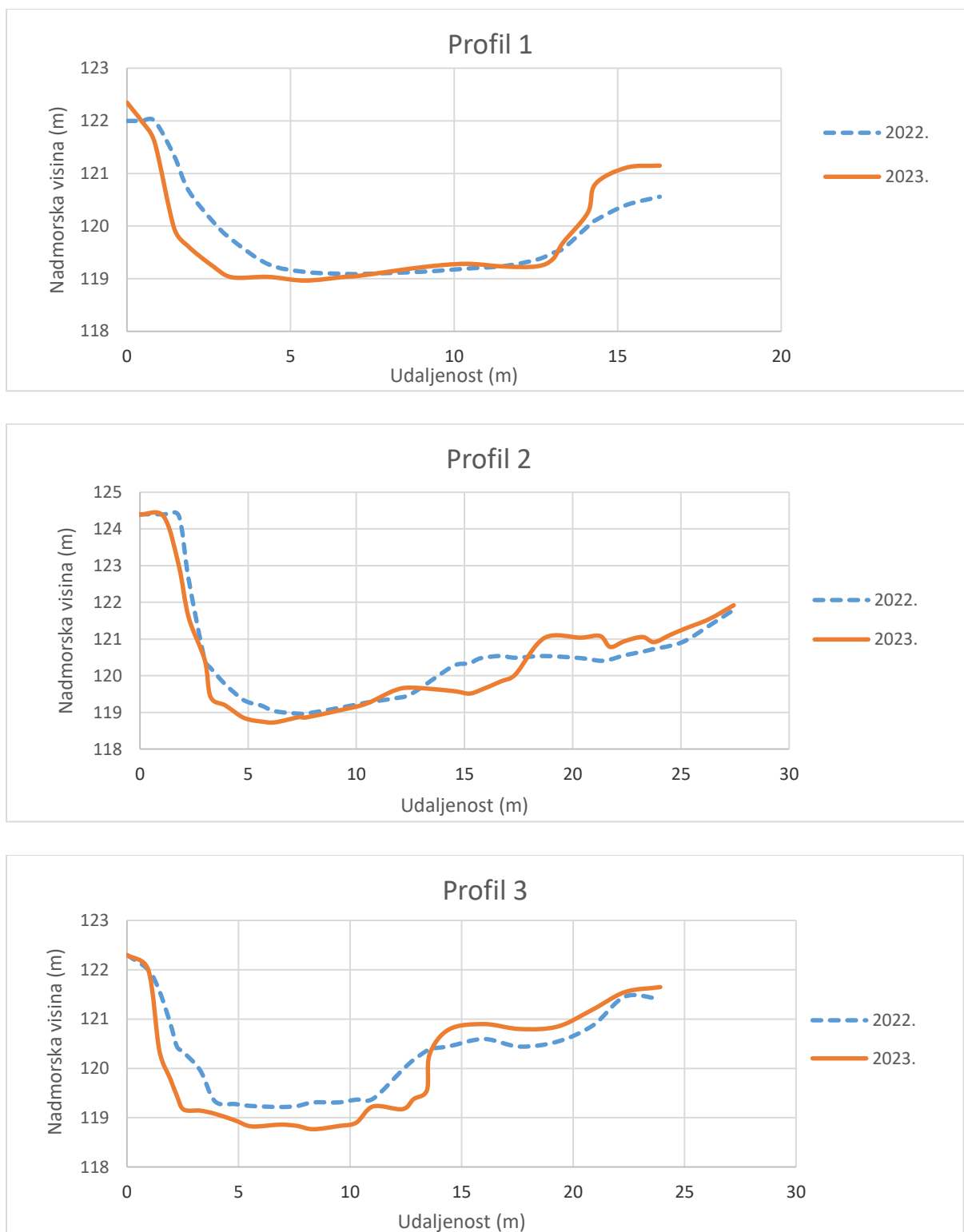
Poprečni presjeci korita mjereni su u listopadu 2023., a za 2022. su procijenjeni na temelju DSM modela zbog čega dubinu korita (talveg) treba uzeti sa zadržkom. No, visine obala procijenjene su zadovoljavajućom točnošću (procijenjena vertikalna greška DSM modela je 0,1 m). Na svim profilima je zabilježeno proširivanje, odnosno erozija lijeve strme obale, te akumulacija materijala na desnoj, blagoj obali (Sl. 4.30). Na profilu 1 proširivanje korita ulijevo iznosilo je cca 1 m, a akumulacija materijala 0,5±0,1 m. Na profilu 2 erozija strme obale pri vrhu iznosila je oko 0,5±0,1 m, a akumulacija materijala na desnoj blagoj obali bila je neravnomjerna (0,1-0,5 m). Na profilu 3 nije zabilježena značajna erozija lijeve strme obale, a akumulacija na desnoj obali iznosila je otprilike 0,3±0,1 m. Zbog bočnog kretanja rijeke, lokacije profila korita snimljenih 2012. godine se od najkasnije 2017. nalaze na naplavnoj ravnicu, stoga nije bila moguća usporedba razine korita s današnjim stanjem.





Sl. 4.29. Promjene korita Orljave na lokaciji Vesela od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 7. 5. 2024.



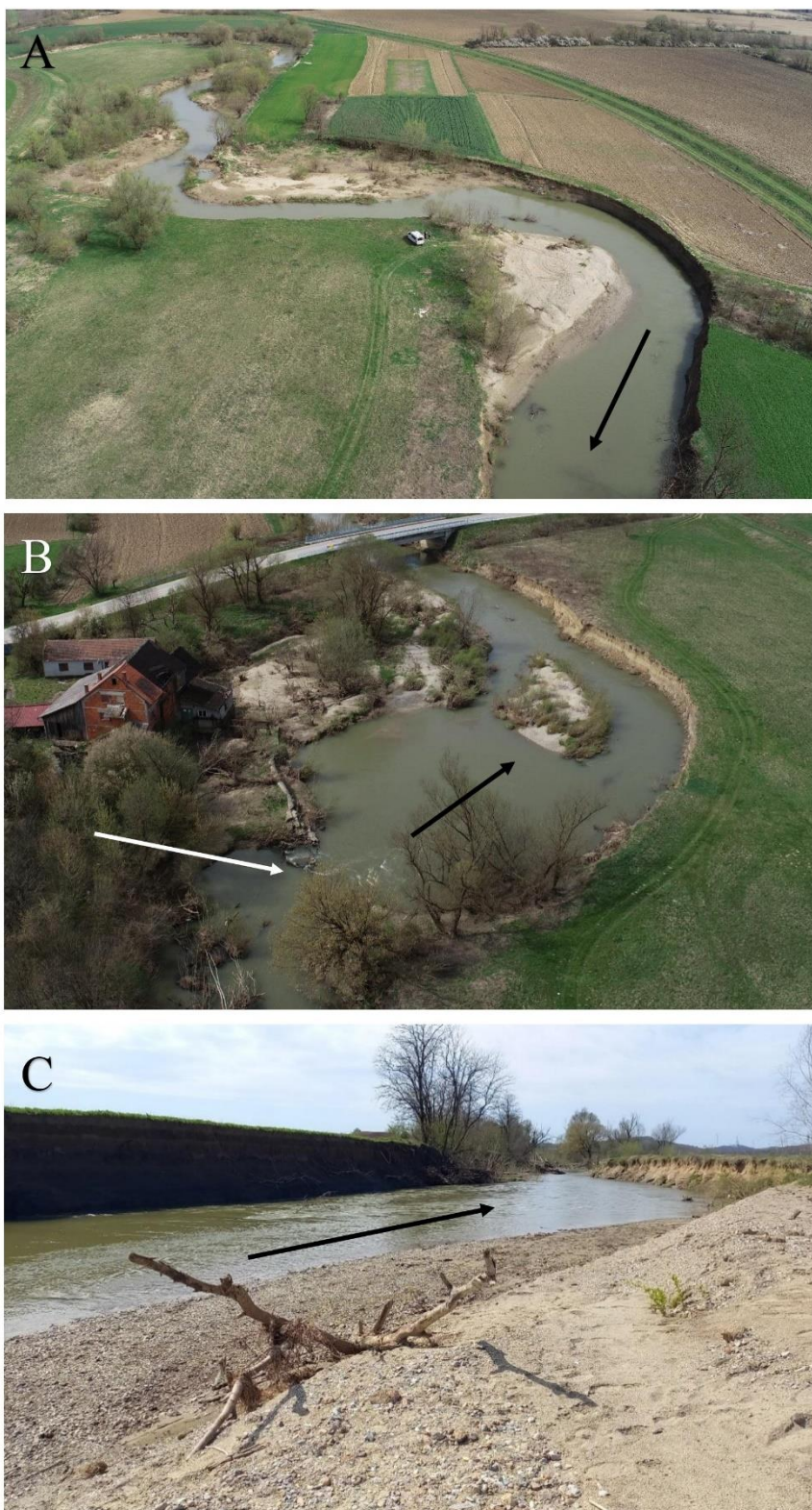


Sl. 4.30. Izmjereni profili na lokaciji Vesela. Isprekidane linije prikazuju profile procijenjene na temelju DSM modela dobivenog snimanjem bespilotnom letjelicom. Svi profili su orijentirani u smjeru toka rijeke (lijeva obala – desna obala).

#### 4.4.4. Lokacija Bučje

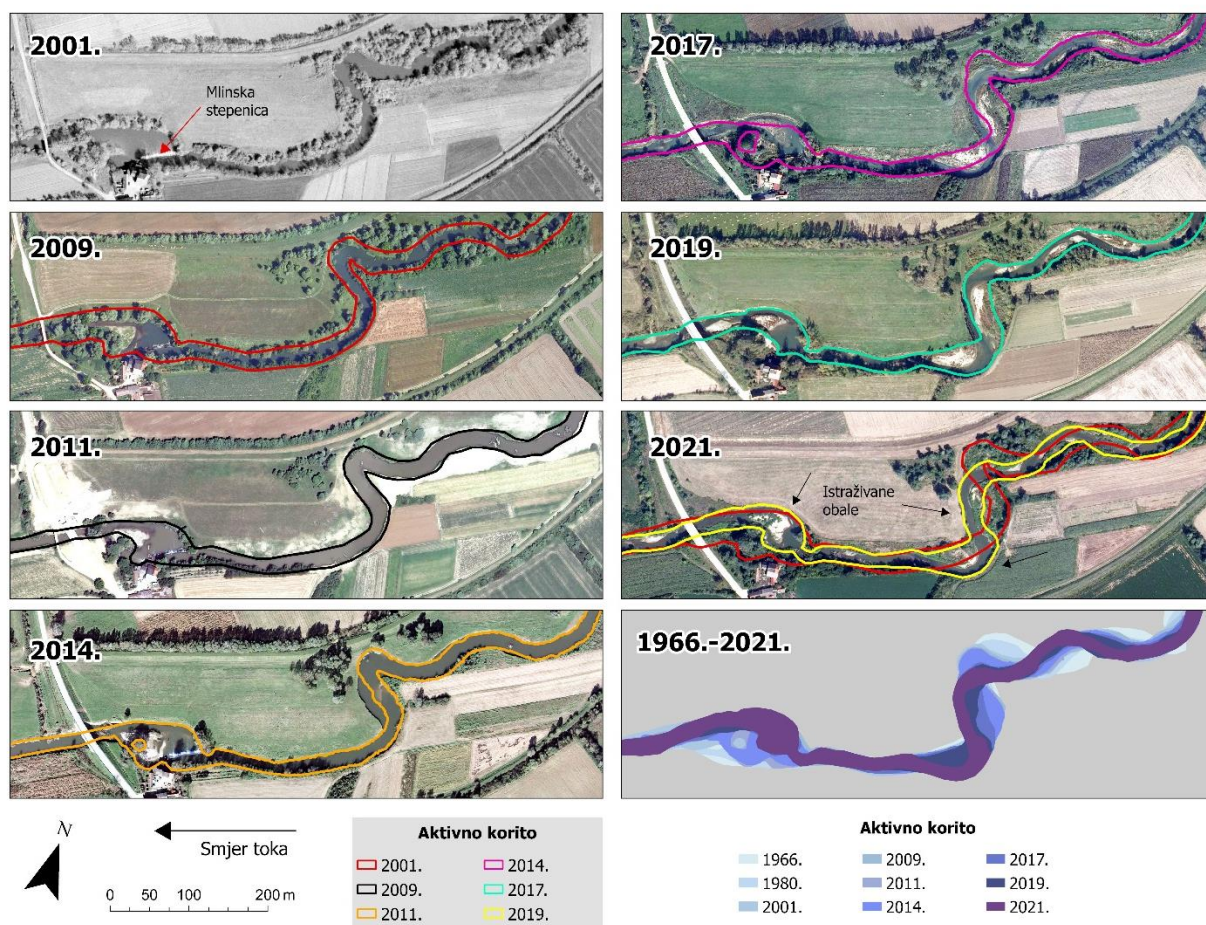
Lokacija Bučje nalazi se 7,5 km nizvodno od hidrološke postaje Frkljevci u donjem dijelu toka Orljave nizvodno od grada Pleternice, u odsječku rijeke 8. Terenskim istraživanjem obuhvaćena je duljina korita od oko 500 m uzvodno od mosta koji se nalazi u blizini naselja Bučje. Stotinjak metara uzvodno od mosta nalazi se mlin Ganoci (toponim prema HOK5 iz 1980.), koji je na toj lokaciji prikazan i na karti prve vojne izmjere s kraja 18. st. (Arcanum, n.d.). Nekad pokretan na vodenički pogon, mlin je od 1980-ih godina koristio električni pogon iz male hidroelektrane na lokaciji (Miletić, 2021). Međutim, mlin posljednjih desetak godina nije u funkciji, a mlinska stepenica visine 4 m razrušena je 2016. godine zbog neodržavanja (Milanović, 2016). Stope erozije naplavne ravnice analizirane su na desnoj strmoj obali nizvodno od probijene stepenice, te na dva meandra dvjestotinjak metara uzvodno od stepenice (Sl. 4.31). Sve obale nalaze se uz poljoprivredne površine te su prekrivene travom. Uzorkovana obala se 52,7 % sastoji od pijeska, i to većinom od frakcije krupnog pijeska (0,63-2 mm), šljunci imaju udio od 16,3 %, a silt i glina od 31 %. Uzorkovan prud sastojao se 47,7 % od šljunaka, najvećim dijelom od sitne frakcije (2-4 mm), pijesci su činili 41,6 % (s najvećim udjelom krupne frakcije 0,63-2 mm), a silt i glina 11 %.

Prema aerofotogramterijskoj snimci iz 2001., obale rijeke prekrivao je uski koridor drvenaste vegetacije izvan kojega su se nalazile poljoprivredne površine (Sl. 4.32). Na snimci je vidljivo slapište na lokaciji mlinske stepenice. Godine 2009., pružanje korita nije se značajno mijenjalo, kao niti struktura vegetacije na obalama. Međutim, 2011. godine vidljive su posljedice antropogenog uklanjanja vegetacije na obalama – površine uz obale uglavnom je prekrivalo golo tlo, izuzev kraćeg pojasa očuvane drvenaste vegetacije na lijevoj obali uzvodno od stepenice. Bitno je istaknuti kako se pružanje korita nije značajno promijenilo u usporedbi s 2009. godinom. Širenje korita i bočna erozija na uzvodnim meandrima zabilježeno je 2014. godine, a intenzifikaciju tih procesa uz stvaranje bočnih prudova moguće je pratiti u godinama 2017.-2021. Ukupna stopa bočnog kretanja na oba meandra u razdoblju 2014. – 2021. iznosila je 15,1 m, s površinom erodirane naplavne ravnice od oko 3.000 m<sup>2</sup>. Također, nizvodno od stepenice, površina erodirane naplavne ravnice na desnoj obali iznosila je 1270 m<sup>2</sup>, a prosječno povlačenje obale 8,8 m s maksimumom od 16,3 m. Vegetacija na obalama do 2021. uspjela se oporaviti na konveksnim, blagim obalama na kojima djeluju procesi akumulacije i stabilizacije korita, dok su strme, konkavne obale koje erodiraju bile prekrivene niskom, zeljastom vegetacijom.



Sl. 4.31. Meandri uzvodno od mlinske stepenice (A), korito nizvodno od stepenice (B), akumulirani sediment i drvni ostaci na prudu (C). Crne strelice označavaju smjer toka, a bijela strelica razrušenu stepenicu. Snimljeno 30. 3. 2023.





Sl. 4.32. Recentne promjene korita Orljave na lokaciji Bučje u razdoblju 2001. – 2021.

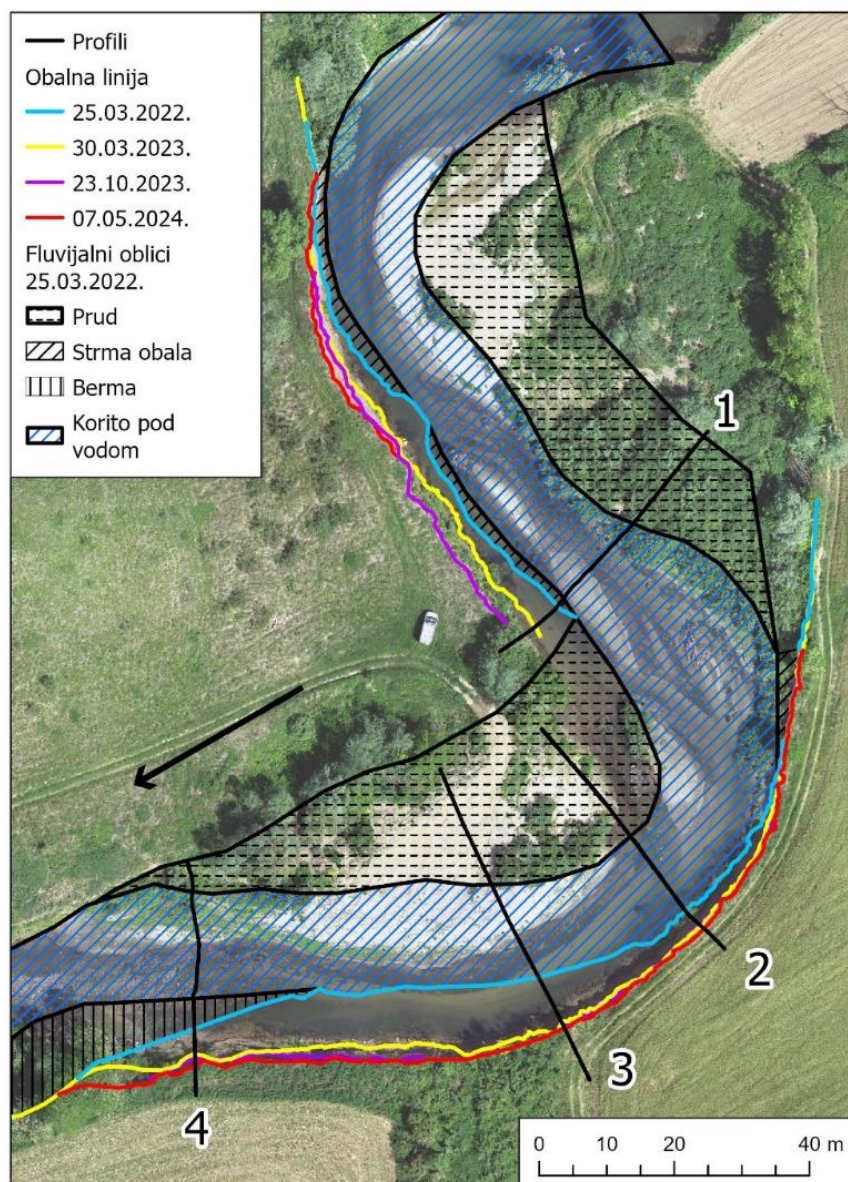
Prvo snimanje bespilotnom letjelicom na ovoj lokaciji obavljeno je u prosincu 2021. godine. Međutim, s obzirom da su do ožujka 2022. zabilježene manje promjene u položaju obalnih linija (prosječno povlačenje obale od 0,12-0,16 m), te radi višeg vodostaja tijekom snimanja i usporedivosti s drugim lokacijama, detaljno kartiranje fluvijalnih reljefnih oblika obavljeno je na temelju snimanja u ožujku 2022. (Sl. 4.33). Na dijelu lokacije uzvodno od stepenice, gdje su analizirane strme obale dvaju uzastopnih meandara, kartirani su prostrani bočni prudovi, kojima je 80-90 % površine bilo prekriveno zeljastom vegetacijom. Granica između prudova i naplavne ravnice određena je pojavom drvenaste vegetacije. Nizvodno od meandara uz lijevu obalu kartirana je berma. Površina aktivnog korita u ožujku 2022. iznosila je prosječno 25,8 m (od početka kartiranog korita do profila 4), s maksimumom od 42 m na nizvodnom meandru (profil 2). Na lokaciji geodetskog snimanja iz 2012. snimljen je profil 2 (Sl. 4.34). U usporedbi sa stanjem iz 2012. zabilježeno je pomicanje talvega korita za 37 m udesno i produbljivanje razine dna korita za 0,9 m.

U ožujku 2023. bespilotnom letjelicom zabilježena je značajna erozija obiju strmih obala i akumulacija sedimenta na bočnim prudovima. Posebno značajne vrijednosti erozije zabilježene su na lijevoj obali, na kojoj je ukupna površina erodirane ravnice u usporedbi sa stanjem iz ožujka 2022. iznosila 628,7 m<sup>2</sup>. Udaljenost linearnog povlačenja obale iznosila je prosječno 4,8 m, s maksimumom od 10,17 m nizvodno od profila 3. Na uzvodnoj, desnoj obali, izmjerene vrijednosti bile su nešto manje: 188,2 m<sup>2</sup>, s prosječnih 2,6 m povlačenja obalne linije. Navedena erozija strmih obala može se pratiti i na izmjerenim profilima 1-4 (Sl. 4.34), kao i migracija korita te akumulacija sedimenta na blagim, konveksnim obalama. Na profilu 1, razina lijevog bočnog pruda se povisila za 0,4-1 m, talveg korita se pomaknuo ulijevo za 11,5 m, a povlačenje obale iznosilo je oko 4,6 m. U sredini korita formiran je prud. Na profilu 2 došlo je do erozije nekadašnjeg pruda i stvaranja novog šireg korita, uz manju eroziju lijeve strme obale. Na profilu 3, povlačenje obale i pomicanje talvega ulijevo iznosile su oko 10 m, a akumulacija materijala na prudu mjestimično preko 1 m. Na profilu 4 povlačenje obale također iznosilo je oko 10 m, uz manju akumulaciju sedimenta na desnoj obali.

Izmjerene vrijednosti promjena u morfologiji meandra posljedica su njegove nizvodne migracije, bez značajnih promjena u amplitudi ili duljini između infleksijskih točaka (Sl. 4.33). Prosječno bočno kretanje crte sredine korita u razdoblju od ožujka 2022. do ožujka 2023. iznosilo je 3,8 m. Udaljenost između profila 2 i 3, koji su izmjereni po središnjim osima meandra 2022. i 2023. iznosi oko 25 m, što znači da je središnja os meandra migrirala za otprilike 25 m. Prosječna širina korita u ožujku 2023. iznosila je 29,7 m, dakle 15,1 % više nego u ožujku 2022.

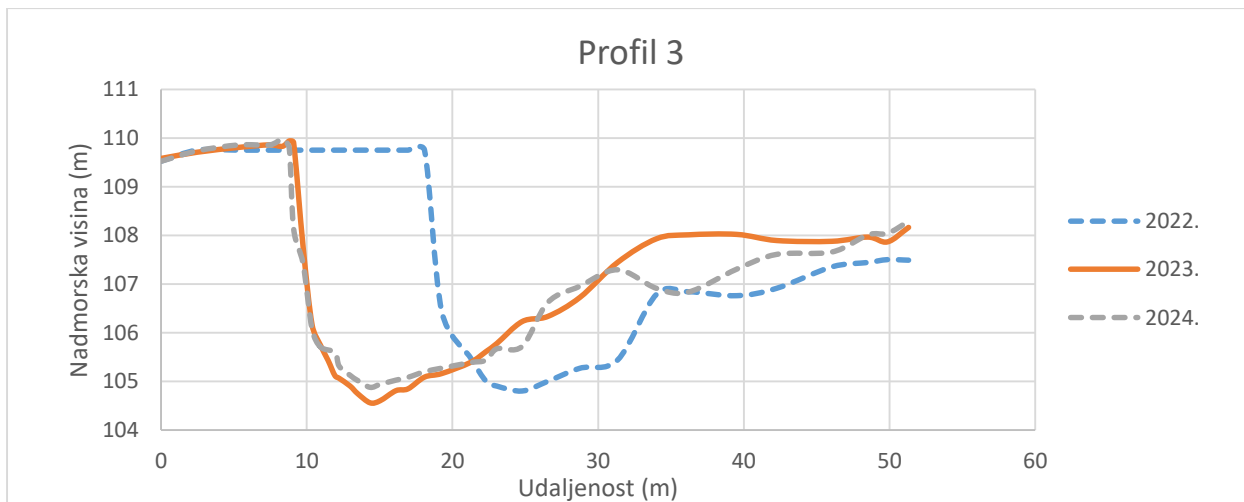
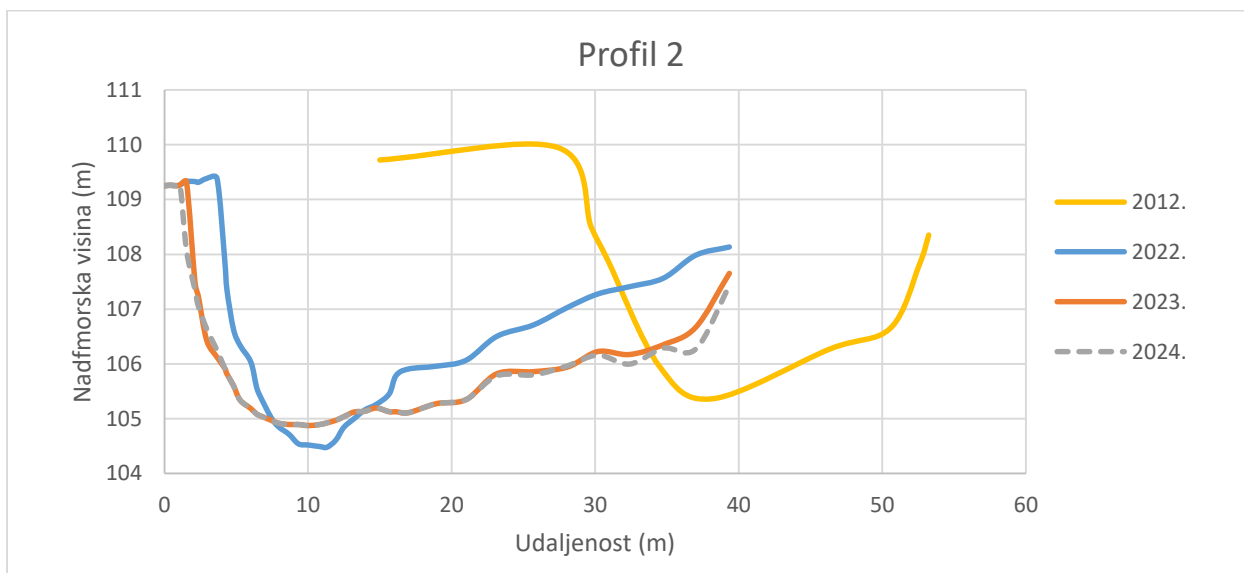
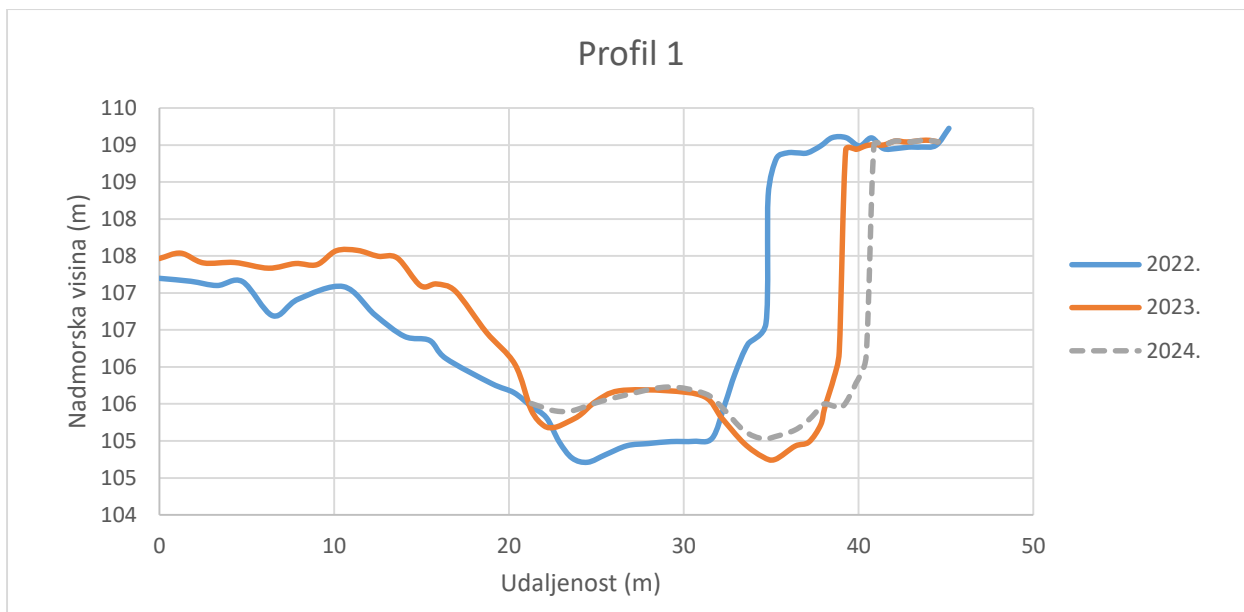
Od ožujka do listopada 2023. zabilježena erozija naplavne ravnice iznosila je 90-105 m<sup>2</sup> na istraživanim obalama, s prosječnim povlačenjem obale 2-3 m. Zeljasta vegetacija je dijelom prekrila prudove. Treba napomenuti da je tijekom terenskog izlaska u listopadu 2023. primijećeno ilegalno šljunčarenje na prudu od strane lokalnog stanovništva. Tijekom terenskog istraživanja u svibnju 2024. općenito su zabilježene manje vrijednosti erozije naplavne ravnice (25-45 m<sup>2</sup>) i povlačenja obalne linije (prosječno 1-2 m). Također, nisu zabilježene značajne promjene u morfologiji korita na profilima (Sl. 4.34).

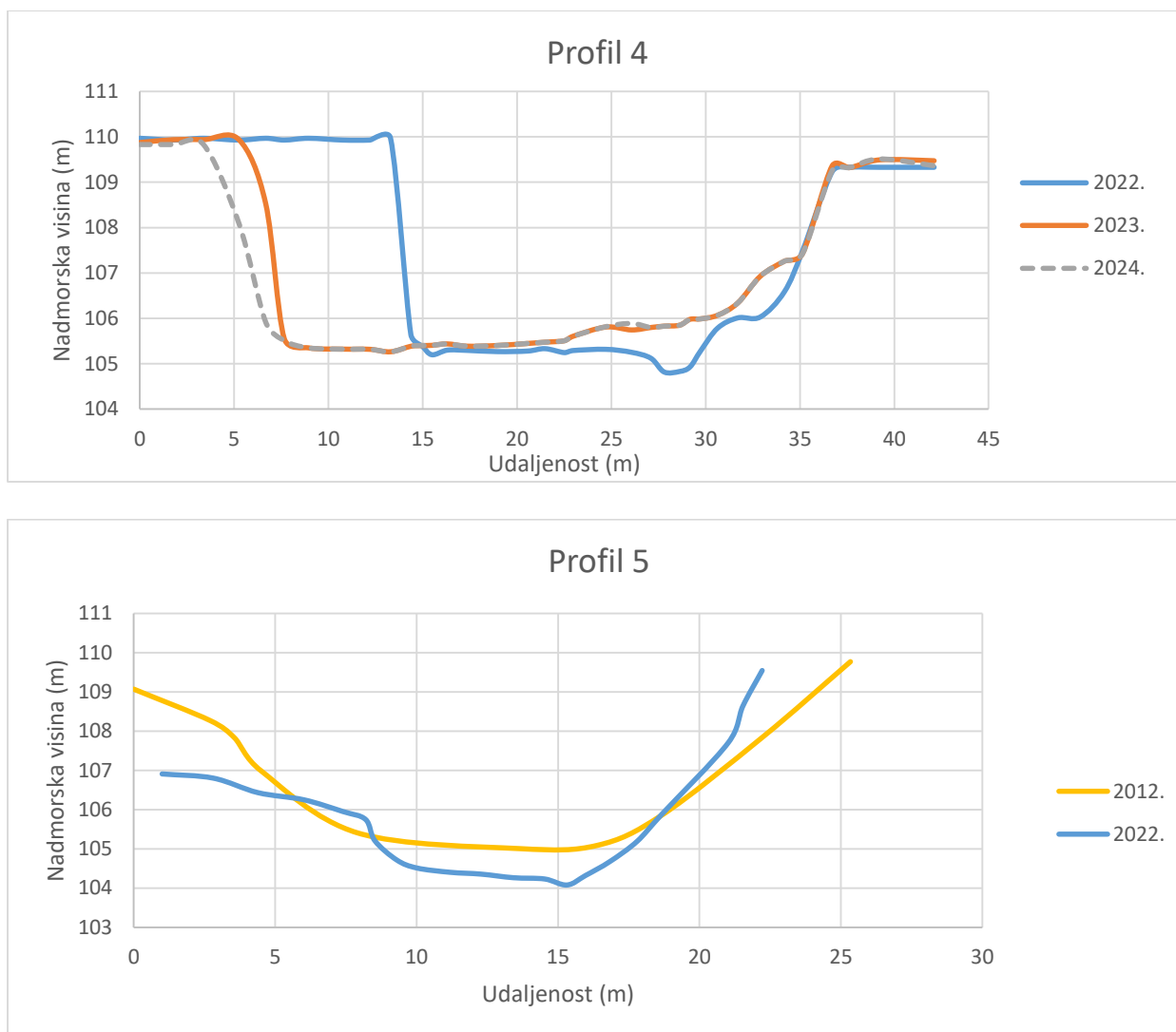




Sl. 4.33. Promjene korita Orljave na lokaciji Bučje, uzvodni meandri, od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 7. 5. 2024.



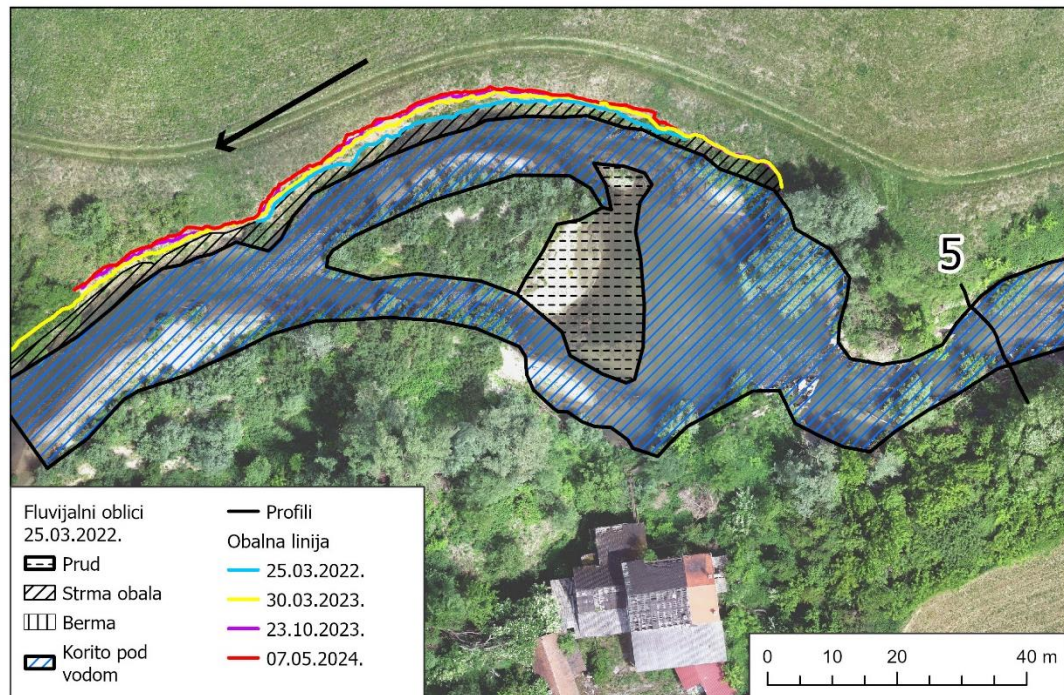




Sl. 4.34. Izmjereni profili na lokaciji Bučje. Isprekidane linije prikazuju profile procijenjene na temelju DSM modela dobivenog snimanjem bespilotnom letjelicom. Svi profili su orijentirani u smjeru toka rijeke (lijeva obala – desna obala).

Na istraživanoj desnoj strmoj obali nizvodno od mlinske stepenice, erozija naplavne ravnice bila je ujednačenija tijekom cijelog istraživnog razdoblja 2022.-2024. (Sl. 4.35), iako je najveća površina erodirane ravnice izmjerena u razdoblju od ožujka 2022. do ožujka 2023. kao i na meandrima uzvodno ( $105,9 \text{ m}^2$ , s prosječnim povlačenjem obale od 1 m). Međutim, ako se erodirane površine podijele s brojem dana između terenskih izlazaka, stope erozije 03.2022.-03.2023. i 03.2023.-10.2023. bile su približno jednake: iznosile su  $8,7 \text{ m}^2$ , odnosno  $8,4 \text{ m}^2$  mjesečno. Od 10.2023. do 05.2024. stopa erozije se smanjila na  $4,6 \text{ m}^2$  mjesečno. Samo pružanje korita na lokaciji se od 2022. do 2024. nije značajno promijenilo, a od morfoloških promjena treba spomenuti eroziju središnjeg pruda, i stvaranje manjeg lijevog bočnog pruda nizvodno.

Uzvodno od mlinске stepenice izmjeren je profil 5, na istoj lokaciji kao i za geodetsko snimanje 2012. Godine 2012. na lijevoj obali nalazila se berma, a desna obala je bila strmija i uža nego prije deset godina. Međutim, važno je napomenuti snižavanje razine dna korita za gotovo 1 m u talvegu.



Sl. 4.35. Promjene korita Orljave na lokaciji Bučje, nizvodno od stepenice, od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 7. 5. 2024.

#### 4.4.5. Lokacija Tenov mlin

Najnižvodnija istraživana lokacija nalazi se 3,2 km nizvodno od mosta kod Bučja, i 500 m nizvodno od Tenovog mlina (toponim prema HOK5 iz 1980.), koji je na ovoj lokaciji najranije prikazan na karti druge vojne izmjere iz druge polovine 19. st. (Arcanum maps, n.d.). Lokacija se nalazi u odsječku rijeke broj 9, na kojem nagib korita prosječno iznosi 1,1 m/km. Terenskim istraživanjem obuhvaćena su dva uzastopna meandra duljine korita oko 300 m. Strme obale gornjeg meandra obrasle su drvenastom vegetacijom, dok se donji meandar nalazi tik uz poljoprivredne površine (Sl. 4.36). Na blagim obalama obaju meandara nalaze se prostrani bočni prudovi djelomično prekriveni zeljastom i niskom drvenastom vegetacijom. Strukturu sedimenta na obalama većinom čine pijesci srednje (33,1 %) i sitne frakcije (32,2 %) te silt i glina (34,3 %). Prudovi su uglavnom građeni od šljunaka (52,7 %), najvećim dijelom sitne frakcije od 4-8 mm (20,3 %), dok pijesci čine 44 %, a silt i glina 3,3 %.

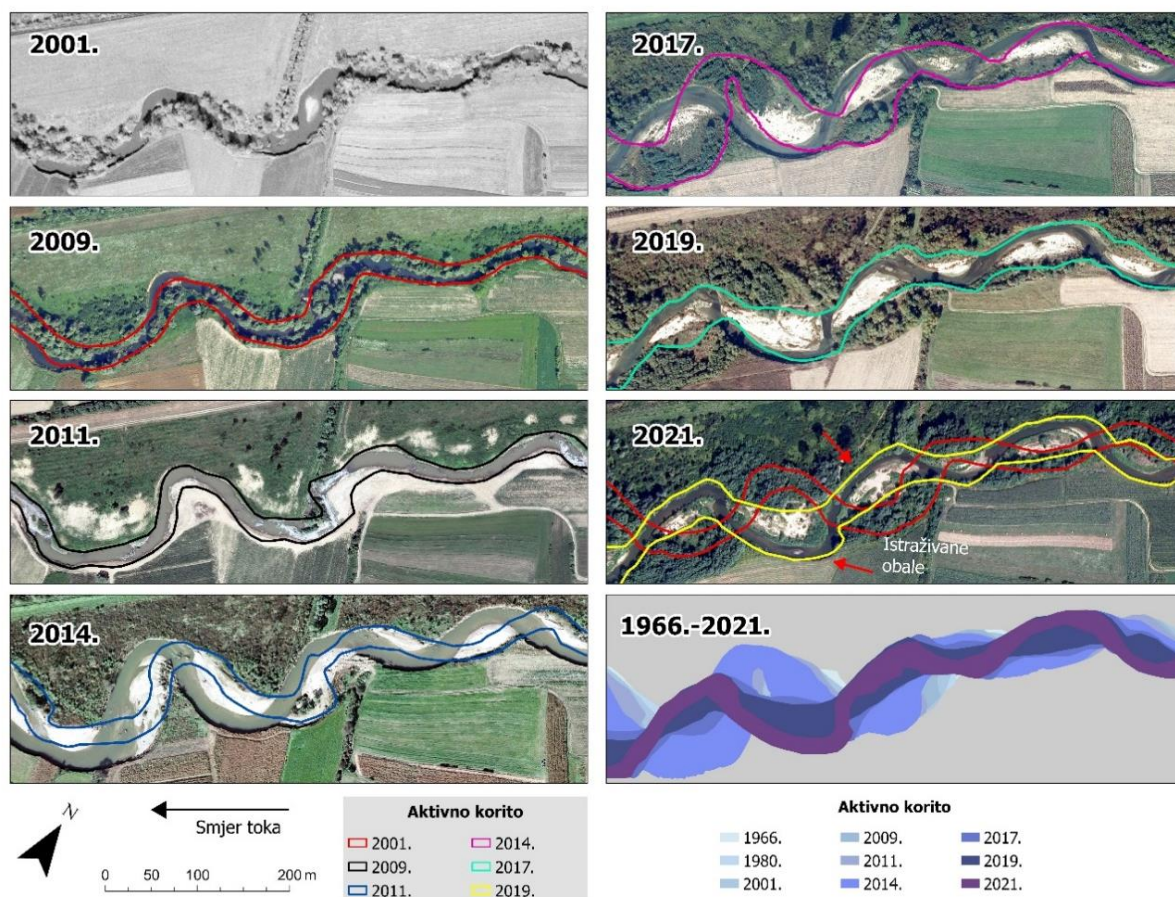
Na lokaciji Tenov mlin su u posljednjih dvadesetak godina zabilježene značajne promjene korita (Sl. 4.37). Godine 2001., obale rijeke su na širem području oko lokacije bile djelomično obrasle uskim pojasom drvenaste vegetacije. Strme obale meandra su većinom bile gole, odnosno tik uz poljoprivredne površine. Godine 2009., zabilježena je povećana gustoća i duljina koridora drvenaste vegetacije uz korito, a samo pružanje toka nije se značajno promijenilo. Posljedice uklanjanja priobalne vegetacije vidljive su 2011., no također bez značajnih promjena u pružanju korita. Međutim, nakon velike poplave 2014. godine dolazi do značajnog širenja korita, stvaranja velikih bočnih prudova i nizvodne migracije korita. Tijekom sljedećih godina 2017.-2021. dolazi do postupnog usporavanja bočnog kretanja i zarastanja prudova vegetacijom i stabilizacije korita. Zanimljivo je primijetiti da se na području istraživane lokacije pružanje korita u zadnjih dvadesetak godina u potpunosti promijenilo: na području koje je 2001. – 2011. bilo aktivno korito, nataložili su se sedimenti te se razvila drvenasta vegetacija, čime je to područje danas postalo dio naplavne ravnice, iako relativno niže nadmorske visine od razine poljoprivrednih površina. Stopa ukupnog bočnog kretanja na dva istražena uzastopna meandra u razdoblju 2011. – 2021. iznosila je gotovo 50 m, a erodiralo je ukupno 9.162 m<sup>2</sup> naplavne ravnice.





Sl. 4.36. Istraživani meandri (A), šljunkoviti sediment na prudu i desna strma obala gornjeg meandra (B). Crna strelica označava smjer toka. Snimljeno 7. 5. 2024. (A) i 30. 3. 2023. (B).





Sl. 4.37. Recentne promjene korita na lokaciji Tenov mlin u razdoblju 2001. – 2021.

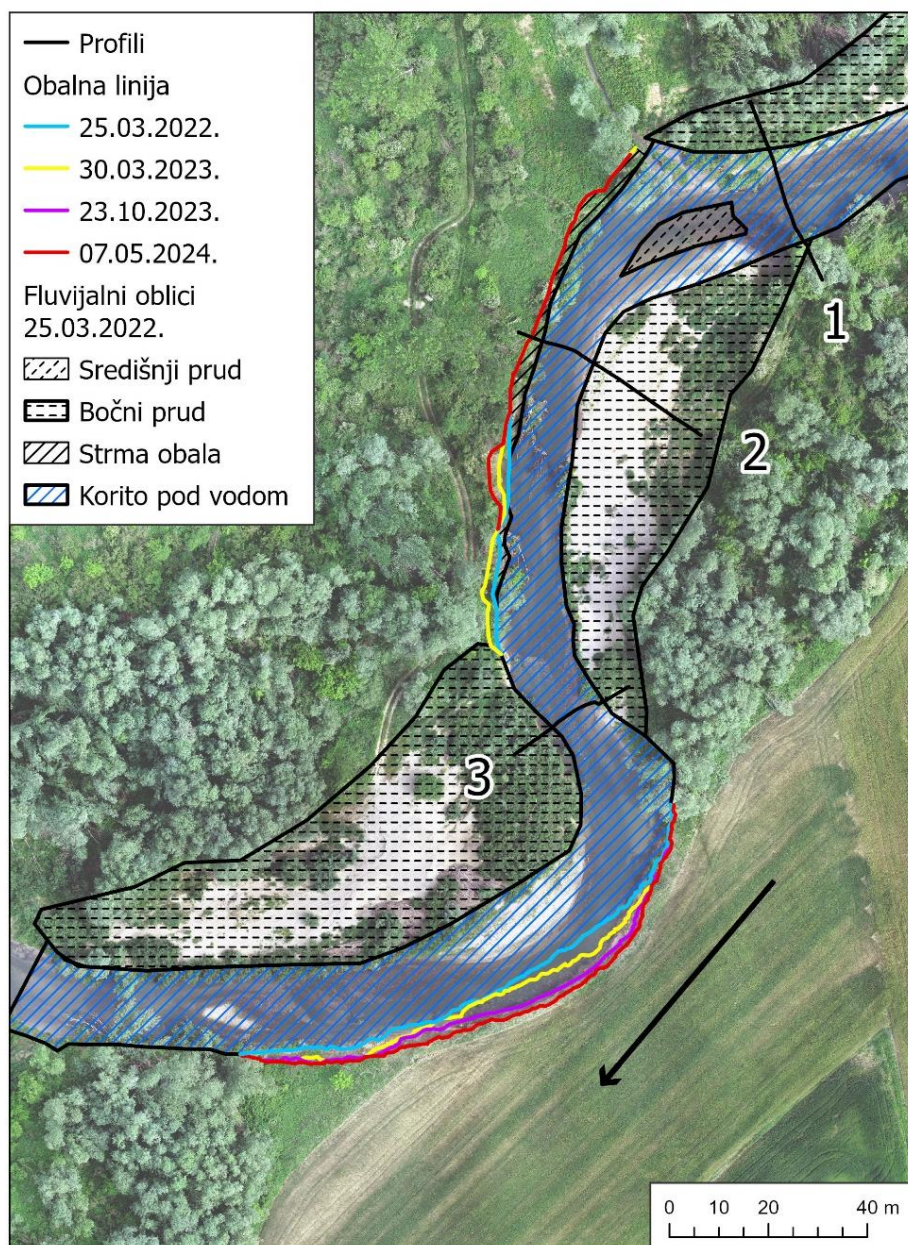
Prvo terensko istraživanje na ovoj lokaciji obavljeno je u prosincu 2021., no budući da do idućeg izlaska nisu zabilježene promjene korita, detaljno kartiranje obalnih linija i fluvijalnih reljefnih oblika u koritu obavljeno je na temelju snimanja bespilotnom letjelicom u ožujku 2022. (Sl. 4.38). Prudovi su kartirani do pojasa drvenaste vegetacije na naplavnoj ravnici. Prosječna širina aktivnog korita uzvodnog meandra iznosila je 28,8 m, s maksimumom od 40,5 m (profil 2), a nizvodnog meandra prosječnih 18,5 m (u aktivno korito nije uključena površina cijelog morfološki određenog pruda jer je djelomično prekriven drvenastom vegetacijom što ukazuje na njegovu stabilizaciju). Potrebno je naglasiti da su na lokaciji primijećeni tragovi intenzivnog ilegalnog šljunčarenja, jer je prud lako dostupan poljskom cestom. Na ovoj lokaciji nije bilo moguće izmjeriti profile korita na istim lokacijama kao i 2012. jer su se svi profili izmjerili 2012. u vrijeme terenskog istraživanja za ovaj rad nalazili na naplavnoj ravnici, što je posljedica dinamičnih promjena korita. Kartiranjem obalne linije u listopadu 2022. nisu zabilježeni pomaci u njenom pružanju.



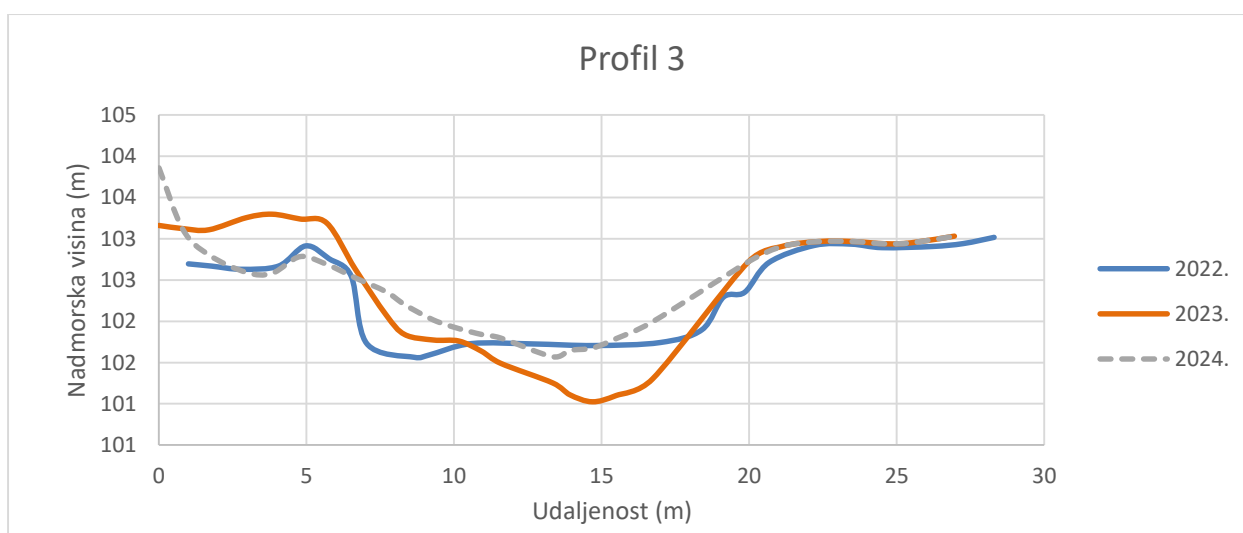
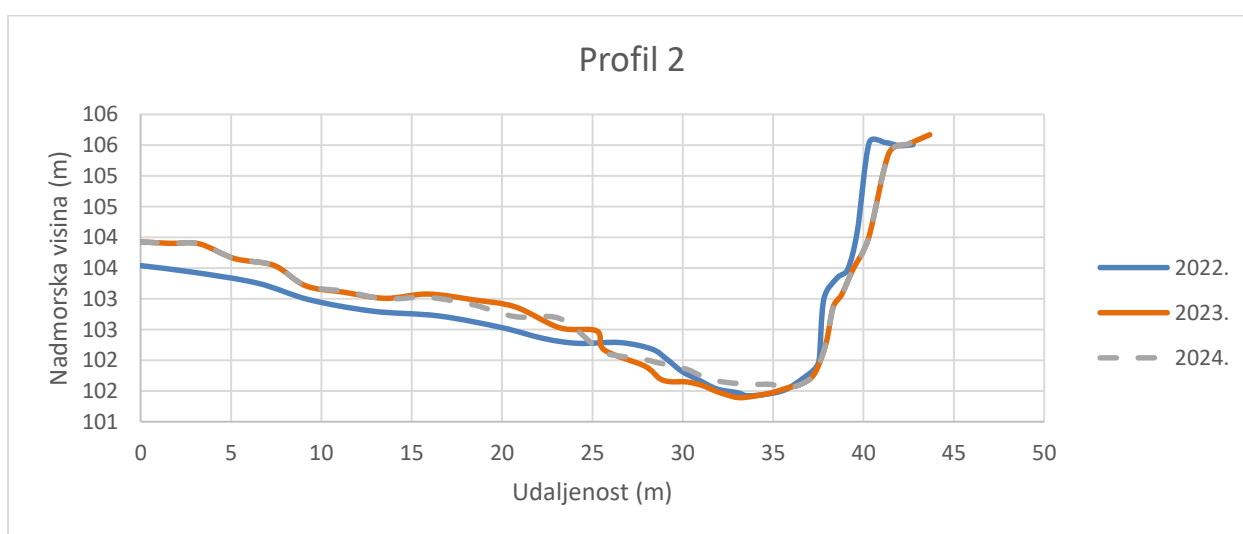
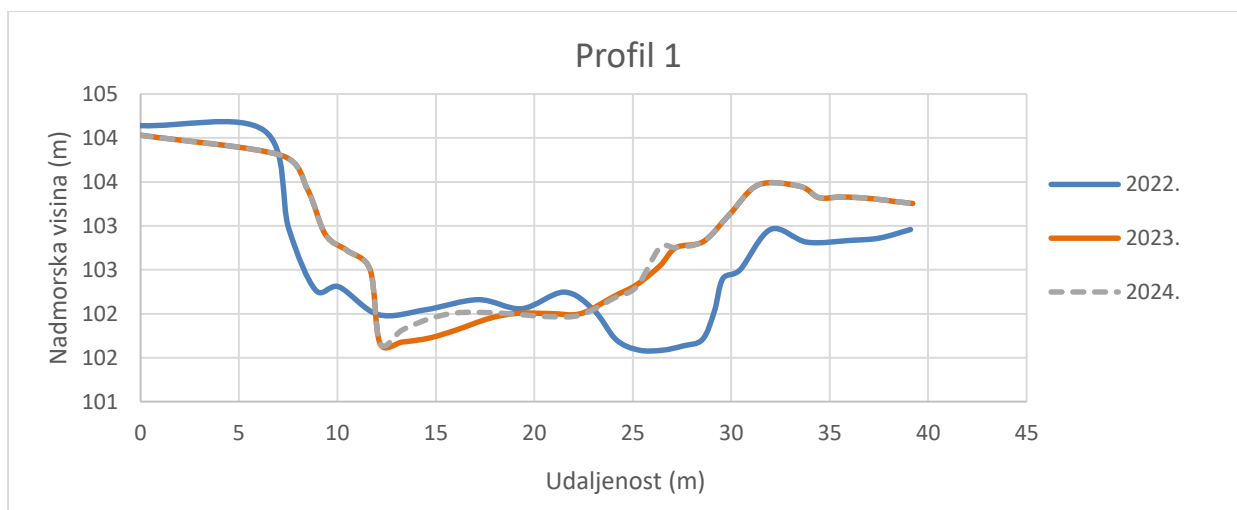
S druge strane, u ožujku 2023. izmjerena je površina erodirane naplavne ravnice na gornjem meandru od 101,7 m<sup>2</sup>, a na donjem meandru od 173,5 m<sup>2</sup> s maksimalnim povlačenjem obalne linije od 4,1 m (Sl. 4.38). Širina korita se na gornjem meandru nije značajno povećala (manje od 1 %), a na donjem za 6 % (19,6 m). Na profilu 1 zabilježena je akumulacija materijala na desnoj blagoj obali od približno 0,5 m, dok je na lijevoj strmoj obali došlo do djelomičnog sužavanja korita, vjerojatno uslijed spuštanja gornjeg dijela obale nakon erozije podinskog dijela (Sl. 4.39). Na profilu 2, koji se pruža središnjim dijelom gornjeg meandra, zabilježena je akumulacija sedimenta na prudu od 0,2-0,5 m, širenje korita lijevo od talvega te blaga erozija desne strme obale. Na profilu 3 zabilježeno je značajno produbljivanje dna korita uz desnu obalu za 0,7 m te akumulacija materijala na lijevoj obali od 0,4-0,6 m. Profil 3 je 2022. godine predstavljao tipičnu morfologiju korita u infleksijskog točki meandra (šire, pliće korito), dok je njegovim produbljivanjem u 2023. i stvaranjem jasnog talvega stvorena morfologija koja je tipičnija za zavojiti dio meandra (Sl. 4.39).

U idućem razdoblju, do listopada 2023., erozija desne obale gornjeg meandra nije zabilježena, no na donjem meandru je iznosila 156,2 m<sup>2</sup>, s maksimalnim povlačenjem obale od 4,1 m, kao i u prethodnom razdoblju. Ako u obzir uzmemo duljinu proučavanog vremenskog razdoblja, mjesečna stopa erozije naplavne ravnice bila je 22,9 m<sup>2</sup>, što je niže nego od listopada 2022. do ožujka 2023. (32,4 m<sup>2</sup> mjesečno). U svibnju 2024. zabilježena je erozija obale na gornjem meandru od 36,4 m<sup>2</sup>, a na donjem od 105,9 m<sup>2</sup>.

Promjene u morfologiji korita na ovoj lokaciji nisu bile tako izražene kao na uzvodnima. Morfologija uzvodnog meandra nije se bitno mijenjala osim što je 2023. erodiran središnji prud koji se 2022. nalazio između profila 1 i 2 (Sl. 4.38). Stope bočne erozije na donjem meandru bile su veće, te uz migraciju nizvodno treba istaknuti i povećanje u njegovoj amplitudi za 7,5 m od ožujka 2022. do svibnja 2024., što prvenstveno upućuje na tip razvoja meandra koji se naziva rast meandra (engl. *meander growth*, prema Hooke, 1984).



Sl. 4.38. Promjene korita Orljave na lokaciji Tenov mlin od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 7. 5. 2024.



Sl. 4.39. Izmjereni profili na lokaciji Tenov mlin. Isprekidane linije prikazuju profile procijenjene na temelju DSM modela dobivenog snimanjem bespilotnom letjelicom. Svi profili su orijentirani u smjeru toka rijeke (lijeva obala – desna obala).

#### 4.4.6. Sinteza rezultata erozije obala na istraženim lokacijama

Vrijednosti povlačenja obalne linije i erodirane površine naplavne ravnice usporedno su analizirane za jednogodišnja razdoblja na svim lokacijama (Sl. 4.40). Najveće prosječne vrijednosti povlačenja obalne linije i ukupne površine erodirane naplavne ravnice zabilježene su u prvom razdoblju (25. 3. 2022. – 30. 3. 2023.), i to na meandrima strmih lijevih travnatih obala na lokacijama Boričevci (7,3 m; 682 m<sup>2</sup>) i Bučje (4,8 m; 628,7 m<sup>2</sup>). U istom razdoblju, najmanje vrijednosti izmjerene su na desnim strmim obalama prekrivenim drvenastom vegetacijom, također na Boričevcima (0,8 m; 83 m<sup>2</sup>) i kod Tenovog mlina (0,9 m; 101,7 m<sup>2</sup>). U idućem jednogodišnjem razdoblju (30. 3. 2023. – 7. 5. 2024.), erozija obala bila je manja na svim lokacijama, osim na lijevoj obali kod Tenovog mlina. Na lijevoj obali kod Boričevaca (1,3 m; 121,7 m<sup>2</sup>) i Bučja (1,1 m; 148,7 m<sup>2</sup>) erozija obala bila je značajno manja nego u prethodnom razdoblju. Najviše vrijednosti zabilježene su na lijevoj obali lokacije Vesela (2,2 m; 367,9 m<sup>2</sup>).

Važno je istaknuti razlike u eroziji obala uzastopnih meandara koji imaju drugačiju strukturu obala: i na Boričevcima i kod Tenovog mlina, na meandrima s travnatim obalama zabilježene su veće vrijednosti bočne erozije, na Boričevcima čak do osam puta veće. S druge strane, bočna erozija na lokaciji Deževci u prvom razdoblju bila je značajna unatoč tome što su obale prekrivene drvenastom vegetacijom (4 m, 401,2 m<sup>2</sup>). Na lokaciji Bučje – most, nizvodno od razrušene mlinske stepenice, vrijednosti bočne erozije bile su u prvom razdoblju niže nego na Deževcima unatoč tome što su obale travnate, te također niže nego na uzvodnim meandrima (Bučje lijeva i desna obala). Razlike u eroziji obala na Bučju – most u prvom i drugom razdoblju bile su relativno male, gotovo ujednačene.

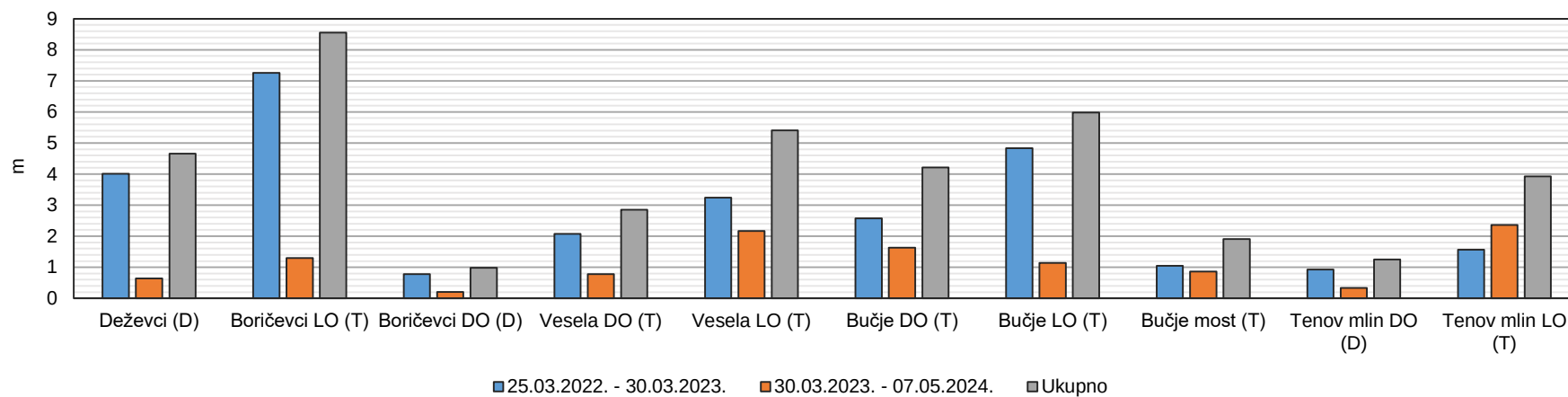
Osim razlika u strukturi obala, istraživani meandri su se razlikovali i po morfometrijskim pokazateljima (Tab. 4.8). Najšire aktivno korito izmjereno je na lokacijama Bučje i Tenov mlin (24,3-28,8 m), a najuže na lokaciji Vesela (11,5 m). Najveći indeks vijugavosti izmjeren je na lokaciji Boričevci LO (lijeva obala) (1,67 i 1,96). Korelacijska analiza je pokazala da je u prvom razdoblju (2022. – 2023.) prosječno povlačenje obala bilo pozitivno povezano s indeksom vijugavosti meandra ( $p = 0,842$ ,  $p = 0,002$ , Sl. 4.41). S prosječnom širinom aktivnog korita nije utvrđena statistička povezanost. U idućem razdoblju (2023. – 2024.) nije ustanovljena statistička povezanost između niti jedne varijable.

Tab. 4.8. Morfometrijski pokazatelji istraživanih meandara

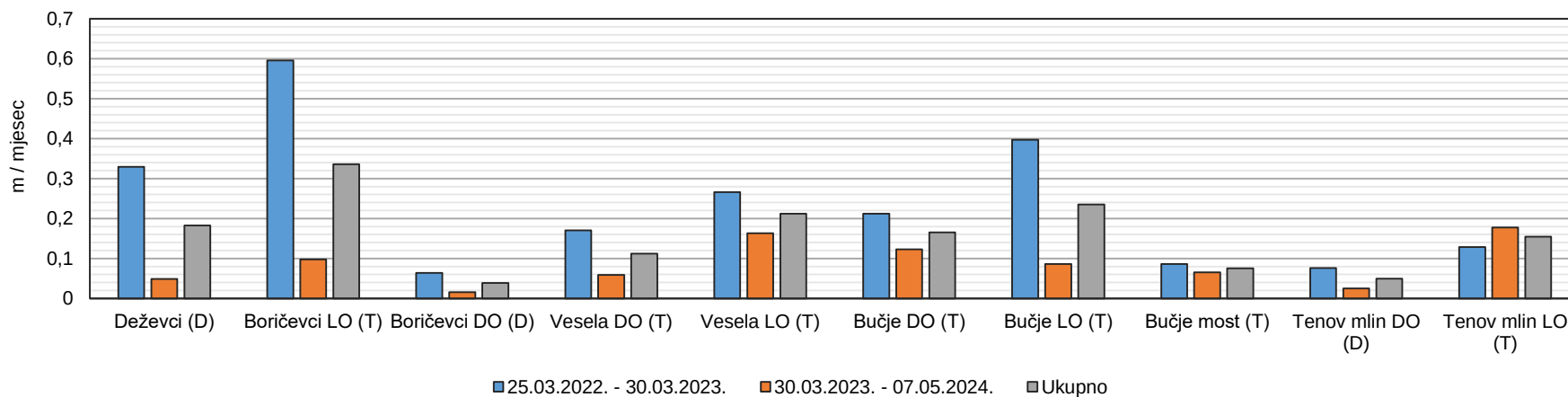
|                          | 2022.                                |                            | 2023.                                |                            |
|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
|                          | Prosječna širina aktivnog korita (m) | Indeks vijugavosti meandra | Prosječna širina aktivnog korita (m) | Indeks vijugavosti meandra |
| <b>Deževci (D)</b>       | 19,80                                | 1,61                       | 20,1                                 | 1,56                       |
| <b>Boričevci LO (T)</b>  | 23,10                                | 1,67                       | 31,1                                 | 1,96                       |
| <b>Boričevci DO (D)</b>  | 16,50                                | 1,29                       | 19,00                                | 1,38                       |
| <b>Vesela DO (T)</b>     | 12,30                                | 1,20                       | 12,60                                | 1,33                       |
| <b>Vesela LO (T)</b>     | 11,50                                | 1,54                       | 12,90                                | 1,68                       |
| <b>Bučje DO (T)</b>      | 24,26                                | 1,45                       | 25,88                                | 1,50                       |
| <b>Bučje LO (T)</b>      | 27,76                                | 1,55                       | 32,82                                | 1,55                       |
| <b>Bučje most (T)</b>    | 26,00                                | 1,37                       | 27,50                                | 1,37                       |
| <b>Tenov mlin DO (D)</b> | 28,80                                | 1,19                       | 28,90                                | 1,18                       |
| <b>Tenov mlin LO (T)</b> | 18,50                                | 1,25                       | 19,60                                | 1,31                       |

\*napomena: LO – lijeva obala, DO – desna obala, D – drvenasta vegetacija, T – trava

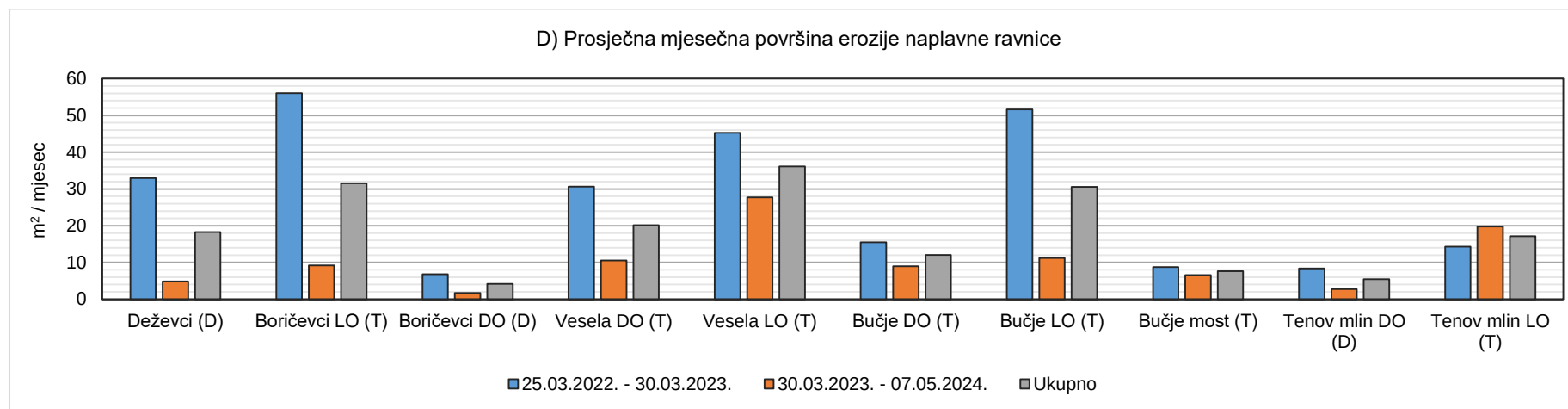
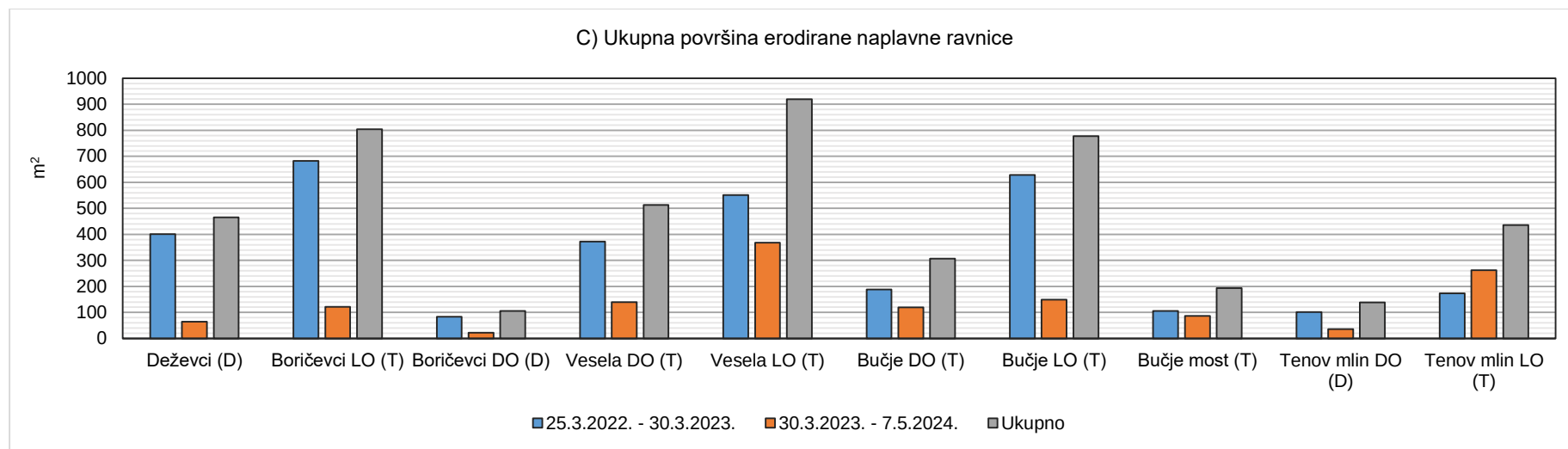
A) Prosječno ukupno povlačenje obale



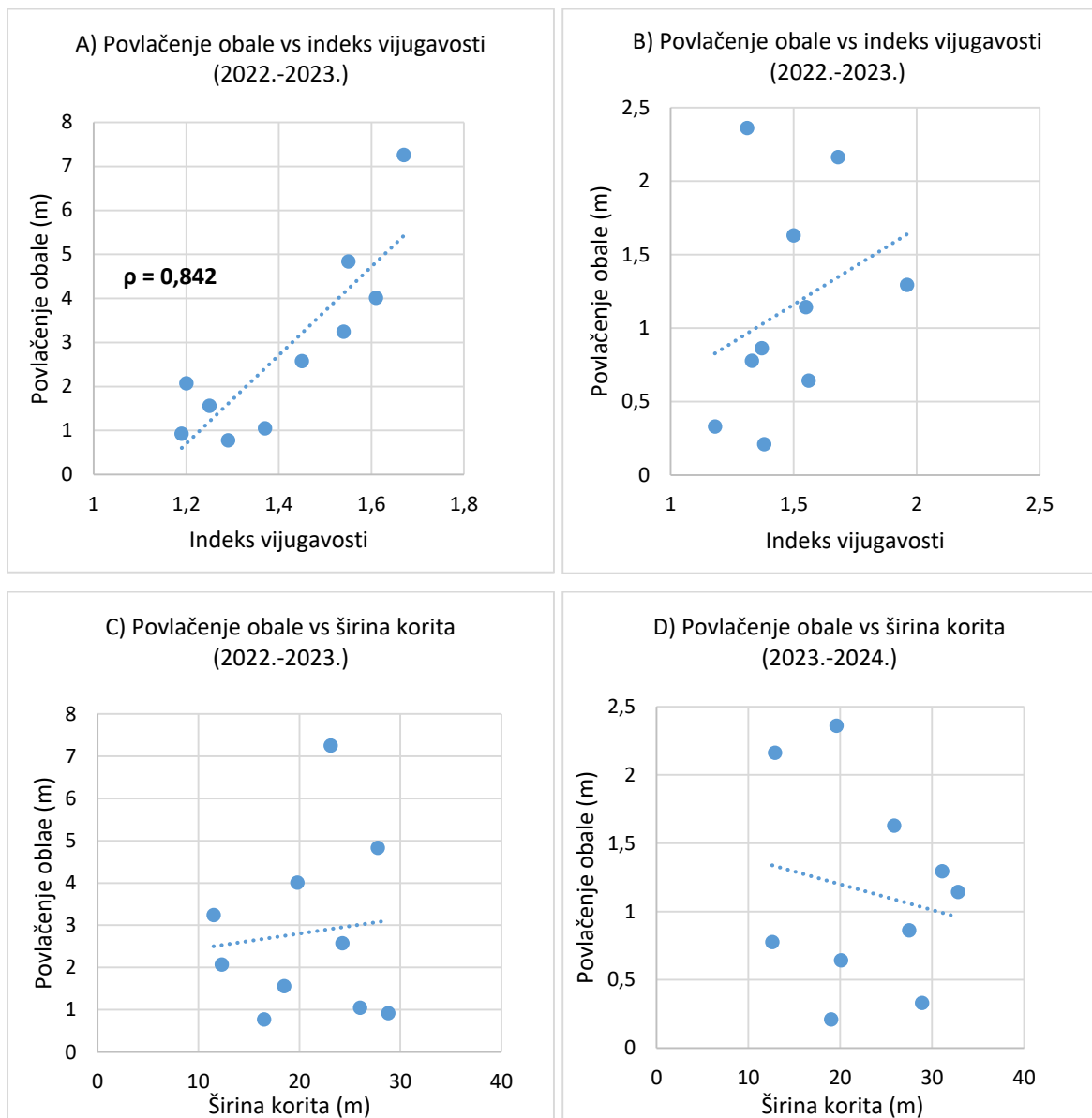
B) Prosječno mjesečno povlačenje obale







Sl. 4.40. Relativne i apsolutne vrijednosti erozije obala na istraženim lokacijama u jednogodišnjim razdobljima (LO – lijeva obala, DO – desna obala, D – drvenasta vegetacija, T – trava). Napomena: prosječne vrijednosti prate apsolutne no prikazane su da bi se uzelo u obzir nejednako trajanje razdoblja



Sl. 4.41. Raspršeni dijagrami odnosa između prosječnog povlačenja obale i indeksa vijugavosti, te prosječne širine aktivnog korita u prvom i drugom razdoblju terenskih istraživanja

## 5. RASPRAVA

### 5.1. Pouzdanost korištenih metoda

#### 5.1.1. Točnost i pouzdanost kartografskih izvora i podataka daljinskih istraživanja

U ovom su radu za mjerenja morfoloških obilježja i procesa na rijeci Orljavi prvenstveno korišteni kartografski izvori i podaci daljinskih istraživanja, od kraja 19. stoljeća do 2021. godine na razini odsječaka rijeke, te od 2021./2022. do 2024. na razini odabranih lokacija meandara. Pri integraciji izvora podataka različite starosti i točnosti, ključno je uzeti u obzir obilježja najstarijeg izvora jer on određuje koje su analize prikladne i kako rezultati mogu biti interpretirani.

U ovom radu kao najstariji izvor podataka analizirana je karta treće vojne izmjere Habsburške Monarhije iz godina 1879. i 1882., koja je odabrana zbog svoje sveobuhvatnosti i zadovoljavajuće točnosti. Horizontalna točnost ove karte procijenjena je na prosječno 25 m, što odgovara vrijednostima iz literature (Pavlek i Faivre, 2020; Scorpio i dr., 2015). Međutim, budući da je Orljava manja tekućica, prosječne širine korita manje od 25 m, mjereni parametri ograničeni su na duljinu i indeks vijugavosti. Povijesna analiza mogla bi biti proširena uporabom katastarskih podataka iz 1860. godine, koji su detaljniji i točniji od karata treće vojne izmjere, no budući da ni snimke iz 1966. godine nisu dovoljno kvalitetne za precizno određivanje položaja korita u svim dijelovima toka, analiza bočnog kretanja korita u tom razdoblju nije se smatrala izvedivom.

Također, na povijesnim kartama (uključujući i katastarske) teško je odrediti je li korito prirodno ili su već provedene lokalne mjere izravnavanja. Za razdoblje 19. stoljeća ne postoje ni hidrološki podaci ni informacije o zemljišnom pokrovu u porječju, što dodatno otežava interpretaciju rezultata. U tom su razdoblju vjerojatno vladali drugačiji hidrološki uvjeti u usporedbi s današnjim vremenom, pa bi interpretacija bočnog kretanja korita bila nepouzdana. Nadalje, prikladnost analize bočnog kretanja korita kroz razdoblje dulje od 100 godina može biti upitna jer se tijekom tako dugog razdoblja rijeka može kretati u suprotnim smjerovima (npr. prvo prema lijevoj, a zatim natrag prema desnoj obali), što može dovesti do poništavanja ukupnog kretanja. To stvara nesigurnost u interpretaciji rezultata i otežava donošenje preciznih zaključaka.

Zbog ovih razloga fokus ove disertacije stavljen je na recentno razdoblje, od sredine 20. stoljeća do danas, za koje su dostupni detaljni i točni kartografski i aerofotogrametrijski podaci, kao i podaci o protocima. Za procjenu osjetljivosti odsječaka na morfološke promjene provedena je analiza bočnog kretanja u razdoblju 2001. – 2019. na temelju adekvatno detaljnih izvora podataka: topografske karte u mjerilu 1:25 000 i ortofoto karte iz 2019. godine (jer je 2021. korito na nekim dijelovima bilo već zaraslo u gustu vegetaciju u srednjem dijelu toka, te je 2019. godina uzeta kao relevantna za izračune).

Pri izračunima bočnog kretanja, nesigurnosti u mjerenju adresirane su na način da vrijednosti manje od horizontalne točnosti izvora nisu uključene u konačne izračune. Što se tiče točnosti georeferenciranja ortofoto karata, ona je u skladu s vrijednostima iz literature (0,5 – 2 m) (Bertalan i dr., 2019; Hooke i Yorke, 2010), dok su za snimke prikupljene bespilotnim letjelicama točnosti također u rangu vrijednosti zabilježenih u literaturi (5 cm horizontalno i 10 cm vertikalno) (Hemmelder i dr., 2018; Rusnák i dr., 2018).

### **5.1.2. Točnost klasifikacije zemljišnog pokrova**

Objektna klasifikacija zemljišnog pokrova na temelju aerofotogrametrijskih snimaka DGU iz razdoblja 2011. – 2021. pokazala se učinkovitom metodom u analizi promjena u riječnom koridoru Orpljave. Za sve analizirane godine osim 2014. procijenjena je visoka točnost klasifikacije zemljišnog pokrova (>85 %). Za 2014. nije bio dostupan NIR kanal, što je otežalo klasifikaciju vode i različitih klasa vegetacije. Najveća točnost od 93 % postignuta je za 2021., što se vjerojatno može pripisati napretku u kvaliteti senzora na korištenim kamerama. Voda i golo tlo bile su najtočnije klasificirane klase u svim analiziranim godinama.

Točnost klasifikacije općenito ovisi o klasifikacijskoj shemi, sastavu zemljišnog pokrova, strukturi i raspodjeli uzoraka za treniranje, korištenim algoritmima te svojstvima i kvaliteti snimaka (Foody, 2002). Infracrveni (IR) kanali ključni su za definiranje vodenih površina i različitih vegetacijskih klasa (Nguyen i dr., 2019; Jia i dr., 2020). U radovima koji analiziraju zemljišni pokrov u riječnim koridorima na regionalnim razinama na temelju satelitskih i zračnih snimaka s IR kanalima voda je općenito najtočnije kartirana klasa (PA i UA iznad 95 %), dok ukupna točnost klasifikacije iznosi oko 90 % ili više (Tormos i dr., 2012; Jia i dr., 2020; Granger i dr., 2021). Istraživanja koja analiziraju obilježja rijeka na manjim prostornim razinama koristeći samo RGB snimke iz bespilotnih letjelica obično navode niže vrijednosti ukupne točnosti (oko 80 %) zbog miješanja klasa vode i riječnih prudova, iako se jedinstvena

vegetacijska klasa vrlo dobro izdvaja (Rivas Casado i dr., 2015; Rusnák i dr., 2018). Međutim, nedavni napredak u algoritmima dubokog učenja pokazao je da je moguće klasificirati riječne okoliše s točnošću od 90 % samo na temelju RGB snimki visoke rezolucije (Carbonneau i dr., 2020).

Što se tiče studija sa sličnim klasifikacijskim shemama kao u ovom istraživanju, Demarchi i dr. (2016) kartirali su jedinice riječnog koridora na temelju multispektralnih snimki koristeći SVM (engl. *supported vector machine*) i RF (engl. *random forest*) algoritme te su procijenili točnost klasifikacije s Kappa koeficijentima od 0,79. S dodatkom DDTM-a (digitalnog modela terena bez trenda pada riječne doline), točnost procijenjena Kappa koeficijentom se penje na 0,91 za SVM i 0,89 za RF algoritam (Demarchi i dr., 2016). Slično tome, Rabanaque i dr. (2021) dobili su Kappa koeficijente između 0,81 i 0,87 za klasifikacije temeljene na pikselima koristeći Sentinel satelitske snimke, pri čemu je SVM postigao nešto bolje rezultate od RF algoritma. U obje studije, najtočnije klase bile su riječno korito, šljunčani prudovi bez vegetacije i dijelovi naplavne ravnice pokriveni gustom vegetacijom. S druge strane, najniže točnosti zabilježene su za klasu rijetke vegetacije (Demarchi i dr., 2016) te poljoprivredne i površine s mješovitom vegetacijom (Rabanaque i dr., 2021), što je slično rezultatima dobivenim u ovom istraživanju. Budući da je rijetka vegetacija prijelazna klasa između površina bez vegetacije i površina prekrivenih gustom vegetacijom, ta se klasa u prirodi često miješa s drugim klasama. Mješoviti pokrov zemljišta pogotovo se često stvara u ranim fazama sukcesije vegetacije na riječnim prudovima. U ovom istraživanju, riječni sedimenti (prudovi bez vegetacije) bili su najtočnije klasificirani 2021. godine (koja je općenito bila najtočnija godina) te 2014. godine, kada vegetacija još nije počela rasti na novostvorenim riječnim prudovima nakon poplave.

Dodatna uporaba DDSM-a (digitalnog modela površina bez trenda pada riječne doline) u drugoj fazi provedbe klasifikacije pokazala se korisnom za razlikovanje riječnih sedimenata u koritu i golog tla na naplavnoj ravnici, budući da se točnost pokazala zadovoljavajućom za obje klase. Što se tiče visoke vegetacije, zbog definiranog praga od 7 m iznad prosječne razine vode, postoji mogućnost da stabla na riječnim prudovima nisu bila uključena u klasu visoke vegetacije, čime je površina same klase možda podcijenjena. Točnost ove klase nije mogla biti testirana zbog nedostatka referentnih podataka s terena (visina stabala). Ipak, visoka vegetacija klasificirana na ovaj način i dalje može doprinijeti prikazu općih trendova u dinamici pokrova zemljišta. Za detaljniju klasifikaciju morfoloških jedinica u riječnom koridoru potrebna je upotreba LiDAR-a, čije laserske zrake penetriraju kroz vegetaciju što omogućuje točnije

određivanje rubova riječnih obala koje su prekrivene drvenastom vegetacijom te izdvajanje reljefnih oblika korita i naplavne ravnice (Demarchi i dr., 2016; Wiliams i dr., 2020).

### **5.1.3. Statističko utvrđivanje uzročno-posljedičnih veza u geomorfologiji**

Upotreba statističkih modela za utvrđivanje uzročno-posljedičnih veza i predviđanje budućih procesa u geomorfologiji otežana je činjenicom da su geomorfološki sustavi „otvoreni” i zbog toga izrazito kompleksni (Brierley i dr., 2021). U većini analiziranih radova o morfološkim promjenama tekućica utvrđene veze uglavnom se temelje na stručnoj interpretaciji autora, odnosno na temelju istodobnosti i neposredne blizine pojavnosti morfoloških prilagodbi i njihovih pretpostavljenih uzroka (Downs i Piégay, 2019). Na taj način moguće je stvoriti konceptualni model morfološkoga razvoja tekućice, na kojem su obično na vremenskoj crti označene morfološke promjene i pojava pretpostavljenih uzroka tih promjena (npr. Downs i dr., 2013; Scorpio i dr., 2015). Međutim, iako se morfološke promjene i njihovi pretpostavljeni uzroci često kvantificiraju, konceptualni modeli rijetko se koriste kao temelj za postavljanje hipoteza o uzročno-posljedičnim vezama između pojedinih parametara koje bi se zatim statistički testirale (Downs i Piégay, 2019; Liébault i dr., 2002).

Općenito, za provedbu pouzdanih statističkih analiza potreban je veliki broj podataka. U geomorfologiji prikupljanje podataka ima tri osnovna izazova: odabir odgovarajućeg prostornog i vremenskog mjerila te izbjegavanje prostorne autokorelacije (tj. zavisnosti) između jedinica promatranja, tj. uzoraka (Luoto i Hjort, 2006). Prostorno mjerilo istraživanja može imati utjecaj na rezultate analize. Naime, parametri i procesi koji su važni na jednoj prostornoj skali često nisu prediktivni na drugoj skali, a informacije se mogu izgubiti kada se podaci razmatraju na prostoru veće rezolucije (Gregory, 2006). Svaki geomorfološki proces u pravilu ima svoju optimalno prostorno i vremensko mjerilo analize, što je u slučaju fluvijalne geomorfologije prikazano u tablici 1.1 (Gurnell i dr., 2016). Nadalje, geomorfologija riječnih korita oblikuje se kroz dva osnovna mehanizma: postupne, kontinuirane erozijsko-sedimentacijske procese koji djeluju na dužim vremenskim skalama, te nagle i velike promjene uzrokovane ekstremnim događajima. Zbog toga je morfološki razvoj rijeka često nelinearan i teško predvidljiv.

Također, za riječne sustave važno je naglasiti njihovu hijerarhijsku organizaciju, u kojoj su manje prostorne jedinice (odsječci rijeke) dio većih jedinica (porječje). Svaka niža razina unutar sustava kontrolirana je uvjetima na višim razinama (Fryirs and Brierley, 2013). Također,



prostorne jedinice iste razine riječnog sustava često su međusobno čvrsto povezane protokom vode i prijenosom sedimenta (Poepl i dr., 2017). Prema tome, čimbenici lokalnih promjena korita često mogu biti i udaljenije uzvodne promjene u hidrološkim obilježjima ili donosu sedimenta. Geomorfološke varijable mjerene na jednoj tekućici stoga mogu biti prostorno autokorelirane, odnosno međusobno statistički povezane na temelju svoje lokacije u prostoru. Na taj način prostorna autokorelacija podataka dovodi do pseudoreplikacije, tj. nedostatka statističke neovisnosti među podacima (Hurlbert, 1984). Budući da je nezavisnost pojedinačnih mjerenja jedan od glavnih uvjeta za provođenje klasičnih analiza korelacije ili linearne regresije, prostorna autokorelacija dovodi do njihove nepouzdanosti: klasični statistički testovi često pokazuju da su korelacijski i regresijski koeficijenti ili razlike među grupama značajne kada to zapravo nisu (Luoto i Hjort, 2006).

U riječnim sustavima također postoji velik broj vanjskih čimbenika koji uzrokuju promjene različitih stopa i trajanja, poput režima padalina, zemljišnoga pokrova ili izravnih antropogenih utjecaja (npr. izgradnja brana), koji zajedno čine tzv. kumulativne utjecaje (Downs i Piégay, 2019; Gregory, 2006). Kao i u ostalim geoznanostima, posebnu važnost imaju lokalni čimbenici te prošli događaji i uvjeti poput klimatskih promjena (Brierley i dr., 2021). Dodatni su izazov i kompleksni vremenski odmaci u morfološkom odgovoru na poremećaje te nelinearnost morfološkoga razvoja riječnih korita (Fryirs, 2017). Zbog svih tih izazova, primjena statističkih modela u geomorfološkim istraživanjima tekućica je ograničena, te se većinom svodi na redukcionistički pristup gdje se istražuje odnos samo dviju varijabli, za razliku od tzv. holističkog pristupa koji teži sagledavanju cjelokupnosti riječnog sustava (Downs i Piégay, 2019).

U ovom istraživanju, korelacijskim analizama istraženi su odnosi između više parova varijabli. Međutim, napravljen je i linearni mješoviti model (LMM) koji kombinira više varijabli i njihove međusobne odnose, što predstavlja korak bliže holističkom pristupu te također kontrolira mogućnost pseudoreplikacije. Budući da su LMM potvrdili veze utvrđene korelacijom, obje analize prihvaćene su kao valjane.

Količina podataka korištena u istraživanju bila je ograničena s obzirom na datume snimanja aerofotogrametrijskih snimki. Nakon 2011. godine učestalost aerofotogrametrijskog snimanja teritorija Republike Hrvatske značajno se povećala i postala redovita (svake 2-3 godine), dok je prije 2011. godine ta učestalost bila znatno manja. Uzimajući u obzir dostupne podatke, provedene su analize koje su bile izvedive te su testirane hipoteze o uzročno-posljedičnim

vezama između morfoloških promjena i njihovih uzroka. Svjesni smo ograničenja provedenih analiza, prvenstveno utjecaja neujednačenih vremenskih razdoblja, zbog čega sva razdoblja nisu jednako zastupljena brojem podataka. Međutim, smatramo da dobiveni rezultati, pogotovo rezultati LMM-a, ipak predstavljaju pomak u odnosu na abduktivno zaključivanje koje inače prevladava u fluvijalnoj geomorfologiji (tj. donošenje zaključaka na temelju najvjerojatnijih tvrdnji; Downs i Piégay, 2019).

Važno je naglasiti da statistika sama po sebi nije apsolutni dokaz: ako određene veze nisu statistički potvrđene, ne znači da one u prirodi ne postoje, već to može biti znak neadekvatnosti dostupnih podataka ili odabrane analize. Zbog toga Brierley i dr. (2021) brane važnost stručne interpretacije u geomorfološkim istraživanjima, ali naglašavajući činjenicu da se ona mora donositi na temelju dovoljnoga broja podataka, uz sve prednosti korištenja novih tehnologija i modela te važnosti testiranja i verifikacije da bi se procijenila pouzdanost zaključaka.

## 5.2. Čimbenici morfoloških promjena korita rijeke Orljave

### 5.2.1. Kanaliziranje korita – glavni uzrok dugoročnih morfoloških promjena

Na analiziranim odsječcima srednjeg i donjeg toka Orljave, od ulaska u Požešku kotlinu do ušća, od kraja 19. stoljeća do 2019. zabilježene su većinom negativne promjene u duljini toka i indeksu vijugavosti rijeke. Najznačajnije skraćivanje toka zabilježeno je na odsječku 4 koji teče područjem grada Požege (32 %) te u odsječku 9 nizvodno od Pleternice (21 %). Uzroci skraćivanja toka su prvenstveno antropogeni: u odsječku 4 provedene su hidrotehničke mjere zaštite od poplave u obliku potpunog kanaliziranja i izravnavanja toka, čime je stvoren umjetan trapezoidni poprečni presjek korita te je u potpunosti uklonjena priobalna vegetacija. Također, izravnavanjem korita rijeke isušena je naplavna ravnica što je omogućilo prostorni razvoj i širenje grada Požege. U odsječku 9 razlog značajnog smanjenja duljine, a istovremeno i indeksa vijugavosti (s 1,59 na 1,25) jest presijecanje meandara kako bi se područje meandriranja rijeke suzilo na širinu od 250 m unutar nasipa koji su izgrađeni 1980-ih. Time su također proširene poljoprivredne površine na naplavnoj ravnici. Ukupno se duljina Orljave u srednjem i donjem toku od kraja 19. stoljeća do 2019. smanjila za 9,3 %, a danas je kanalizirano oko 30 % toka. Time je **potvrđena hipoteza 1** ovog istraživanja o postojanju značajnih hidromorfoloških promjena na rijeci od kraja 19. stoljeća.

Povećanje u duljini korita zabilježeno je samo na dva odsječka: 6 i 8. Oba odsječka nalaze se uzvodno od stepenica, koje su vrlo vjerojatno postojale i krajem 19. stoljeća (s obzirom na označene mlinove na karti treće vojne izmjere). Intenzivnije produljivanje (za 37 %) zabilježeno je na odsječku 6. Iz korištenih izvora ne može se sa sigurnošću ustvrditi je li na navedenim odsječcima već tijekom 19. stoljeća došlo do izravnavanja korita pa se posljedično produljivanje i povećanje vijugavosti rijeke može protumačiti kao vraćanje rijeke u prirodno stanje vijugavosti prema zakonima hidrodinamike, kao što je to npr. zabilježeno na Dravi (Bognar, 2008). Međutim, u uzroke povećanja vijugavosti treba uzeti i potencijalni utjecaj stepenice, čija je visina na kraju odsječka 6 vjerojatno povećana izgradnjom brane na približno istoj lokaciji 1926. godine. Naime, porast erozijske baze općenito uzrokuje smanjenje nagiba korita i povećanog taloženja sedimenta, što bi trebalo dovesti do smanjenja vijugavosti rijeke kako bi se održao potreban nagib za transport sedimenata (Schumm, 1977). Međutim, suprotno ovom modelu, istraživanja šljunkovitih isprepletenih i meandrirajućih rijeka u zonama povišene erozijske baze pokazuju da se korita sužavaju i postaju više vijugava zbog taloženja finog sedimenta i rasta vegetacije, što povećava visinu i otpornost obala na eroziju (Liro, 2017). Prema tome, može se pretpostaviti da je povišenje postojećih stepenica, odnosno lokalne erozijske baze, dovelo do povećanja vijugavosti u odsječcima 6 i 8 u razdoblju od kraja 19. st. do 2019.

Također, važno je naglasiti da u odsječcima s najmanjim ljudskim utjecajima (1 i 2) nisu zabilježene značajne promjene u duljini ili indeksu vijugavosti, što dodatno potvrđuje činjenicu da je antropogeni utjecaj, odnosno kanaliziranje tekućica ključan čimbenik izmjerenih dugoročnih morfoloških promjena korita na rijeci Orljavi, čime je **dokazana hipoteza 2** ovog istraživanja.

Kanaliziranje tekućica vrlo je raširena praksa upravljanja tekućicama na području Panonske Hrvatske općenito: u istraživanju koje je obuhvatilo 152 vodna tijela koja su značajno promijenjena ljudskim djelovanjem, 62 % vodnih tijela nije zadovoljilo morfološko stanje koje bi se procijenilo kao dobro stanje prema smjernicama ODV-a, prvenstveno radi značajnih promjena u obliku i poprečnom presjeku korita te uklanjanju priobalne vegetacije (Pavlek i dr., 2023). Primjerice, rijeka Lonja u potpunosti je izravnata na oko 20 % duljine toka, dok je ostalim mjerama kanaliziranja toka zasigurno zahvaćena i puno veća duljina (Čanjevac i dr., 2022). U porječju Ilove 47 % svih tokova je kanalizirano (Plantak i dr., 2016).

Velike tekućice poput Drave ili Save kanalizirane su na kraćim odsječcima koji prolaze gusto naseljenim područjima (npr. Sava u Zagrebu), no od 19. stoljeća na cijeloj duljini njihovog toka kroz Hrvatsku se lokalno provode mjere izravnavanja toka (presijecanje meandara) kako bi se povećala protočnost i suzilo poplavno područje. Duljina Drave se od kraja 19. stoljeća do danas mjestimično smanjila od 25 do 73 % (Bognar, 2008; Pavlek i dr., 2022). Čanjevac i dr. (2022) izmjerili su duljinu Save u Hrvatskoj od 505 km na temelju kartografskih podataka iz 2019., a u statističkom ljetopisu 2018. zabilježen je podatak o duljini toka od 562 km, što vjerojatno predstavlja neko ranije stanje.

Kanaliziranje tekućica također je proširena praksa diljem Europe, kako na nizinskim meandrirajućim rijekama Panonskog bazena (Bertalan i dr., 2019; Hohensinner i dr., 2004), tako i na alpskim tekućicama. Primjerice, duljina rijeke Tise u Mađarskoj skraćena je za 38 % od kraja 19. stoljeća radi brojnih presijecanja meandara (Kiss i dr., 2008). S druge strane, alpske rijeke s isprepletenim koritima danas zauzimaju tek 15 % svoje povijesne dužine iz sredine 18. stoljeća, a 45 % većih alpskih rijeka intenzivno je kanalizirano ili su pretvorene u akumulacije. Time je nestalo oko 510 km ili 4,3 % duljine tokova iz sredine 18. st. (Hohensinner i dr., 2021). Kanaliziranje na većim rijekama provodi se radi zaštite od poplava, ali i lakšeg prometovanja, dok se na manjim rijekama poput Orljave provodi prvenstveno radi zaštite od poplava i isušivanja naplavne ravnice (Živaković Kerže, 2004).

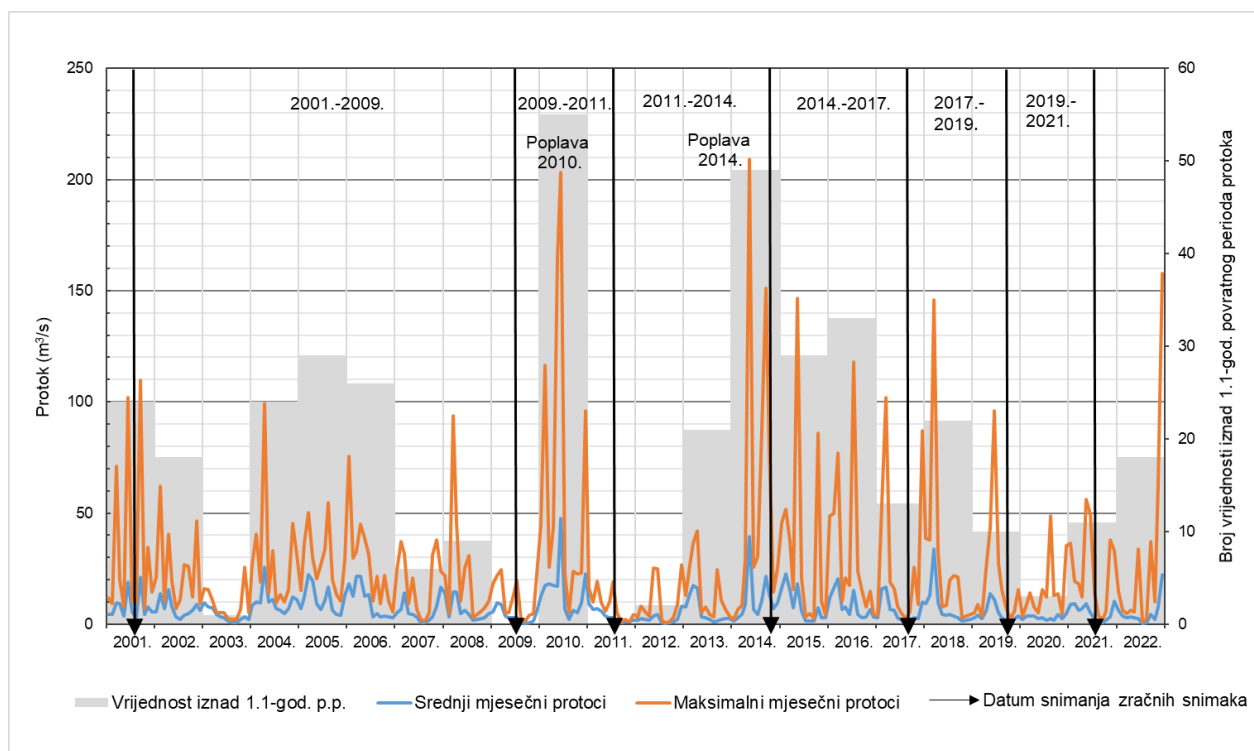
### **5.2.2. Pojava poplava i uklanjanje priobalne vegetacije (odsječci Frkljevci – Čosin mlin)**

Detaljna analiza morfoloških promjena korita u razdoblju 1966. – 2021. provedena je na odsječcima 8 i 9 između hidrološke postaje Frkljevci i Čosinog mlina kod Brodskog Drenovca, ukupne duljine oko 14 km. Rezultati su pokazali da se stope morfoloških promjena razlikuju i dijakronijski i prostorno (odnosno između dva analizirana odsječka). Kako bi se utvrdili čimbenici brzine bočnog kretanja rijeke kao glavnog morfološkog pokazatelja osjetljivosti, statistički su analizirani podaci o veličini i učestalosti poplava, udjelu drvenaste vegetacije na obalama i morfometrijskim pokazateljima geometrije korita (širina, vijugavost, nagib). Statističke analize su provedene za razdoblje 2001. – 2021. za koje postoje podaci s hidrološke postaje Frkljevci.

U navedenom razdoblju 2001. – 2021., na rijeci Orljavi dogodile su se dvije značajne poplave sličnih maksimuma: 2010. ( $203 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i 2014. ( $209,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Sl. 5.1). Analiza srednjaka pokazala

je da se godišnji maksimalni protoci i trajanje protoka iznad  $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$  nisu značajno razlikovali između desetljeća 2001. – 2011. i 2011. – 2021. Međutim, morfološka obilježja i dinamika korita, pogotovo u odsječku 9, pokazala su se jasno različitima između prvog desetljeća 2001. – 2011. (a može se reći na temelju snimaka iz 1966. i duljeg razdoblja) i drugog desetljeća 2011. – 2021. Širina aktivnog korita je u odsječku 9 do 2011. godine prosječno iznosila oko 20 m, no 2014. je narasla na preko 30 m. Također, godišnje stope bočnog kretanja su s 0,5 do 1 m/god u razdoblju 1966. – 2011. narasle na više od 4 m/god u razdoblju 2011. – 2014. (Sl. 4.11A). Odsječak 8 općenito je pokazao manju dinamiku u svim proučavanim obilježjima korita (vijugavost, širina, stopa bočnog kretanja, područja erozije i taloženja), iako je nakon 2014. zabilježeno trostruko povećanje stopa bočnog kretanja rijeke.

Korelacijskom analizom ustanovljeno je da su za skup podataka koji uključuje oba desetljeća veze između hidroloških pokazatelja (maksimalnih protoka i trajanja protoka) i stopa bočnog kretanja u odsječku 9 umjerene i pozitivne ( $\rho = 0,459$ ;  $\rho = 0,617$ ), međutim u slučaju skupa podataka koji obuhvaća samo desetljeće 2011. – 2021. te veze jačaju ( $\rho = 0,824$ ). Iz toga se može zaključiti da je utjecaj velikih protoka na stope bočnog kretanja općenito pozitivan, ali je bio puno jači u drugom desetljeću. Također, u linearnom mješovitom modelu za ukupno razdoblje 2001. – 2021. koeficijent varijable trajanja protoka bio je pozitivan i statistički značajan što podržava rezultate korelacijske analize.



Sl. 5.1. Broj vrijednosti iznad praga od  $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (protok s povratnim periodom od 1,1 godine), prosječni i maksimalni mjesečni protoci na hidrološkoj postaji Frkljevci, te datumi snimanja zračnih snimaka. Izvor: Državni hidrometeorološki zavod, Državna geodetska uprava

Veličina i učestalost poplava općenito su glavni pokretači prirodne morfodinamike korita i sukcesije vegetacije u riječnim koridorima: tijekom velikih protoka (posebno onih koji su viši od geomorfološki efektivnog protoka koji oblikuje korito) riječne obale erodiraju, priobalna vegetacija biva uklonjena, korito se širi, te se formiraju riječni prudovi (Bertoldi i dr., 2009; Rood i dr., 2015; Schumm, 1977). Primjerice, na rijeci Toplji u Slovačkim Karpatima, učestale poplave visokog intenziteta nakon 2002. godine pojačale su erozivne procese: površina erozije u usporedbi s površinom taloženja povećala se 3,6 puta, a prosječno bočno kretanje korita se udvostručilo u usporedbi s razdobljem 1987.-2002. (Rusnák i dr., 2016).

Međutim, na rijeci Orljavi, točnije na odsječku 9 između Ganocijevog i Čosinog mlina, poplava iz 2010. godine nije uzrokovala tako intenzivne morfološke promjene kao poplava iz 2014. Stope bočnog kretanja u razdoblju 2009. – 2011. iznosile su  $1,02 \text{ m/god}$ , a 2011. – 2014.  $4,14 \text{ m/god}$  (razdoblje 2011. – 2014. uključuje poplavu iz 2014., Sl. 5.1). Također, širina korita je s 22-23 m (2009. i 2011.) narasla na 33 m (2014.). Glavna razlika u hidromorfološkim obilježjima rijeke prije poplava 2010. i 2014. godine bio je udio drvenaste vegetacije na obalama: tijekom 2011. godine vegetacija s obala je gotovo u potpunosti uklonjena kao dio



hidrotehničkih mjera obrane od poplava, te je njen udio pao sa više od 70 % (2009.) na oko 5 % (2011.) u oba odsječka.

Dakle, poplava 2010. godine dogodila se kada su obale odsječaka bile većinom obrasle drvenastom vegetacijom. Stope bočnog kretanja 2009. – 2011. bile su za samo 0,18 m/god više nego u prethodnom razdoblju 2001. – 2009. (0,84 m/god), u kojem nije bilo maksimalnih protoka većih od 110 m<sup>3</sup>/s. S druge strane, u svibnju 2014., prije poplave, iako je rijetka vegetacija vjerojatno prekrivala riječne obale, drvenasta vegetacija nije imala dovoljno vremena za razvoj od uklanjanja 2011. Poplava 2014. dogodila se dok obale rijeke nisu bile ojačane vegetacijom, te su stope bočnog kretanja premašile 4 m/god (2011. – 2014).

Snažne negativne veze ( $\rho > 0,7$ ) između udjela drvenaste vegetacije i stope bočnog kretanja rijeke utvrđene su u odsječku 9 za sva tri istraživana skupa podataka (za razdoblje prije i nakon uklanjanja, i samo za razdoblje nakon uklanjanja vegetacije). Negativni odnos navedenih varijabli potvrđen je i linearnim mješovitim modelom, čime je **potvrđena hipoteza 3a**. Treba napomenuti da je varijabla stope bočnog kretanja logaritmirana, što znači da njezin odnos s udjelom drvenaste vegetacije nije linearan. Ovo ukazuje na to da smanjenje udjela drvenaste priobalne vegetacije može imati proporcionalno veći učinak na povećanje stope bočnog kretanja. Također, u odsječku 9 utvrđene su značajne negativne veze između udjela vegetacije na obalama rijeke i promjena u širini korita, čime je **potvrđena hipoteza 3b**. Naime, s porastom udjela vegetacije smanjuju se promjene u širini korita, odnosno korito postaje stabilnije, što se izravno povezuje i s manjim bočnim kretanjem rijeke.

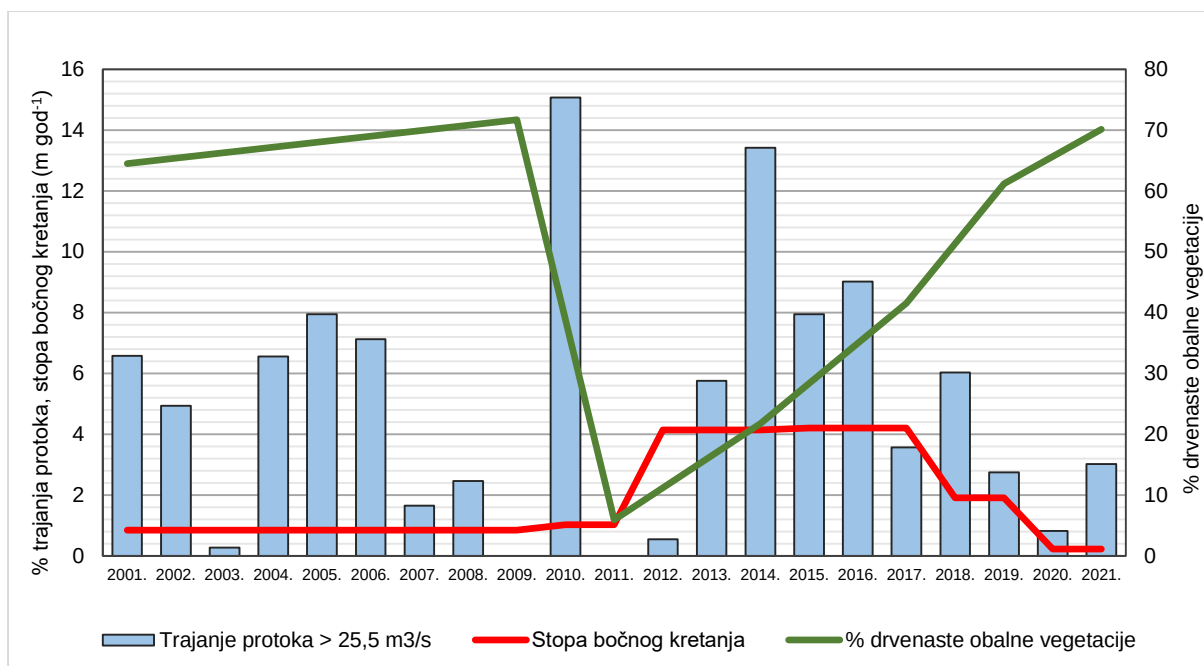
Poplave sličnog intenziteta kao i ona 2010. dogodile su se i 1951., 1972., i 1987. (prema podacima hidrološke postaje Pleternica most), no tijekom razdoblja 1966. – 1980. i 1980. – 2001. zabilježene su općenito niske stope bočnog kretanja (0,37 m/god). Udio drvenaste vegetacije na obalama 1966. iznosio je oko 65 %, te iako za razdoblje do 2001. nema dostupnih podataka, može se zaključiti da je udio drvenaste vegetacije na obalama bio stabilan. Prema tome, može se zaključiti da je visok udio drvenaste vegetacije na obalama rijeke prije 2011. bio glavni kontrolni faktor morfoloških promjena rijeke s obzirom na pojavu značajnih poplava, odnosno da su nakon njenog uklanjanja nastupile značajne morfološke promjene. Time je **dodatno potvrđena hipoteza 2** da su ljudski utjecaji, u ovom slučaju uklanjanje vegetacije, glavni uzročnici morfoloških promjena rijeke.

Mnoge studije su pokazale da intenzitet morfoloških promjena korita uzrokovanih poplavama ovisi o strukturi riječnih obala: vegetacija povećava čvrstoću obala razvojem korijenja te time

smanjuje eroziju (Bertoldi i dr., 2015; Corenblit i dr., 2009; Gurnell, 2014). Posebno je važna visoka drvenasta vegetacija koja može značajno povećati čvrstoću tla (Krzeminska i dr., 2019). McMahon i dr. (2020) su pokazali da povećanje udjela drvenaste vegetacije više od pet metara za 1 % smanjuje intenzitet erozije za 2 % do 3 %. S druge strane, Pollen-Bankhead i dr. (2009) su utvrdili da se brzina povlačenja obala na lokaciji nakon uklanjanja vegetacije otprilike udvostručila u usporedbi s kontrolnom dionicom (od približne stope od 0,7-0,8 m/god na 1,85 m/god). Nadalje, mnoge studije potvrdile su veće stope erozije na naplavnim ravnicama prekrivenima poljoprivrednim zemljištem i travnjacima u usporedbi s poplavnim šumama (Micheli i dr., 2004; Rood i dr., 2015; Rusnák i Lehotský, 2014).

Međutim, u uvjetima kada je udio drvenaste priobalne vegetacije nizak, kao glavni faktor koji određuje stopu bočnog kretanja na Orljavi pokazao se intenzitet i trajanje velikih protoka, što je dokazano porastom koeficijenta korelacije između navedenih varijabli u razdoblju 2011. – 2021. Također, nakon uklanjanja vegetacije 2011., veličina protoka imala je ključnu ulogu u njenom postupnom rastu i oporavku (koeficijent korelacije između maksimalnih protoka i udjela drvenaste vegetacije iznosio je  $\rho > -0,8$ ). Naime, tijekom malih protoka, ako je njihovo trajanje dovoljno, vegetacija se obnavlja, raste i stabilizira riječne prudove, što dovodi do sužavanja korita (Kiss i Blanka, 2012; Rusnák i Lehotsky, 2014). Povećanjem trenja, vegetacija u koritu i na obalama smanjuje eroziju i pojačava sedimentaciju, te ujedno i reagira na geomorfološke procese i kontrolira ih (Corenblit i dr., 2009; Gurnell, 2014). Na taj način dolazi do pozitivne povratne sprege: manji protoci smanjuju stopu erozije i dovode do razvoja vegetacije koja potom dodatno smanjuje eroziju i omogućuje stabilizaciju obala.

Dakle, na intenzivne promjene u zemljišnom pokrovu riječnog koridora i morfologiji korita u desetljeću 2011. – 2021. utjecali su i ljudski faktori (uklanjanje vegetacije) i prirodni faktori (veličina i trajanje protoka). U razdoblju 2011. – 2014. zabilježeno je širenje korita, stvaranje prostranih prudova te smanjenje klase golog tla na naplavnoj ravnicama, kao posljedica pojave poplave u svibnju 2014. U razdoblju 2014. – 2017., postupno smanjenje maksimalnih protoka omogućilo je sužavanje korita, ali migracija korita ostala je izražena jer je oporavak vegetacije tek započeo (Sl. 5.2). U razdoblju 2017.–2019. vršni maksimalni protok ostao je sličan kao i u prethodnom razdoblju (Sl. 5.1), ali stopa bočnog kretanja se smanjila, vjerojatno zbog rasta vegetacije. Na kraju, stabilizacija korita nakon 2019. godine omogućena je kombinacijom malih protoka i snažnog širenja guste i visoke vegetacije na obalama rijeke i prudovima (Sl. 5.2).



Sl. 5.2. Vrijednosti trajanja protoka iznad 25,5 m<sup>3</sup>/s, stopa bočnog kretanja i udjela drvenaste obalne vegetacije u razdoblju 2001. – 2021. u odsječku 9

### **5.2.3. Povezanost vijugavosti, nagiba korita i bočnog kretanja (odsječci Frkljevci – Ćosin mlin)**

Budući da su uklanjanje vegetacije i pojava poplava čimbenici koji su istovremeno djelovali na cjelokupnoj duljini oba odsječka, zabilježene razlike u morfološkim promjenama između odsječaka posljedica su njihovih različitih hidromorfoloških obilježja i lokalnih ljudskih utjecaja poput presijecanja meandara.

Kao što je navedeno, u odsječku 8 općenito su zabilježene manje promjene i slabija dinamika geomorfoloških procesa. Manje varijacije u indeksu vijugavosti 1966. – 2021. posljedica su manjeg broja i duljine antropogeno presječenih meandara. S druge strane, manje varijacije u širini aktivnog korita i bočnom kretanju vjerojatno su posljedica utjecaja stepenice kod mlina Ganoci i uzvodnog ujezerenja, koje je postojalo do probijanja stepenice 2016. godine. Stepenica u koritu povisuje erozijsku bazu te time smanjuje nagib korita i snagu i brzinu toka. U razdoblju 2011. – 2014., stope bočnog kretanja u odsječku 8 iznosile su samo 0,43 m/god, što je deset puta manje od odsječka 9. Nakon probijanja stepenice, dinamika korita značajno se povećala: od 2014. do 2017. širina aktivnog korita prosječno se suzila za oko 3 m (15 %), a stope bočnog kretanja u razdoblju 2014. – 2017. popele su se na 1,28 m/god. Naime, probijanjem stepenice snižena je lokalna erozijska baza te je povećan nagib korita te snaga toka. Općenito, morfološke promjene nakon uklanjanja poprečnih građevina mogu biti složene zbog brojnih lokalnih ili čimbenika na razini porječja, kao što su hidrotehničke mjere ili pojava poplava (Poepl i dr., 2015). Na proučavanom odsječku, budući da nema obaloutvrda, a obale nisu obrasle gustom drvenastom vegetacijom, povećana snaga toka povećala je bočnu eroziju i kretanje korita. Erodirani materijal s obala nataložio se i uzvodno i nizvodno od probijene stepenice u obliku prostranih bočnih i središnjih prudova u koritu (Sl. 4.32). Površina prudova bez vegetacije povećana je na razini cijelog odsječka 8 u razdoblju 2017. – 2019. (Sl. 4.7C), što je vjerojatno posljedica relativno većih stopa bočnog kretanja (1,08 m/god) koje omogućuju unos sedimenta u korito.

Dakle, dinamika korita u odsječku 8 nakon probijanja stepenice se povećala, ali još uvijek nije dosegla vrijednosti odsječka 9. Općenito, odsječak 9 pokazao se kao izrazito osjetljiv na razini cijelog toka Orljave – izmjerene stope bočnog kretanja u razdoblju 2001. – 2019. bile su dvostruko veće nego na svim drugim istraživanim odsječcima (Sl. 4.5). Stoga vjerojatno postoje dodatni faktori koji utječu na ukupno veću dinamiku korita u odsječku 9. Jedan od faktora različitih stopa erozije ili bočnog kretanja može biti razlika u strukturi sedimenta obala

(Kiss i dr., 2019). U ovom istraživanju nije provedena detaljna analiza strukture sedimenta riječnih obala na istraživanim odsječcima. Međutim, cijela istraživana dolina Orljave nalazi se na području litostratigrafske jedinice holocenskih aluvijalnih sedimenata: iako su prostorne različitosti moguće, terenskim obilascima nisu zamijećene značajne razlike.

S druge strane, u odsječku 9 od 1980-ih presječeno je nekoliko većih meandara, što je rezultiralo smanjenjem duljine korita za gotovo 25 % od 1966. do 2021. godine (duljina odsječka 8 u navedenom razdoblju nije se značajno mijenjala). Skraćivanje duljine korita u odsječku 9 također je dovelo do smanjenja u indeksu vijugavosti s 1,68 na 1,28. Skraćivanje korita (ako pretpostavimo da se razina riječnog dna u tom trenutku nije promijenila, odnosno da nije došlo do usijecanja korita) općenito povećava njegov nagib, što dovodi do veće snage toka. Stoga, zbog značajnog skraćivanja u usporedbi s prijašnjim stanjem korita, odsječak 9 je vrlo vjerojatno morfološki nestabilniji, izvan prirodne ravnoteže te sklon prilagodbama korita (Fryirs i Brierley, 2013). U razdoblju 2001. – 2009. prije značajnih poplava, na odsječku 9 su već zabilježene 4,5 puta veće stope bočnog kretanja nego u odsječku 8.

Primjerice, na rijeci Moravi u Češkoj, Ondruch i Mačka (2015) su kao ključne faktore intenzivnog povećanja stope erozije obala nakon 1938. identificirali antropogeno presijecanje meandara i izravnavanje korita, čime je povećan nagib i snaga toka. Vraćanje rijeke u prirodno stanje vijugavosti trajalo je 25 godina, nakon čega su se stope erozije vratile na vrijednosti zabilježene prije hidrotehničkih radova. Dinamične prilagodbe korita bile su dodatno pojačane relativno visokom učestalošću poplava (Ondruch i Mačka, 2015). Salas i Rhoads (2022) su istražujući rijeku Big Pine Creek Ditch u Indiani (SAD) kanaliziranu 1930-ih, ustanovili da stope porasta vijugavosti tijekom vremena na odsječcima koji su se oporavili sustavno rastu s povećanjem snage toka po jediničnoj duljini, te da vrijeme potrebno za potpuni oporavak odnosa između vijugavosti i snage toka prije kanaliziranja iznosi otprilike jedno stoljeće. I na rijeci Dravi zabilježen je porast u duljini toka od 5,2 km između 1886. i 1966./68 nakon presijecanja meandara kod Križnice jer na obalama nisu bile postavljene obaloutvrde (Bognar, 2008).

U istraživanjima koja su statistički analizirala faktore koji utječu na stopu bočnog kretanja kao najznačajnija varijabla istaknuta je snaga toka, koja je objasnila oko 50 % varijance u zavisnoj varijabli, a kao ostale značajne varijable navode se širina i nagib korita (Alber i Piégay, 2017; Nicoll i Hickin, 2010; Richard i dr., 2005). Ondruch i Mačka (2015) su na razini odsječaka ustanovili statistički značajne negativne korelacije između indeksa vijugavosti i površina

erozije i akumulacije, međutim te veze su se na razini meandra pokazale kao pozitivne. Na razini meandara autori su također utvrdili pozitivne veze između širine korita i površina erozije i akumulacije.

U ovom istraživanju, snaga toka pokazala je umjereno pozitivnu korelaciju ( $\rho > 0,4$ ) s bočnim kretanjem u odsječku 9, no za nagib i širinu korita nisu utvrđene statistički značajne korelacije. Međutim, u linearnom mješovitom modelu te su se varijable pokazale kao statistički značajne, s pozitivnim koeficijentima, čime je **potvrđena hipoteza 4a**. S druge strane, indeks vijugavosti nije bio statistički značajan ni u korelacijskoj analizi, ni u linearnom mješovitom modelu, čime **hipoteza 4b nije potvrđena** na razini pododsječaka.

Snaga toka u ovom istraživanju vjerojatno nije bila tako značajan čimbenik kao hidrološke varijable (maksimalni protoci, trajanje protoka) jer se računa s obzirom na nagib korita – a on je u ovom radu određen na temelju poprečnih profila iz geodetskog snimanja iz 2012., čiji su podaci uzeti kao nepromijenjeni za cijelo proučavano razdoblje 2001. – 2021. u statističkoj analizi. Dakle pretpostavilo se da nije bilo značajnog usijecanja korita, što je moglo dovesti do određene nepreciznosti. Iz istog razloga se ni nagib korita možda nije pokazao značajnim u korelaciji s bočnim kretanjem. Međutim, linearni mješoviti model prepoznao je statističku značajnost nagiba i širine korita u odnosu s bočnim kretanjem. Linearni mješoviti model, za razliku od korelacijske analize, omogućuje analizu složenijih odnosa i interakcija između varijabli. Također, mješoviti model može kontrolirati utjecaj drugih varijabli, što može otkriti značaj nagiba korita kada se drugi čimbenici poput trajanja protoka uzmu u obzir.

Indeks vijugavosti nije se pokazao kao značajna varijabla u statističkim analizama vjerojatno radi kompleksnosti njegovog odnosa sa stopom bočnog kretanja i na prostornoj i na vremenskoj razini. Istraživanja pokazuju da na meandrirajućim rijekama općenito dolazi do prirodnih ciklusa rasta i pada u indeksu vijugavosti, koji su izravno povezani s razvojem meandara: najveća dinamika i bočno kretanje korita vezano je uz stanje visoke vijugavosti radi jačanja centrifugalne sile i brzine toka na vanjskoj strani meandra, što dovodi do bočne erozije (Bertalan i dr., 2019; Hickin i Nanson, 1975). Međutim, prirodnim presijecanjem meandara dolazi do naglog pada u vijugavosti, nakon čega se rijeka postepeno vraća u prijašnje stanje. Te oscilacije predstavljaju dinamičnu ravnotežu meandrirajućih rijeka (Hooke, 2003; 2022).

Također je važno naglasiti da se morfološke promjene nakon skraćivanja toka i smanjenja vijugavosti ne moraju nužno događati isključivo na lokalnoj razini, već se mogu pojaviti i nizvodno ili uzvodno od zahvaćenog dijela toka (Bertalan i dr., 2019; Zawiejska i Wyżga,



2010). U slučaju odsječaka 9 na rijeci Orljavi, najdinamičnije promjene korita zabilježene su stotinjak metara nizvodno od najvećih presječenih meandara. Zbog toga definiranje (pod)odsječaka i prostorno mjerilo u istraživanju predstavlja izazov u geomorfološkim studijama (Luoto i Hjort, 2006). Vjerojatno bi indeks vijugavosti u ovom radu trebalo promatrati na većem prostornom mjerilu, a ne na razini pododsječaka duljine oko 1 km. Međutim, u većem prostornom mjerilu nije bilo dovoljno dostupnih i adekvatnih podataka za statističku analizu. Slični izazovi zabilježeni su i u drugim radovima: Richard i dr. (2005) primjerice nisu pronašli statistički značajnu korelaciju između indeksa vijugavosti i bočne migracije, ni na razini odsječaka (10 km), ni na razini pododsječaka rijeke Rio Grande.

#### **5.2.4. Čimbenici morfoloških promjena na razini meandra**

Terenska istraživanja provedena su na ukupno pet lokacija meandara u srednjem i donjem toku rijeke. Od 2022. do 2024. bespilotnom letjelicom i visokopreciznim GNSS uređajem istraživane su promjene u morfologiji korita, prvenstveno stope erozije obala i promjene u poprečnim presjecima. Na gotovo svim istraživanim obalama (9/10) najveće promjene zabilježene su tijekom prve godine, odnosno od ožujka 2022. do ožujka 2023. U idućem jednogodišnjem razdoblju, stope pomicanja obalne linije i površine erodirane naplavne ravnice na svim lokacijama osim kod Tenovog mlina bile su 20-80 % manje.

Zbog nedostupnosti hidroloških podataka za razdoblje nakon prosinca 2022. nije moguće u potpunosti i detaljno interpretirati izmjerene promjene korita na razini meandra u smislu pojave velikih protoka. No, prema dostupnim podacima poznato je da se u prosincu 2022. dogodila značajna poplava, tijekom koje je zabilježen maksimalni protok na postaji Požega od  $114 \text{ m}^3/\text{s}$ , a na postaji Frkljevci od  $158 \text{ m}^3/\text{s}$  (DHMZ). Tijekom poplave rijeka se izlila iz korita nizvodno od postaje Frkljevci i poplavila područje između nasipa. U 2023. nije zabilježena takva velika poplava. Prema tome, izgledno je da je pojava poplave 2022. bila glavni čimbenik jače erozije obala na gotovo svim lokacijama u prvoj istraživanoj godini u usporedbi sa sljedećom.

Međutim, vrijednosti erodiranog područja i povlačenja obale međusobno su se značajno razlikovale na proučavanim meandrima tijekom istih razdoblja. Primjerice, tijekom 2022.-2023., na lokaciji Bučje u donjem toku, na desnoj obali uzvodnog meandra erodirano je ukupno  $188,2 \text{ m}^2$  naplavne ravnice, a na lijevoj obali nizvodnog meandra čak  $628,7 \text{ m}^2$  (duljina erodirajućih obala oba meandra iznosi oko 100 m). Najveće vrijednosti zabilježene su na

lokaciji Boričevci u srednjem toku, gdje je erodiralo ukupno 682 m<sup>2</sup> naplavne ranice, s prosječnim povlačenjem obale od 7,3 m.

Lokalne razlike u stopama erozije obale mogu biti uzrokovane brojnim čimbenicima, koji uključuju strukturu sedimenta obale, varijacije u morfologiji korita koje utječu na brzinu protoka i turbulenciju, vegetacijski pokrov obale te hidrotehničke mjere poput obaloutvrda (Kiss i dr. 2019). Za proučavane meandre precizni podaci o granulometrijskom sastavu sedimenta obala nisu prikupljeni ni analizirani (npr. varijacije u strukturi sedimenta na obali jedne lokacije, za koju je potrebno prikupiti više uzoraka). Međutim, bazična analiza jednog uzorka po obali koja je provedena u okviru ovog istraživanja pokazala je da su obale većinom građene od pijeska srednje i krupne frakcije (0,2-2 mm) u srednjem toku, a sitne frakcije u donjem toku (0,063-0,2 mm). Jedino je na lokaciji Vesela uzorkovana obala većinom građena od silta i gline (< 0,063 mm), vjerojatno radi donosa velike količine sitnog materijala s okolnih poljoprivrednih površina budući da nema priobalne vegetacije koja bi služila kao *buffer* zona (Poepl i dr., 2012).

Istraženi meandri pokazali su značajne razlike u stopama erozije obala ovisno o vrsti vegetacijskog pokrova. Usporedbom dva uzastopna meandra s različitim pokrovom obala, kao što su meandri na lokacijama Boričevci i Tenov mlin, uočeno je da vegetacijski pokrov ima važnu ulogu u smanjenju erozije. Naime, na meandrima s drvenastim pokrovom zabilježene su niže stope erozije. Primjerice, na Boričevcima je nizvodni meandar s drvenastim obalama erodirao 105,5 m<sup>2</sup> šume, a uzvodni meandar s travnatim obalama 803,7 m<sup>2</sup> poljoprivrednog zemljišta u ukupnom razdoblju 2022. – 2024. Zbog malog broja prikupljenih podataka i morfoloških razlika među lokacijama, nije bilo moguće provesti statističku analizu utjecaja vegetacije na eroziju obala na razini meandara. Ipak, rezultati usporedbe ovih uzastopnih meandara potvrđuju **hipotezu 3**, koja pretpostavlja da uklanjanje priobalne vegetacije dovodi do povećane erozije obala, što je potvrđeno na razini pododsječaka.

Korelacijska analiza je pokazala da je u prvom razdoblju (2022.-2023.) prosječno povlačenje obala bilo pozitivno povezano s indeksom vijugavosti meandra ( $\rho = 0,842$ ), ali u idućem razdoblju (2023.-2024.) statistička povezanost između navedenih varijabli nije dokazana. S druge strane, širina aktivnog korita nije pokazala značajnu statističku povezanost s povlačenjem obala niti u jednom razdoblju. Ondruch i Mačka (2015) također su zabilježili značajnu pozitivnu korelaciju između indeksa vijugavosti i površine erozije, iako manje snage ( $r = 0,4$ ). Indeks vijugavosti meandra negativno je povezan s radijusom krivine (engl. *radius*

*of curvature*), koji se obično dovodi u snažnu negativnu vezu s količinom erozije na vanjskoj strani meandra (Hickin i Nanson, 1975; Hooke, 2003). Naime, centrifugalna sila tjera vodu da teče brže i s većom snagom na vanjskoj strani meandra, što pojačava erozivno djelovanje. Meandri s manjim radijusom krivine imaju jaču centrifugalnu silu, zbog čega voda ubrzava i dodatno povećava eroziju. Suprotno tome, na unutarnjoj strani meandra, gdje je tok vode sporiji, dolazi do taloženja sedimenta (Bognar, 2008; Charlton, 2007). Međutim, istraživanja su također pokazala da je odnos između radijusa krivine i bočnog kretanja meandra kompleksan te da ovisi o stupnju razvoja meandra i prostornom mjerilu istraživanja (Hooke, 2023). Primjerice, Hooke i York (2010) su istaknuli da se stope erozije i povlačenja obale povećavaju s razvojem meandra (povećanjem njegove vijugavosti) sve do trenutka kada se počinju stvarati složeni meandri sa sekundarnim krivinama, te da stope erozije pokazuju slabu povezanost s različitim mjerama radijusa krivine na prostornoj skali od 10 m.

U ovom istraživanju korelacijskom analizom je potvrđeno da su na meandrima veće vijugavosti zabilježene veće stope bočne erozije, čime je na razini meandra **potvrđena hipoteza 4b**, koja analizama na razini pododsječaka nije potvrđena. Ta činjenica dodatno govori u prilog važnosti određivanja odgovarajućeg prostornog mjerila u geomorfološkim istraživanjima. Naime, parametri i procesi koji su važni na jednoj prostornoj skali ne moraju biti važni ili prediktivni na drugoj skali, a informacije se često gube kada se prostorni podaci razmatraju na prostoru veće rezolucije (Luoto i Hjort, 2006; Ondruch i Mačka, 2015).

Najveća vijugavost 2022. izmjerena je na lijevoj obali meandra kod Boričevaca (1,67), gdje su također izmjerene i najveće vrijednosti erozije naplavne ravnice (803,7 m<sup>2</sup>) i povlačenja obala (8,5 m). Osim veće vijugavosti, na lokaciji Boričevci treba istaknuti i druga morfološka obilježja i značajne ljudske utjecaje. Lokacija se nalazi nizvodno od ravnog, uskog dijela korita nizvodno od mosta, što povećava brzinu i snagu protoka. Na uzvodnom dijelu strme erodirajuće obale meandra mještani su nasipali obalu otpadnim građevinskim materijalom radi zaštite obližnjeg poljoprivrednog zemljišta od erozije. Međutim, nizvodno se na obalama nalazi drvenasta vegetacija, što je vrlo vjerojatno ograničilo eroziju na naplavnu ravnicu prema istoku te uzrokovalo rotaciju meandra (Sl. 4.25).

S druge strane, na lokaciji Bučje, izmjerene su druge najveće vrijednosti ukupne erozije obale nakon Boričevaca (777,4 m<sup>2</sup>). Meandar strme lijeve obale također je 2022. imao relativno veću vrijednost vijugavosti (1,55) te mu obala nije bila obrasla drvenastom vegetacijom. Međutim, povećana dinamika korita na ovom meandru, ali i uzvodnom meandru može se pratiti već od

2017. godine nakon što je 2016. probijena stepenica nizvodno kod mlina Ganoci. Analizom poprečnih profila na lokaciji izmjereno je usijecanje korita od oko 1 m u usporedbi sa stanjem iz 2012. Prema tome, nakon proboja stepenice, radi povećanog nagiba i snage toka na lokaciji Bučje došlo je do značajne i bočne i dubinske erozije.

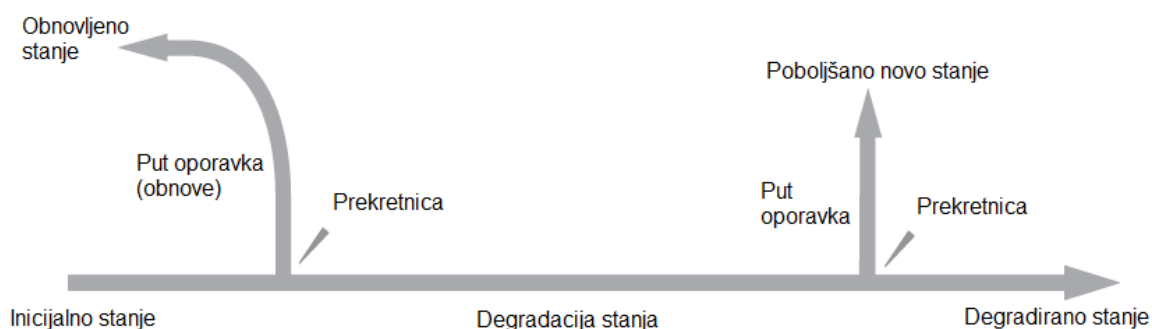
Na lokacijama u srednjem toku (Deževci i Boričevci) nije izmjerena značajna razlika u dubini korita u usporedbi sa stanjem iz 2012., dok na lokacijama Vesela i Tenov mlin usporedba nije bila moguća radi promjena u pružanju korita. Ostale zabilježene promjene poprečnih profila na istraživanim lokacijama između 2022. i 2024. dio su prirodne dinamike riječnog dna povezane s bočnim kretanjem korita po naplavnoj ravnici, odnosno izmjenom strukture brzaca i bazena. Na poprečnim profilima također je moguće pratiti pomicanje talvega i agradaciju sedimenta na riječnim prudovima nakon poplava, koja je primjerice na lokaciji kod Boričevaca iznosila više od 1 m. Na lokaciji Deževci, nakon antropogeno provedenog izravnavanja i produbljivanja korita bez učvršćivanja obala, korito se vratilo u prethodno stanje za otprilike 6 mjeseci što govori o dinamičnoj prirodi rijeke i njenom brzom povratku u stanje korita koje odgovara kontrolnim morfološkim faktorima na tom dijelu toka.

### **5.3. Potencijal za oporavak rijeke i mjere poboljšanja trenutnog hidromorfološkog stanja**

U posljednjih dvadesetak godina, zajedno sa svijesti o zaštiti okoliša razvijaju se i novi pristupi u upravljanju rijekama u kojima se stavlja naglasak na što prirodnije funkcioniranje cjelokupnog riječnog sustava (Brierley i Fryirs, 2005; Gurnell i dr., 2016). Na tekućicama sa značajnim ljudskim utjecajima potiče se na njihovu obnovu, odnosno vraćanje struktura, procesa i funkcija karakterističnih za prirodno stanje rijeka koji pridonose povećanju bioraznolikosti i sposobnosti ekosustava za samopročišćavanje, podižu kvalitetu života lokalnog stanovništva (npr. omogućuju rekreaciju) te smanjuju rizik od poplava (Muhar i dr., 2018). U Europskoj uniji, za potrebe provedbe ODV-a izdane su smjernice s popisom mjera za ublažavanje antropogenih utjecaja na rijeke koje su podijeljene prema namjeni (plovidba, zaštita od poplava, hidroenergija, navodnjavanje, vodoopskrba, rekreacija, odvodnjavanje i urbanizacija), te prema pritiscima i utjecajima na određene hidromorfološke elemente (Europska komisija, 2019; Vučković i dr., 2021).

U tom kontekstu, Brierley i Fryirs (2005) su unutar okvira *River Styles* razvili sustav procijene potencijala rijeke za oporavak (engl. *river recovery potential*), koji je prihvaćen i unutar

europskog projekta REFORM kao važan korak u planiranju obnove rijeka u skladu s europskim okolišnim politikama. Oporavak rijeke je definiran kao putanja promjene rijeke prema boljem hidromorfološkom stanju, dok je potencijal za oporavak definiran kao kapacitet za poboljšanje hidromorfološkog stanja tekućice u sljedećih 50-100 godina (Fryirs i Brierley, 2016). Potencijal za oporavak procjenjuje se na temelju dosadašnje putanje promjena tekućice, sadašnjeg stanja te položaja istraživanog odsječka na tzv. dijagramu oporavka rijeke. Glavni cilj je utvrditi stupanj degradacije hidromorfološkog stanja rijeke: ako je rijeka neznatno promijenjena s obzirom na očekivano prirodno stanje za taj tip rijeke, dovoljne su minimalne intervencije da se rijeka vrati u inicijalno stanje. Međutim, ako je stanje rijeke značajno degradirano, potrebne su značajne intervencije da se to stanje popravi. S obzirom na često promijenjene granične uvjete na razini porječja (poput zemljišnog pokrova) ili značajne ljudske intervencije (npr. regulacija protoka izgradnjom brane), ne može se realno očekivati da se rijeka vrati u inicijalno stanje, nego se stanje pokušava popraviti s obzirom na postojeće uvjete u porječju. Dakle, kreiraju se obilježja i procesi koji su „novi“ za tu tekućicu, ali predstavljaju općenito poboljšano hidromorfološko stanje (Sl. 5.3, Fryirs i Brierley, 2016).



Sl. 5.3. Dijagram potencijala za oporavak rijeke (prema Fryirs i Brierley, 2016)

Prema tome, pri planiranju obnove tekućice, treba imati na umu da referentni uvjeti ne mogu predstavljati "netaknute" uvjete bez ili s vrlo malim ljudskim utjecajem, kao što je to definirano ODV-om (EU, 2000) jer takvi uvjeti u 21. stoljeću gotovo ne postoje. Brierley i Fryirs (2005) definiraju referentne uvjete kao procjenu najboljeg stanja koje je moguće postići s obzirom na promjene uzrokovane ljudskim aktivnostima i granične uvjete koji postoje u porječju. Slično, Rinaldi i dr. (2013) definiraju referentne uvjete kao očekivane procese i funkcije u određenom fizičkom kontekstu, odnosno specifičnoj morfološkoj tipologiji, a Wyżga i dr. (2012) kao uvjete koji stvarno ili potencijalno postoje s obzirom na trenutne okolišne uvjete u porječju, ali bez ljudskog utjecaja na korito, priobalno područje i poplavno područje rijeke. Treba naglasiti

da prošla stanja korita s povijesnih kartografskih izvora, koja se ponekad znaju uzimati kao referentni uvjeti, ne predstavljaju nužno niti prirodno niti očekivano stanje rijeke jer morfologija povijesnih korita može odražavati granične uvjete vrlo različite od sadašnjih, npr. u vidu klimatskih obilježja i zemljišnog pokrova u porječju (Rinaldi i dr., 2013; Wyžga i dr., 2012).

Na rijeci Orljavi, analizom hidromorfoloških promjena i procjenom osjetljivosti rijeke definirane su četiri osnovne kategorije odsječaka: kanalizirani nisko osjetljivi odsječci ( $N_k$ -I,  $N_k$ -II), potencijalno visoko osjetljivi odsječci koji bilježe umjerene promjene (V-II), potencijalno umjereno osjetljivi odsječci koji bilježe umjerene promjene (U-II), i potencijalno umjereno osjetljivi odsječci koji bilježe značajne promjene (U-III, točnije odsječak 9).

### **5.3.1. Kanalizirani odsječci**

Kod kanaliziranih odsječaka, niska osjetljivost na promjene uvjetovana je antropogenim utjecajima kojima je spriječeno bočno kretanje korita ( $N_k$ -I,  $N_k$ -II). Ti se odsječci nalaze u izrazito degradiranom hidromorfološkom stanju, budući da im je morfologija u potpunosti promijenjena stvaranjem uniformnog, ravnog korita trapezoidnog presjeka, bez vegetacije na obalama (Pavlek i dr., 2023). Umjetna stabilizacija korita postignuta je izgradnjom stepenica koje podižu lokalnu erozijsku bazu i smanjuju snagu toka te posljedično dubinsku i bočnu eroziju. To dovodi do smanjenja heterogenosti hidroloških obilježja (npr. brzine toka) i geomorfoloških oblika u koritu rijeke, koji su glavni čimbenici raznolikosti i kvalitete riječnih staništa (Graf i dr., 2016). Također, nedostatak priobalne vegetacije dovodi do povećanja temperature vode, što može dovesti do smanjenja otopljenog kisika u tekućici (Buffagni i dr., 2016). Ograničavanjem lateralne povezanosti korita s naplavnom ravnicom mijenjaju se uvjeti potrebni za razvoj riparijske močvarne vegetacije (npr. periodično plavljenje), a produbljivanjem korita snižava se razina podzemnih voda, koja zajedno sa slabijim vezama s naplavnom ravnicom vodi do većeg rizika od isušivanja samog korita (Hohensinner i dr., 2018).

Međutim, osim negativnih posljedica za živi svijet, kanaliziranje rijeka može imati negativne posljedice i na rizik od poplava, usprkos činjenici da je zaštita od poplava glavna svrha te hidrotehničke mjere. Naime, izravnavanjem korita voda brže otječe, ali se nestankom prirodne naplavne ravnice gubi kapacitet okolnog područja za upijanje vode, što dovodi do većih maksimalnih protoka (Kiss i dr., 2021). Također, nizvodno od kanaliziranog odsječaka brzi

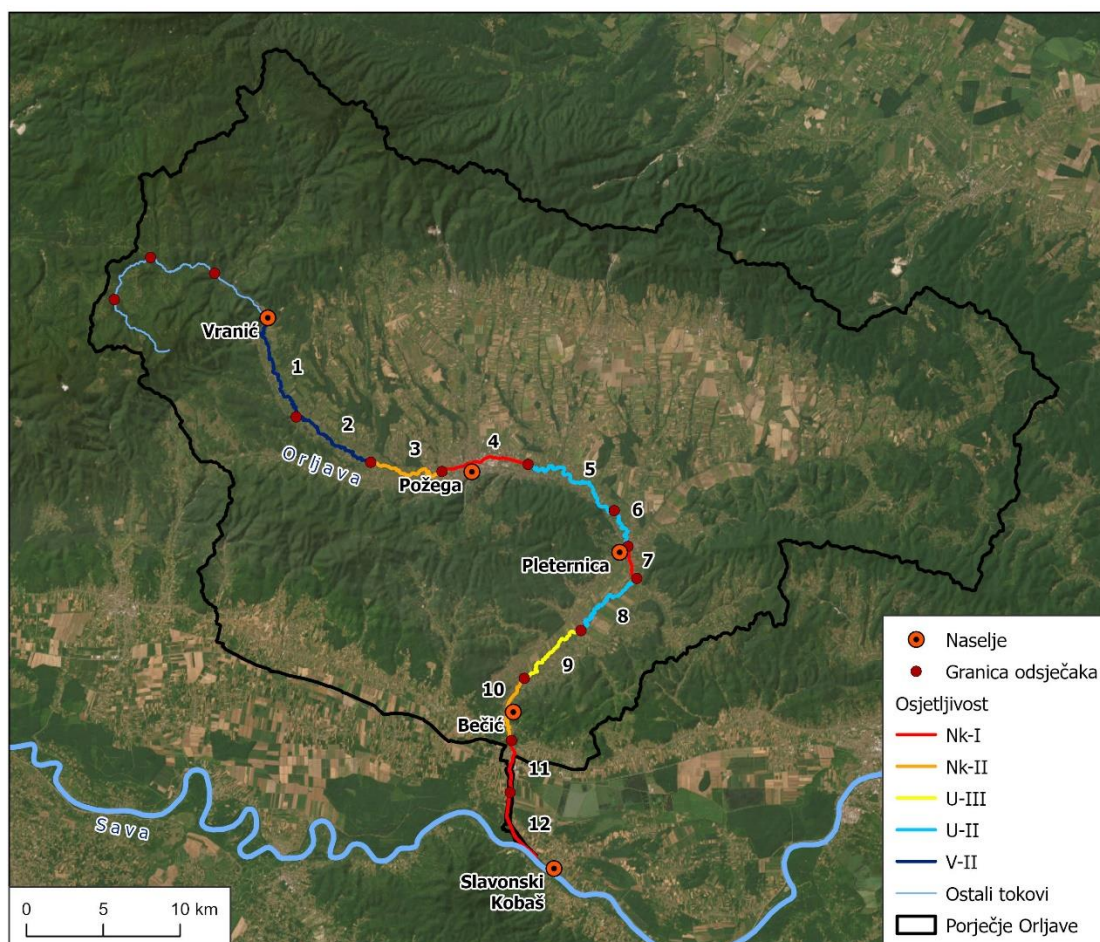


dotok vode povećava rizik od poplava. Kapacitet korita i okolne često uske naplavne ravnice omeđene nasipima smanjuje se povećanom agradacijom sedimenta te se rizik od poplava povećava uslijed sve češćih ekstremnih padalina (Kiss i Blanka, 2012). Zbog toga se od početka 21. stoljeća sve više potiče na upravljanje rijekama i poplavama u skladu s prirodnim procesima (engl. *natural flood protection*), koji prvenstveno uključuju smanjivanje količine otjecanja na padinama (npr. aforestacijom), očuvanje prirodnih poplavnih područja kao retencijskih zona te usporavanja otjecanja u samom koritu (Lane, 2017). Tim mjerama vodni se val nastoji ravnomjerno rasporediti u porječju te se umjesto ubrzanjem toka i „slanjem problema nizvodno“, rizik od poplava u nizvodnim područjima ublažava uzvodnim retencijama.

Kanalizirani odsječci Orljave na području gradova Požege i Pleternice (4 i 7) imaju slab potencijal za potpuni oporavak i obnovu jer je zbog urbanizacije na naplavnoj ravnicima nemoguće vratiti rijeku u prijašnje stanje vijugavosti korita (Sl. 5.4). Ipak, sadašnje stanje može se poboljšati obnovom drvenaste vegetacije na obalama rijeke, koja pruža zasjenjenje korita i stvara drvene ostatke, čime se smanjuje temperatura vode i osigurava raznolikost geomorfoloških oblika i staništa (Buffagni i dr., 2016; Galia i dr., 2023). S obzirom na to da Orljava kod Požege može presušiti (posljednji put u rujnu 2024.; Krstanović, 2024), ova mjera mogla bi ublažiti i taj problem. Međutim, budući da priobalna vegetacija smanjuje protočnost korita, ta mjera potencijalno povećava rizik od poplava u okolnom urbaniziranom području. Rizik od poplava u cijelom porječju Orljave optimalno bi bio ublažen izgradnjom retencija za koje postoji dovoljno prostora u gornjem dijelu porječja, primjerice kod Kamenske (pri čemu se ne misli na izgradnju brane koja bi poremetila longitudinalni kontinuitet rijeke). Također, važno je očuvati i pravilno gospodariti šumskim pokrovom u brdskim područjima kako bi se smanjila količina i brzina otjecanja na padinama.

Djelomično kanalizirani odsječak 3 i kanalizirani odsječci u donjem toku (10, 11 i 12) prolaze uskim koridorom izvan kojeg se na naplavnoj ravnicima nalaze poljoprivredne površine. Pozitivna činjenica jest da je priobalna vegetacija na ovim odsječcima većinom kontinuirana, što poboljšava općenito hidromorfološko stanje. Međutim, glavni hidromorfološki problem odsječaka u donjem toku predstavljaju visoke stepenice (preko 5 m) kojima se regulira razina vode i odvodnjava dio toka za potrebe napajanja ribnjaka Jasinje. Zbog toga dolazi do potpunog prestanka u longitudinalnom kontinuitetu protoka vode, prijenosa vučenog sedimenta i mogućnosti migracije organizama, što u konačnici dovodi do fragmentacije riječnih staništa (Seliger i Zeilinger, 2018). Također, rijeka nizvodno od stepenica može i presušiti. Poboljšanje hidromorfološkog stanja odsječaka moglo bi se postići djelomičnom revitalizacijom naplavnih

ravnica (širenjem područja između nasipa i stvaranjem poplavnih šuma), primjenom prirodnijih dizajna pregrada poput kaskada i ribljih staza te uvođenjem ekološkog protoka (Europska komisija, 2019; Muhar i dr., 2018). Međutim, provedba ovih mjera zahtijevala bi otkup poljoprivrednog zemljišta u pojasu oko rijeke. Također, implementacija prilagođenih pregrada i ekološkog protoka zahtijeva ulaganja u infrastrukturu i dugoročno upravljanje.



Sl. 5.4. Odsječci Orłjave klasificirani prema osjetljivosti: kanalizirani nisko osjetljivi odsječci ( $N_k$ -I,  $N_k$ -II), potencijalno visoko osjetljivi odsječci koji bilježe umjerene promjene (V-II), potencijalno umjereno osjetljivi odsječci koji bilježe umjerene promjene (U-II), i potencijalno umjereno osjetljivi odsječci koji bilježe značajne promjene (U-III). Osnovne predložene mjere ublažavanja sadašnjeg hidromorfološkog stanja i obnove rijeke: očuvanje priobalne vegetacije (odsječci 1, 2) obnova priobalne vegetacije (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9), udaljavanje nasipa i revitalizacija naplavnih ravnica (3, 10, 11, 12), prilagodba stepenica (3, 4, 7, 9, 10, 11, 12), očuvanje slobodnog bočnog kretanja rijeke (1, 2, 5, 6, 8, 9).

### 5.3.2. Odsječci s malim i umjerenim antropogenim utjecajima

Potencijalno visoko osjetljivi odsječci 1 i 2 koji bilježe umjerene promjene (V-II) nalaze se u najuzvodnijem dijelu Požeške kotline. Njihovo stanje može se ocijeniti kao dobro, s obzirom da su antropogeni utjecaji ograničeni: korito nije bočno ograničeno, riparijska zona je uglavnom očuvana, a geomorfološki oblici i procesi odgovaraju očekivanom prirodnom stanju. Mjere očuvanja trebale bi uključivati dodatnu zaštitu i obnovu riparijske zone na mjestima gdje je ona uklonjena, kao i prekid hidrotehničkih radova kojima se nastoji promijeniti morfologija korita. Takvi radovi, kao što su pokazala terenska istraživanja u ovom radu, često rezultiraju kratkotrajnom i nepotrebnom degradacijom, budući da se morfodinamika rijeke brzo vraća u prirodno stanje. Također, trebalo bi strože kontrolirati ilegalno šljunčarenje koje može dovesti do usijecanja korita.

Potencijalno umjereno osjetljivi odsječci koji bilježe umjerene promjene su 5, 6 i 8 (U-II). Na tim odsječcima je zabilježeno djelomično ili potpuno uklanjanje priobalne vegetacije, zbog čega su lokalno utvrđene povećane stope erozije obala i poljoprivrednih površina na naplavnoj ravnicima (npr. lokacija Vesela, odsječak 6). Usprkos uklonjenoj vegetaciji, relativno umjerenim stopama bočnog kretanja u ovim odsječcima vjerojatno doprinosi činjenica da se na nizvodnim granicama nalaze stepenice koje smanjuju nagib korita (odsječci 6 i 8). Izgradnjom stepenica antropogeno se smanjuje prirodna osjetljivost odsječaka, što smanjuje bočno kretanje uzvodno, ali dovodi do prekida u longitudinalnom protoku vode i sedimenta te mijenja razinu lokalne erozijske baze, a to nizvodno može utjecati na pojačanu bočnu i dubinsku eroziju (Poepl i dr., 2015).

Naime, nizvodno od stepenice kod mlina Ganoci smješten je odsječak 9, koji se pokazao kao visoko osjetljiv na morfološke promjene zbog visokih stopa bočnog kretanja zabilježenih nakon uklanjanja priobalne vegetacije 2011. godine (U-III). Osim položaja nizvodno od stepenice, čime se pojačava „glad“ rijeke za sedimentom jer se on uzvodno akumulira, visoka osjetljivost tog odsječka dodatno je uzrokovana značajnim skraćivanjem korita antropogenim presijecanjem meandara kojim su lokalno povećani nagib i snaga toka. Time je povećana nestabilnost i potencijal odsječka za prilagodbe korita, odnosno težnja k vraćanju u prijašnje stanje vijugavosti. Međutim, iako je ovaj odsječak klasificiran kao specifično visoko osjetljiv, promjene koje su zabilježene (dinamično bočno kretanje) još uvijek spadaju u standardnu dinamiku meandrirajućeg tipa tekućice, samo je stopa te dinamike porasla radi promijenjenih uvjeta: uklanjanja vegetacije i povećanja nagiba skraćivanjem korita.

Ovdje treba naglasiti da je bočno kretanje kao prirodno svojstvo meandrirajućih rijeka važna odrednica dinamike i razvoja riparijskih ekosustava, koja time podržava biološku raznolikost (Corenblit i dr., 2007; Garófano-Gómez i dr., 2017). Također, obnova vegetacije nakon poplava i erozije obala pridonosi održavanju kapaciteta protoka uklanjanjem starije vegetacije i smanjenjem trenja na obalama korita (Baptist i dr., 2004; Kiss i Blanka, 2012). Međutim, činjenica je da migracija korita često ugrožava poljoprivredna zemljišta ili naselja na naplavnoj ravnicima (Bertalan i dr., 2018; Rusnák i dr., 2016). U riječnom koridoru Orljave na odsječcima 8 i 9 ukupno 4,71 ha poljoprivrednog zemljišta je erodirano u razdoblju od 2011. do 2021. godine. Osim ekonomskih gubitaka, povećana erozija poljoprivrednih površina može ugroziti riječna staništa i organizme zamućivanjem i eutrofikacijom zbog povećanog unosa sitnog sedimenta (Poepl i dr., 2020). Nadalje, budući da riparijska vegetacija djeluje kao *buffer* zona između naplavne ravnice i korita, njezina odsutnost može olakšati prijenos sedimenta i štetnih tvari s poljoprivrednih područja u riječni sustav, dodatno povećavajući lateralni unos sedimenta i potencijalno zagađenje (Poepl i dr., 2012).

Prema tome, zabilježene povećane stope bočnog kretanja u odsječku 9 nepoželjne su i s ekološkog stajališta i s ekonomskog aspekta. Stoga bi bilo poželjno odsječak vratiti u stanje prije uklanjanja vegetacije. Budući da zabilježene promjene pripadaju standardnoj dinamici meandrirajućeg tipa tekućice, odsječak ne treba smatrati morfološki značajno degradiranim. Moguće je provesti njegovu obnovu (npr. vraćanje stopa bočnog kretanja vrijednostima iz razdoblja 2001. – 2011.) implementacijom dviju osnovnih mjera: obnovom kontinuiteta priobalne vegetacije i očuvanjem prirodne vijugavosti rijeke (tj. izbjegavanje mjere presijecanja meandara). Važno je naglasiti da je u ovom istraživanju dokazana nelinearna veza između udjela drvenaste vegetacije na obalama i bočnog kretanja rijeke. U smislu upravljanja to znači da čak i manji porast u udjelu drvenaste vegetacije kad je on općenito nizak pridonosi značajnom smanjenju bočnog kretanja. Štoviše, rijeka pokazuje visok potencijal za samoobnovu, budući da se udio drvenaste vegetacije na obalama nakon 10 godina rastom i razvojem prirodno vratio na stanje prije uklanjanja 2011., uz istovremeno smanjenje stopa bočnog kretanja. Ipak, s obzirom na to da su u razdoblju od 2019. do 2021. zabilježeni niži protoci, nije bilo uvjeta za izraženije bočno kretanje. Daljnja istraživanja su potrebna kako bi se analizirala dinamika rijeke tijekom sljedećih poplava te kako bi se donijela procjena je li se odsječak stabilizirao ili se još nalazi u fazi dinamičnih prilagodbi korita.

Na kraju, ne treba zaboraviti veliki rizik od (bujičnih) poplava koji predstavlja izazov za naselja i infrastrukturu duž cijelog toka Orljave. Novi pristupi upravljanju rijekama, umjesto

kontroliranja hidroloških i geomorfoloških procesa rijeke (engl. *hard engineering approach*), predlažu "dati više prostora rijeci", odnosno odrediti zone koje često plave, aktivno erodiraju, ili uključuju riparijske močvare (Buffin-Bélanger i dr., 2015; Williams i dr., 2020), što je u skladu s prirodnim upravljanjem poplavama (Lane, 2017). Prema tome, predlažu se mjere koje uključuju izgradnju nasipa smještenih na dovoljnoj udaljenosti od rijeke, čime se omogućava slobodno bočno kretanje rijeke i stvara prostor naplavne ravnice između nasipa, koji može poslužiti kao prirodna retencija tijekom poplava.

Pozitivan primjer upravljanja rijekom u tom smislu može se vidjeti na desnoj obali odsječaka 8 i 9, koji jesu omeđeni nasipima, ali njihova udaljenost ipak omogućava rijeci određeni prostor za migraciju. Širina između nasipa na uzvodnom odsječku 8 je prosječno 250 m (Sl. 5.5), što je prema Williamsu (1986) dovoljna širina kako bi se uspostavila prirodna širina pojasa meandriranja s obzirom na širinu korita rijeke.<sup>5</sup> Također, naplavna ravnica na desnoj obali odsječaka 8 i 9 do nasipa je državno vlasništvo, odnosno javno vodno dobro pod upravljanjem Hrvatskih voda. Ponekad se mjera presijecanja meandara mora izvršiti, npr. ako rijeka počne erodirati nasip. U tom slučaju, povećano bočno kretanje može biti ublaženo kontinuitetom priobalne vegetacije. Međutim, lijeva obala oba odsjeka prekrivena je poljoprivrednim površinama što otežava stvaranje šire riparijske *buffer* zone. Eventualna prenamjena zemljišta bila bi vjerojatno dugotrajna i složena, pogotovo jer se katastarske karte u Hrvatskoj još uvijek temelje na onima iz sredine 19. stoljeća, koje naravno ne prikazuju točno stanje riječnog koridora zbog značajnih migracija korita.

U svakom slučaju, za odsječke 5, 6, 8 i 9, koje možemo morfološki klasificirati kao meandrirajućeg tipa, za poboljšanje hidromorfološkog stanja bilo bi poželjno pridržavati se sljedećih smjernica:

1. **Obnova kontinuiteta priobalne vegetacije** ključna je za smanjenje bočne erozije, snižavanje temperature vode i poboljšanje heterogenosti geomorfoloških oblika u koritu stvaranjem drvnih ostataka (Buffagni i dr., 2016; Galia i dr., 2023).

---

<sup>5</sup> Williams (1986) navodi jednadžbu za izračun prirodne širine pojasa meandriranja:  $B=4,3W^{1,12}$  gdje je B širina pojasa meandara, a W širina korita. Za vodotoke srednje veličine (širina korita 30 m), širina pojasa meandara je otprilike šest puta veća od širine korita. Williams (1986) temelji svoj izračun na 153 točke s aluvijalnih tekućica iz SAD-a, Indije, Pakistana, Kanade, Švedske i Australije, s koeficijentom korelacije  $r=0.96$ .

2. **Očuvanje relativno slobodnog bočnog kretanja rijeke:** izgrađeni nasipi moraju biti na dovoljnoj udaljenosti od korita (Europska komisija, 2019), barem u skladu s jednadžbom Williamsa (1986).
3. **Mjere presijecanja meandara** trebale bi se primjenjivati **isključivo u iznimnim slučajevima** kada su ugroženi nasipi ili druga vrijedna infrastruktura.
4. **Ublažavanje utjecaja stepenica na prekid longitudinalne povezanosti** protoka vode i prijenosa sedimenta. Na dijelovima toka na kojima stepenice nisu ključne za smanjenje rizika od poplava (npr. mlin Ganoci), stepenice je poželjno ukloniti. Na dijelovima toka na kojima stepenice imaju ključnu ulogu u obrani od poplava ili su dio važne infrastrukture (npr. brana kod Pleternice) njihov utjecaj je potrebno ublažiti izgradnjom ribljih staza koje omogućuju migraciju organizama (Europska komisija, 2019; Seliger i Zeilinger, 2018).



Sl. 5.5. Isječak toka rijeke između dva nasipa u odsječku 8



## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je dijakronijska analiza hidromorfoloških promjena rijeke Orljave od kraja 19. stoljeća, kojom su utvrđene značajne promjene u morfologiji korita rijeke uzrokovane prvenstveno antropogenim utjecajima poput kanaliziranja i uklanjanja priobalne vegetacije (**cilj 1**). Istraživanje je provedeno na temelju kartografskih izvora, podataka daljinskih istraživanja i terenskih mjerenja. Na kartama i aerofotogrametrijskim snimkama iz 1966. i 2001. korito rijeke vektorizirano je ručno u GIS-u, dok je na aerofotogrametrijskim snimkama iz razdoblja 2011. – 2021. provedena objektna klasifikacija zemljišnog pokrova pomoću algoritama strojnog učenja, čime je automatiziran proces izdvajanja morfoloških i vegetacijskih jedinica u riječnom koridoru. Upotreba objektna klasifikacije pokazala se kao vrlo učinkovita, čak i u određivanju topografskih jedinica (poput riječnih sedimenata i golog tla na naplavnoj ravnici) u nedostatku LiDAR podataka. Uporabom bespilotne letjelice u terenskim istraživanjima omogućeno je brzo prikupljanje podataka visoke prostorne rezolucije na razini meandra, čime je osigurana visoka preciznost u praćenju promjena.

U prvom dijelu istraživanja, u kojem su istražene dugoročne promjene korita na odsječcima rijeke od ulaska u Požešku kotlinu do ušća, rezultati su pokazali da se duljina toka u razdoblju 1879./1882. – 2019. smanjila za 9,3 %, prvenstveno radi kanaliziranja i izravnavanja toka na području Požege i na najnižvodnijem dijelu prije ušća u Savu. Godine 2019. oko 30 % srednjeg i donjeg toka bilo je kanalizirano. Time su potvrđene **hipoteze 1 i 2**, kojima je pretpostavljeno da na rijeci Orljavi postoje značajne hidromorfološke promjene od kraja 19. stoljeća (1) te da su morfološke promjene korita rijeke prvenstveno posljedica ljudskog utjecaja (2). Na temelju hidromorfoloških obilježja odsječaka procijenjena je njihova potencijalna osjetljivost na promjene, a na temelju veličine stopa bočnog kretanja u razdoblju 2001. – 2019. njihova specifična osjetljivost (**cilj 3**). Time su odsječci podijeljeni u četiri osnovne grupe: kanalizirani nisko osjetljivi odsječci, potencijalno visoko osjetljivi odsječci koji bilježe umjerene promjene, potencijalno umjereno osjetljivi odsječci koji bilježe umjerene promjene, i potencijalno umjereno osjetljivi odsječci koji bilježe značajne promjene.

U drugom dijelu istraživanja analizirane su promjene zemljišnog pokrova (2011. – 2021.) i morfologije korita (1966. – 2021.) na odsječcima rijeke između Frkljevaca i Čosinog mlina, s ciljem dublje interpretacije njihovih prirodnih i antropogenih čimbenika (**cilj 2**). Tijekom posljednjih dvadesetak godina, na Orljavi su se dogodile dvije značajne poplave: 2010. i 2014. Iako su poplave bile sličnih maskimalnih protoka (oko 200 m<sup>3</sup>/s na postaji Frkljevci), izmjerene

morfološke promjene bile su znatno veće nakon druge poplave; primjerice, stope bočnog kretanja u odsječku između mlina Ganoci i Čosinog mlina povećale su se s 1,02 m/god (2009. – 2011.) na 4,14 m/god (2011. – 2014.), a širina aktivnog korita narasla je s 22-23 m na 33 m. Glavna razlika u hidromorfološkim obilježjima rijeke između 2010. i 2014. bio je udio drvenaste vegetacije na obalama, koji je nakon antropogenog uklanjanja u sklopu mjera obrane od poplava pao s više od 70 % (2009.) na oko 5 % (2011.).

Veze između stopa bočnog kretanja korita i njihovih čimbenika utvrđene su statističkim testovima i modelima. Statistički značajna negativna povezanost između udjela drvenaste vegetacije na obalama i stope bočnog kretanja rijeke potvrđena je korelacijskom analizom i linearnim mješovitim modelom (**hipoteza 3a**). Također, utvrđena je negativna povezanost između udjela vegetacije i promjena u širini aktivnog korita (**hipoteza 3b**). Naime, veći udio vegetacije na obalama povećava stabilnost, čime se bočna erozija smanjuje. Budući da je kao glavni uzrok pojačane morfodinamike rijeke u razdoblju 2011. – 2021. utvrđeno antropogeno uklanjanje vegetacije, a ne pojava poplava, dodatno je potvrđena **hipoteza 2** o dominaciji antropogenog utjecaja na morfološke promjene rijeke.

Nadalje, pozitivna veza između stopa bočnog kretanja (kao mjere osjetljivosti rijeke) i nagiba korita (**hipoteza 4a**) dokazana je linearnim mješovitim modelom. Veći nagib korita pridonosi većoj snazi toka koja uzrokuje veću bočnu eroziju. Međutim, na razini pododsječaka, veza između bočnog kretanja i indeksa vijugavosti nije bila statistički značajna (**hipoteza 4b**).

U trećem dijelu istraživanja, terenska mjerenja na razini meandara (2022. – 2024.) pokazala su da su stope bočne erozije bile 20-80 % veće na gotovo svim istraživanim meandrima u prvom jednogodišnjem razdoblju (2022. – 2023.), tijekom kojeg se dogodila značajnija poplava (Frkljevci:  $Q_{\max} = 158 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Također su zabilježene veće stope bočne erozije na meandrima na kojima strma obala nije prekrivena drvenastom vegetacijom, što je u skladu s već dokazanom **hipotezom 3a** na razini pododsječaka. Korelacijskom analizom je dokazana pozitivna veza između indeksa vijugavosti meandra i stope pomicanja obale, čime je na razini meandra potvrđena **hipoteza 4b**. Naime, veća zakrivljenost meandra povećava centrifugalnu silu koja tjera vodu da teče brže i s većom snagom na vanjskoj strani meandra, što pojačava erozivno djelovanje. Nadalje, promjene u poprečnim profilima većinom su održavale prirodnu dinamiku dna tekućice u skladu s bočnim kretanjem (izmjena brzaca i bazena), osim na lokaciji kod Bučja, gdje je s usporedbom sa stanjem iz 2012. zabilježeno usijecanje korita od oko 1 m uzvodno od probijene stepenice radi snižavanja lokalne erozijske baze.

Kvantifikacija prošlih i sadašnjih stanja i procesa pružila je uvid u evoluciju rijeke kroz vrijeme, te zajedno s identifikacijom i interpretacijom uzročno-posljedičnih veza omogućila dublje razumijevanje riječnog sustava Orljave. Poznavanje geomorfološke reakcije rijeke na određene poremećaje, poput uklanjanja priobalne vegetacije, omogućuje bolje planiranje budućeg upravljanja. Ciljevi novih pristupa upravljanju rijekama temelje se na što prirodnijem funkcioniranju riječnih sustava, stoga su u ovom istraživanju predložene mjere za poboljšanje trenutnog hidromorfološkog stanja Orljave (**cilj 4**).

Kako bi se smanjila daljnja erozija obala (prvenstveno poljoprivrednih površina) u odsječcima u kojima je priobalna vegetacija antropogeno uklonjena, ključna mjera poboljšanja sadašnjeg stanja uključuje zaštitu i obnovu priobalne vegetacije, koja pridonosi stabilizaciji korita i smanjenju bočne erozije. Naime, iako su hidrološki parametri poput trajanja i veličine poplava glavni pokretači morfoloških promjena korita, ovim istraživanjem je dokazano da je prisutnost drvenaste vegetacije na obalama presudno važna za smanjenje erozije tijekom velikih protoka. Također, dokazana je nelinearna veza između udjela drvenaste vegetacije na obalama i bočnog kretanja rijeke, što u smislu upravljanja znači da čak i manji porast u udjelu drvenaste vegetacije kad je on općenito nizak pridonosi značajnom smanjenju bočnog kretanja.

Nadalje, predlaže se očuvanje slobodnog bočnog kretanja rijeke i njezine prirodne vijugavosti, čime se omogućuje razvoj heterogenih geomorfoloških oblika i hidroloških uvjeta unutar korita, koji su ključni za razvoj raznovrsnih riječnih staništa. Prirodna vijugavost rijeke također povećava površinu korita koja može apsorbirati i skladištiti velike protoke, čime se dodatno smanjuje rizik od poplava. S druge strane, veća vijugavost korita smanjuje nagib i brzinu toka što pridonosi stabilnosti korita.

Mjere ublažavanja za kanalizirane odsječke rijeke su ograničene zbog gusto naseljenih i izgrađenih područja kroz koja prolaze. Međutim, budući da se zbog klimatskih promjena predviđa sve češća pojava ekstremnih događaja poput velikih poplava i suša, predlaže se provedba dviju ključnih mjera: obnovom priobalne vegetacije smanjuje se temperatura vode, dok se razvojem retencijskih područja povećava kapacitet za prihvrat velike količine vode tijekom poplava.

Na Orljavi se također nalazi 13 stepenica, od kojih su one u donjem dijelu toka visoke i preko 5 m čime prekidaju longitudinalnu povezanost toka i uzrokuju fragmentaciju staništa. Iako bi optimalno bilo uklanjanje svih stepenica, utjecaj infrakstrukturno važnih stepenica potrebno je ublažiti izgradnjom ribljih staza koje omogućuju migraciju organizama.

Buduća hidromorfološka istraživanja na Orljavi trebala bi se usmjeriti na daljnje praćenje promjena korita te proučavanje odnosa između prirodnih i antropogenih čimbenika promjena. Primjerice, bilo bi zanimljivo nastaviti istraživati kako prirodno obnovljena priobalna vegetacija na odsječku između mlina Ganoci i Ćosinog mlina utječe na stope bočnog kretanja: je li se korito stabiliziralo te kako reagira na poplavne događaje? Jesu li se stope bočnog kretanja vratile na razinu s početka stoljeća, ili je odsječak još uvijek nestabilan radi povećanog nagiba korita uslijed presijecanja velikog broja meandara?

Budući da je temeljen na prihvaćenim znanstvenim okvirima hidromorfoloških istraživanja tekućica, ovaj rad može poslužiti kao model za istraživanje drugih tekućica sličnih morfoloških obilježja, tj. aktivno meandrirajućih rijeka. Općenito, ovo istraživanje predstavlja zanimljiv primjer reakcije rijeke na pojavu poplava s obzirom na uklanjanje priobalne vegetacije. Dosadašnja literatura rijetko spominje osjetljivost rijeke u kontekstu utjecaja priobalne vegetacije, već se uglavnom fokusira na morfološka obilježja doline, korita i sedimenta dna. U primjeru rijeke Orljave, dokazana je veća osjetljivost upravo zbog uklanjanja priobalne vegetacije.

U konačnici, ovo istraživanje predstavlja sveobuhvatnu hidromorfološku analizu rijeke Orljave s velikim brojem podataka i informacija koje mogu doprinijeti boljem upravljanju riječnim sustavom. Istraživanje može poslužiti kao čvrst temelj za planiranje obnove rijeke i ekološka istraživanja. Kako bi se poboljšalo hidromorfološko stanje Orljave, potrebna je primjena holističkog pristupa upravljanja koji sagledava tekućice u širem prostornom kontekstu, poput cjelokupnog porječja, te se temelji na razumijevanju hidroloških, geomorfoloških i ekoloških procesa uz primjenu prirodnih rješenja.

## Literatura

1. Alber, A., & Piégay, H. (2017). Characterizing and modelling river channel migration rates at a regional scale: Case study of south-east France. *Journal of Environmental Management*, 202, 479–493. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.055>
2. Allen, D. C., Wynn-Thompson, T. M., Kopp, D. A., & Cardinale, B. J. (2018). Riparian plant biodiversity reduces stream channel migration rates in three rivers in Michigan, U.S.A. *Ecohydrology*, 11(4), e1972. <https://doi.org/10.1002/eco.1972>
3. Anderson, J. R. (1976). *A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data*. U.S. Government Printing Office.
4. Andrić, S. (2009). Podgorje Papuka i Krndije u srednjem vijeku: Prilozi za lokalnu povijest (drugi dio). *Scrinia Slavonica : Godišnjak Podružnice za povijest Slavonije, Srijema i Baranje Hrvatskog instituta za povijest*, 9(1), 57–98.
5. Astrade, L., & Bravard, J.-P. (1999). Energy gradient and geomorphological processes along a river influenced by neotectonics (the Saône river, France). *Geodinamica Acta*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/09853111.1999.11105327>
6. Babiński, Z. (1992). Hydromorphological consequences of regulating the lower vistula, Poland. *Regulated Rivers: Research & Management*, 7(4), 337–348. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450070404>
7. Baena-Escudero, R., Rinaldi, M., García-Martínez, B., Guerrero-Amador, I. C., & Nardi, L. (2019). Channel adjustments in the lower Guadalquivir River (southern Spain) over the last 250 years. *Geomorphology*, 337, 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.027>
8. Balen, D., Massonne, H.-J., & Petrinc, Z. (2015). Collision-related Early Paleozoic evolution of a crustal fragment from the northern Gondwana margin (Slavonian Mountains, Tisia Mega-Unit, Croatia): Reconstruction of the P–T path, timing and paleotectonic implications. *Lithos*, 232, 211–228. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.003>
9. Baptist, M. J., Penning, W. E., Duel, H., Smits, A. J. M., Geerling, G. W., Van Der Lee, G. E. M., & Van Alphen, J. S. L. (2004). Assessment of the effects of cyclic floodplain rejuvenation on flood levels and biodiversity along the Rhine River. *River Research and Applications*, 20(3), 285–297. <https://doi.org/10.1002/rra.778>
10. Belletti, B., Rinaldi, M., Buijse, A. D., Gurnell, A. M., & Mosselman, E. (2015). A review of assessment methods for river hydromorphology. *Environmental Earth Sciences*, 73(5), 2079–2100. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3558-1>
11. Benac, Č., Rubinić, J., & Radišić, M. (2017). Geomorfološka evolucija riječnih dolina i ušća na istarskom poluotoku. *Hrvatske vode*, 25(100), 71–80.
12. Bertalan, L., Novák, T., Németh, Z., Rodrigo-Comino, J., Kertész, Á., & Szabó, S. (2018). Issues of Meander Development: Land Degradation or Ecological Value? The Example of the Sajó River, Hungary. *Water*, 10(11), 1613. <https://doi.org/10.3390/w10111613>
13. Bertalan, L., Rodrigo-Comino, J., Surian, N., Šulc Michalková, M., Kovács, Z., Szabó, S., Szabó, G., & Hooke, J. (2019). Detailed assessment of spatial and temporal

variations in river channel changes and meander evolution as a preliminary work for effective floodplain management. The example of Sajó River, Hungary. *Journal of Environmental Management*, 248, 109277.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109277>

14. Bertoldi, W., Gurnell, A. M., & Drake, N. A. (2011). The topographic signature of vegetation development along a braided river: Results of a combined analysis of airborne lidar, color air photographs, and ground measurements. *Water Resources Research*, 47(6), W06525. <https://doi.org/10.1029/2010WR010319>
15. Bertoldi, W., Gurnell, A., Surian, N., Tockner, K., Zanoni, L., Ziliani, L., & Zolezzi, G. (2009). Understanding reference processes: Linkages between river flows, sediment dynamics and vegetated landforms along the Tagliamento River, Italy. *River Research and Applications*, 25(5), 501–516. <https://doi.org/10.1002/rra.1233>
16. Bertoldi, W., Welber, M., Gurnell, A. M., Mao, L., Comiti, F., & Tal, M. (2015). Physical modelling of the combined effect of vegetation and wood on river morphology. *Geomorphology*, 246, 178–187.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.038>
17. Blaschke, T., Hay, G. J., Kelly, M., Lang, S., Hofmann, P., Addink, E., Queiroz Feitosa, R., van der Meer, F., van der Werff, H., van Coillie, F., & Tiede, D. (2014). Geographic Object-Based Image Analysis – Towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 180–191.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.09.014>
18. Bognar, A. (1999). Geomorfološka regionalizacija Hrvatske. *Acta Geographica Croatica*, 34.(1.), 7–26.
19. Bognar, A. (2008). Geomorfološka obilježja korita rijeke Drave i njenog poloja u širem području naselja Križnica. *Hrvatski geografski glasnik*, 70.(2.), 49–71.  
<https://doi.org/10.21861/hgg.2008.70.02.03>
20. Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J. R., Stevens, M. H. H., & White, J.-S. S. (2009). Generalized linear mixed models: A practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(3), 127–135.  
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.10.008>
21. Bonacci, O., & Andrić, I. (2008). Karst Rivers Hydrology: Case of the Lika and Gacka (Croatia). *Acta Carsologica*, 37(2–3), 185–196. <https://doi.org/10.3986/ac.v37i2.146>
22. Bonacci, O., & Andrić, I. (2010). Impact of an inter-basin water transfer and reservoir operation on a karst open streamflow hydrological regime: An example from the Dinaric karst (Croatia). *Hydrological Processes*, 24(26), 3852–3863.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.7817>
23. Bonacci, O., & Ljubenkov, I. (2008). Changes in flow conveyance and implication for flood protection, Sava River, Zagreb. *Hydrological Processes*, 22(8), 1189–1196.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.6688>
24. Bonacci, O., & Oskoruš, D. (2010). The changes in the lower Drava River water level, discharge and suspended sediment regime. *Environmental Earth Sciences*, 59(8), 1661–1670. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0148-8>
25. Bonacci, O., & Roje-Bonacci, T. (2003). The influence of hydroelectrical development on the flow regime of the karstic river Cetina. *Hydrological Processes*, 17(1), 1–15. <https://doi.org/10.1002/hyp.1190>



26. Boothroyd, R. J., Nones, M., & Guerrero, M. (2021). Deriving Planform Morphology and Vegetation Coverage From Remote Sensing to Support River Management Applications. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 657354. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.657354>
27. Brierley, G., Fryirs, K., Reid, H., & Williams, R. (2021). The dark art of interpretation in geomorphology. *Geomorphology*, 390, 107870. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107870>
28. Brierley, G. J., & Fryirs, K. A. (2005). *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework* (1st edition). Wiley-Blackwell.
29. Brooks, A. P., & Brierley, G. J. (1997). Geomorphic responses of lower Bega River to catchment disturbance, 1851–1926. *Geomorphology*, 18(3), 291–304. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(96\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(96)00033-5)
30. Brunsden, D., & Thornes, J. B. (1979). Landscape Sensitivity and Change. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 4(4), 463–484. <https://doi.org/10.2307/622210>
31. Buffagni, A., TENCHINI, R., CAZZOLA, M., ERBA, S., BALESTRINI, R., BELFIORE, C., & PAGNOTTA, R. (2016). Detecting the impact of bank and channel modification on invertebrate communities in Mediterranean temporary streams (Sardinia, SW Italy). *Science of The Total Environment*, 565, 1138–1150. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.154>
32. Buffin-Bélanger, T., Biron, P. M., Larocque, M., Demers, S., Olsen, T., Choné, G., Ouellet, M.-A., Cloutier, C.-A., Desjarlais, C., & Eyquem, J. (2015). Freedom space for rivers: An economically viable river management concept in a changing climate. *Geomorphology*, 251, 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.013>
33. Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (Eds.). (2004). *Model Selection and Multimodel Inference*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b97636>
34. Burt, J. E., Barber, G. M., & Rigby, D. L. (2009). *Elementary Statistics for Geographers* (Third edition). The Guilford Press.
35. Čanjevac, I. (2012). Novije promjene protočnih režima u hrvatskom dijelu porječja Dunava. *Hrvatski geografski glasnik*, 74.(1.), 61–74. <https://doi.org/10.21861/HGG.2012.74.01.04>
36. Čanjevac, I. (2013). Typology of Discharge Regimes of Rivers in Croatia. *Hrvatski geografski glasnik*, 75.(1.), 23–42. <https://doi.org/10.21861/HGG.2013.75.01.02>
37. Čanjevac, I., & Orešić, D. (2015). Contemporary changes of mean annual and seasonal river discharges in Croatia. *Hrvatski Geografski Glasnik*, 77(1), 7–27. <https://doi.org/10.21861/HGG.2015.77.01.01>
38. Čanjevac, I., & Orešić, D. (2018). Changes in discharge regimes of rivers in Croatia. *Acta Geographica Slovenica*, 58(2), 7–18. <https://doi.org/10.3986/AGS.2004>
39. Čanjevac, I., Pavlek, K., & Orešić, D. (2022). River lengths in Croatia determined from a topographic map at a scale of 1:25,000. *Hrvatski Geografski Glasnik* 84, 5–30. <https://doi.org/10.21861/HGG.2022.84.01.01>
40. Carbonneau, P. E., Dugdale, S. J., Breckon, T. P., Dietrich, J. T., Fonstad, M. A., Miyamoto, H., & Woodget, A. S. (2020). Adopting deep learning methods for

- airborne RGB fluvial scene classification. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112107. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112107>
41. Carbonneau, P. E., Lane, S. N., & Bergeron, N. E. (2004). Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery. *Water Resources Research*, 40(7), 2003WR002759. <https://doi.org/10.1029/2003WR002759>
  42. Casado, M. R., Gonzalez, R. B., Kriechbaumer, T., & Veal, A. (2015). Automated Identification of River Hydromorphological Features Using UAV High Resolution Aerial Imagery. *Sensors*, 15(11), 27969–27989. <https://doi.org/10.3390/s151127969>
  43. Charlton, R. (2007). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203371084>
  44. Corenblit, D., Steiger, J., Gurnell, A. M., Tabacchi, E., & Roques, L. (2009). Control of sediment dynamics by vegetation as a key function driving biogeomorphic succession within fluvial corridors. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(13), 1790–1810. <https://doi.org/10.1002/esp.1876>
  45. Corenblit, D., Tabacchi, E., Steiger, J., & Gurnell, A. M. (2007). Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. *Earth-Science Reviews*, 84(1–2), 56–86. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.05.004>
  46. Cutler, D. R., Edwards Jr., T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J., & Lawler, J. J. (2007). Random Forests for Classification in Ecology. *Ecology*, 88(11), 2783–2792. <https://doi.org/10.1890/07-0539.1>
  47. Da Cunha, E. R., Santos, C. A. G., Da Silva, R. M., Bacani, V. M., Teodoro, P. E., Panachuki, E., & De Souza Oliveira, N. (2020). Mapping LULC types in the Cerrado-Atlantic Forest ecotone region using a Landsat time series and object-based image approach: A case study of the Prata River Basin, Mato Grosso do Sul, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 136. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8093-9>
  48. Demarchi, L., Bizzi, S., & Piégay, H. (2016). Hierarchical Object-Based Mapping of Riverscape Units and in-Stream Mesohabitats Using LiDAR and VHR Imagery. *Remote Sensing*, 8(2), 927. <https://doi.org/10.3390/rs8020097>
  49. Deur, M., Gašparović, M., & Balenović, I. (2021). A Review of Satellite Missions and Forest Cover Classification Methods Using High Resolution Satellite Imagery. *Geodetski list*, 75 (98)(2), 3926.
  50. Dominguez Ruben, L., Naito, K., Gutierrez, R. R., Szupiany, R., & Abad, J. D. (2021). Meander Statistics Toolbox (MStaT): A toolbox for geometry characterization of bends in large meandering channels. *SoftwareX*, 14, 100674. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100674>
  51. Downs, P. W., Dusterhoff, S. R., & Sears, W. A. (2013). Reach-scale channel sensitivity to multiple human activities and natural events: Lower Santa Clara River, California, USA. *Geomorphology*, 189, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.01.023>
  52. Downs, P. W., & Gregory, K. J. (1995). Approaches to River Channel Sensitivity. *The Professional Geographer*, 47(2), 168–175. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1995.00168.x>

53. Downs, P. W., & Piégay, H. (2019). Catchment-scale cumulative impact of human activities on river channels in the late Anthropocene: Implications, limitations, prospect. *Geomorphology*, 338, 88–104. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.021>
54. Eloise, A., & Sabater, S. (2013). Effects of hydromorphological impacts on river ecosystem functioning: A review and suggestions for assessing ecological impacts. *Hydrobiologia*, 712(1), 129–143. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1226-6>
55. EN 14614:2004: A Guidance Standard for Assessing the Hydromorphological Features of Rivers, Technical Committee CEN/TC 230 “Water analysis”, Bruxelles.
56. EN 15843:2010: Water quality — Guidance standard on determining the degree of modification of river hydromorphology, Technical Committee CEN/TC 230 “Water analysis”, Bruxelles.
57. Europska komisija (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. *Official Journal L* 327, 22/12/2000, Brussels.
58. Europska komisija (2019). *Guidance Document No. 37: Steps for defining and assessing ecological potential for improving comparability of heavily modified water bodies*. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). <https://circabc.europa.eu/sd/a/d1d6c347-b528-4819-aa10-6819e6b80876/Guidance%20No%2037%20-%20Steps%20for%20defining%20and%20assessing%20ecological%20potential%20for%20improving%20comparability%20of%20Heavily%20Modified%20Water%20Bodies.pdf>
59. Filipčić, A. (1998). Klimatska regionalizacija Hrvatske po W. Köppenu za standardno razdoblje 1961. – 1990. U odnosu na razdoblje 1931. – 1960. *Acta Geographica Croatica*, 33(1), 7–14.
60. Filipčić, A., Orešić, D., & Maradin, M. (2013). Promjene količine padalina u Hrvatskoj od sredine 20. Stoljeća do danas. *Geoadria*, 18(1), 29–39. <https://doi.org/10.15291/geoadria.145>
61. Frančišković-Bilinski, S., Bhattacharya, A. K., Bilinski, H., Bhattacharya, B. D., Mitra, A., & Sarkar, S. K. (2012). Fluvial geomorphology of the Kupa River drainage basin, Croatia: A perspective of its application in river management and pollution studies. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 56(1), 93–119. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2011/0056>
62. Fryirs, K. A. (2017). River sensitivity: A lost foundation concept in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 55–70. <https://doi.org/10.1002/esp.3940>
63. Fryirs, K. A., & Brierley, G. J. (2013). *Geomorphic Analysis of River Systems: An Approach to Reading the Landscape* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118305454>
64. Fryirs, K. A., & Brierley, G. J. (2016). Assessing the geomorphic recovery potential of rivers: Forecasting future trajectories of adjustment for use in management. *WIREs Water*, 3(5), 727–748. <https://doi.org/10.1002/wat2.1158>
65. Galia, T., Horáček, M., Ruiz-Villanueva, V., Poledníková, Z., & Škarpich, V. (2023). Large wood retention in a large meandering river: Insights from a 5-year monitoring

- in the Odra River (Czechia). *CATENA*, 224, 106973.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106973>
66. García-Martínez, B., & Rinaldi, M. (2022). Changes in meander geometry over the last 250 years along the lower Guadalquivir River (southern Spain) in response to hydrological and human factors. *Geomorphology*, 410, 108284.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108284>
  67. García-Ruiz, J. M., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., & Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, 198, 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023>
  68. Garófano-Gómez, V., Metz, M., Egger, G., Díaz-Redondo, M., Hortobágyi, B., Geerling, G., Corenblit, D., & Steiger, J. (2017). Vegetation succession processes and fluvial dynamics of a mobile temperate riparian ecosystem: The lower Allier River (France). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 23(3), 187–202.  
<https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11805>
  69. Gašparović, M., & Dobrinić, D. (2020). Comparative Assessment of Machine Learning Methods for Urban Vegetation Mapping Using Multitemporal Sentinel-1 Imagery. *Remote Sensing*, 12(12), 1952. <https://doi.org/10.3390/rs12121952>
  70. Godfroy, J., Lejot, J., Demarchi, L., Bizzi, S., Michel, K., & Piégay, H. (2022). Combining Hyperspectral, LiDAR, and Forestry Data to Characterize Riparian Forests along Age and Hydrological Gradients. *Remote Sensing*, 15(1), 17.  
<https://doi.org/10.3390/rs15010017>
  71. Gomes, M., Ralph, T. J., & Humphries, M. S. (2023). Contemporary channel adjustment and geomorphic sensitivity of the lower Mara River and its floodplain wetlands, Tanzania. *Geomorphology*, 425, 108583.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108583>
  72. Gong, J., Yue, Y., Zhu, J., Wen, Y., Li, Y., Zhou, J., Wang, D., & Yu, C. (2012). Impacts of the Wenchuan Earthquake on the Chaping River upstream channel change. *International Journal of Remote Sensing*, 33(12), 3907–3929.  
<https://doi.org/10.1080/01431161.2011.636767>
  73. Grabowski, R. C., Surian, N., & Gurnell, A. M. (2014). Characterizing geomorphological change to support sustainable river restoration and management. *WIREs Water*, 1(5), 483–512. <https://doi.org/10.1002/wat2.1037>
  74. Graf, W., Leitner, P., Hanetseder, I., Ittner, L. D., Dossi, F., & Hauer, C. (2016). Ecological degradation of a meandering river by local channelization effects: A case study in an Austrian lowland river. *Hydrobiologia*, 772(1), 145–160.  
<https://doi.org/10.1007/s10750-016-2653-6>
  75. Granger, J. E., Mahdianpari, M., Puestow, T., Warren, S., Mohammadimanesh, F., Salehi, B., & Brisco, B. (2021). Object-based random forest wetland mapping in Conne River, Newfoundland, Canada. *Journal of Applied Remote Sensing*, 15(03), 038506. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.15.038506>
  76. Grecu, F., Ioana-Toroimac, G., Osaci-Costache, G., Zaharia, L., Cocos, O., Hachemi, K., & Sălăjan, L. (2022). Dynamics of Islands and Danube River Channel Along Vedea-Călărași Sector (1856–2019): Hydrogeomorphological Approach. In A. Negm, L. Zaharia, & G. Ioana-Toroimac (Eds.), *The Lower Danube River: Hydro-*

*Environmental Issues and Sustainability* (pp. 43–67). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-03865-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-03865-5_2)

77. Gregory, K. J. (2006). The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 79(3), 172–191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.018>
78. Gurnell, A. (2014). Plants as river system engineers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(1), 4–25. <https://doi.org/10.1002/esp.3397>
79. Gurnell, A. M., Rinaldi, M., Belletti, B., Bizzi, S., Blamauer, B., Braca, G., Buijse, A. D., Bussetini, M., Camenen, B., ... Ziliani, L. (2016). A multi-scale hierarchical framework for developing understanding of river behaviour to support river management. *Aquatic Sciences*, 78(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0424-5>
80. Hajdukiewicz, H., & Wyzga, B. (2019). Aerial photo-based analysis of the hydromorphological changes of a mountain river over the last six decades: The Czarny Dunajec, Polish Carpathians. *Science of The Total Environment*, 648, 1598–1613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.234>
81. Harezlak, V., Geerling, G. W., Rogers, C. K., Penning, W. E., Augustijn, D. C. M., & Hulscher, S. J. M. H. (2020). Revealing 35 years of landcover dynamics in floodplains of trained lowland rivers using satellite data. *River Research and Applications*, 36(7), 1213–1221. <https://doi.org/10.1002/rra.3633>
82. Harvey, J., & Gooseff, M. (2015). River corridor science: Hydrologic exchange and ecological consequences from bedforms to basins: RIVER CORRIDORS FROM BEDFORMS TO BASINS. *Water Resources Research*, 51(9), 6893–6922. <https://doi.org/10.1002/2015WR017617>
83. Hemmelder, S., Marra, W., Markies, H., & De Jong, S. M. (2018). Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery – A case study of the river Buëch, Hautes-Alpes, France. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 428–437. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.016>
84. Hickin, E. J., & Nanson, G. C. (1975). The Character of Channel Migration on the Beaton River, Northeast British Columbia, Canada. *GSA Bulletin*, 86(4), 487–494. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86<487:TCOCMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86<487:TCOCMO>2.0.CO;2)
85. Hohensinner, S., Egger, G., Muhar, S., Vaudor, L., & Piégay, H. (2021). What remains today of pre-industrial Alpine rivers? Census of historical and current channel patterns in the Alps. *River Research and Applications*, 37(2), 128–149. <https://doi.org/10.1002/rra.3751>
86. Hohensinner, S., Habersack, H., Jungwirth, M., & Zauner, G. (2004). Reconstruction of the characteristics of a natural alluvial river–floodplain system and hydromorphological changes following human modifications: The Danube River (1812–1991). *River Research and Applications*, 20(1), 25–41. <https://doi.org/10.1002/rra.719>
87. Hohensinner, S., Hauer, C., & Muhar, S. (2018). River Morphology, Channelization, and Habitat Restoration. In S. Schmutz & J. Sendzimir (Eds.), *Riverine Ecosystem Management* (pp. 41–65). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_3)

88. Hooke, J. (2003). River meander behaviour and instability: A framework for analysis. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 28(2), 238–253. <https://doi.org/10.1111/1475-5661.00089>
89. Hooke, J. (2023). Morphodynamics of active meandering rivers reviewed in a hierarchy of spatial and temporal scales. *Geomorphology*, 439, 108825. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108825>
90. Hooke, J. M. (1984). Changes in river meanders: A review of techniques and results of analyses. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 8(4), 473–508. <https://doi.org/10.1177/030913338400800401>
91. Hooke, J. M. (2006). Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology*, 79(3), 311–335. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.036>
92. Hooke, J. M. (2022). Morphodynamics of a meandering channel over decadal timescales in response to hydrological variations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(8), 1902–1920. <https://doi.org/10.1002/esp.5354>
93. Hooke, J. M., & Yorke, L. (2010). Rates, distributions and mechanisms of change in meander morphology over decadal timescales, River Dane, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(13), 1601–1614. <https://doi.org/10.1002/esp.2079>
94. Houphlet, S. D. K., Dusseux, P., Adiko, A. E. G., Konan-Waidhet, A. B., Munoz, F., Bigot, S., & Adou Yao, C. Y. (2023). Object-based characterization of vegetation heterogeneity with sentinel images proves efficient in a highly human-influenced National Park of Côte d'Ivoire. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 200. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10792-4>
95. Hurlbert, S. H. (1984). Pseudoreplication and the Design of Ecological Field Experiments. *Ecological Monographs*, 54(2), 187–211. <https://doi.org/10.2307/1942661>
96. Ioana-Toroimac, G. (2016). Inventory of Long-Term Braiding Activity at a Regional Scale as a Tool for Detecting Alterations to a Rivers' Hydromorphological State: A Case Study for Romania's South-Eastern Subcarpathians. *Environmental Management*, 58(1), 93–106. <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0701-7>
97. James, M. R., Chandler, J. H., Eltner, A., Fraser, C., Miller, P. E., Mills, J. P., ... & Lane, S. N. (2019). Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(10), 2081–2084.
98. Jia, M., Mao, D., Wang, Z., Ren, C., Zhu, Q., Li, X., & Zhang, Y. (2020). Tracking long-term floodplain wetland changes: A case study in the China side of the Amur River Basin. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102185. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102185>
99. Jiang, J., & Nguyen, T. (2021). *Linear and generalized linear mixed models and their applications* (Second edition). Springer.
100. Jogun, T., Lukić, A., & Gašparović, M. (2019). Simulacijski model promjena zemljišnog pokrova u postsocijalističkom perifernom ruralnom području: Požeško-slavonska županija, Hrvatska. *Hrvatski Geografski Glasnik*, 81(1), 31–59. <https://doi.org/10.21861/HGG.2019.81.01.02>
101. Keesstra, S. D. (2007). Impact of natural reforestation on floodplain sedimentation in the Dragonja basin, SW Slovenia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(1), 49–65. <https://doi.org/10.1002/esp.1360>



102. Keesstra, S. D., Bruijnzeel, L. A., & van Huissteden, J. (2009). Meso-scale catchment sediment budgets: Combining field surveys and modeling in the Dragonja catchment, southwest Slovenia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(11), 1547–1561. <https://doi.org/10.1002/esp.1846>
103. Keesstra, S. D., van Huissteden, J., Vandenbergh, J., Van Dam, O., de Gier, J., & Pleizier, I. D. (2005). Evolution of the morphology of the river Dragonja (SW Slovenia) due to land-use changes. *Geomorphology*, 69(1), 191–207. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.01.004>
104. Khan, S., & Fryirs, K. (2020). An approach for assessing geomorphic river sensitivity across a catchment based on analysis of historical capacity for adjustment. *Geomorphology*, 359, 107135. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107135>
105. Kidová, A., Radecki-Pawlik, A., Rusnák, M., & Plesiński, K. (2021). Hydromorphological evaluation of the river training impact on a multi-thread river system (Belá River, Carpathians, Slovakia). *Scientific Reports*, 11(1), 6289. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85805-2>
106. Kiss, T., Amisshah, G. J., & Fiala, K. (2019). Bank Processes and Revetment Erosion of a Large Lowland River: Case Study of the Lower Tisza River, Hungary. *Water*, 11(6), 1313. <https://doi.org/10.3390/w11061313>
107. Kiss, T., & András, G. (2017). Hydro-morphological Responses of the Dráva River on various Engineering Works. *Ekonomika i Ekohistorija : Časopis Za Gospodarsku Povijest i Povijest Okoliša*, 13(1), 14–24.
108. Kiss, T., András, G., & Hernesz, P. (2011). Morphological alteration of the Dráva as the result of human impact. *Landscape & Environment*, 5(2), 58–75.
109. Kiss, T., & Blanka, V. (2012). River channel response to climate- and human-induced hydrological changes: Case study on the meandering Hernád River, Hungary. *Geomorphology*, 175–176, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.003>
110. Kiss, T., Blanka, V., András, G., & Hernesz, P. (2013). Extreme Weather and the Rivers of Hungary: Rates of Bank Retreat. In D. Loczy (Ed.), *Geomorphological impacts of extreme weather: Case studies from central and eastern Europe* (pp. 83–98). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6301-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6301-2_6)
111. Kiss, T., Fiala, K., & Sipos, G. (2008). Alterations of channel parameters in response to river regulation works since 1840 on the Lower Tisza River (Hungary). *Geomorphology*, 98(1), 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.027>
112. Kiss, T., Nagy, J., Fehérvári, I., Amisshah, G. J., Fiala, K., & Sipos, G. (2021). Increased flood height driven by local factors on a regulated river with a confined floodplain, Lower Tisza, Hungary. *Geomorphology*, 389, 107858. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107858>
113. Kondolf, G. M., & Piégay, H. (2016). Tools in fluvial geomorphology: Problem statement and recent practice. In *Tools in Fluvial Geomorphology* (pp. 1–12). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118648551.ch1>
114. Krpan, T. (1995). Čudesna dolina - Pooravljen kroz prostor i vrijeme u riječi i slici. Privlačica, Vinkovci.
115. Krzeminska, D., Kerkhof, T., Skaalsveen, K., & Stolte, J. (2019). Effect of riparian vegetation on stream bank stability in small agricultural catchments. *CATENA*, 172, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.014>

116. Kui, L., Stella, J. C., Shafroth, P. B., House, P. K., & Wilcox, A. C. (2017). The long-term legacy of geomorphic and riparian vegetation feedbacks on the dammed Bill Williams River, Arizona, USA. *Ecohydrology*, 10(4), e1839. <https://doi.org/10.1002/eco.1839>
117. Kutz, K., Cook, Z., & Linderman, M. (2022). Object based classification of a riparian environment using ultra-high resolution imagery, hierarchical landcover structures, and image texture. *Scientific Reports*, 12(1), 11291. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14757-y>
118. Lane, S. N. (2017). Natural flood management. *WIREs Water*, 4(3), e1211. <https://doi.org/10.1002/wat2.1211>
119. Leopold, L. B., & Maddock, T. (1953). *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. U.S. Government Printing Office.
120. Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P., 1964. *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman and Co., San Francisco, CA. 522 pp.
121. Liébault, F., Clément, P., Piégay, H., Rogers, C. F., Kondolf, G. M., & Landon, N. (2002). Contemporary channel changes in the Eygues basin, southern French Prealps: The relationship of subbasin variability to watershed characteristics. *Geomorphology*, 45(1–2), 53–66. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00189-1)
122. Liébault, F., & Piégay, H. (2002). Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(4), 425–444. <https://doi.org/10.1002/esp.328>
123. Lindsey, J. K., & Lambert, P. (1995). Dynamic generalized linear models and repeated measurements. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 47(1), 129–139. [https://doi.org/10.1016/0378-3758\(94\)00126-G](https://doi.org/10.1016/0378-3758(94)00126-G)
124. Liro, M. (2017). Dam-induced base-level rise effects on the gravel-bed channel planform. *CATENA*, 153, 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.005>
125. Luoto, M., & Hjort, J. (2006). Scale matters—A multi-resolution study of the determinants of patterned ground activity in subarctic Finland. *Geomorphology*, 80(3–4), 282–294. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.03.001>
126. Luterbacher, J., García-Herrera, R., Akcer-On, S., Allan, R., Alvarez-Castro, M.-C., Benito, G., Booth, J., Büntgen, U., Cagatay, N., Colombaroli, D., Davis, B., Esper, J., Felis, T., Fleitmann, D., Frank, D., Gallego, D., Garcia-Bustamante, E., Glaser, R., Gonzalez-Rouco, F. J., ... Zorita, E. (2012). 2—A Review of 2000 Years of Paleoclimatic Evidence in the Mediterranean. In P. Lionello (Ed.), *The Climate of the Mediterranean Region* (pp. 87–185). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416042-2.00002-1>
127. Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., & Kjeldsen, T. R. (2014). Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519, 3634–3650. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>
128. Magdaleno, F., & Fernández-Yuste, J. A. (2011). Meander dynamics in a changing river corridor. *Geomorphology*, 130(3–4), 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.016>
129. Marshall, A., Wohl, E., Iskin, E., & Zeller, L. (2024). Interactions of Logjams, Channel Dynamics, and Geomorphic Heterogeneity Within a River Corridor. *Water*

*Resources Research*, 60(6), e2023WR036512.  
<https://doi.org/10.1029/2023WR036512>

130. Martínez-Fernández, V., González del Tánago, M., Maroto, J., & García de Jalón, D. (2017). Fluvial Corridor Changes Over Time in Regulated and Non-Regulated Rivers (Upper Esla River, NW Spain). *River Research and Applications*, 33(2), 214–223. <https://doi.org/10.1002/rra.3032>
131. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
132. McMahon, J. M., Olley, J. M., Brooks, A. P., Smart, J. C. R., Stewart-Koster, B., Venables, W. N., Curwen, G., Kemp, J., Stewart, M., Saxton, N., Haddadchi, A., & Stout, J. C. (2020). Vegetation and longitudinal coarse sediment connectivity affect the ability of ecosystem restoration to reduce riverbank erosion and turbidity in drinking water. *Science of The Total Environment*, 707, 135904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135904>
133. Micheli, E. R., Kirchner, J. W., & Larsen, E. W. (2004). Quantifying the effect of riparian forest versus agricultural vegetation on river meander migration rates, central Sacramento River, California, USA. *River Research and Applications*, 20(5), 537–548. <https://doi.org/10.1002/rra.756>
134. Miletić, M., Matijašević, N., Zidar, M., Marić, L., Tumara, D. (2021). Elaborat zaštite okoliša u postupku ocjene o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš. Zahvat mala hidroelektrana orljava 7 snage do 250 kW, na rijeci Orljavi, Grad Pleternica, Požeško-slavonska županija. Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb.
135. Modica, G., De Luca, G., Messina, G., & Praticò, S. (2021). Comparison and assessment of different object-based classifications using machine learning algorithms and UAVs multispectral imagery: A case study in a citrus orchard and an onion crop. *European Journal of Remote Sensing*, 54(1), 431–460. <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.1951623>
136. Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>
137. Muhar, S., Sendzimir, J., Jungwirth, M., & Hohensinner, S. (2018). Restoration in Integrated River Basin Management. In S. Schmutz & J. Sendzimir (Eds.), *Riverine Ecosystem Management* (pp. 273–299). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_15)
138. Nguyen, U., Glenn, E. P., Dang, T. D., & Pham, L. T. H. (2019). Mapping vegetation types in semi-arid riparian regions using random forest and object-based image approach: A case study of the Colorado River Ecosystem, Grand Canyon, Arizona. *Ecological Informatics*, 50, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2018.12.006>
139. Nicoll, T. J., & Hickin, E. J. (2010). Planform geometry and channel migration of confined meandering rivers on the Canadian prairies. *Geomorphology*, 116(1–2), 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.10.005>
140. Ondruch, J., & Máčka, Z. (2015). Response of lateral channel dynamics of a lowland meanderingriver to engineering-derived adjustments—An example of theMorava

- River (Czech Republic). *Open Geosciences*, 7(1), 588–605.  
<https://doi.org/10.1515/geo-2015-0047>
141. Orešić, D., Čanjevac, I., & Maradin, M. (2017). Changes in discharge regimes in the middle course of the Sava River in the 1931-2010 period. *Prace Geograficzne*, 151, 93–113.
  142. Parish Geomorphic (2004). *Belt Width Delienation Procedures*. Toronto and Region Conservation Authority, Ontario.
  143. Pavelić, D., & Kovačić, M. (2018). Sedimentology and stratigraphy of the Neogene rift-type North Croatian Basin (Pannonian Basin System, Croatia): A review. *Marine and Petroleum Geology*, 91, 455–469.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.01.026>
  144. Pavlek, K., & Faivre, S. (2020). Geomorphological changes of the Cetina River channels since the end of the nineteenth century, natural vs anthropogenic impacts (the Dinarides, Croatia). *Environmental Earth Sciences*, 79(20), 482.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-020-09213-x>
  145. Pavlek, K., Kulej, T., & Bočić, N. (2022). Promjene u duljini i obliku korita Drave od Repaša do Ferdinandovca od kraja 18. Stoljeća do danas. *Podravina : časopis za geografska i povijesna multidisciplinarna istraživanja*, 21(42), 27–41.
  146. Pavlek, K., Plantak, M., Martinić, I., Vinković, K., Vučković, I., & Čanjevac, I. (2023). Methodological Framework for Assessing Hydromorphological Conditions of Heavily Modified and Artificial River Water Bodies in Croatia. *Water*, 15(6), 482.  
<https://doi.org/10.3390/w15061113>
  147. Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510.  
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
  148. Piégay, H., Arnaud, F., Belletti, B., Bertrand, M., Bizzi, S., Carbonneau, P., Dufour, S., Liébault, F., Ruiz-Villanueva, V., & Slater, L. (2020). Remotely sensed rivers in the Anthropocene: State of the art and prospects. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(1), 1573–188. <https://doi.org/10.1002/esp.4787>
  149. Piégay, H., Darby, S. E., Mosselman, E., & Surian, N. (2005). A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: A sustainable approach to managing bank erosion. *River Research and Applications*, 21(7), 773–789.  
<https://doi.org/10.1002/rra.881>
  150. Plantak, M., Čanjevac, I., & Vidaković, I. (2016). Morfološko stanje tekućica u poriječju Ilove. *Hrvatski geografski glasnik*, 78(1), 5–24.  
<https://doi.org/10.21861/HGG.2016.78.01.01>
  151. Pletikapić, Z., Čargonja-Reicher, K., Kereković, A., Plantak, M., Srebočan, M., Međan, D., Rimac, A., Goja, L. (2017). *Postojeće stanje na slivu Orljave*. Studijska dokumentacija za pripremu projekata zaštite od poplava na slivu Orljave. (Vol. 1, pp. 315). Hrvatske vode, Zagreb.
  152. Poepl, R. E., Fryirs, K. A., Tunncliffe, J., & Brierley, G. J. (2020). Managing sediment (dis)connectivity in fluvial systems. *Science of The Total Environment*, 736, 139627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139627>

153. Poepl, R. E., Keesstra, S. D., & Hein, T. (2015). The geomorphic legacy of small dams—An Austrian study. *Anthropocene*, 10, 43–55.  
<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2015.09.003>
154. Poepl, R. E., Keesstra, S. D., & Maroulis, J. (2017). A conceptual connectivity framework for understanding geomorphic change in human-impacted fluvial systems. *Geomorphology*, 277, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.033>
155. Poepl, R. E., Keiler, M., Von Elverfeldt, K., Zweimueller, I., & Glade, T. (2012). The influence of riparian vegetation cover on diffuse lateral sediment connectivity and biogeomorphic processes in a medium-sized agricultural catchment, Austria. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94(4), 511–529.  
<https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2012.00476.x>
156. Pollen-Bankhead, N., Simon, A., Jaeger, K., & Wohl, E. (2009). Destabilization of streambanks by removal of invasive species in Canyon de Chelly National Monument, Arizona. *Geomorphology*, 103(3), 363–374.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.07.004>
157. Potrebica, H. (2012). The Požega Valley – European Cultural Centre (Archaeological Perspective). *Radovi Zavoda za znanstveni i umjetnički rad u Požegi*, 1., 187–208.
158. Poulos, S. E., & Collins, M. B. (2002). Fluvial sediment fluxes to the Mediterranean Sea: A quantitative approach and the influence of dams. *Geological Society, London, Special Publications*, 191(1), 227–245.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.191.01.16>
159. Provansal, M., Dufour, S., Sabatier, F., Anthony, E. J., Raccasi, G., & Robresco, S. (2014). The geomorphic evolution and sediment balance of the lower Rhône River (southern France) over the last 130 years: Hydropower dams versus other control factors. *Geomorphology*, 219, 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.033>
160. Rabanaque, M. P., Martínez-Fernández, V., Calle, M., & Benito, G. (2022). Basin-wide hydromorphological analysis of ephemeral streams using machine learning algorithms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(1), 328–344.  
<https://doi.org/10.1002/esp.5250>
161. Räßle, B., Piégay, H., Stella, J. C., & Mercier, D. (2017). What drives riparian vegetation encroachment in braided river channels at patch to reach scales? Insights from annual airborne surveys (Drôme River, SE France, 2005–2011). *Ecohydrology*, 10(8), e1886. <https://doi.org/10.1002/eco.1886>
162. Raven, P. J., Holmes, N. T. H., Dawson, F. H., & Everard, M. (1998). Quality assessment using River Habitat Survey data. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 8(4), 477–499. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0755\(199807/08\)8:4<477::AID-AQC299>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0755(199807/08)8:4<477::AID-AQC299>3.0.CO;2-K)
163. Reid, H. E., & Brierley, G. J. (2015). Assessing geomorphic sensitivity in relation to river capacity for adjustment. *Geomorphology*, 251, 108–121.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.009>
164. Richard, G. A., Julien, P. Y., & Baird, D. C. (2005). Statistical analysis of lateral migration of the Rio Grande, New Mexico. *Geomorphology*, 71(1–2), 139–155.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.07.013>
165. Riđanović, J. (1993). *Hidrogeografija*. Školska knjiga, Zagreb.

166. Rinaldi, M., Gurnell, A. M., del Tánago, M. G., Bussettini, M., & Hendriks, D. (2016). Classification of river morphology and hydrology to support management and restoration. *Aquatic Sciences*, 78(1), 17–33. <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0438-z>
167. Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., & Bussettini, M. (2013). A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI). *Geomorphology*, 180–181, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.009>
168. Rood, S. B., Bigelow, S. G., Polzin, M. L., Gill, K. M., & Coburn, C. A. (2015). Biological bank protection: Trees are more effective than grasses at resisting erosion from major river floods. *Ecohydrology*, 8(5), 772–779. <https://doi.org/10.1002/eco.1544>
169. Roux, C., Alber, A., Bertrand, M., Vaudor, L., & Piégay, H. (2015). “FluvialCorridor”: A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology*, 242, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.018>
170. Rusnák, M., & Lehotský, M. (2014). Time-focused investigation of river channel morphological changes due to extreme floods. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 58(2), 251–266. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/0124>
171. Rusnák, M., Lehotský, M., & Kidová, A. (2016). Channel migration inferred from aerial photographs, its timing and environmental consequences as responses to floods: A case study of the meandering Topľa River, Slovak Carpathians. *Moravian Geographical Reports*, 24(3), 32–43. <https://doi.org/10.1515/mgr-2016-0015>
172. Rusnák, M., Sládek, J., Kidová, A., & Lehotský, M. (2018). Template for high-resolution river landscape mapping using UAV technology. *Measurement*, 115, 139–151. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.023>
173. Rusnák, M., Sládek, J., Pacina, J., & Kidová, A. (2019). Monitoring of avulsion channel evolution and river morphology changes using UAV photogrammetry: Case study of the gravel bed Ondava River in Outer Western Carpathians. *Area*, 51(3), 549–560. <https://doi.org/10.1111/area.12508>
174. Salas, C. R., & Rhoads, B. L. (2022). Big Pine Creek Ditch revisited: Planform recovery to channelization and the timescale of river meandering. *Geomorphology*, 403, 108140. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108140>
175. Schneider, C., Laizé, C. L. R., Acreman, M. C., & Flörke, M. (2013). How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 325–339. <https://doi.org/10.5194/hess-17-325-2013>
176. Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
177. Schumm, S.A. (1997). *The Fluvial System*. John Wiley & Sons, New York.
178. Schwenk, J., Khandelwal, A., Fratkin, M., Kumar, V., & Foufoula-Georgiou, E. (2017). High spatiotemporal resolution of river planform dynamics from Landsat: The RivMAP toolbox and results from the Ucayali River: Annual Planform Morphodynamics, Ucayali. *Earth and Space Science*, 4(2), 46–75. <https://doi.org/10.1002/2016EA000196>



179. Scorpio, V., Aucelli, P. P. C., Giano, S. I., Pisano, L., Robustelli, G., Rosskopf, C. M., & Schiattarella, M. (2015). River channel adjustments in Southern Italy over the past 150 years and implications for channel recovery. *Geomorphology*, 251, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.008>
180. Scorpio, V., & Piégay, H. (2021). Is afforestation a driver of change in Italian rivers within the Anthropocene era? *CATENA*, 198, 105031. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105031>
181. Seliger, C., & Zeiringer, B. (2018). River Connectivity, Habitat Fragmentation and Related Restoration Measures. In S. Schmutz & J. Sendzimir (Eds.), *Riverine Ecosystem Management* (pp. 171–186). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_9)
182. Simon, A., Dickerson, W., & Heins, A. (2004). Suspended-sediment transport rates at the 1.5-year recurrence interval for ecoregions of the United States: transport conditions at the bankfull and effective discharge? *Geomorphology* 58, 243–262.
183. Story, M., & Congalton, R. G. (1986). Accuracy assessment: A user's perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(3), 397–399.
184. Surian, N., & Rinaldi, M. (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50(4), 307–326. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00219-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00219-2)
185. Tal, M., & Paola, C. (2010). Effects of vegetation on channel morphodynamics: Results and insights from laboratory experiments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(9), 1014–1028. <https://doi.org/10.1002/esp.1908>
186. Tormos, T., Kosuth, P., Durrieu, S., Dupuy, S., Villeneuve, B., & Wasson, J. G. (2012). Object-based image analysis for operational fine-scale regional mapping of land cover within river corridors from multispectral imagery and thematic data. *International Journal of Remote Sensing*, 33(14), 4603–4633. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.637093>
187. Valozić, L. (2014). Klasifikacija zemljišnog pokrova urbanog i periurbanog prostora pomoću objektno orijentirane analize multispektralnih snimaka. *Hrvatski geografski glasnik*, 76.(2.), 27–38. <https://doi.org/10.21861/HGG.2014.76.02.02>
188. Vidaković Šutić, R., Ričković, V., Lubura Matković, T., Paladin, M., Pranjić, V., Čahun Sabolić, Đ., & Plantak, M. (2017). *Hidrološke—hidrauličke analize*. Studijska dokumentacija za pripremu projekata zaštite od poplava na slivu Orljave. (Vol. 2, pp. 286). Hrvatske vode, Zagreb.
189. Vučković, I., Čanjevac, I., Bočić, N., Buzjak, N., Orešić, D., Plantak, M., Pletikapić, Z., Vidaković, I., Srebočan, M., Martinić, I. i dr. (2018). *Sustavno ispitivanje hidromorfoloških elemenata kakvoće u rijekama u 2016. i 2017. godini*, elaborat, Hrvatske vode.
190. Vučković, I., Čanjevac, I., Bočić, N., Buzjak, N., Orešić, D., Plantak, M., Srebočan, M., Vidaković, I., Martinić, I., Mišetić, S. (2019). *Sustavno ispitivanje hidromorfoloških elemenata kakvoće u rijekama u 2018. godini*, elaborat, Hrvatske vode.
191. Vučković, I., Čanjevac, I., Plantak, M., Bočić, N., Buzjak, N., Orešić, D., Pavlek, K., Vinković, K., Martinić, I., Srebočan, M. i dr. (2021). *Sustavno ispitivanje*

hidromorfoloških elemenata kakvoće u rijekama u 2019. i 2020. godini, elaborat, Hrvatske vode.

192. Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377–392.
193. Wheeler, N., Pingram, M., David, B., Marson, W., Tunnicliffe, J., & Brierley, G. (2022). River adjustments, geomorphic sensitivity and management implications in the Waipā catchment, Aotearoa New Zealand. *Geomorphology*, 410, 108263. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108263>
194. Williams, G. P. (1986). River meanders and channel size. *Journal of Hydrology*, 88(1), 147–164. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90202-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90202-7)
195. Williams, R. D., Bangen, S., Gillies, E., Kramer, N., Moir, H., & Wheaton, J. (2020). Let the river erode! Enabling lateral migration increases geomorphic unit diversity. *Science of The Total Environment*, 715, 136817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136817>
196. Wolman, M. G. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 35(6), 951-956.
197. Woodget, A. S., & Austrums, R. (2017). Subaerial gravel size measurement using topographic data derived from a UAV-SfM approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(9), 1434–1443. <https://doi.org/10.1002/esp.4139>
198. Wyżga, B., Zawiejska, J., Radecki-Pawlik, A., & Hajdukiewicz, H. (2012). Environmental change, hydromorphological reference conditions and the restoration of Polish Carpathian rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(11), 1213–1226. <https://doi.org/10.1002/esp.3273>
199. Young, N. N., Stow, D. A., Swayne, M. R. E., & Nara, A. (2023). Mapping environmentally sustainable urban development within six US cities through object-based image change analysis of aerial orthoimagery. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(4), 469. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11075-2>
200. Zaharia, L., Ioana-Toroimac, G., Moroşanu, G.-A., Gălie, A.-C., Moldoveanu, M., Čanjevac, I., Belleudy, P., Plantak, M., Buzjak, N., Bočić, N., Legout, C., Bigot, S., & Ciobotaru, N. (2018). Review of national methodologies for rivers' hydromorphological assessment: A comparative approach in France, Romania, and Croatia. *Journal of Environmental Management*, 217, 735–746. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.017>
201. Zawiejska, J., & Wyżga, B. (2010). Twentieth-century channel change on the Dunajec River, southern Poland: Patterns, causes and controls. *Geomorphology*, 117(3), 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.01.014>
202. Živaković-Kerže, Z. (2004). Od močvare do oranica: osvrt na povijest preobrazbe okoliša osječkog kraja hidromelioracijom porječja Vuke i isušanjem močvare Palače, *Osječki zbornik* 27, 83–89.
203. Žugaj, R. (2000). *Hidrologija*. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

## Izvori

Agisoft, L. L. C. (2021). Agisoft Metashape professional. Version 1.7 [Computer software]. <https://www.agisoft.com/>

Arcanum maps. (n.d.). The Historical Map Portal. <https://maps.arcanum.com/en/>

DJI (2024). DJI Phantom 4 RTK specs. <https://www.dji.com/hr/phantom-4-rtk/info>

Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV). Dritte Landesaufnahme (1869-1887), Slavonien, 1 : 25 000, list (godina): 5759-3 (1879.), 5759-4 (1879.), 5859-1 (1879.), 5859-2 (1879.), 5859-3 (1879.), 5859-4 (1879.), 5860-1 (1879.), 5860-2 (1879.), 5860-3 (1879.), 5860-4 (1879.), 5959-1 (1882.), 5959-2 (1882.), 5959-4 (1882.), 5960-1 (1882.).

Državna geodetska uprava (DGU) (1966). Aerofotogrametrijske snimke, Slavonija\_1966 (3026, 3027, 3058, 3059, 3150, 3151, 3186, 3187, 3253, 3254, 3292, 3293, 3342, 3343, 3344, 3345, 3346, 3347, 3348, 3349, 3350, 5318, 5319).

Državna geodetska uprava (DGU) (2001). Aerofotogrametrijske snimke (5044, 5046, 5074, 5076).

Državna geodetska uprava (DGU) (2009). Digitalni ortofoto u mjerilu 1:5000, 2009. godina. List Pleternica (5-14-3-108-14, 5-15-3-108-14, 5-19-3-108-14, 5-23-3-108-14, 5-24-3-108-14), list Oriovac (5-02-1-109-14, 5-03-1-109-14).

Državna geodetska uprava (DGU) (2011). Digitalni ortofoto u mjerilu 1:5000, 2011. godina – WMS, <http://geoportal.dgu.hr/services/dof/wms?SERVICE=WMS&REQUEST=GetCapabilities>, (18. 10. 2021.)

Državna geodetska uprava (DGU) (2014). Digitalni ortofoto u mjerilu 1:5000, 2014/16. godina – WMS, [http://geoportal.dgu.hr/services/inspire/orthophoto\\_2014-2016/wms?SERVICE=WMS&REQUEST=GetCapabilities](http://geoportal.dgu.hr/services/inspire/orthophoto_2014-2016/wms?SERVICE=WMS&REQUEST=GetCapabilities), (18. 10. 2021.)

Državna geodetska uprava (DGU) (2017). Digitalni ortofoto u mjerilu 1:5000, 2017. godina – WMS, [https://geoportal.dgu.hr/services/inspire/orthophoto\\_2017/wms?request=GetCapabilities&service=WMS](https://geoportal.dgu.hr/services/inspire/orthophoto_2017/wms?request=GetCapabilities&service=WMS), (18. 10. 2021.)

Državna geodetska uprava (DGU) (2019). Digitalni ortofoto u mjerilu 1:5000, 2019. godina – WMS / Digital orthophoto at a scale of 1:5000, 2019 – WMS, [https://geoportal.dgu.hr/services/inspire/orthophoto\\_2019/wms?service=WMS&request=GetCapabilities](https://geoportal.dgu.hr/services/inspire/orthophoto_2019/wms?service=WMS&request=GetCapabilities) (30. 6. 2022.)

Državna geodetska uprava (DGU) (2021). Digitalni ortofoto u mjerilu 1:5000, 2021. godina – WMS / Digital orthophoto at a scale of 1:5000, 2021 – WMS, [https://geoportal.dgu.hr/services/inspire/orthophoto\\_2021/wms?service=WMS&request=GetCapabilities](https://geoportal.dgu.hr/services/inspire/orthophoto_2021/wms?service=WMS&request=GetCapabilities) (30. 6. 2022.)

Državna geodetska uprava (DGU). Hrvatska osnovna karta u mjerilu 1:5000 – WMS, Državna geodetska uprava, <http://geoportal.dgu.hr/services/hok/wms?SERVICE=WMS&REQUEST=GetCapabilities>, (18. 10. 2021.)

Državna geodetska uprava (DGU). Topografska karta u mjerilu 1:25000 – WMS, Državna geodetska uprava, <http://geoportal.dgu.hr/wms?layers=TK25>, (18. 10. 2021.)

Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ), srednje mjesečne i godišnje temperature zraka (°C) i srednje mjesečne i godišnje količine oborina (mm) za postaju Požega (1997.-2020.), srednji dnevni protok (m<sup>3</sup>/s) na stanicama Pleternica most (1946.-2013.), Pleternica-Londža (1973.-1993., 1995.-2012.), Požega (1976.-1996., 1998.-2022), i Frkljevci (1999.-2022.) i maksimalni dnevni protok na stanicama Požega (2001.-2022.) i Frkljevci (2000.-2022).

Esri. (2018). ArcGIS Pro. Version 2.3.0 [Computer software]. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>

European Environmental Agency (EEA). (2020). CORINE land cover 2018(vector), Europe, 6-yearly—version 2020\_20u1. <https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/copernicus/api/records/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfd0?language=all>

Hrvatske vode (2014). Obilazak terena 19.05.2014. tri dana nakon poplave u Požeštini. Interni dokumenti. Vodnogospodarska ispostava za mali sliv „Orljava-Londža“.

Hrvatski geološki institut (HGI) (2009). Geološka karta Republike Hrvatske u mjerilu 1:300000.

Hrvatski jezični portal (n.d.). Orljava.

[https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search\\_by\\_id&id=eFhkXBE%3D&keyword=orljava](https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=eFhkXBE%3D&keyword=orljava)

IBM Corp. (2023). IBM SPSS Statistics for Windows, verzija 27.0 [Computer software]. Armonk, NY: IBM Corp. Dostupno na: <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>

Krstanović, D (2024). Ni najstariji Požežani ne pamte da je rijeka Orljava gotovo u potpunosti presušila, *Požega.eu* (12. 09. 2024.) <https://pozega.eu/ni-najstariji-pozezani-ne-pamte-da-je-rijeka-orljava-gotovo-u-potpunosti-presusila-677>

Mandarić, A. (2023). Nove poplave, stara priča: Tko je odgovoran?, *34portal* (08. 06. 2023.) <https://www.034portal.hr/nove-poplave-stara-prica-tko-je-odgovoran--203>

Milanović, T. (2016). Pukla mlinska brana na Bučju: "Nije potrebna hitna sanacija jer nije bitna za vodotok". *34portal* (27. 01. 2016.) <https://www.034portal.hr/index.php?id=20802>

Pejaković, M. (2022). Poplava u Kaptolu. *Pozeski.hr* (09. 06. 2022.) <https://pozeski.hr/video-upravo-poplava-u-kaptolu/>

Š. M. (2021). Zbog jake kiše Požega i okolica pod vodom, u Vidovcima snažna bujica nosila sve pred sobom. *Tportal*, (06.06.2021.) <https://www.tportal.hr/vijesti/clanak/video-zbog-jake-kise-pozega-i-okolica-pod-vodom-u-vidovcima-snazna-bujica-nosi-sve-pred-sobom-20210606>

Trimble Germany GmbH. (2014). eCognition developer. Version 9.0.1 [Computer software]. <https://geospatial.trimble.com/en/products/software/trimble-ecognition>

## Popis tablica

|                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 1.1. Ključna obilježja prostornih jedinica riječnog sustava s obzirom na različito prostorno i vremensko mjerilo istraživanja (prema Grabowski i dr., 2014; Gurnell i dr., 2016).....                            | 5   |
| Tab. 1.2. Prostorno-vremenski okvir triju osnovnih dijelova istraživanja .....                                                                                                                                        | 19  |
| Tab. 2.1. Raspodjela nadmorskih visina i nagiba u porječju Orljave.....                                                                                                                                               | 24  |
| Tab. 2.2. Osnovni morfometrijski elementi porječja Orljave .....                                                                                                                                                      | 27  |
| Tab. 2.3. Osnovni morfometrijski elementi rijeke Orljave .....                                                                                                                                                        | 28  |
| Tab. 3.1. Korišteni kartografski i aerofotogrametrijski izvori podataka na cijeloj duljini toka.....                                                                                                                  | 39  |
| Tab. 3.2. Obilježja odsječaka .....                                                                                                                                                                                   | 42  |
| Tab. 3.3. Potencijalna osjetljivost morfoloških tipova korita rijeke Orljave .....                                                                                                                                    | 47  |
| Tab. 3.4. Korišteni kartografski i aerofotogrametrijski izvori podataka za odsječke od Frkljevaca do Čosinog mlina (Brodski Drenovac).....                                                                            | 50  |
| Tab. 3.5. Klasifikacijska shema korištena u istraživanju .....                                                                                                                                                        | 56  |
| Tab. 3.6. Varijable korištene u korelacijskoj analizi i linearnom mješovitom modelu.....                                                                                                                              | 68  |
| Tab. 3.7. Datumi terenskih istraživanja i obavljene aktivnosti .....                                                                                                                                                  | 72  |
| Tab. 3.8. Tip sedimenta prema veličini zrna, modificirano prema Wentworth (1922).....                                                                                                                                 | 81  |
| Tab. 4.1. Klasifikacija potencijalne i specifične osjetljivosti odsječaka rijeke Orljave.....                                                                                                                         | 86  |
| Tab. 4.2. Procjena točnosti klasifikacije zemljišnog pokrova.....                                                                                                                                                     | 89  |
| Tab. 4.3. Duljina korita, duljina presječenih meandara i indeks vijugavosti odsječaka 8 i 9 .                                                                                                                         | 94  |
| Tab. 4.4. Statistički pokazatelji provedenog U-testa.....                                                                                                                                                             | 99  |
| Tab. 4.5. Spearmanovi koeficijenti korelacije između istraživanih varijabli u odsječcima 8 i 9 u dvama istraživanim razdobljima (narančasta označava pozitivne veze, zelena negativne, a tamnija boja jače veze)..... | 103 |
| Tab. 4.6. Prilagodba modela za zavisnu varijablu „stopa bočnog kretanja“ .....                                                                                                                                        | 110 |
| Tab. 4.7. Procjene parametara za model 4. ....                                                                                                                                                                        | 111 |
| Tab. 4.8. Morfometrijski pokazatelji istraživanih meandara .....                                                                                                                                                      | 146 |

## Popis slika

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sl. 2.1. Porječje Orljave. Kartografska podloga: DGU, DEM10 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 21 |
| Sl. 2.2. Geološka karta porječja Orljave s označenim litostratigrafskim jedinicama i rasjedima. Izvor: HGI, 2009. ....                                                                                                                                                                                                                                                     | 23 |
| Sl. 2.3. Nagib reljefa u porječju Orljave. Izvor: prema DGU, DEM10 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 25 |
| Sl. 2.4. Godišnji hod temperature i padalina u Požegi u razdoblju 1997.-2020. Izvor: Državni hidrometeorološki zavod .....                                                                                                                                                                                                                                                 | 26 |
| Sl. 2.5. Modulni koeficijenti na stanicama Požega i Frkljevci u razdoblju 1999.-2022. Izvor: Državni hidrometeorološki zavod .....                                                                                                                                                                                                                                         | 29 |
| Sl. 2.6. Krivulja trajanja srednjih dnevnih protoka na postajama Požega i Frkljevci u razdoblju 1999.-2022. Izvor: Državni hidrometeorološki zavod .....                                                                                                                                                                                                                   | 30 |
| Sl. 2.7. Kretanje srednjih godišnjih maksimuma na (A) postaji Pleternica most u razdoblju 1946.-2013., i (B) postajama Frkljevci i Požega u razdoblju 1973.-2022. Crveni kružići označavaju značajne poplave. Izvor: Državni hidrometeorološki zavod .....                                                                                                                 | 31 |
| Sl. 2.8. Zemljišni pokrov i hidrotehničke građevine u porječju Orljave. Izvor: Corine Land Cover 2018 (EEA); prostorna baza podataka hidrotehničkih građevina (Hrvatske vode).....                                                                                                                                                                                         | 34 |
| Sl. 2.9. Ljudski utjecaji na morfologiju korita: A) obaloutvrda od kamenog nabačaja, B) stepenica u Pleternici, C) kanalizirano korito u Pleternici, D) stepenica nizvodno od Bečića                                                                                                                                                                                       | 36 |
| Sl. 3.1. Delineacija odsječaka na toku rijeke Orljave.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 41 |
| Sl. 3.2. Longitudinalni profil rijeke Orljave od izvora do ušća (na temelju DEM10) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 43 |
| Sl. 3.3. Različiti tipovi korita Orljave po odsječcima, A) step-pool morfologija (odsječak G3), B) prijelazni tip s bočnim i središnjim prudovima (odsječak 1), C) kanalizirano korito u Požegi (odsječak 4), D) meandrirajuće korito (odsječak 6), E) vijugavo/ meandrirajuće korito s bočnim prudovima (odsječak 9) F) kanalizirano korito kod Lužana (odsječak 11)..... | 44 |
| Sl. 3.4. Hidrotehničke građevine i mjere na istraživanim odsječcima 8 i 9 (godine presijecanja meandara označavaju godinu kad je presječen meandar zapažen na zračnoj snimci, a ne kada je mjera provedena).....                                                                                                                                                           | 49 |
| Sl. 3.5. Isječak riječnog koridora Orljave na RGB ortofoto kompozitu za 2017. (A), NIR ortofoto kompozitu za 2017. (B), DDSM-u za 2017. (C) .....                                                                                                                                                                                                                          | 52 |
| Sl. 3.6. Klase zemljišnog pokrova u riječnom koridoru prikazane na segmentiranim NIR ortofotima iz 2011. i 2017. (poligoni predstavljaju objekte proizvedene segmentacijom).....                                                                                                                                                                                           | 55 |
| Sl. 3.7. Uzorci za treniranje i validaciju te područje provedbe klasifikacije prikazani na RGB ortofoto kompozitu iz 2017. ....                                                                                                                                                                                                                                            | 58 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sl. 3.8. Delineacija riječnog koridora preklapanjem poligona aktivnog korita iz analiziranih godina .....                                                                                                                                                                                                               | 60 |
| Sl. 3.9. A) Mjerenje lateralnog kretanja rijeke pomoću poprečnih presjeka, B) mjerenje površina erozije i taloženja na temelju preklapanja poligona aktivnog korita iz uzastopnih godina (podloga: ortofoto iz 2017. godine).....                                                                                       | 62 |
| Sl. 3.10. Delineacija pododsječaka unutar odsječaka 8 i 9 .....                                                                                                                                                                                                                                                         | 67 |
| Sl. 3.11. Lokacije istraživanih meandara na rijeci Orljavi .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 71 |
| Sl. 3.12. Snimanje bespilotnom letjelicom na odabranim lokacijama meandara Orljave.....                                                                                                                                                                                                                                 | 73 |
| Sl. 3.13. Digitalni model površina (A) i digitalni ortofoto model (B) generirani na temelju snimaka prikupljenih bespilotnom letjelicom na lokaciji Bučje 30. 3. 2023. ....                                                                                                                                             | 74 |
| Sl. 3.14. Prikupljanje točaka za terensku kontrolu (lijevo), mjerenje poprečnog profila korita (desno).....                                                                                                                                                                                                             | 75 |
| Sl. 3.15. Laplacian edge detection filter primijenjen na DSM (A), DSM s vektoriziranim obalnim linijama (B) .....                                                                                                                                                                                                       | 76 |
| Sl. 3.16. Morfometrijski pokazatelji na meandru (A), osnovni tipovi razvoja meandra prema Hooke (1984) (B) .....                                                                                                                                                                                                        | 78 |
| Sl. 3.17. Uzorci s terena (A), mokro sito (B), prosijani uzorci (C) .....                                                                                                                                                                                                                                               | 80 |
| Sl. 4.1. Duljina toka Orljave po odsječcima u razdoblju od 1879./1882. do 2019. ....                                                                                                                                                                                                                                    | 82 |
| Sl. 4.2. Indeks vijugavosti toka Orljave po odsječcima u razdoblju od 1879./1882. do 2019.                                                                                                                                                                                                                              | 83 |
| Sl. 4.3. Relativne promjene u duljini i indeksu vijugavosti toka Orljave po odsječcima u razdoblju od 1879./1882. do 2019.....                                                                                                                                                                                          | 84 |
| Sl. 4.4. Kanaliziranje korita na području Požege, usporedba pružanja korita 1879. i 2001. Kartografska podloga: treća vojna izmjera 1879., list 5859-4; topografska karta u mjerilu 1:25000, list Požega, izvornik iz 2001. ....                                                                                        | 85 |
| Sl. 4.5. Stope bočnog kretanja odsječaka rijeke u razdoblju 2001. – 2019. Crvene linije predstavljaju prirodne prekide u podacima. ....                                                                                                                                                                                 | 87 |
| Sl. 4.6. Površinski udjeli klasa zemljišnog pokrova u riječnom koridoru u odsječku 8 (A) i odsječku 9 (B) .....                                                                                                                                                                                                         | 90 |
| Sl. 4.7. Prijelazi između klasa zemljišnog pokrova u odsječku 8 (A-D) i 9 (E-H) između proučavanih godina (debljina veza odnosi se na količinu promjene, a postoci predstavljaju udjele klasa zemljišnog pokrova u određenoj godini; manje promjene između klasa isključene su iz dijagrama radi jasnoće prikaza) ..... | 92 |
| Sl. 4.8. Promjene u zemljišnom pokrovu u koridoru rijeke Orljave u A) odsječku 1 i B) odsječku 2 (pokazni isječci označeni na Sl. 3.4) .....                                                                                                                                                                            | 93 |

|                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Sl. 4.9. Indeks vijugavosti .....                                                                                                                                                                                                                          | 95  |
| Sl. 4.10. Relativna razlika u duljini korita i indeksu vijugavosti u promatranim razdobljima                                                                                                                                                               | 95  |
| Sl. 4.11. A) Stope bočnog kretanja (u metrima godišnje) u promatranim razdobljima; B) nizvodna migracija crte sredine korita u promatranim godinama u odsječku 9.....                                                                                      | 96  |
| Sl. 4.12. Širina aktivnog korita u promatranim godinama .....                                                                                                                                                                                              | 97  |
| Sl. 4.13. Površine erozije i taloženja u promatranim razdobljima .....                                                                                                                                                                                     | 98  |
| Sl. 4.14. Udjeli drvenaste vegetacije na riječnim obalama u promatranim godinama .....                                                                                                                                                                     | 98  |
| Sl. 4.15. Dijagrami raspona za maksimalne godišnje protoke i trajanje protoka većih od 25,5 m <sup>3</sup> /s u razdobljima 2001. – 2011. i 2011. – 2021. na hidrološkoj postaji Frkljevci.....                                                            | 99  |
| Sl. 4.16. Odnos logaritmirane stope bočnog kretanja i postotnog udjela drvenaste priobalne vegetacije u odsječcima 8 i 9 u istraživanim razdobljima.....                                                                                                   | 105 |
| Sl. 4.17. Odnos stope bočnog kretanja i trajanja protoka iznad 25,5 m <sup>3</sup> /s u odsječcima 8 i 9 u istraživanim razdobljima .....                                                                                                                  | 108 |
| Sl. 4.18. Profil obale (A), struktura sedimenta na prudu (B), pogled nizvodno na istraživani meandar 2022. godine (C). Strelica prikazuje smjer toka. ....                                                                                                 | 112 |
| Sl. 4.19. Recentne promjene korita Orljave na lokaciji Deževci u razdoblju 2001. – 2021.                                                                                                                                                                   | 113 |
| Sl. 4.20. Promjene korita na lokaciji Deževci od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 07.05.2024. ....                                                                                                            | 116 |
| Sl. 4.21. Izmjereni profili na lokaciji Deževci. Isprekidane linije prikazuju profile procijenjene na temelju DSM modela dobivenog snimanjem bespilotnom letjelicom. Svi profili su orijentirani u smjeru toka rijeke (lijeva obala – desna obala). ....   | 118 |
| Sl. 4.22. Snimka geomorfološkog stanja istraživanog meandra prije (A), u vrijeme hidrotehničkih radova u koritu (B) i šest mjeseci kasnije (C).....                                                                                                        | 119 |
| Sl. 4.23. Struktura strme obale uzvodnog meandra (A), struktura sedimenta na prudu (B), pogled iz bespilotne letjelice na istraživane meandre 30. 3. 2023. (C). Strelica – smjer toka. ....                                                                | 120 |
| Sl. 4.24. Recentne promjene korita Orljave na lokaciji Boričevci u razdoblju 2001. – 2021.                                                                                                                                                                 | 121 |
| Sl. 4.25. Promjene korita Orljave na lokaciji Boričevci od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 7. 5. 2024. ....                                                                                                  | 123 |
| Sl. 4.26. Izmjereni profili na lokaciji Boričevci. Isprekidane linije prikazuju profile procijenjene na temelju DSM modela dobivenog snimanjem bespilotnom letjelicom. Svi profili su orijentirani u smjeru toka rijeke (lijeva obala – desna obala). .... | 125 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Sl. 4.27. Pogled uzvodno na strmu desnu obalu na uzvodnom dijelu istraživane lokacije (A), strma lijeva obala na središnjem ravnom dijelu istraživane lokacije (B), pogled nizvodno (C). Strelica – smjer toka. ....                                                                                                  | 126 |
| Sl. 4.28. Recentne promjene korita Orljave na lokaciji Vesela u razdoblju 2001. – 2021. ..                                                                                                                                                                                                                            | 127 |
| Sl. 4.29. Promjene korita Orljave na lokaciji Vesela od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 7. 5. 2024. ....                                                                                                                                                                | 129 |
| Sl. 4.30. Izmjereni profili na lokaciji Vesela. Isprekidane linije prikazuju profile procijenjene na temelju DSM modela dobivenog snimanjem bespilotnom letjelicom. Svi profili su orijentirani u smjeru toka rijeke (lijeva obala – desna obala). ....                                                               | 130 |
| Sl. 4.31. Meandri uzvodno od mlinske stepenice (A), korito nizvodno od stepenice (B), akumulirani sediment i drvni ostaci na prudu (C). Crne strelice označavaju smjer toka, a bijela strelica razrušenu stepenicu. Snimljeno 30. 3. 2023. ....                                                                       | 132 |
| Sl. 4.32. Recentne promjene korita Orljave na lokaciji Bučje u razdoblju 2001. – 2021. ....                                                                                                                                                                                                                           | 133 |
| Sl. 4.33. Promjene korita Orljave na lokaciji Bučje, uzvodni meandri, od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 7. 5. 2024. ....                                                                                                                                               | 135 |
| Sl. 4.34. Izmjereni profili na lokaciji Bučje. Isprekidane linije prikazuju profile procijenjene na temelju DSM modela dobivenog snimanjem bespilotnom letjelicom. Svi profili su orijentirani u smjeru toka rijeke (lijeva obala – desna obala). ....                                                                | 137 |
| Sl. 4.35. Promjene korita Orljave na lokaciji Bučje, nizvodno od stepenice, od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 7. 5. 2024. ....                                                                                                                                         | 138 |
| Sl. 4.36. Istraživani meandri (A), šljunkoviti sediment na prudu i desna strma obala gornjeg meandra (B). Crna strelica označava smjer toka. Snimljeno 7. 5. 2024. (A) i 30. 3. 2023. (B). ....                                                                                                                       | 140 |
| Sl. 4.37. Recentne promjene korita na lokaciji Tenov mlin u razdoblju 2001. – 2021. ....                                                                                                                                                                                                                              | 141 |
| Sl. 4.38. Promjene korita Orljave na lokaciji Tenov mlin od 2022. do 2024. godine (strelica prikazuje smjer toka). U pozadini ortofoto od 7. 5. 2024. ....                                                                                                                                                            | 143 |
| Sl. 4.39. Izmjereni profili na lokaciji Tenov mlin. Isprekidane linije prikazuju profile procijenjene na temelju DSM modela dobivenog snimanjem bespilotnom letjelicom. Svi profili su orijentirani u smjeru toka rijeke (lijeva obala – desna obala). ....                                                           | 144 |
| Sl. 4.40. Relativne i apsolutne vrijednosti erozije obala na istraženim lokacijama u jednogodišnjim razdobljima (LO – lijeva obala, DO – desna obala, D – drvenasta vegetacija, T – trava). Napomena: prosječne vrijednosti prate apsolutne no prikazane su da bi se uzelo u obzir nejednako trajanje razdoblja. .... | 148 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Sl. 4.41. Raspršeni dijagrami odnosa između prosječnog povlačenja obale i indeksa vijugavosti, te prosječne širine aktivnog korita u prvom i drugom razdoblju terenskih istraživanja .....                                                                                                        | 149 |
| Sl. 5.1. Broj vrijednosti iznad praga od 25,5 m <sup>3</sup> /s (protok s povratnim periodom od 1,1 godine), prosječni i maksimalni mjesečni protoci na hidrološkoj postaji Frkljevci, te datumi snimanja zračnih snimaka. Izvor: Državni hidrometeorološki zavod, Državna geodetska uprava ..... | 159 |
| Sl. 5.2. Vrijednosti trajanja protoka iznad 25,5 m <sup>3</sup> /s, stopa bočnog kretanja i udjela drvenaste obalne vegetacije u razdoblju 2001. – 2021. u odsječku 9.....                                                                                                                        | 162 |
| Sl. 5.3. Dijagram potencijala za oporavak rijeka (prema Fryirs i Brierley, 2016) .....                                                                                                                                                                                                            | 170 |
| Sl. 5.4. Odsječci Orljave klasificirani prema osjetljivosti.....                                                                                                                                                                                                                                  | 173 |
| Sl. 5.5. Isječak toka rijeke između dva nasipa u odsječku 8 .....                                                                                                                                                                                                                                 | 177 |

## Prilozi

Tab. A1. Podaci o aerofotogramterijskim snimkama korištenim u klasifikaciji zemljišnog pokrova i vezani hidrološki podaci

| Godina                              | Datum snimanja | Veličina piksela (m) | Kanali <sup>†</sup> | Srednji dnevni vodostaj (cm) | Srednji dnevni protok (m <sup>3</sup> /s) |
|-------------------------------------|----------------|----------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| 2011.                               | 22.6.2011.     | 0,30                 | R, G, B, NIR        | 44                           | 2,88                                      |
| 2014.                               | 8.10.2014.     | 0,25                 | R, G, B             | 55                           | 4,46                                      |
|                                     | 12.10.2014.    | 0,25                 | R, G, B             | 51                           | 3,83                                      |
|                                     | 20.10.2014.    | 0,25                 | R, G, B             | 60                           | 5,74                                      |
| 2017.                               | 29.9.2017.     | 0,25                 | R, G, B, NIR        | 32                           | 1,38                                      |
|                                     | 17.10.2017.    | 0,25                 | R, G, B, NIR        | 31                           | 1,35                                      |
| 2019.                               | 18.10.2019.    | 0,30                 | R, G, B, NIR        | 30                           | 1,16                                      |
|                                     | 19.10.2019.    | 0,30                 | R, G, B, NIR        | 29                           | 1,13                                      |
|                                     | 20.10.2019.    | 0,30                 | R, G, B, NIR        | 29                           | 1,11                                      |
| 2021.                               | 30.07.2021.    | 0,25                 | R, G, B, NIR        | 33                           | 1,41                                      |
|                                     | 12.08.2021.    | 0,25                 | R, G, B, NIR        | 30                           | 1,08                                      |
| Srednjak za razdoblje 2011. – 2021. |                |                      |                     | 54                           | 6.07                                      |

<sup>†</sup> R – Red, G – Green, B – Blue, NIR – near-infrared  
(izvor hidroloških podataka: Državni hidrometeorološki zavod)

Tab. A2. Parametri i težinski koeficijenti slojeva za multirezolucijsku segmentaciju

| Godina | Scale | Shape | Compactness | Red | Green | Blue | NIR | NDVI | NDWI |
|--------|-------|-------|-------------|-----|-------|------|-----|------|------|
| 2011.  | 30    | 0,1   | 0,5         | 1   | 1     | 1    | 2   | 2    | 2    |
| 2014.  | 40    | 0,1   | 0,5         | 1   | 1     | 1    | -   | -    | -    |
| 2017.  | 30    | 0,1   | 0,5         | 1   | 1     | 1    | 2   | 2    | 2    |
| 2019.  | 30    | 0,1   | 0,5         | 1   | 1     | 1    | 2   | 2    | 2    |
| 2021.  | 30    | 0,1   | 0,5         | 1   | 1     | 1    | 2   | 2    | 2    |

Tab. A3. Broj i površinski udio uzoraka za treniranje i validaciju klasifikacije zemljišnog pokrova

|                                    |                           | Treniranje |       |       |       |       | Validacija |       |       |       |       |
|------------------------------------|---------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|
|                                    |                           | 2011.      | 2014. | 2017. | 2019. | 2021. | 2011.      | 2014. | 2017. | 2019. | 2021. |
| <b>Broj uzoraka</b>                | Voda                      | 142        | 151   | 276   | 200   | 142   | 27         | 29    | 41    | 24    | 27    |
|                                    | Golo tlo                  | 214        | 98    | 275   | 195   | 99    | 79         | 26    | 46    | 63    | 44    |
|                                    | Riječni sed. <sup>†</sup> | -          | -     | -     | -     | -     | 0          | 16    | 19    | 24    | 14    |
|                                    | Gusta veg.                | 307        | 351   | 580   | 392   | 405   | 213        | 203   | 393   | 256   | 311   |
|                                    | Rijetka veg.              | 168        | 343   | 394   | 355   | 179   | 155        | 167   | 233   | 167   | 75    |
|                                    | Sjene                     | 121        | 119   | 279   | 164   | 220   | 26         | 60    | 68    | 66    | 39    |
|                                    | Ukupno                    | 952        | 1062  | 1804  | 1306  | 1045  | 500        | 501   | 800   | 600   | 510   |
| <b>Površinski udio uzoraka (%)</b> | Voda                      | 17,58      | 25,24 | 16,43 | 13,49 | 13,01 | 6,14       | 11,12 | 7,28  | 3,81  | 4,89  |
|                                    | Golo tlo                  | 23,97      | 11,40 | 24,19 | 26,83 | 18,36 | 15,53      | 5,23  | 6,93  | 17,17 | 13,96 |
|                                    | Riječni sed. <sup>†</sup> | -          | -     | -     | -     | -     | 0,00       | 3,99  | 1,34  | 2,60  | 1,48  |
|                                    | Gusta veg.                | 26,90      | 35,67 | 19,32 | 18,73 | 35,17 | 41,55      | 33,56 | 40,24 | 33,36 | 57,18 |
|                                    | Rijetka veg.              | 27,30      | 19,28 | 25,26 | 32,46 | 21,05 | 35,21      | 39,02 | 39,05 | 37,33 | 18,89 |
|                                    | Sjene                     | 4,25       | 8,40  | 14,80 | 8,50  | 12,41 | 1,57       | 7,08  | 5,16  | 5,74  | 3,61  |
| <b>% klasificirane površine</b>    |                           | 4,75       | 4,75  | 5,64  | 5,44  | 6,55  | 5,54       | 1,72  | 1,10  | 2,00  | 1,90  |

<sup>†</sup> Uzorci za treniranje nisu uzimani za riječne sedimente budući da su klasificirani u fazi postklasifikacije na temelju DDSM-a; 2011. godine riječni sedimenti su ručno vektorizirani.

Table A4. Parametri klasifikacijskih algoritama

| Algoritam | Parametar                                                                    | Vrijednost                     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| SVM       | <i>C (size of misclassification allowed for non-separable training data)</i> | 1                              |
| RF        | <i>Maximum tree number</i>                                                   | 300                            |
|           | <i>Maximum tree depth</i>                                                    | 10                             |
|           | <i>Minimum number of samples per node</i>                                    | 1                              |
|           | <i>Number of features randomly selected for each node</i>                    | Korijen ukupnog broja objekata |

Tab. A5. Promjene zemljišnog pokrova po klasama u koridoru rijeke Orljave (sažeto za odsječke 8 i 9).

| Godina    | Iz klase        | U klasu      | Površina (m <sup>2</sup> ) | %     | Godina    | Iz klase        | U klasu      | Površ. (m <sup>2</sup> ) | %     |
|-----------|-----------------|--------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------|--------------|--------------------------|-------|
| 2011-2014 | Golo tlo        | Voda         | 45122                      | 9,16  | 2014-2017 | Voda            | Rijetka veg. | 52851                    | 10,73 |
|           | Voda            | Riječni sed. | 27315                      | 5,55  |           | Voda            | Gusta veg.   | 40069                    | 8,14  |
|           | Golo tlo        | Rijetka veg. | 24849                      | 5,05  |           | Rijetka veg.    | Gusta veg.   | 30560                    | 6,21  |
|           | Rijetka veg.    | Voda         | 20963                      | 4,26  |           | Voda            | Riječni sed. | 27220                    | 5,53  |
|           | Voda            | Rijetka veg. | 20665                      | 4,20  |           | Riječni sed.    | Rijetka veg. | 21662                    | 4,40  |
|           | Gusta veg.      | Voda         | 19373                      | 3,93  |           | Rijetka veg.    | Voda         | 18977                    | 3,85  |
|           | Gusta veg.      | Rijetka veg. | 18368                      | 3,73  |           | Riječni sed.    | Gusta veg.   | 18892                    | 3,84  |
|           | Golo tlo        | Riječni sed. | 14547                      | 2,95  |           | Poljopr.        | Voda         | 12603                    | 2,56  |
|           | Poljopr.        | Voda         | 14115                      | 2,87  |           | Riječni sed.    | Voda         | 12454                    | 2,53  |
|           | Gusta veg.      | Riječni sed. | 8440                       | 1,71  |           | Rijetka veg.    | Visoka veg.  | 11138                    | 2,26  |
|           | Ostale promjene |              | 55592                      | 11,29 |           | Poljopr.        | Rijetka veg. | 8202                     | 1,67  |
|           | Bez promjene    |              | 223067                     | 45,30 |           | Ostale promjene |              | 63050                    | 12,80 |
| 2017-2019 | Rijetka veg.    | Gusta veg.   | 36724                      | 7,46  | 2019-2021 | Bez promjene    |              | 174737                   | 35,49 |
|           | Rijetka veg.    | Voda         | 18467                      | 3,75  |           | Rijetka veg.    | Gusta veg.   | 52637                    | 10,69 |
|           | Voda            | Riječni sed. | 16620                      | 3,38  |           | Gusta veg.      | Visoka veg.  | 44918                    | 9,12  |
|           | Voda            | Rijetka veg. | 13656                      | 2,77  |           | Riječni sed.    | Gusta veg.   | 19495                    | 3,96  |
|           | Riječni sed.    | Rijetka veg. | 12496                      | 2,54  |           | Voda            | Gusta veg.   | 16425                    | 3,34  |
|           | Gusta veg.      | Rijetka veg. | 10893                      | 2,21  |           | Riječni sed.    | Rijetka veg. | 10776                    | 2,19  |
|           | Gusta veg.      | Visoka veg.  | 10518                      | 2,14  |           | Voda            | Rijetka veg. | 5990                     | 1,22  |
|           | Voda            | Gusta veg.   | 9731                       | 1,98  |           | Voda            | Riječni sed. | 5785                     | 1,17  |
|           | Rijetka veg.    | Riječni sed. | 9439                       | 1,92  |           | Rijetka veg.    | Visoka veg.  | 4643                     | 0,94  |
|           | Riječni sed.    | Voda         | 7703                       | 1,56  |           | Ostale promjene |              | 62089                    | 12,61 |
|           | Ostale promjene |              | 66136                      | 13,43 |           | Bez promjene    |              | 269659                   | 54,76 |
|           | Bez promjene    |              | 280033                     | 56,87 |           |                 |              |                          |       |



## SUMMARY

Rivers are inherently dynamic systems shaped by the interactions between water discharge, sediment transport, and vegetation dynamics. Natural morphodynamics of actively meandering rivers is characterised by lateral channel migration across the floodplain. However, lateral erosion and channel shifting can present challenges for nearby settlements and human activities, particularly when located close to riverbanks. To mitigate flood risk and bank erosion, various river management measures are often implemented, such as straightening, channelization, and construction of weirs. In order to control river processes, these interventions alter channel morphology, degrade habitat quality, and, in some cases, even increase flood risks.

In this study, we examined the meandering Orljava River, a left tributary of the Sava River located in eastern Croatia in the Pannonian basin. The Orljava is one of the few remaining lowland rivers in Croatia that is not completely laterally restrained. However, since it flows through developed agricultural areas, we hypothesized that significant hydromorphological changes have occurred along the Orljava since the late 19th century (H1), primarily driven by human activities (H2). In recent years, preliminary observations in much of the river's middle and lower reaches revealed widespread riparian vegetation removal – a management practice intended to increase channel capacity and reduce flood risk by accommodating higher discharges. We hypothesized that this anthropogenic vegetation removal has led to increased channel dynamics, particularly in terms of increased channel migration (H3a) and changes in channel width (H3b). Additionally, we proposed that the increased channel slope (H4a) and sinuosity (H4b) further increase the river's sensitivity to morphological changes.

Therefore, the research aims were to analyse the hydromorphological changes of the Orljava River since the late 19th century and to interpret the key natural and human factors that have contributed to these changes. Also, the study developed a methodology for assessing the river's sensitivity to morphological change, identified significant mitigation measures for the current hydromorphological state and explored the potential for river recovery.

The study is methodologically divided into three parts, defined by the spatial and temporal framework, following the proposed steps from the project REFORM's theoretical framework for the analysis of river hydromorphology (Gurnell et al., 2016). First, the river course was delineated into reaches based on the characteristics of channel morphology and slope, river valley width, and longitudinal connectivity barriers (such as dams and mill weirs). In the reaches from the entrance into the Požega Valley to the river's mouth, long-term channel

changes were analysed from the late 19th century to 2019, using historical maps of the Third Military Survey (1879/1882), archival aerial images from 1966, and recent topographic and orthophoto maps (2001, 2019). Channel features were manually vectorised in geographic information system. Channel length and sinuosity index were analysed as primary indicators of anthropogenic changes, particularly river channelization.

Following this long-term historical analysis, reaches were categorized into natural and heavily modified reaches (e.g., channelized reaches). Potential sensitivity to changes was assessed based on the basic hydromorphological properties of each reach (Reid & Brierley, 2015). Specific sensitivity of the reaches was evaluated based on the rate of lateral migration from 2001 to 2019, which was taken as an indicator of the river's sensitivity to changes, since it represents a key geomorphological feature of meandering rivers like the Orljava (Gomes et al., 2023; Reid & Brierley, 2015; Wheeler et al., 2022).

In the lower course, on two reaches between Frkljevci hydrological station and Čosin Mlin (mill weir) the greater channel width and more accurate data allowed for more detailed analysis of channel changes in the period 1966–2021. The object-based classification of floodplain land cover was conducted based on RGB and near-infrared aerial images from the period 2011–2021. Five land cover classes within the river corridor were mapped: water, bare soil, sparse vegetation, dense vegetation, and shadows. A digital surface model generated from the images was used to differentiate between bare river channel units (“river sediments”) and bare soil in the floodplain, as well as to identify high vegetation, while agricultural land was classified manually. Land cover classification automated the vectorization process of channel features and allowed for further investigation of the vegetation cover dynamics. Channel features from the earlier images and maps (1966, 1980, 2001, 2009) were vectorised manually. The following morphometric parameters were analysed: sinuosity index, channel length, channel width, lateral migration rate, areas of erosion and accretion and percentage of riparian woody vegetation. To determine the factors affecting lateral migration rates (chosen as the most representative metric due to the meandering channel pattern), data on flood size and frequency, riparian woody vegetation, and channel geometry (width, sinuosity, slope) were statistically analysed for the period 2001–2021. To enable a more detailed investigation of data variability, the river reaches were divided into six 1-km subreaches. Relationships between variables were tested using Spearman’s rank correlation analysis and linear mixed models to account for potential pseudoreplication in the data.

The final part of the study involved field research carried out from 2022 to 2024 at specific meander locations in the middle and lower reaches of the river using an unmanned aerial vehicle (UAV) and GNSS receiver. The aim of the field research was to investigate short-term geomorphological changes in the channel, primarily lateral erosion, on smaller spatial units. The measured changes were interpreted in line with the hydromorphological characteristics of each location (bank vegetation structure, channel geometry). Statistical testing of the relationships between bank retreat rates and meander morphometric parameters (meander width and sinuosity) improved the overall understanding of the river's sensitivity to changes at the meander level.

The results of the long-term analysis of river channel changes showed that the river length from the entrance to the Požega Valley to the confluence with the Sava decreased by 9.3% from 1879/1882 to 2019. Primary reasons were river channelization and straightening in the Požega urban area and in the most downstream section before the confluence. By 2019, approximately 30% of the middle and lower course reaches had been channelized. This confirmed the hypothesis that significant hydromorphological changes have occurred in the Orljava River since the late 19th century (H1) and that the morphological changes in the river channel are primarily the result of human impacts (H2). Regarding the river sensitivity assessment, the reaches were categorized into four main groups: channelized low-sensitivity reaches, potentially highly sensitive reaches that exhibit moderate changes, potentially moderately sensitive reaches that exhibit moderate changes, and potentially moderately sensitive reaches that exhibit significant changes.

In the reaches between Frkljevcí and Čosin Mlin, river morphometric analyses (1966–2021) showed a clear increase in channel dynamics after 2011, especially regarding lateral migration rates and channel widening. The impact of natural factors on channel changes was investigated by analysing hydrological parameters. Since 2001, two significant floods occurred on the Orljava River: in 2010 and 2014. Although the floods had similar maximum discharges (around 200 m<sup>3</sup>/s at the Frkljevcí station), the measured morphological changes were significantly greater after the second flood. For instance, lateral migration rates in the reach between Ganoci Mill and Čosin Mlin increased from 1.06 m/year (2009–2011) to 4 m/year (2011–2014), while the width of the active channel expanded from 22–23 m to 33 m. The main difference in the hydromorphological characteristics of the river in 2010 and 2014 was the proportion of woody vegetation on the riverbanks, which fell from over 70% (in 2009) to around 5 % (in 2011) following anthropogenic removal as part of flood defence measures. Also, a significant

difference in rates of morphological changes was noted between the studied reaches. The reach impounded by a weir generally showed less dynamics: the highest lateral migration rates (1.28 m per year) occurred during 2014–2017, following the breach of the mill weir in 2016, which also led to a 17.5% reduction in channel width due to removal of the impoundment.

A statistically significant negative correlation between the proportion of woody vegetation on the riverbanks and the river's lateral migration rate was confirmed through correlation analysis and a linear mixed model (H3a). Additionally, a negative relationship between woody bank vegetation and changes in the width of the active channel was identified (H3b). Generally, a higher proportion of vegetation on the banks increases stability, thereby reducing lateral erosion. Since anthropogenic removal of vegetation, rather than the occurrence of floods, was identified as the main cause of intensified channel dynamics during the 2011-2021 period, the dominance of anthropogenic influence on changes in river morphology was further confirmed (H2).

Moreover, a positive relationship between lateral migration rates (as a measure of river sensitivity) and channel slope was established through a linear mixed model (H4a). A greater channel slope contributes to higher stream power, which results in increased lateral erosion. However, at the subreach level, the relationship between lateral migration and sinuosity index was not statistically significant (H4b).

In the third part of the research, field measurements at the meander level (2022-2024) revealed that lateral erosion rates were 20-80% higher at nearly all surveyed meanders during the first year of monitoring (2022-2023), when a significant flood occurred (Frkljevcí:  $Q_{\max} = 158 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Higher lateral erosion rates were also recorded at meanders where steep banks were not covered by woody vegetation, consistent with the previously established hypothesis at the subreach level (H3a). Correlation analysis showed a positive relationship between the meander sinuosity index and the rate of bank retreat, thus confirming hypothesis H4b at the meander level. Generally, greater curvature of the meander increases the centrifugal force that drives water to flow faster and with greater strength on the outer side of the meander, enhancing bank erosion. Additionally, changes in cross-sectional profiles were mostly in line with the natural riverbed dynamics related to lateral migration of the channel (alternating pools and riffles). At the location near Bučje, however, the riverbed incision of about 1 m upstream of the breached weir was recorded compared to the state in 2012, due to the lowering of the local erosion base.

Based on quantified morphological evolution of the Orljava River over time, identification and interpretation of statistical relationships, and assessed river sensitivity to change, this research also proposed measures to improve the current hydromorphological state of the Orljava River. To reduce further bank erosion (primarily of agricultural land) in reaches where bank vegetation has been anthropogenically removed, a key measure to improve the current state involves protecting and restoring bank (riparian) vegetation, which contributes to channel stabilization and reduction in lateral erosion rates. This research has demonstrated that the presence of woody riverbank vegetation is crucial for reducing erosion during high flows. Additionally, a nonlinear negative relationship has been established between the proportion of woody bank vegetation and the lateral migration rates, meaning that even a small increase in the proportion of woody vegetation when it is generally low contributes to a significant reduction in lateral migration.

Furthermore, the lack of artificial bank stabilization and natural channel sinuosity allow for the development of heterogeneous geomorphological forms and hydrological conditions within the channel, which is essential for the development of diverse river habitats. The river's natural sinuosity also increases the channel surface area that can absorb and store high flows, further reducing flood risk. Likewise, increased sinuosity reduces the slope and flow velocity, contributing to the channel stability.

Mitigation measures for the channelized reaches of the river are limited due to surrounding densely populated and built-up areas. However, given that climate change is expected to lead to more frequent extreme events such as significant floods and droughts, two key measures are proposed: restoring riparian vegetation to lower water temperatures and developing retention areas to increase capacity for accommodating large volumes of water during floods. On the Orljava River there are also 13 weirs, some of which in the lower course are over 5 meters high, disrupting the longitudinal connectivity of the flow and sediment transfer and causing habitat fragmentation. While it would be optimal to remove all weirs, the impact of structurally important weirs must be mitigated by constructing fish passes that enable migration of organisms.

This research provides a comprehensive hydromorphological analysis of the Orljava River, presenting a substantial amount of data and insights that can enhance the management of the river system. Notably, the study highlights the river's response to flood events in the context of anthropogenic riparian vegetation removal, an aspect that previous literature on river sensitivity

has less frequently addressed. Most studies on river sensitivity have focused primarily on the morphological characteristics of the river valley, channel, and bed sediments. In the case of the Orłjava River, greater sensitivity has been demonstrated specifically due to the removal of riparian vegetation.

Overall, this study serves as a solid foundation for planning river restoration and ecological research. To improve the hydromorphological condition of the Orłjava River, a holistic management approach is essential—one that considers rivers within a broader spatial context, such as the entire catchment, and is grounded in an understanding of hydrological, geomorphological, and ecological processes, alongside the implementation of natural solutions.

## ŽIVOTOPIS

Katarina Pavlek rođena je 27. siječnja 1995. godine u Zagrebu gdje je maturirala u Klasičnoj gimnaziji i Glazbenoj školi Blagoja Berse. Tijekom osnovne i srednje škole na državnim natjecanjima iz geografije osvojila je dva prva i dva druga mjesta. Kao članica hrvatskog tima učenika na svjetskim geografskim olimpijadama 2012. i 2013. godine osvojila je dvije srebrne medalje. Preddiplomski studij geografije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu upisala je 2013. godine. Tijekom studija osvojila je Rektorovu nagradu za timski znanstveni rad, dvije Pohvalnice Fakultetskog vijeća za izuzetan uspjeh u studiju te nagradu „Maja Pisk“ za uzornog studenta Geografskog odsjeka. Tijekom diplomskog studija (smjer Fizička geografija s geoekologijom) provela je šest mjeseci na Sveučilištu u Lancasteru (Ujedinjena Kraljevina) u sklopu Erasmus+ studijskog boravka. Diplomirala je 2019. godine s temom „Recentne geomorfološke promjene korita rijeke Cetine“ pod mentorstvom prof. dr. sc. Sanje Faivre. Doktorski studij geografije na PMF-u pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Ivana Čanjevca upisala je 2020. godine. Tijekom doktorskog studija bila je na kraćim studijskim boravcima na Sveučilištu u Segedinu (Mađarska) i na *University of Natural Resources and Life Sciences* u Beču. U akademskoj godini 2023./2024., kao dobitnica stipendije za doktorske studente Ernst Mach, provela je šest mjeseci na geografskom odsjeku Sveučilišta u Beču, gdje je bila članica istraživačkih grupa ENGAGE (*Geomorphological Systems and Risk Research*) i HI-CONN (*Human Impact and Connectivity*) pod mentorstvom Dr. Ronalda E. Poeppla. Od 2020. do 2023. bila je zaposlena kao suradnica na projektima hidromorfoloških istraživanja tekućica u Hrvatskoj na Geografskom odsjeku PMF-a. Glavni istraživački interesi vezani su joj uz područje fluvijalne geomorfologije, posebno interakcije između vegetacije i geomorfoloških procesa, te promjena zemljišnog pokrova. Do sada je objavila 10 znanstvenih radova (8 u Scopusu), od toga 7 kao prva autorica te je sudjelovala na 13 domaćih i međunarodnih znanstvenih konferencija.

Popis znanstvenih radova:

1. **Pavlek, K.**, Gašparović, M., & Poeppl, R. E. (2024). Assessing natural and human-induced river corridor changes using object-based image analysis (Orljava River, Croatia). *River Research and Applications* (in press). <https://doi.org/10.1002/rra.4369>
2. **Pavlek, K.**, Mićunović, M., & Čanjevac, I. (2024). Monitoring Changes in Channel Morphology on the Orljava River Based on UAV and GNSS Surveys (Požega-Slavonia



- County, Croatia). In M. Gašparović (Ed.), *1st International Conference of Environmental Remote Sensing and GIS* (pp. 5-8). Zagreb: University of Zagreb Faculty of Geodesy.
3. **Pavlek, K.**, Plantak, M., Martinić, I., Vinković, K., Vučković, I., & Čanjevac, I. (2023). Methodological Framework for Assessing Hydromorphological Conditions of Heavily Modified and Artificial River Water Bodies in Croatia. *Water*, 15(6), 1113.
  4. **Pavlek, K.** (2023). Geomorfološke promjene tekućica: pristupi, rezultati i izazovi istraživanja. *Hrvatski Geografski Glasnik*, 85(1), 5-39.
  5. **Pavlek, K.**, Kulej, T., & Bočić, N. (2022). Promjene u duljini i obliku korita Drave od Repaša do Ferdinandovca od kraja 18. stoljeća do danas. *Podravina - časopis za multidisciplinarna istraživanja*, 21(42), 27-41.
  6. Čanjevac, I., **Pavlek, K.**, & Orešić, D. (2022). Duljine tekućica u Hrvatskoj određene na temelju topografske karte mjerila 1: 25 000. *Hrvatski geografski glasnik*, 84(1), 5-30.
  7. **Pavlek, K.**, & Faivre, S. (2020). Geomorphological changes of the Cetina River channels since the end of the 19<sup>th</sup> century, natural vs anthropogenic impacts (the Dinarides, Croatia), *Environmental Earth Sciences*, 79(20), 482.
  8. Ivić, Š., Silvija, L., Marinković, S., **Pavlek, K.**, Šošić Klindžić, R., & Halamić, J. (2020). Exploring Sources of Knappable Materials as a Starting Point for Locating Pre-Neolithic Open-Air Sites in Dalmatia. In I. Miloglav (Ed.), *Recent Developments in Archaeometry and Archaeological Methodology in South-Eastern Europe* (pg. 35-57). Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing.
  9. **Pavlek, K.**, Bišćević, F., Furčić, P., Grđan, A., Gugić, V., Malešić, N., Moharić, P., Vragović, V., Fuerst-Bjeliš, B., & Cvitanović, M. (2017). Spatial patterns and drivers of fire occurrence in a Mediterranean environment: a case study of southern Croatia. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography* 117(1), 22-35.
  10. Jogun, T., **Pavlek, K.**, Belić, T., Buhin, S., & Malešić, N. (2017). Promjene zemljišnog pokrova u sjevernoj Hrvatskoj od 1981. do 2011. godine. *Hrvatski geografski glasnik* 79(1), 33-59.