

Migracija meandara rijeke Save i rizik od poplava između Slavonskog Broda i Račinovaca

Vadlja, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:342990>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Dominik Vadjla

Migracija meandara rijeke Save i rizik od poplava
između Slavenskog Broda i Račinovaca

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Dominik Vadjla

Migracija meandara rijeke Save i rizik od poplava
između Slavanskog Broda i Račinovaca

Diplomski rad
Predložen Geološkom odsjeku
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta
Sveučilišta u Zagrebu
radi stjecanja akademskog stupnja
magistar geologije

Mentor:
doc. dr. sc. Katarina Gobo

Zagreb, 2021.

Zahvaljujem se svojoj mentorici doc. sr. sc. Katarini Gobo na nebrojenim smjernicama, korisnim savjetima te golemom strpljenju iskazanom prilikom ispravljanja ovog rada.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji na njihovoj podršci kroz cijeli studij.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Diplomski rad

Migracija meandara rijeke Save i rizik od poplava između Slavanskog Broda i Račinovaca

Dominik Vadjla

Rad je izrađen na Geološko-paleontološkom zavodu Geološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Horvatovac 102a, 10 000 Zagreb, Republika Hrvatska.

Sažetak: Rijeka Sava pokazuje meandrirajuć karakter na svojoj dionici između Slavanskog Broda i sela Račinovci gdje je 2014. godine na dva mjesta probila nasip i uzrokovala dosad nezabilježenu poplavu u brodskoj Posavini. Kontinuiranom erozijom i taloženjem meandrirajuća rijeka se razvija u horizontalnoj ravnini, stoga se može reći kako njeno korito migrira. U ovome radu izvršena je usporedba stare karte „Slawonische Militärgrenze“ (1780) i modernih satelitskih snimaka te su se na taj način uočile i zabilježile migracije meandara rijeke Save u proteklih 240 godina. Također, uporabom podataka o maksimalnim godišnjim protocima prikupljenih na trima hidrološkim postajama izračunati su parametri intervala i vjerojatnosti pojavljivanja te je na taj način u ovome radu procijenjen rizik od poplava na dionici rijeke Save između Slavanskog Broda i Račinovaca.

Ključne riječi: hazard, meandriranje, poplava, Posavina, rijeka, Sava

Rad sadrži: (45 stranica, 30 slika, 3 tablice , 36 literaturna navoda)

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je pohranjen u: Središnjoj geološkoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Mentor: doc. dr. sc. Katarina Gobo, docent, PMF, Zagreb

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Katarina Gobo, docent, PMF, Zagreb

doc. dr. sc. Borna Lužar-Oberiter, docent, PMF, Zagreb

prof. dr. sc. Marijan Kovačić, redoviti profesor, PMF, Zagreb

Datum završnog ispita: 26. veljače. 2021.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geology

Master's Thesis

Migration of Sava River meanders and flood risk between Slavonski Brod and Račinovci

Dominik Vadjla

Thesis completed in Division of Geology and Paleontology, Department of Geology, Faculty of Science University of Zagreb, Horvatovac 102a, 10 000 Zagreb, Croatia.

Abstract: The Sava River is meandering on its section between Slavonski Brod and the village of Račinovci, where in 2014 it broke through the embankment in two places and caused an unprecedented flood in area known as brodska Posavina. Through continuous erosion and deposition, the meandering river evolves in a horizontal plane, so it can be said that its channel migrates. This thesis presents a comparison of the old map „Slawonische Militärgrenze“ (1780) and modern satellite images to show the migrations of the Sava River meanders in the past 240 years. Also, using maximum annual discharge data from three hydrological stations, recurrence intervals and probabilities of occurrence were calculated, leading to an estimate of flood risk on the section of the Sava River between Slavonski Brod and Račinovci village.

Keywords: flood, hazard, meandering, Posavina, river, Sava

Thesis contains: (45 pages, 30 figures, 3 tables, 36 references)

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Central Geological Library, Faculty of Science, University of Zagreb

Supervisor: Ph.D, Katarina Gobo, Assistant Professor

Reviewers: Katarina Gobo, Ph.D., Asistant Professor, PMF, Zagreb

Borna Lužar-Oberiter, Ph.D., Asistant Professor, PMF, Zagreb

Marijan Kovačić, Ph.D. Full Professor, PMF, Zagreb

Date of the final exam: February 26, 2021

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. MEANDRIRAJUĆE RIJEKE	3
2.1 Općenito o meandrirajućim rijekama.....	3
2.2 Rijeka Sava	6
3. GEOLOGIJA ISTRAŽIVANOG PODRUČJA	8
4. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....	12
4.1. Pregled dosadašnjih istraživanja istočne Slavonije	12
4.2. Pregled dosadašnjih istraživanja meandrirajućih rijeka.....	13
4.3. Pregled dosadašnjih istraživanja poplava	15
5. MATERIJALI I METODE.....	17
6. REZULTATI	19
6.1. Migracija meandara rijeke Save	19
6.1.1. Razdioba istraživanog područja na pojedine sektore meandara.....	19
6.1.2. Promjene uočene na pojedinim sektorima	20
6.1.3. Problematika mjesta Štitar	27
6.1.4. Dokazi starijih migracija meandara	29
6.2. Procjena rizika od poplava.....	31
6.2.1. Hidrološka postaja Slavonski brod	31
6.2.2. Hidrološka postaja Županja	33
6.2.3. Hidrološka postaja Gunja.....	35
7. RASPRAVA.....	37
7.1. Migracija meandara rijeke Save	37
7.2. Procjena rizika od poplava.....	38
8. ZAKLJUČAK	40
9. REFERENCE	41
10. POPIS SLIKA I TABLICA U TEKSTU.....	45

1. UVOD

Fluvijalni okoliši su dinamični i sa sobom nose rizik od poplava. Poplave su najčešće prirodni proces, u načelu važan i pozitivan, jer donose nove čestice tj. sitnozrnate sedimente u ravnice (FELJA, 2020). Poplave su najčešći tip prirodne opasnosti s najvećim brojem pogođenih ljudi i uništenih materijalnih dobara. Primarni uzročnici poplava su hidrometeorološke prirode poput kopnjenja snijega, obilnih i dugotrajnih padalina i blokiranja ledom. Poplave također mogu biti posljedica prirodnih ledenih i zemljanih prepreka unutar riječnog korita, a mogu biti uzrokovane rušenjem brana ili odronjavanjem stijena u vodeni tok. Najkatastrofalnija od svih poplava bila je ona 1931. godine u Kini, gdje je broj izgubljenih ljudskih života procijenjen na 2 milijuna, a površina poplavljenog područja iznosila je otprilike 180 tisuća kvadratnih kilometara (COURTNEY, 2018).

Također, bitna karakteristika poplava je vrijeme odgode, koje uvelike ovisi o klimatskim uvjetima istraživanog područja, propusnosti podloge, geometriji bazena i upotrebi zemljišta. Tako će vrijeme odgode na glinovitoj podlozi, na urbaniziranom području gdje prevladava aridna klima biti mnogo kraće nego na vapnenačkoj podlozi, bez ili s minimalnim čovjekovim utjecajem gdje prevladava vlažna klima. Poplave riječnih dolina te bujične poplave dva su tipa poplava vezana za rijeke. Izradom detaljnih hidrograma te karata opasnosti od poplave moguće je predvidjeti učinke te aproksimirati štetu prouzročenu istom.

Poplave nisu rijetkost ni na području Republike Hrvatske. Među najpoznatijim poplavama koje su zadesile područje Republike Hrvatske upravo je ona koja je 2014. godine pogodila istočnu Hrvatsku, točnije brodsku Posavinu (slike 1, 2). Tokom svibnja 2014. godine zabilježen je rekordan vodostaj rijeke Save koja je probila nasipe kod Rajevog Sela i Račinovaca te uzorokovala dosad nezabilježenu poplavu na spomenutim područjima. Cilj ovog diplomskog rada bit će uočavanje migracije riječnih meandara rijeke Save koja na području između Slavenskog Broda i Račinovaca meandrira te procjena rizika od poplava na spomenutom području.



Slika 1. Područje pogođeno poplavom 2014. godine.

Preuzeto s: https://hr.wikipedia.org/wiki/Poplave_u_istočnoj_Hrvatskoj_u_svibnju_2014.



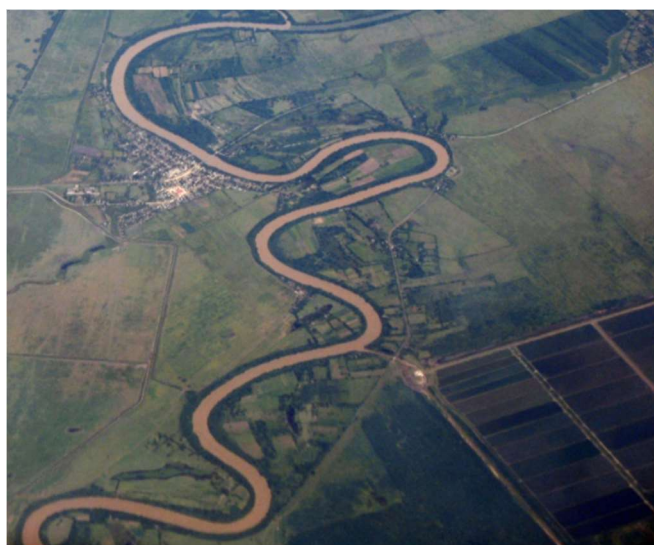
Slika 2. Posljedice poplave u brodskoj Posavini 2014. godine.

Preuzeto s: <https://www.jutarnji.hr/vijesti/hrvatska/najveca-prirodna-katastrofa-u-modernoj-hrvatskoj-evo-kako-izgleda-gunja-cetiri-godine-nakon-velike-poplave-7>

2. MEANDRIRAJUĆE RIJEKE

2.1 Općenito o meandrirajućim rijekama

Meandrirajuće rijeke predstavljaju jedan od glavnih morfoloških tipova rijeka (slika 3). Gradijent spomenutih rijeka je nizak dok im je zavojitost velika. Glavna značajka ovih rijeka upravo su meandri, koji predstavljaju specifičan oblik riječnih zavoja gdje se očituju dva oblika riječnog djelovanja na okoliš, erozija i sedimentacija. Nepobitna je činjenica da upravo dvama navedenim procesima meandrirajuće rijeke nepovratno mijenjaju okoliš kojim protječu.

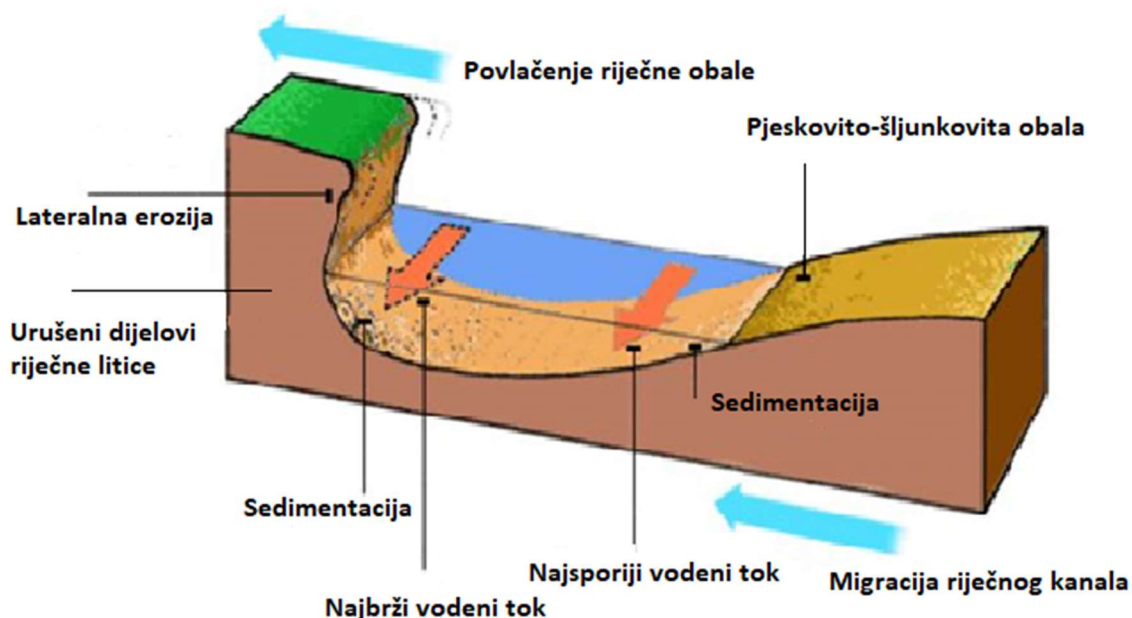


Slika 3. Primjer meandrirajuće rijeke (Rio Cauto, Kuba).

Preuzeto s: <https://enacademic.com/dic.nsf/enwiki/1574633>

Tokom godina javile su se mnoge hipoteze o pravom uzroku riječnog meandriranja. Međutim, niti jedna hipoteza nije cjelovito odgovorila na zadano pitanje. FERREIRA DA SILVA et al. (2006) meandriranje objašnjavaju uvođenjem tzv. „bursting“ procesa koji u kombinaciji s nasumičnim elementom prisutnim u svakom turbulentnom toku predstavlja početak stvaranja prvog u nizu riječnih meandara. Također, KASPEREK (2015) kao uzrok meandriranja predstavlja centrifugalnu silu, koja u zavojitom vodenom toku premješta strujanje vode prema vanjskom dijelu korita te tako uzrokuje lateralnu eroziju koja za sobom povlači produbljivanje i migraciju korita. Navedenim procesima stvara se karakterističan poprečni profil meandrirajuće rijeke koji je sam po sebi asimetričan (slika 4). Već prilikom prvog pogleda na

spomenuti poprečni profil lako je zaključiti kako je vođeni tok najbrži upravo u najdubljem dijelu korita gdje se zbog veće brzine toka javlja erozija, dok je nasuprot, u plitkom dijelu korita, tok sporiji te se odvija sedimentacija.



Slika 4. Poprečan profil meandrirajuće rijeke.

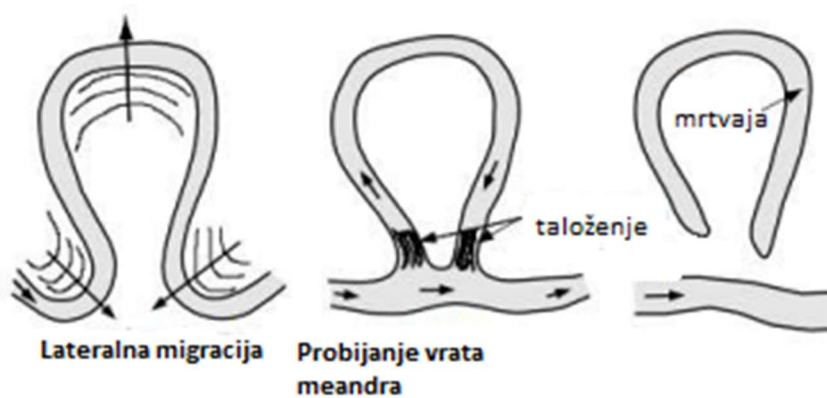
Preuzeto s: https://www.geocaching.com/geocache/GC59WAY_meanders-associated-landforms.

Kontinuiranom erozijom i taloženjem rijeka se razvija u horizontalnoj ravnini te pritom stvara sedimentne forme poput prudova i mrtvaja (slika 5). Kao što je već otprije poznato, mrtvaje su jezera specifičnog nastanka koja nastaju isključivo kao produkt meandrirajućih rijeka.

Mrtvaje su zapravo produkt dugotrajne erozije kojom rijeka djeluje na unutarnje obale istog meandra. Zadnji korak pri stvaranju mrtvaje je probijanje „vrata“ meandra, što je zapravo naziv za probijanje vodenog toka kroz sedimentnu barijeru, čime jedan u nizu meandara zaostaje i prestaje biti dio aktivnog toka rijeke te postaje jezero (slika 6). Jezera opisanog nastanka specifičnog su izgleda i teško ih je zamijeniti s ostalim tipovima jezera.



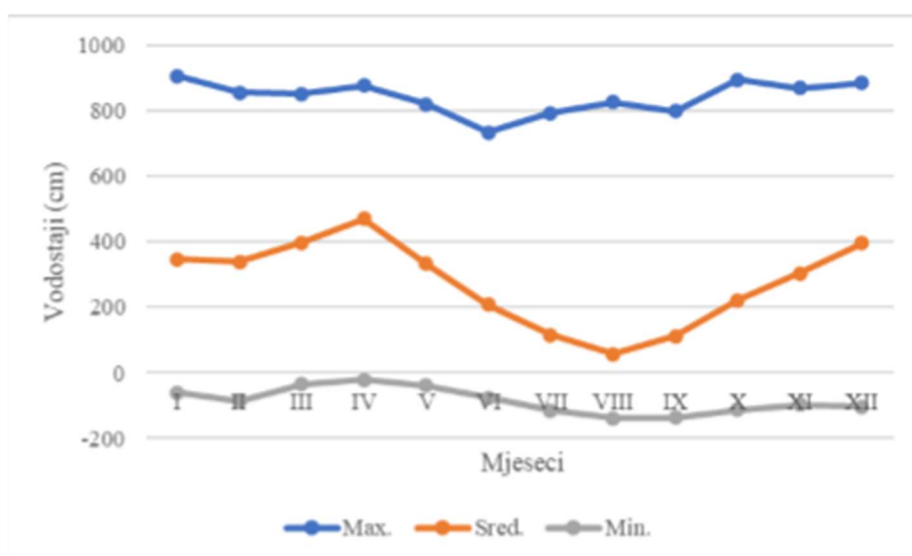
Slika 5. Primjer mrtvaje. Preuzeto s: <https://www.sciencesource.com/archive/Oxbow-Lake-in-South-Carolina-SS2431870.html>



Slika 6. Prikaz probijanja „vrata“ meandra te nastanak mrtvaje (JULIEN, 2002).

2. 2 Rijeka Sava

Rijeka Sava jedna je od najvećih rijeka koja protječe Republikom Hrvatskom gdje duljina njenog toka iznosi 562 km. Sava kao takva nastaje spajanjem Save Dolinke i Save Bohinjke u Sloveniji, a utječe u Dunav u Beogradu. Sliv rijeke Save najveći je sliv jugoistočne Europe, ukupne površine od približno 97.713,20 km² čije područje obuhvaća šest zemalja: Sloveniju, Hrvatsku, Bosnu i Hercegovinu, Srbiju, Crna Goru i Albaniju. Korito rijeke Save najšire je kod mjesta Šabac gdje izmjerena širina iznosi 700 m. Kopnjenje snijega u proljeće te obilne jesenje padaline donose najviše vodostaje, dok najniže vodostaje bilježimo tokom ljetnih sušnih razdoblja (GRGIĆ, 2020) (slika 7). Stoga možemo reći kako vodostaji pokazuju pravilne sezonske oscilacije.



Slika 7. Vodostaji rijeke Save na vodomjernoj postavi Jasenovac za period od 1970. do 2012. godine. Preuzeto iz GRGIĆ, 2020.

Bitna karakteristika rijeke Save jest njena podložnost poplavama koje nastaju kao posljedica otapanja leda na prijelazu iz zime u proljeće i intenzivnih jesenjih oborina, ovo je ujedno i najbitnija karakteristika u kontekstu ovog diplomskog rada. Neka od najranjivih područja kada

je riječ o poplavama nalaze se u Posavini i brodskoj Posavini, uključujući i područje istraživanja duž kojeg rijeka Sava pokazuje meandrirajuć karakter.

3. GEOLOGIJA ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Istraživano područje nalazi se između Slavonskog Broda i sela Račinovci koje spadaju u veću geografsku cjelinu nazvanu brodska Posavina. Spomenuta geograska cjelina nalazi se u tzv. Slavonsko-srijemskoj depresiji, jednoj od četiriju neogenskih depresija na području hrvatskoga dijela Panonskog bazenskog sustava (slika 8) (BALUN, 2016). U dubinskoj građi Slavonsko-srijemske depresije razlikuju se dva bitno različita geološka kompleksa stijena, odnosno naslaga. Prvi kompleks stijena čine magmatske, metamorfne i sedimentne stijene pretežito paleozojske i mezozojske starosti, koje čine podlogu na koju su taložene neogenske i plio-kvartarne naslage. Prema podacima objavljenim u VELIĆ et al. (2002) i SAFTIĆ et al. (2003), naslage neogenske i plio-kvartarne ispune depresije izdvojene su u tri sedimentacijska megaciklusa.



Slika 8. Četiri depresije u hrvatskome dijelu Panonskog bazenskog sustava. Označeno crvenom bojom – Slavonsko-srijemska depresija.

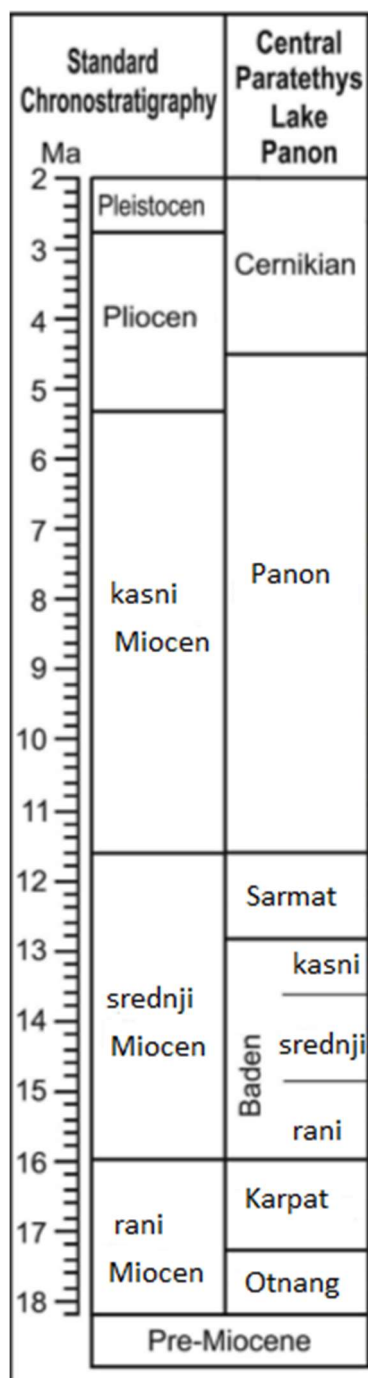
Preuzeto iz VELIĆ, 2007; prema KRANJEC et al., 1981.

Prvi u nizu sedimentacijskih megaciklusa odvijao se tokom ranog i srednjeg miocena, preciznije od otnanga zaključno sa sarmatom (18,3 – 11,5 Ma) (slika 9). Sedimentacija započinje tek u otnangu i to u kopnenim okolišima aluvijalnih lepeza i u jezerskim taložnim okolišima (PAVELIĆ, 1998). Sredinom miocena dolazi do transgresije koja uz regionalno marinsko poplavljanje dovodi do taloženja biogenih vapnenaca i konglomerata.

Idući u nizu sedimentacijskih megaciklusa datiran je za panon (11,6- 5,3 Ma) (VELIĆ, 2007). Južni dio hrvatskog dijela Panonskog bazena tokom kasnog miocena zabilježio je manju tektonsku aktivnost uz produbljivanje taložnog prostora za što je zaslužna termalna subsidencija, odnosno hlađenje litosfere (PRELOGOVIĆ et al., 1995; PAVELIĆ, 2001). Navedene promjene pogoduju taloženju dubokomorskih sedimenata poput lapora proslojenih siliciklastičnim materijalom. Naknadno, tokom panona, dolazi do oplićavanja te do porasta udjela terigenog materijala gdje delte i prodelte predstavljaju dominantne okoliše taloženja (PAVELIĆ, 2001).

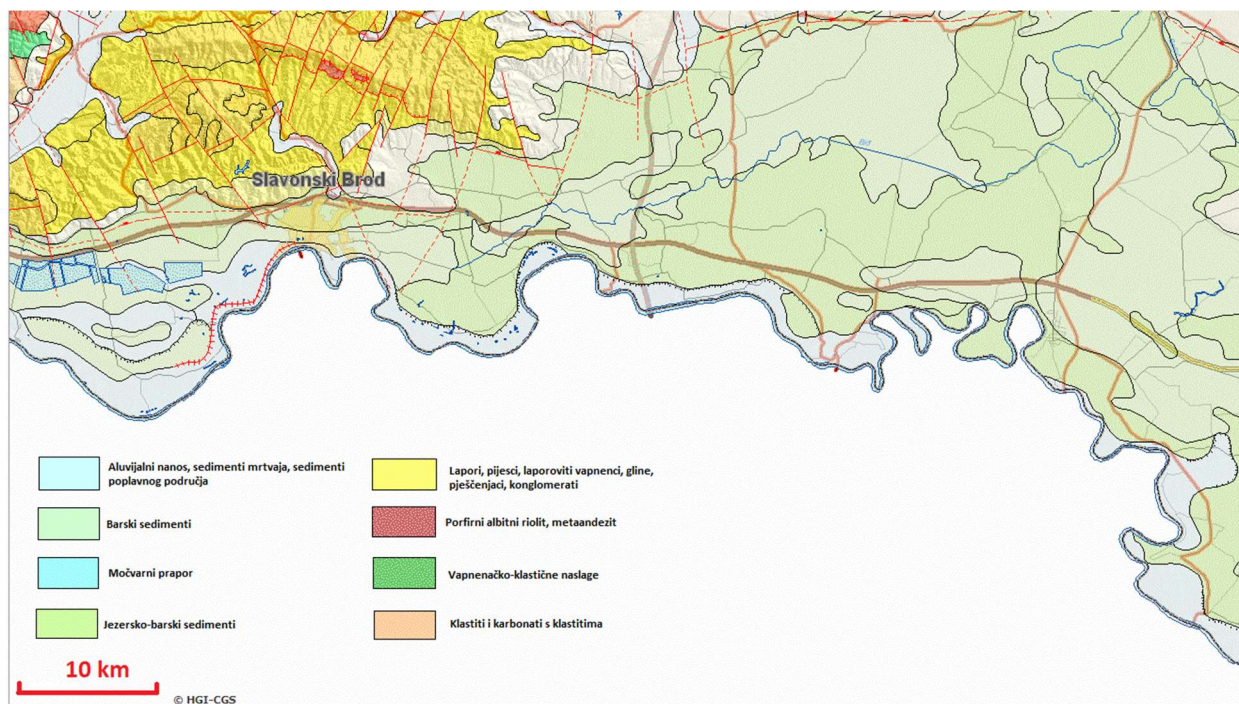
Posljednji u nizu sedimentacijskih megaciklusa ujedno je i najkraći. Radi se o razdoblju koje je započelo prije 5,3 milijuna godina te traje još i danas. Ovdje je riječ o sedimentima plio-kvartarne starosti čija debljina varira od 500 do 1000 m (SAFTIĆ et al., 2003). Za posljednji sedimentacijski megaciklus karakteristična je dominantno močvarna, jezerska i riječna sedimentacija (BALUN, 2016). Ovaj završni megaciklus litološki se razlikuje od prethodnih jer je izgrađen od izmjene sivih, slabo vezanih pijesaka i sivozelenih ili plavičastih mekih glina koje sadrže rijetke slojeve lignita. Završava sa šljuncima i praporima (VELIĆ, 2007).

Temeljno tektonsko obilježje ovog područja je radijalna tektonika (ŠPARICA et al., 1987). Glavni paleorasjedi, duž kojih se obnavljala tektonska aktivnost, su pružanja istok-zapad, ili zapad, sjeverozapad-istok, jugoistok. Rasjedi pružanja sjever-jug ili bliski tom pravcu su mlađi i najčešće presijecaju starije rasjede. Najznačajniji strukturno-tektonski elementi na ovom prostoru su „antiklinala“ Županja te „sinklinala“ Orašje na jugu (KOPIĆ, 2016). Navedena izdignuta struktura dijeli Slavonsko-srijemsku depresiju na sjeverni te južni dio. Sjeverni dio je znatno manji i dublji od južnog koji je plići i razvedeniji.



Slika 9. Kronostratigrafska podjela centralnog Paratethysa, izmjenjeno iz KOVAČIĆ & PAVELIĆ (2018).

Sedimenti poplavnih područja holocenske starosti ipak su u centru pozornosti ovog diplomskog rada (slika 10). Spomenute naslage poglavito se sastoje od sitnozrnatih i srednjezrnatih pijesaka, zaglinjenih pijesaka i silta čija debljina ne prelazi 5 m (KOPIC, 2016). Ovaj tip naslaga karakterističan je za fluvijalne okoliše, pa njihov pronalazak na istraživanom području nije neobičan



Slika 10. Sedimenti poplavnih ravnica holocenske starosti (označeni svijetloplavom bojom).

Izmijenjeno iz: <http://webgis.hgi-cgs.hr/gk300/default.aspx>

4. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

4. 1. Pregled dosadašnjih istraživanja istočne Slavonije

Prvo znanstveno, tj. geološko kartiranje istočne Slavonije započinje u 19. stoljeću. Radi se o pothvatu austrijskih i mađarskih geologa koji prikazuju kvartarne naslage rasprostranjene na tom području. GRIMMER (1899) pronalazi fosilni zapis sisavaca u aluvijalnom nanosu rijeke Save. GORJANOVIĆ-KRAMBERGER (1913) opisuje praporne naslage istočne Slavonije te daje uvid u fosilni zapis sisavaca čiji su ostaci pronađeni na spomenutom području.

Istočna Slavonija tokom druge polovice 20. stoljeća privlači veći broj znanstvenika koji će vršiti razna geološka te geofizička istraživanja u sklopu naftnogeoloških istraživanja. Razdiobu istočne Slavonije na tri sedimentacijska predjela Dravsku potolinu, Slavonsko-srijemsku potolinu i Đakovačko-vinkovački timor, vrši HERNITZ (1983). CRNKOVIĆ & BUŠIĆ (1970), URUMOVIĆ et al. (1978) i HERNITZ (1983) navode kako su holocenske naslage upravo rezultat poplavlivanja rijeke Save i njenih pritoka.

Detaljan uvid u tektoniku Slavonsko-srijemske depresije daje BARIŠIĆ (1986). U spomenutom radu autor naglašava kako, osim otprije poznatih sustava rasjeda koji su posljedica radijalne tektonike, nadalje postoje i reversni rasjedi nastali kao posljedica kompresijskog režima, a za posljedicu imaju kontakt čvrstih, izdignutih struktura i potolinskih mekih dijelova

SOKAČ (1978) svojim radom vrši stratigrafsku podjelu kvartarnih naslaga na donji, srednji i gornji pleistocen, a navedeni rezultati su u ovom slučaju potkrijepljeni pronađenim fosilnim sadržajem. URUMOVIĆ et al. (1978), na temelju podataka prikupljenih u sklopu vodoistražnih te istražnih bušotina, vrše podjelu kvartarnih naslaga u Slavonsko-srijemskoj potolini na donji, srednji i gornji pleistocen te holocen.

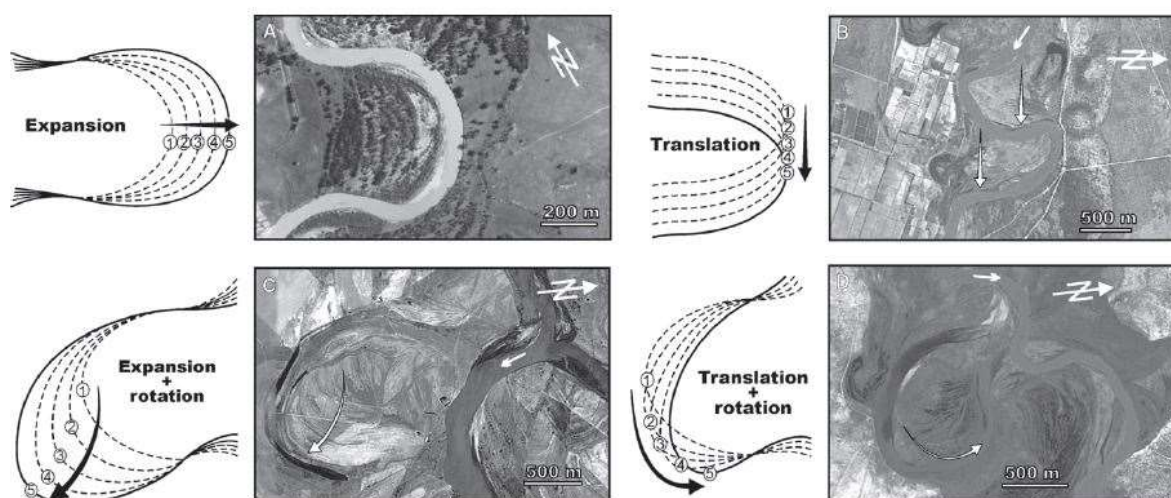
4. 2. Pregled dosadašnjih istraživanja meandrirajućih rijeka

LEOPOLD i WOLMAN (1960) u svom radu zaključuju kako većina riječnih meandara ima vrlo sličan omjer radijusa njihove zakrivljenosti i širine korita, čija vrijednost iznosi između 2 i 3. Također, u spomenutom radu spominju se različite vrijednosti za brzine vodenog toka unutar same rijeke te se time postavlja podloga za daljnja istraživanja meandrirajućih rijeka.

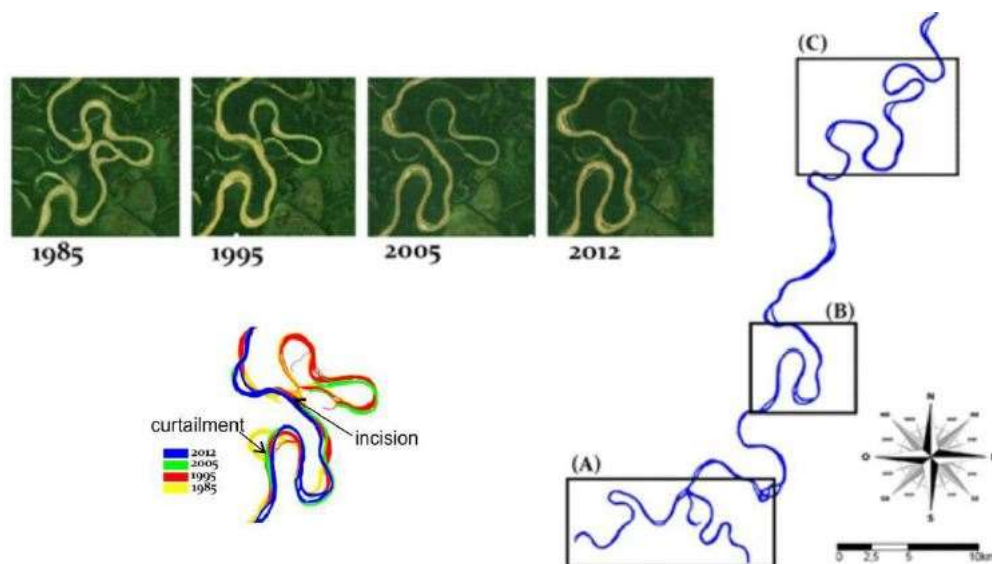
FERREIRA DA SILVA et al. (2006) meandriranje objašnjavaju uvođenjem tzv. „bursting procesa“. Spomenuti procesi dolaze u obliku sitnih, kružnih vodenih strujanja horizontalne i vertikalne orijentacije na kontaktu vodenog toka i korita rijeke, a u konačnici rezultiraju erodiranjem korita. KASPEREK (2015) istražuje promjene u toku rijeke Odre izazvane poplavama. Također, u svome radu kao uzrok meandriranja predstavlja centrifuglanu silu koja se stvara na kontaktu korita i same rijeke.

GHINASSI et al. (2014) bilježe migracije meandara paleorijeke na lokalitetu Boyabat u Turskoj. Metode korištene pri dobivanju rezultata, u sklopu njihovog rada, terenske su prirode te uključuju detaljno kartiranje područja, izradu detaljnih geoloških stupova izdanaka te odredbu smjera paleotoka imbrikacijom valutica, a sve s ciljem detaljnije odredbe migracija meandara. Također GHINASSI et al. (2014) predstavljaju četiri glavna tipa migracije meandrirajućih rijeka: ekspanzija, translacija, ekspanzija s rotacijom i translacija s rotacijom, prethodno opisanih u radovima DANIEL (1971), BRICE (1974) i JACKSON (1976) (slika 11). Ekspanzija povećava zakrivljenost korita te produljuje vodeni tok, dok se vrh meandra udaljava od osi meandrirajuće rijeke. Translacijom se vrh meandra pomiče paralelno u odnosu na os meandrirajuće rijeke, dok se zakrivljenost ne mijenja. Zaključno, rotacijom se vrh meandra približava ili udaljuje od osi meandrirajuće rijeke.

Drugačiji pristup odredbi migracije meandara predstavlja rad GOMES et al. (2018). Predmet istraživanja ovog znanstvenog rada je recentna rijeka Mamorecillo u Boliviji. Istraživanje na području Bolivije temeljena su na satelitskim snimkama. Prva snimka istraživanog područja snimljena je još 1985. godine, a iduće snimke snimljene su 1995., 2005. te zaključno 2012. godine. Pri rekonstrukciji nekadašnjih korita rijeke Mamorecillo korišten je i Earth Engine, platforma za analize i vizualizaciju skupova geoprostornih podataka. Rezultati su dobiveni kolektivnom usporedbom četiriju satelitskih snimaka i uočavanjem promjena te rekonstrukcijom kretanja sadašnjih i bivših korita (slika 12).



Slika 11. Tipovi migracije meandrirajućih rijeka. Preuzeto iz GHINASSI et al. 2014.



Slika 12. Rezultati istraživanja provedenih na jednom od sustava meandara rijeke Mamorecillo.

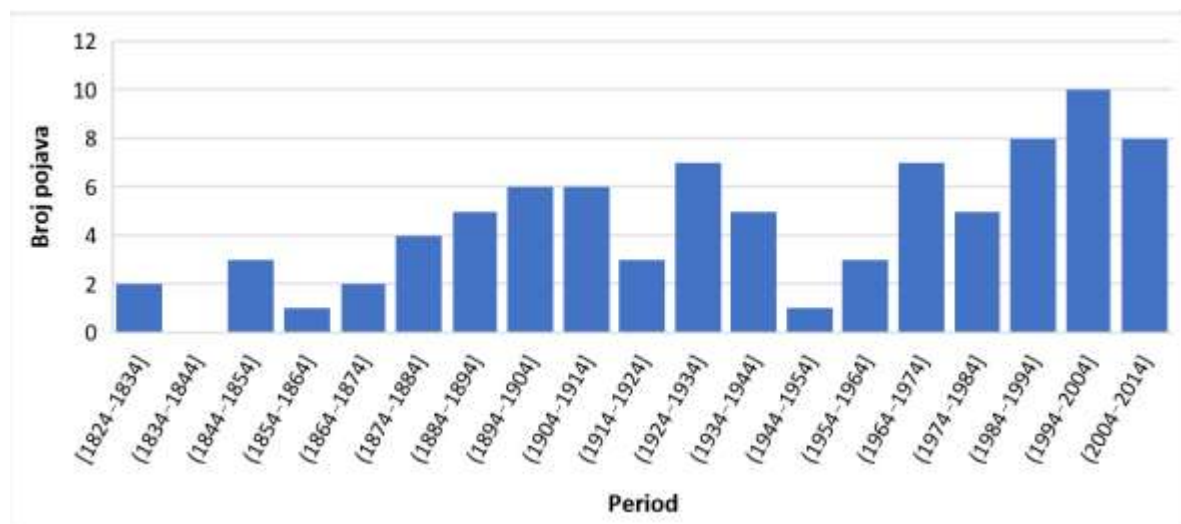
Preuzeto iz GOMES et al. 2018.

4. 3. Pregled dosadašnjih istraživanja poplava

Život na plodnom tlu poplavnih ravnic čovjeku donosi mnoge blagodati već od samih začetaka modernih civilizacija. Naravno, odabравši život na poplavnoj ravnicі velike rijeke čovjek se upoznao s opasnijom stranom poplave, onom koja može prouzročiti materijalne štete i uzimati živote. Stoga nije neobično da čovjek već tisućama godina pokušava promijeniti riječne tokove s ciljem smanjenja poplava. Prve mjere zaštita od poplave primjenjene su u drevnoj Kini, gdje su izgrađeni nasipi uz rijeku Yangtze (PLATE, 2002). Moderne mjere zaštite također obuhvaćaju gradnju nasipa, ali i neke kompleksnije metode poput regulacije vodotoka, izgradnje velikih bazena i odteretnih kanala te sustava retencija.

Zabrinjavajuća je činjenica da se s recentnim klimatskim promjenama broj poplava velikih magnituda znatno povećao. KNOX (1993) se u svome radu o rijeci Mississippi bavi tom problematikom. BRONSTERT (2003) također nadodaje kako su za povećan broj poplava odgovorni antropogeni procesi poput prekomjernog iskorištavanja prirodnih površina, regulacije toka rijeka te emisije stakleničkih plinova, međutim područje istraživanja ovaj put obuhvaća Njemačku te ostale zemlje u Europi. BECKER I GRÜNEWALD (2003) u svome radu opisuju rizik od poplava u središnjoj Europi. Oni se također dotiču tematike klimatskih promjena, ali i predlažu neke od mjera zaštita od poplava poput gradnje retencijskih bazena u koje bi se prilikom poplave izlio višak vode koji bi u protivnom prouzročio štetu u naseljenom mjestu.

O povećanju broja poplava svjedoči i broj zabilježenih poplavnih događaja na slivu rijeke Save zabilježenih u razdoblju od 1824. godine do 2014. godine (slika 13). Mjere zaštita od poplava koje su provedene na području sliva rijeke Save obuhvaćaju nasipe poput onog u Zagrebu koji je dimenzioniran za povratni period poplave od 1000 godina, dok zaštitni sustav srednje Posavine čine prirodne retencije poput Lonjskog polja, Mokrog polja, Kupčine, Zelenika i Jantaka.



Slika 13. Broj zabilježenih poplavnih događaja na slivu rijeke Save zabilježenih u razdoblju od 1824. godine do 2014. godine.

Preuzeto iz:

http://www.savacommission.org/dms/docs/dokumenti/sfrmp_micro_web/sfrmp_draft/sava_flood_risk_management_plan_draft_-_cro.pdf

5. MATERIJALI I METODE

Prikupljanje te obrada podataka predstavljali su prvi korak prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Glavna metoda prilikom uočavanja mogućih promjena u prostornom smještaju meandara rijeke Save bila je usporedba starih karata, izrađenih tokom 18. i 19. stoljeća, s recentnim satelitskim snimkama. Prva karta korištena pri prikupljanju podataka je karta Slawonische Militärgrenze (1780) gdje je prikazana vojna granica tadašnje Habsburške Monarhije i Osmanskog carstva. Iduća karta korištena za svrhu prikupljanja podataka u sklopu ovog rada bila je Habsburgermonarchie (1869 – 1887).

Prvi korak pri sakupljanju rezultata bio je izdvajanje pojedinih sektora meandara između Slavanskoga Broda i sela Račinovci, kao što je učinjeno u radu GOMES et al. (2018), a zatim se vršilo preklapanje starih karata sa satelitskim snimkama. Zaključno, rezultati su prikazani u obliku slika uz koje su priloženi opisi i interpretacije eventualnih migracija.

Prilikom procjene rizika od poplava koristili su se podaci o protoku prikupljeni na trima hidrološkim postajama: Slavonski Brod, Županja stepenica i Gunja. Podaci o protocima na spomenutim postajama dostupni su na internet stranici Državnog hidrometereološkog zavoda. Sve tri postaje nalaze se na području između Slavanskog Broda i Račinovaca. Naime, na istraživanom području postoje još i hidrološke postaje Slavonski Šamac i Slavonski Šamac most, međutim navedene postaje nemaju zabilježene podatke o protoku stoga im mjerenja nisu ukopljena u rezultate. Nadalje, prikupljene su vrijednosti najvećih protoka u proteklih pedeset godina, dakle počevši od 1970. godine, te su se računali intervali i vjerojatnosti pojavljivanja za iste. Navedeni parametri računali su se upotrebom dviju jednadžbi (slika 14). Prikupljeni podaci zaključno su navedeni u excel tablicama i grafikonima izraženima za svaku hidrološku postaju. Hidrološka postaja Slavonski Brod nije mjerila protoke od 1993. do 2004. godine stoga je efektivan raspon mjerenja protoka te postaje u ovom radu zapravo 40 godina. Zaključno, valja napomenuti kako hidrološka postaja Gunja s radom počinje tek 2012. godine. Stoga, treba imati na umu kako vrijednosti intervala i vjerojatnosti pojavljivanja dobivene iz podataka spomenute hidrološke postaje nisu reprezentativne poput onih dobivenih iz hidroloških postaja Slavonski Brod te Županja stepenica.

$$T = \frac{(N + 1)}{m}$$

$$P = \frac{1}{T} * 100\%$$

Slika 14. Jedandžbe korištene pri odredbi intervala pojavljivanja (T) i vjerojatnosti pojavljivanja pojedinih maksimalnih godišnjih protoka (P). U navedenim jednadžbama m označava rang protoka (m=1 označava najveći), dok N označava broj mjerenja odnosno broj godina.

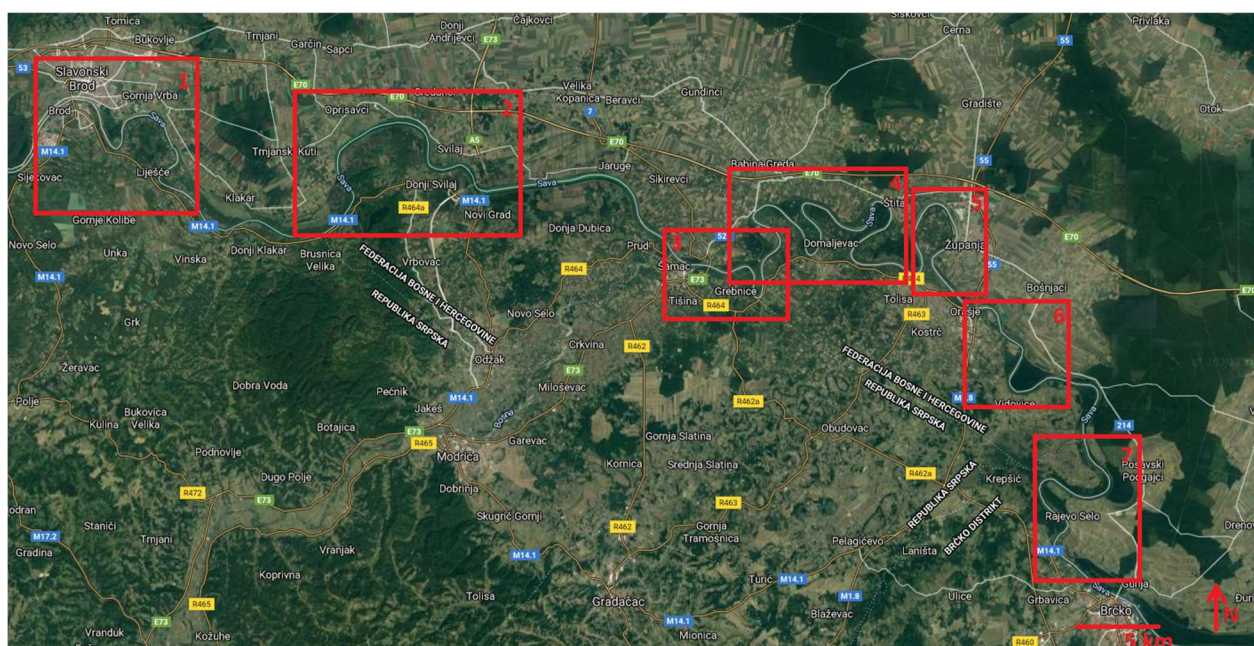
6. REZULTATI

6. 1. Migracija meandara rijeke Save

6. 1. 1. Razdioba istraživanog područja na pojedine sektore meandara

Radi jednostavnijeg prikazivanja dobivenih rezultata tok rijeke Save duž istraživanog područja bilo je potrebno podijeliti u nekoliko sektora, kao što je odrađeno u radu GOMES et al. (2018). Konkretno, u ovome radu riječ je o sedam sektora na kojima su se bilježile promjene u toku odnosno migracije meandara (slika 15).

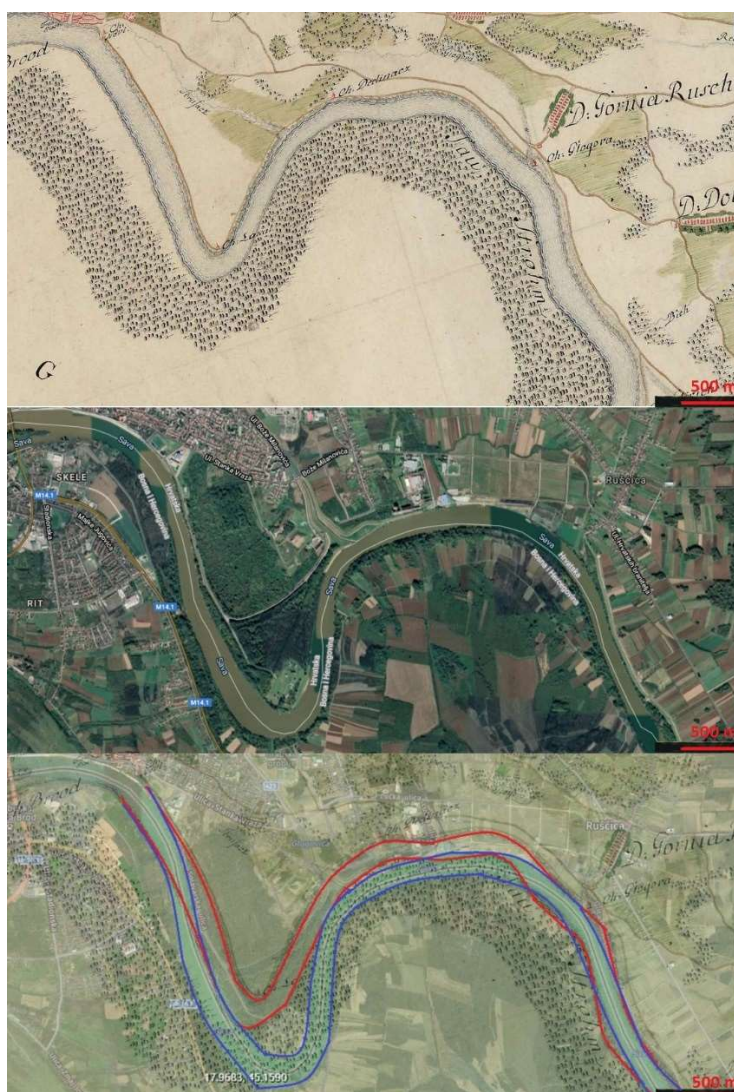
Rezultati preklapanja karte Slawonische Militärgrenze (1780) te modernih satelitskih snimaka prikazani su na slikama od 16 do 22. Radi lakšeg uočavanja migracija riječnog korita, crvenom bojom označeno je korito rijeke Save 1780. godine, dok je plavom bojom označeno korito kojime danas teče navedena rijeka. Također, nadodani su i nepreklopljeni isječci dviju karata obuhvaćenih u rezultatima, s ciljem boljeg pregleda istraživanog područja.



6. 1. 2. Promjene uočene na pojedinim sektorima

6. 1. 2. 1. Sektor 1

Sektor 1 obuhvaća dio toka rijeke Save u neposrednoj blizini Slavonskog Broda (slika 16). Promjene uočene prilikom proučavanja sektor 1 lako su uočljive. U ovome slučaju imamo dva meandra, od kojih jedan pokazuje nešto značajniji pomak prema jugoistoku dok drugi pokazuje nešto blaži pomak, također prema jugoistoku. Maksimalni pomak na ovome sektoru zabilježen je na prvom meandru te iznosi otprilike 500 m, tip migracije po GHINASSI et al. (2014) bila bi translacija s rotacijom.



Slika 16. Migracija meandara unutar sektora 1. Korito rijeke Save 1780. godine, označeno crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom. (izmijenjeno prema <https://mapire.eu/de/>, 2020).

6. 1. 2. 2. Sektor 2

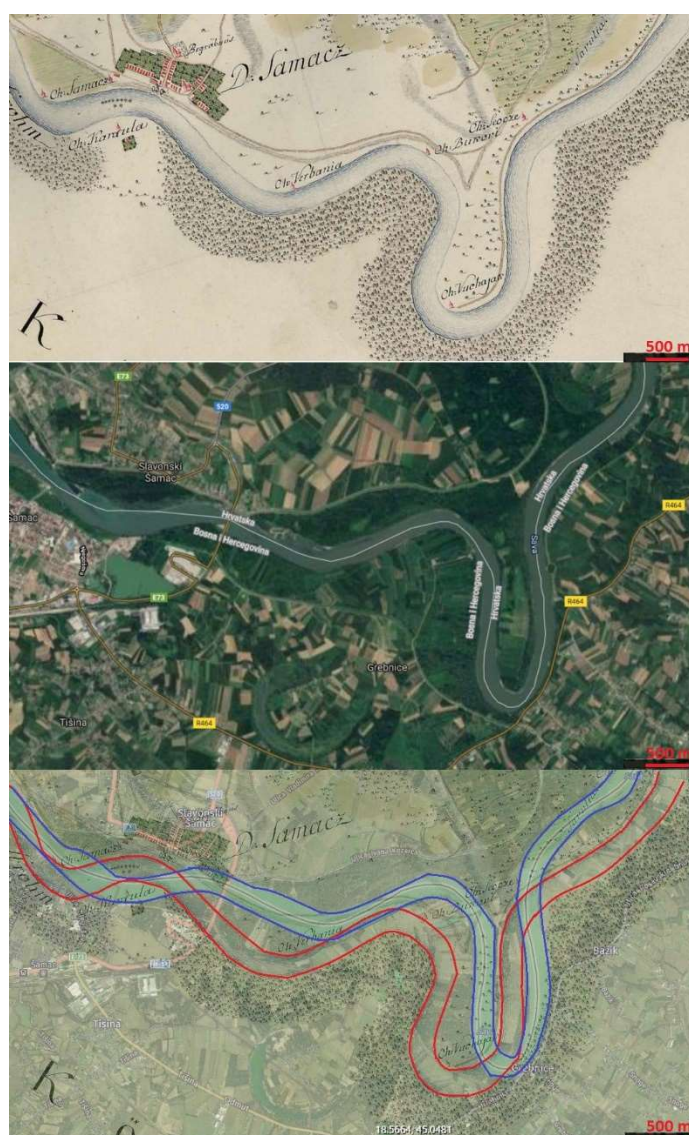
Idući od sektora meandara, sektor 2, pokazuje mnogo blaže promjene koje su postale uočljive tek nakon preklapanja karata (slika 17). Morfologija toka uzvodno nije se znatno promijenila u ovome slučaju, no ipak jedan meandar u nizvodnom dijelu sektora pokazuje južni trend migracije koja bi po GHINASSI et al. (2014) bila proglašena translacijom. Pomak ove migracije iznosi otprilike 600 metara.



Slika 17. Migracija meandara unutar sektora 2. Korito rijeke Save 1780. godine, označeno crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom. (izmijenjeno prema <https://mapire.eu/de/>, 2020).

6. 1. 2. 3. Sektor 3

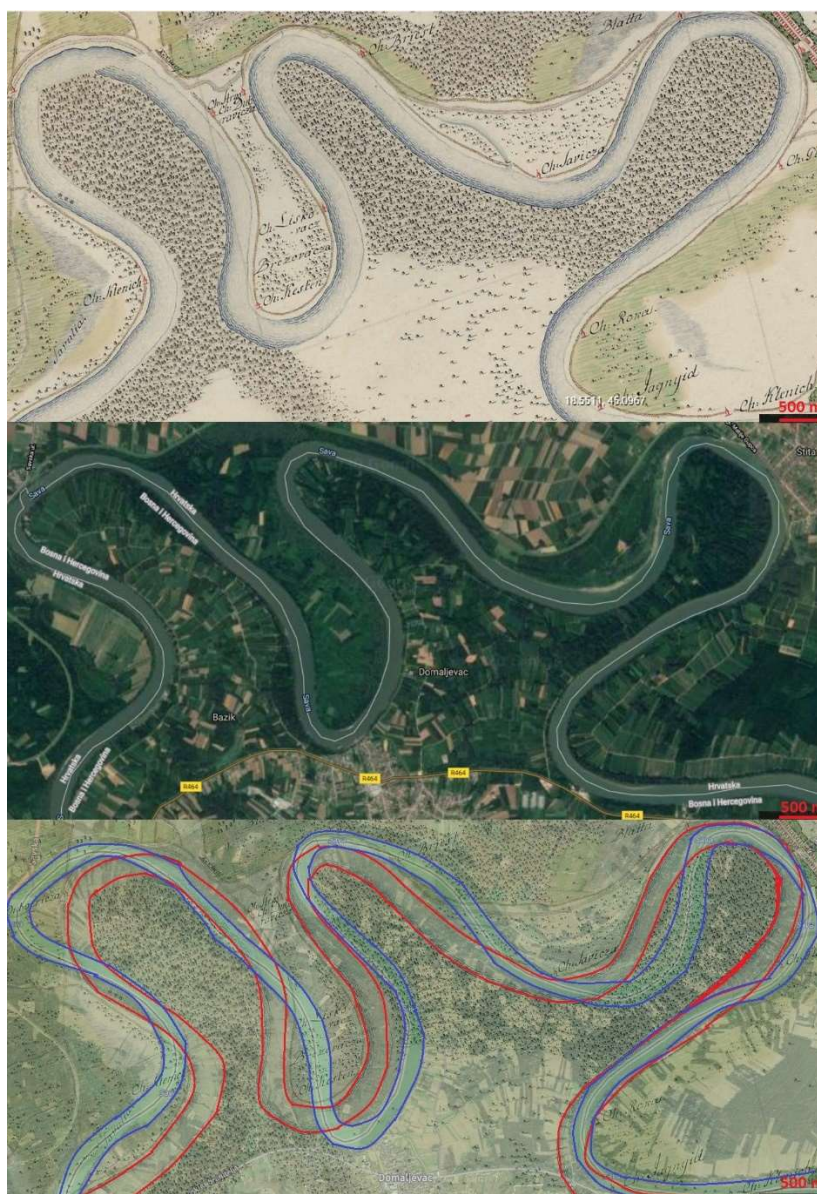
Treći sektor po redu nalazi se nizvodno u blizini mjesta Slavonski Šamac te pokazuje jasno vidljive promjene u toku na istraživanom području (slika 18). Najveći meandar ovog sektora migrira sjeveroistočno uz veliko povećanje zavojitosti. Također, na satelitkoj snimci trećeg sektora vidljiva je presušena mrtvaja koja se nalazi jugozapadno od recentnog toka rijeke što isto tako indicira na sjeveroistočni trend migracije. Maksimalni pomak na ovome sektoru iznosi 750 m, a tipovi migracije po GHINASSI et al. (2014) variraju od translacije do translacije s rotacijom.



Slika 18. Migracija meandara unutar sektora 3. Korito rijeke Save 1780. godine, označeno crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom. (izmijenjeno prema <https://mapire.eu/de/>, 2020).

6. 1. 2. 4. Sektor 4

Sektor 4 sadrži najveći broj meandara obuhvaćenih u pojedinom sektoru opisanom u ovome radu (slika 19). Meandri ovog sektora pokazuju različite smjerove migriranja, prvih nekoliko u uzvodnom dijelu sektora pokazuju trend migracije u smjeru zapada, dok oni u nizvodnom dijelu pokazuju blagi trend migracije na istok. Maksimalni pomak na ovome sektoru iznosi 700 m, a tipovi migracije po GHINASSI et al. (2014) također variraju od translacije do translacije s rotacijom.



Slika 19. Migracija meandara unutar sektor 4. Korito rijeke Save 1780. godine, označeno crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom. (izmijenjeno prema <https://mapire.eu/de/>, 2020).

6. 1. 2. 5. Sektor 5

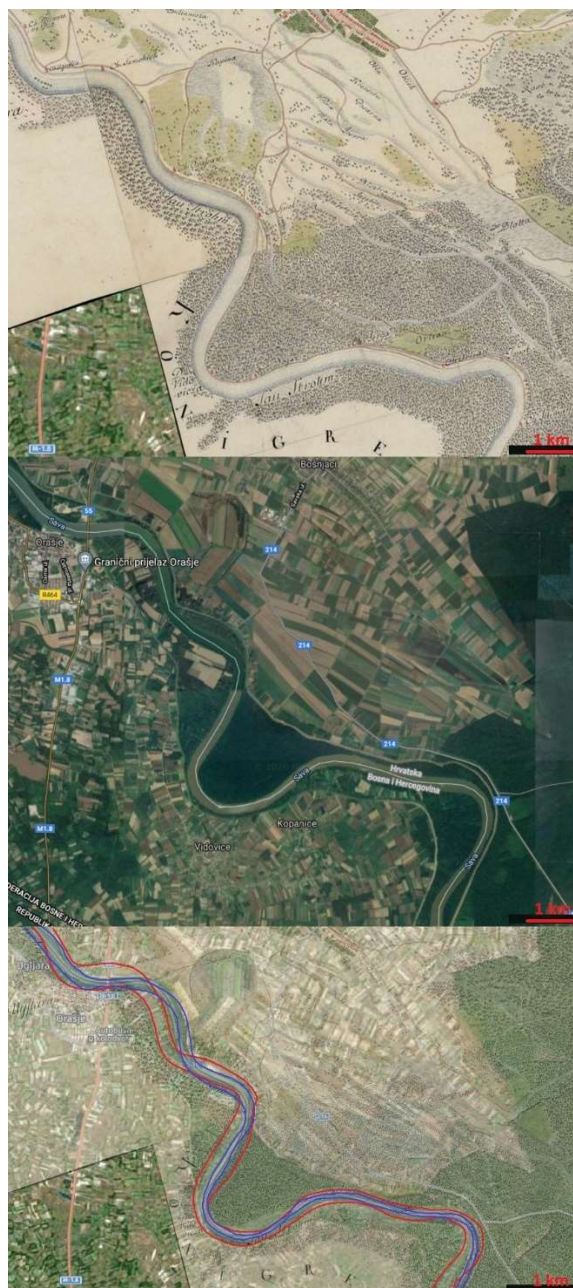
Sektor 5 najjednostavniji je sektor proučen u ovom radu (slika 20). Svejedno, valja ga spomenuti jer bi u skorijoj geološkoj budućnosti u ovome sektoru moglo doći do probijanja „vrata“ meandra te samim time stvaranja mrtvaje. Također, na staroj karti lako uočavamo riječne prudove koji su naknardno akrecijom sedimenta spojeni s obalom. Migracija toka rijeke u ovome sektoru nije lako uočljiva, međutim preklapanjem karte dobivamo rezultate o blagoj sjeveroistočnoj migraciji. Maksimalni pomak na ovome sektoru iznosi približno 400 m, a tip migracije po GHINASSI et al. (2014) je ekspanzija.



Slika 20. Migracija meandara unutar sektora 5. Korito rijeke Save 1780. godine, označeno crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom. (izmijenjeno prema <https://mapire.eu/de/>, 2020).

6. 1. 2. 6. Sektor 6

Sektor 6 obuhvaća nešto šire područje nizvodno od sektora 5 (slika 21). Unatoč slabo vidljivim promjenama, jedan od meandara pokazuje blagu migraciju u smjeru istoka. Maksimalni pomak na ovome sektoru iznosi otprilike 500 m, a tip migracije po GHINASSI et al. (2014) je ekspanzija s blagom rotacijom pojedinih meandara.



Slika 21. Migracija meandara unutar sektora 6. Korito rijeke Save 1780. godine, označeno crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom. (izmijenjeno prema <https://mapire.eu/de/>, 2020).

6. 1. 2. 7. Sektor 7

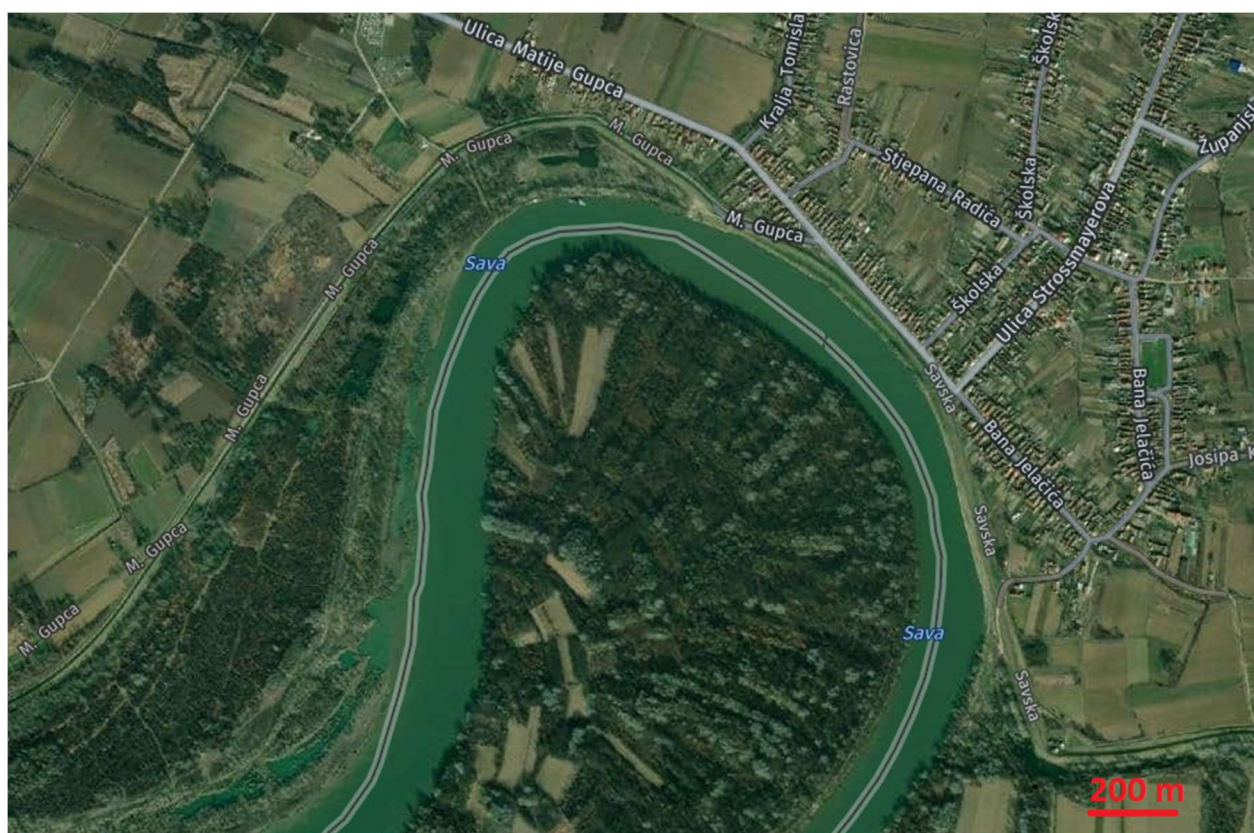
Posljednji u nizu sektora meandara je sektor 7, koji obuhvaća nekoliko meandara u neposrednoj blizini Rajevog Sela gdje je 2014. godine došlo do puknuća nasipa i izlivanja rijeke (slika 22). Dva meandra sjeverno od Rajevog Sela pokazuju vrlo očitu migraciju u smjeru juga. Osim toga, jedan meandar uzvodno od Rajevog Sela pokazuje blag oblik migracije prema jugu. Maksimalni pomak na ovome sektoru iznosi otprilike 1300 m, a tip migracije po GHINASSI et al. (2014) je translacija.



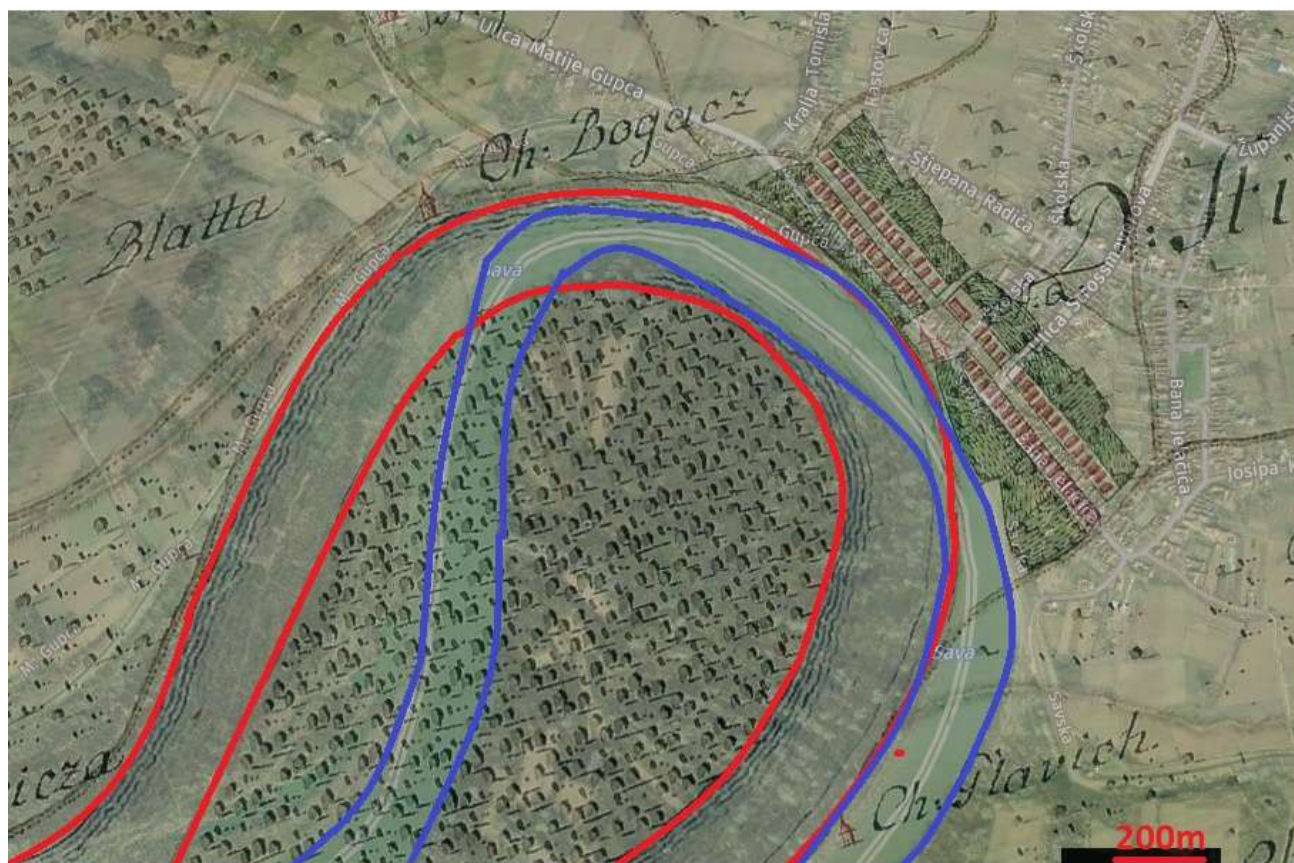
Slika 22. Migracija meandara unutar sektora 7. Korito rijeke Save 1780. godine, označeno crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom. (izmijenjeno prema <https://mapire.eu/de/>, 2020).

6. 1. 3 Problematika mjesta Štitar

Prilikom uočavanja mogućih kretanja meandara rijeke Save uočena je zabrinjavajuća situacija koja bi mogla predstavljati geološki hazard u bližoj budućnosti. Naime, radi se o naseljenom mjestu Štitar koje se nalazi na samoj obali rijeke Save uzvodno od Županje (slika 23). Pojedini meandri rijeke Save pa tako i meandar na čijoj se obali nalazi Štitar u posljednjih 240 godina pokazuju sjevero-istočni trend migracije. Imajući to na umu preklopljene su karta Slawonische Militärgrenze (1780) i moderna satelitska snimka, također, radi lakšeg prepoznavanja promjena u toku crvenom bojom označeno je korito rijeke Save kartirano 1780. godine, dok je plavom bojom označen recentan tok na satelitskoj snimci (slika 24). Iz rezultata dobivenih preklapanjem vidljivo je kako je u nekim dijelovima korito migriralo i nekoliko stotina metara. Riječna erozija koja migrira sjevero-istočno s pripadajućim meandrom mogla bi prouzročiti nestabilnost ili urušavanje nasipa neposredno iza kojeg nalaze se naseljeni objekti. Također dodatnu nestabilnost nasipa izazivaju i veliki protoci rijeke Save koji su pokazuju sezonalnost.



Slika 23. Geografski smještaj naseljenog mjesta Štitar (preuzeto s: <https://mapire.eu/de/>, 2020)



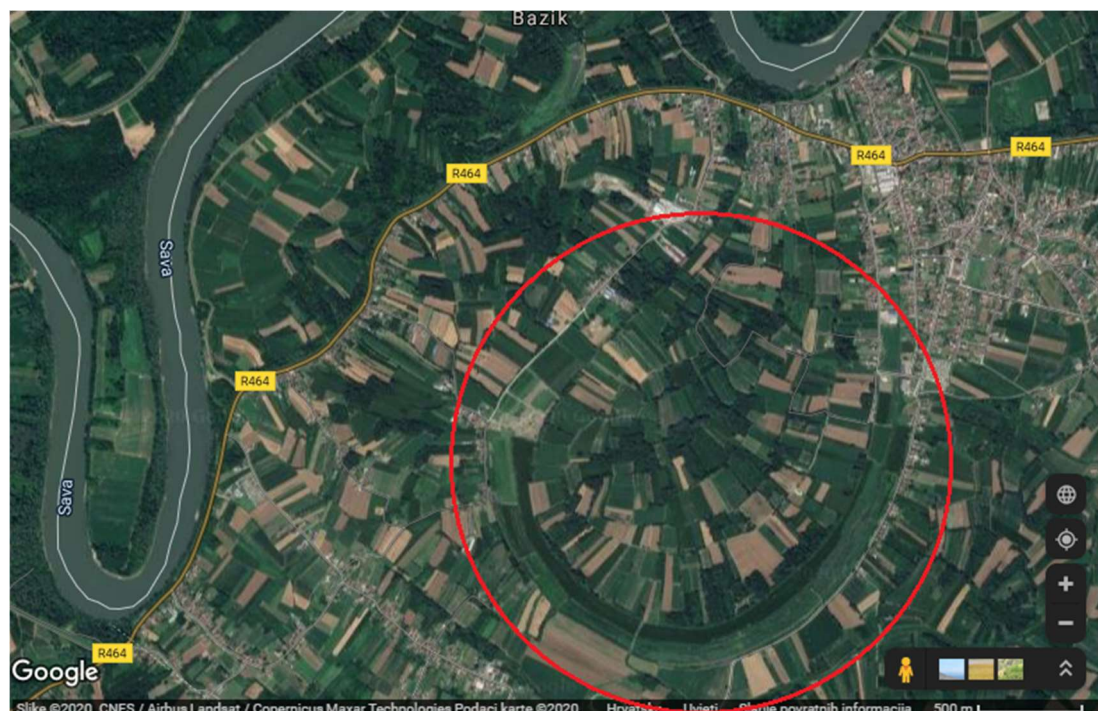
Slika 24. Riječno korito Save kartiran 1780. godine (označen crvenom bojom), te recentno korito rijeke Save (označen plavom bojom) (izmijenjeno iz <https://mapire.eu/de/>, 2020)

6. 1. 4. Dokazi starijih migracija meandara

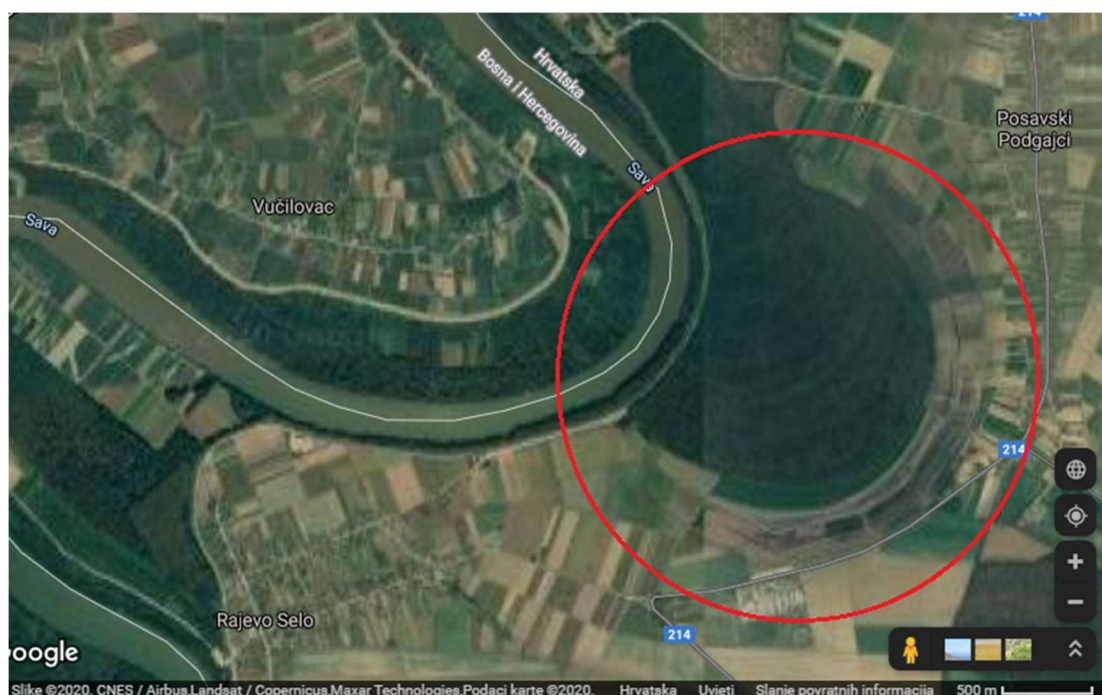
Duž istraživanog područja nalazi se nekoliko lako uočljivih dokaza o znatno starijim migracijama meandara rijeke Save. Naime, radi se o presušanim mrtvajama koje je prilikom terenskih istraživanja teže uočiti premda su vrlo dobro vidljive na satelitskim snimkama, čiji su isječci prikazani na slikama 25, 26 i 27.



Slika 25. Presušena mrtvaja broj 1, označena crvenom bojom. (izmijenjeno iz <https://www.google.hr/maps>, 2020).



Slika 26. Presušena mrtvaja broj 2, označena crvenom bojom. (izmijenjeno iz <https://www.google.hr/maps>, 2020).



Slika 27. Presušena mrtvaja broj 3, označena crvenom bojom. (izmijenjeno iz <https://www.google.hr/maps>, 2020)

Također, prilikom usporedbe starijih karata s modernim satelitskim snimkama uočena je vrlo zanimljiva distribucija šuma uz rijeku Savu koja je dobro vidljiva na prvom, drugom i trećem sektoru. Spomenute šume vrlo se vjerojatno podudaraju s konturama starijih korita koja nikad nisu kartirana (slike 16, 17 i 18). Spomenute šume mogu poslužiti kao još jedan dokaz mnogo starijih migracija rijeke Save.

6. 2. Procjena rizika od poplava

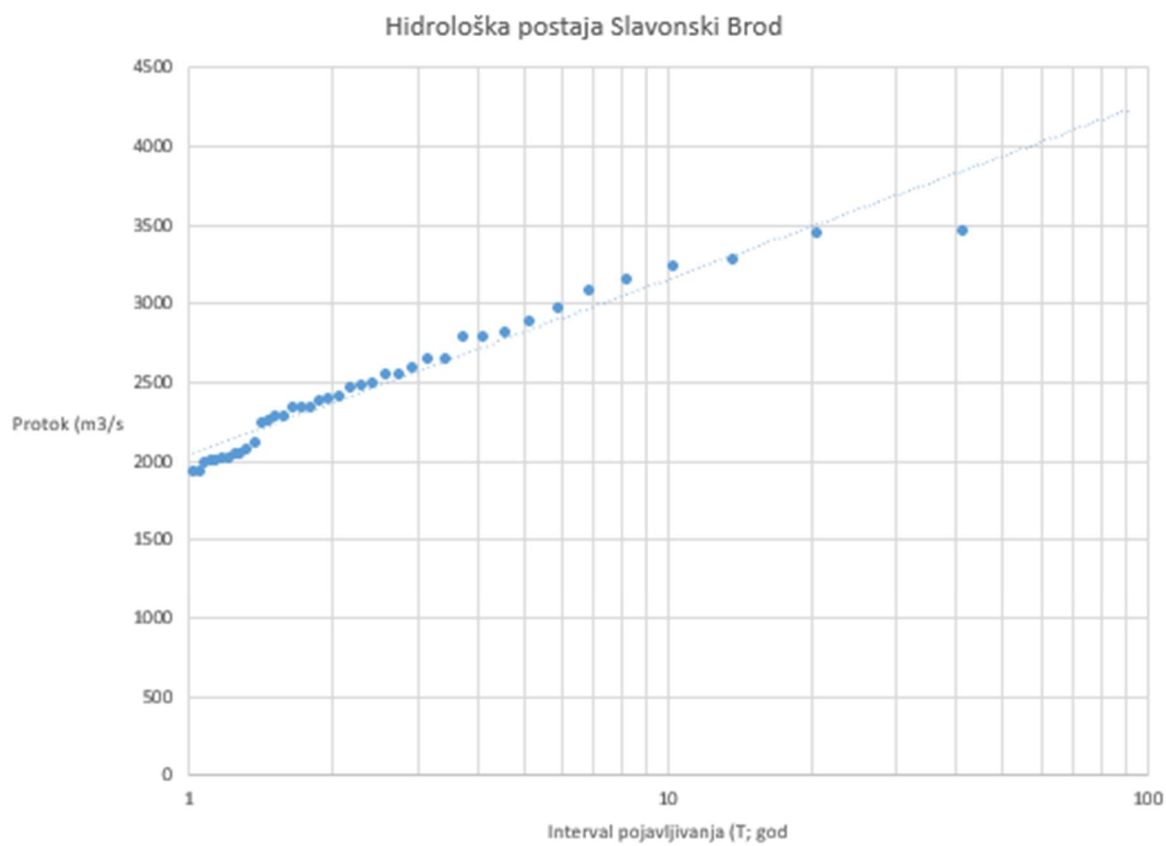
6. 2. 1. Hidrološka postaja Slavonski brod

Prilikom dobivanja rezultata, s ciljem procjene rizika od poplava na užem području koje pokriva hidrološka stanica Slavonski Brod, korišteni su zapisi najvećih godišnjih protoka počevši od 1970. godine, a zaključno s 2019. godinom. Kao što je već objašnjeno u poglavlju Materijali i metode, za procjenu rizika od poplava potrebno je izračunati intervale i vjerojatnosti pojavljivanja pojedinih protoka. Prethodno sakupljeni podaci su prvo rangirani od najvećeg godišnjeg protoka prema najmanjem zabilježenom. Rezultati hidrološke postaje Slavonski Brod prikazani su u tablici 1 te slici 28.

Tablica 1: Vrijednosti intervala pojavljivanja (T) izraženih u godinama te vjerojatnosti pojavljivanja (P) izraženih u postotcima dobivenih iz podataka sakupljenih na hidrološkoj postaji Slavonski Brod.

Hidrološka postaja Slavonski Brod				
Rang	Maksimalni protok (m ³ /s)	Interval pojavljivanja (T/god)	Vjerojatnost (P/%)	N+1
1	3469	41.0000	2.4390	41
2	3460	20.5000	4.8780	
3	3283	13.6667	7.3171	
4	3247	10.2500	9.7561	
5	3165	8.2000	12.1951	
6	3094	6.8333	14.6341	
7	2981	5.8571	17.0732	
8	2894	5.1250	19.5122	
9	2825	4.5556	21.9512	
10	2799	4.1000	24.3902	
11	2793	3.7273	26.8293	
12	2657	3.4167	29.2683	
13	2650	3.1538	31.7073	
14	2594	2.9286	34.1463	
15	2558	2.7333	36.5854	
16	2556	2.5625	39.0244	
17	2507	2.4118	41.4634	
18	2491	2.2778	43.9024	
19	2479	2.1579	46.3415	
20	2412	2.0500	48.7805	
21	2408	1.9524	51.2195	
22	2395	1.8636	53.6585	
23	2350	1.7826	56.0976	
24	2345	1.7083	58.5366	
25	2343	1.6400	60.9756	
26	2296	1.5769	63.4146	
27	2285	1.5185	65.8537	
28	2260	1.4643	68.2927	
29	2255	1.4138	70.7317	
30	2125	1.3667	73.1707	
31	2082	1.3226	75.6098	
32	2058	1.2813	78.0488	
33	2049	1.2424	80.4878	
34	2027	1.2059	82.9268	
35	2023	1.1714	85.3659	
36	2016	1.1389	87.8049	
37	2013	1.1081	90.2439	
38	2001	1.0789	92.6829	
39	1943	1.0513	95.1220	
40	1941	1.0250	97.5610	

Podaci preuzeti s internet stranice DHMZ-a (<https://hidro.dhz.hr>).



Slika 28. Grafički prikaz intervala pojavljivanja maksimalnih godišnjih protoka hidrološke postaje Slavonski Brod.

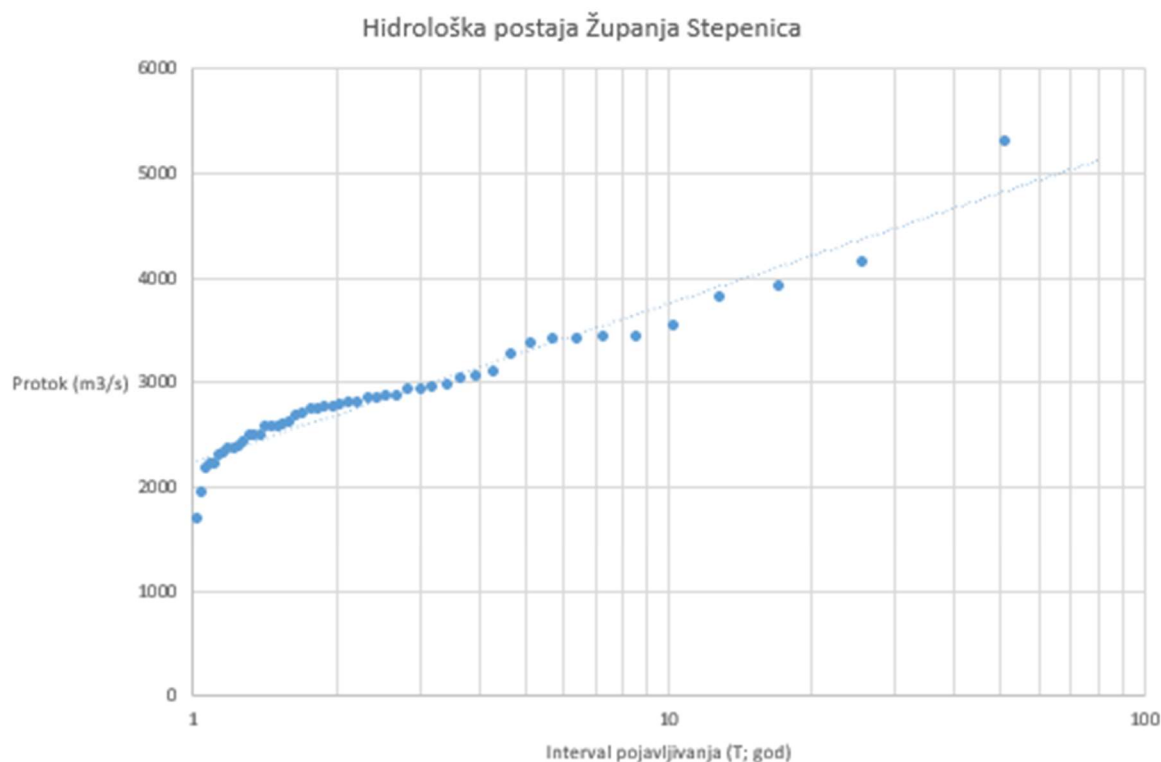
6. 2. 2. Hidrološka postaja Županja

Vrijednosti intervala pojavljivanja (T) te vjerojatnosti pojavljivanja (P) za uže područje obuhvaćeno mjerenjima hidrološkom postajom Županja stepenica dobiveni su koristeći se identičnim metodama kao i prilikom obrade podataka hidrološke stanice Slavonski Brod, a izneseni su u Tablici 2 i slici 39.

Tablica 2: Vrijednosti intervala pojavljivanja (T) izraženih u godinama te vjerojatnosti pojavljivanja (P) izraženih u postotcima dobivenih iz podataka sakupljenih na hidrološkoj postaji Županja stepenica.

Maksimalni protok postaja Županja Stepenica (m ³ /s)					
Godina	Rang	Maksimalni protok (m ³ /s)	Interval pojavljivanja (T/god)	Vjerojatnost (P/%)	N+1
2014	1	5317	51.0000	1.9608	51
1970	2	4154	25.5000	3.9216	
1974	3	3929	17.0000	5.8824	
1981	4	3821	12.7500	7.8431	
2013	5	3560	10.2000	9.8039	
2018	6	3451	8.5000	11.7647	
2004	7	3447	7.2857	13.7255	
2016	8	3435	6.3750	15.6863	
2010	9	3433	5.6667	17.6471	
1991	10	3378	5.1000	19.6078	
1999	11	3273	4.6364	21.5686	
1987	12	3118	4.2500	23.5294	
2000	13	3071	3.9231	25.4902	
1994	14	3050	3.6429	27.4510	
1993	15	2988	3.4000	29.4118	
2005	16	2972	3.1875	31.3725	
1972	17	2947	3.0000	33.3333	
1980	18	2944	2.8333	35.2941	
2015	19	2887	2.6842	37.2549	
1985	20	2875	2.5500	39.2157	
1996	21	2858	2.4286	41.1765	
2006	22	2855	2.3182	43.1373	
2017	23	2830	2.2174	45.0980	
1984	24	2827	2.1250	47.0588	
1995	25	2798	2.0400	49.0196	
1988	26	2788	1.9615	50.9804	
2001	27	2776	1.8889	52.9412	
2009	28	2756	1.8214	54.9020	
1976	29	2755	1.7586	56.8627	
1979	30	2722	1.7000	58.8235	
1983	31	2694	1.6452	60.7843	
1982	32	2622	1.5938	62.7451	
1978	33	2603	1.5455	64.7059	
2008	34	2586	1.5000	66.6667	
1989	35	2584	1.4571	68.6275	
1992	36	2584	1.4167	70.5882	
1986	37	2510	1.3784	72.5490	
1977	38	2509	1.3421	74.5098	
2002	39	2507	1.3077	76.4706	
2011	40	2441	1.2750	78.4314	
2007	41	2405	1.2439	80.3922	
1997	42	2384	1.2143	82.3529	
1971	43	2379	1.1860	84.3137	
1973	44	2338	1.1591	86.2745	
1998	45	2324	1.1333	88.2353	
1990	46	2226	1.1087	90.1961	
1975	47	2223	1.0851	92.1569	
2012	48	2200	1.0625	94.1176	
2019	49	1953	1.0408	96.0784	
2003	50	1710	1.0200	98.0392	

Podaci preuzeti s internet stranice DHMZ-a (<https://hidro.dhz.hr>).



Slika 29. Grafički prikaz intervala pojavljivanja maksimalnih godišnjih protoka hidrološke postaje Županja Stepenica.

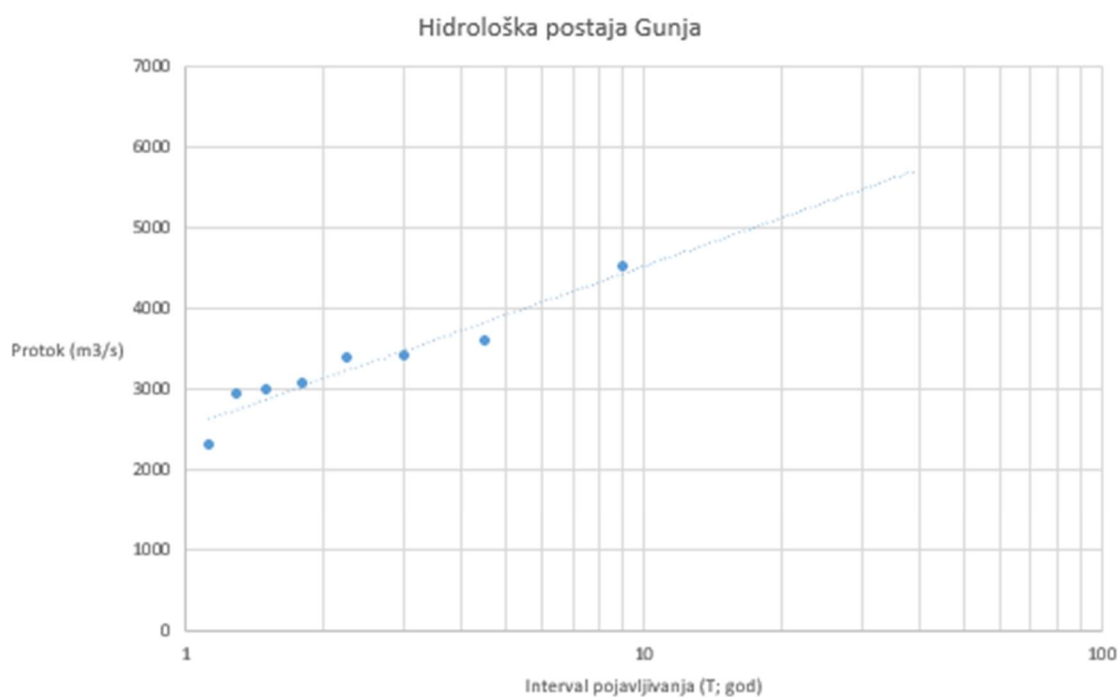
6. 2. 3. Hidrološka postaja Gunja

Posljednja hidrološka postaja čiji su podaci bili obrađeni te čije su vrijednosti intervala pojavljivanja (T) te vjerojatnosti pojavljivanja (P) bile izračunate je hidrološka postaja Gunja (tablica 3). Postaja mjeri podatke od kolovoza 2011. godine, stoga će prva referentna godina čija su mjerenja korištena pri izradi ovoga rada biti 2012. godina. Zbog svega navedenog preciznost dobivenih rezultata neće biti na razini rezultata prethodnih dviju postaja. Rezultati hidrološke postaje Gunja prikazani su u tablici 3 te slici 30.

Tablica 3: Vrijednosti intervala pojavljivanja (T) izraženih u godinama te vjerojatnosti pojavljivanja (P) izraženih u postotcima dobivenih iz podataka sakupljenih na hidrološkoj postaji Gunja.

Hidrološka postaja Gunja					
Godina	Rang	Maksimalni protok (m ³ /s)	Interval pojavljivanja (T/god)	Vjerojatnost (P/%)	N+1
2014	1	4527	9.0000	11.1111	9
2018	2	3614	4.5000	22.2222	
2013	3	3438	3.0000	33.3333	
2016	4	3400	2.2500	44.4444	
2019	5	3085	1.8000	55.5556	
2017	6	3000	1.5000	66.6667	
2015	7	2950	1.2857	77.7778	
2012	8	2321	1.1250	88.8889	

Podaci preuzeti s internet stranice DHMZ-a (<https://hidro.dhz.hr>).



Slika 30. Grafički prikaz intervala pojavljivanja maksimalnih godišnjih protoka hidrološke postaje Gunja.

7. RASPRAVA

7. 1. Migracija meandara rijeke Save

Kao što je već pojašnjeno u prethodnim poglavljima, tok rijeke Save na istraživanom području podijeljen je na 7 sektora radi lakšeg prezentiranja rezultata, a zatim su se na spomenutim sektorima preklapanjem karata bilježile migracije riječnog korita.

Prilikom usporedbe starih karata i satelitskih snimaka uočene su pojedine vrlo uočljive migracije, čiji pomak iznosi više stotina metara. Isto tako valja napomenuti kako postoje i dionice toka rijeke Save s gotovo nezamjetnim migracijama zabilježenim u proteklih 240 godina. Velik broj meandara u svim sektorima obrađenim u ovome radu pokazuju istočan do sjeveroistočan trend migracije, stoga možemo reći kako je upravo to usmjerenje migracija dominantno, premda neki od meandara u najistočnijim sektorima pokazuju južni trend migracije. Tipovi migracija prema GHINASSI et al. (2014) veoma su raznoliki, meandri sektora 6 i 7 isključivo se traslatiraju, meandar u sektoru 5 pokazuje ekspanziju, sektor 4 pokazuje sve tipove migracija na različitim meandrima, meandri prvog i trećeg sektora pokazuju traslaciju s blagom rotacijom, dok meandri drugog sektora pokazuju samo traslaciju.

Prilikom uočavanja promjena u Savinom toku na sektoru 4, pronađena je potencijalna rizična situacija gdje bi se u bližoj budućnosti naseljeno mjesto Štitar moglo naći na putu rijeke Save prilikom migracije meandra u neposrednoj blizini spomenutog mjesta. U tome slučaju riječna bi erozija mogla prouzrokovati nestabilnost i urušavanje tamošnjeg nasipa što bi prouzročilo poplavu kojom bi najviše pogođeno bilo mjesto Štitar, a i okolna mjesta ako je protok Save dovoljno velik u trenutku proboja nasipa.

Također, sektor 5, iako jednostavan, pokazao se vrlo zanimljivim jer predstavlja tipičan slučaj meandra na kojemu će doći do probijanja „vrata“ meandra u bližoj budućnosti kojime će doći do stvaranja mrtvaje na tom području.

Sektor 6 dobar nam je pokazatelj kako ne dolazi do značajnih promjena na svakom dijelu toka rijeke Save.

Prosječni maksimalni pomak svih sektora proučenih u ovome radu iznosi 678,57 m. Prosječnu maksimalnu godišnju stopu erozije u iznosu od 2,82 m dobivamo dijeljenjem prethodno izračunatog prosječnog maksimalnog pomaka s brojem godina proteklih od izrade starije karte zaključno s 2020. godinom (240 godina). Iz prethodnog zaključujemo kako bi se naseljena mjesta poput Štitara, Rajevog Sela i Županje u narednih 100 do 200 godina mogla naći na putu rijeci Savi što bi moglo rezultirati napuštanjem spomenutih mjesta koja u tom slučaju više nebi bila pogodna za život.

Zaključno, usporedbom rezultata objavljenih u GOMES et al. (2018) i rezultata dobivenih u ovome radu, očito je kako je rijeka Mamorecillo mnogo aktivnija od rijeke Save u smislu migracije meandara, premda je i rijeka Sava u posljednjih 240 godina pokazala određenu aktivnost i zamjetne promjene u svojem toku.

7. 2. Procjena rizika od poplava

Analizom dobivenih rezultata vezanih za procjenu rizika od poplava, evidentan je veliki raspon vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka na istraživanom području u zadnjih 50 godina. Rezultati svih hidroloških postaja jasno prikazuju kako je upravo 2014. godina bila rekordna godina u vidu maskimalnih godišnjih protoka, što je i logično povežemo li vrijednosti protoka s velikom poplavom koja je 2014. godine pogodila istraživano područje. Rekordan protok od 5317 m³/s zabilježen je upravo na hidrološkoj postaji Županja stepenica 2014. godine, dok protoci hidroloških postaja Slavonski Brod i Gunja iznose 3469 m³/s i 4527 m³/s.

Pogledamo li vrijednosti intervala i vjerojatnosti pojavljivanja za 2014. godinu, oni iznose 51 godinu i 1,96 % na hidrološkoj postaji Županja, 41 godinu i 2,43 % na hidrološkoj postaji Slavonski Brod i 9 godina te 11,11 % na hidrološkoj postaji Gunja. Međutim, kao što je već izneseno u poglavlju rezultati, podaci hidrološke postaje Gunja nisu statistički reprezentativni jer se temelje na manjem broju mjerenja. Lako je zaključiti kako pouzdanost izračunatih intervala i vjerojatnosti pojavljivanja leži zapravo u broju mjerenja odnosno u broju radnih godina pojedine hidrološke postaje, stoga hidrološka postaja Županja stepenica predstavlja najreprezentativnije rezultate obuhvaćene u ovom diplomskom radu.

Unatoč niskim izgledima ponovnog pojavljivanja velike poplave 2014., rizik od poplava zasigurno postoji. Sve dulji sušni periodi, ali i sve veći intenzitet padalina negativne su

posljedice klimatskih promjena te je lako zaključiti kako će u narednim godinama rizik od poplava u fluvijalnim okolišima rasti diljem svijeta, a ne samo na istraživanom području.

Na istraživanom području izgrađeni su nasipi kao mjera zaštite od poplava, međutim upravo je pucanje nasipa na dva mjesta rezultiralo velikom poplavom 2014. godine, što svjedoči o nesavršenosti spomenute metode. Zaključno, valja napomenuti kako mjere za smanjenje opasnosti od poplava u uzvodnim dijelovima toka često povećavaju rizik od istih nizvodno.

8. ZAKLJUČAK

Promjene u prostornom smještaju meandara rijeke Save tokom proteklih 240 godina ne možemo prozvati drastičnima. Međutim, to ne umanjuje činjenicu da su neke od njih vrlo dobro vidljive prilikom preklapanja starih karata i modernih satelitskih snimaka. Prevladavajući trend migracija Savinih meandara je istočan do sjeveroistočan, premda nekoliko meandara pokazuje migraciju u smjeru juga. Presušene mrtvaje koje nalazimo uz tok rijeke Save na istraživanom području svjedoče o nekadašnjim migracijama koje čak ni starije karte ne obuhvaćaju. Također, na jednom od sektora meandara predviđeno je probijanje „vrata“ meandra u skorijoj budućnosti čime će se stvoriti mrtvaja.

Pomnom analizom podataka vezanih za procjenu rizika od poplava lako je zaključiti kako na istraživanom području definitivno prijeti ovaj oblik geološkog hazarda. Vrijednosti intervala i vjerojatnosti pojavljivanja velike poplave poput one 2014. godine ukazuju kako je šansa za tako velik protok poprilično mala, no ipak postoji. Rizik od poplava tokom godina zasigurno će rasti, kao posljedica klimatskih promjena koje dolaze u obliku dugih sušnih perioda popraćenih intenzivnim padalinama. Imajući to na umu, potrebno je dodatno osigurati ugrožena područja uz rijeku Savu kako bi iduća velika poplava prouzročila što manju moguću štetu.

Zaključno, nakon provedenog istraživanja na području između Slavanskog Broda i Račinovaca dobiva se uvid kako se ovdje radi o jednom kompleksnom, dinamičnom te u smislu poplava vrlo krhkom području.

9. REFERENCE

BALUN, F. (2016): Strukturna analiza neotektonske aktivnosti u istočnom dijelu Slavonsko-srijemske depresije. Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 46 str.

BARIŠIĆ, M. (1986): O strukturnim odnosima miocenskih naslaga i temeljnih stijena u Slavonsko-srijemskoj potolini. Nafta 37/12, Zagreb, str. 603–614.

BECKER A. & GRÜNEWALD, U. (2003): Disaster management: Flood risk in Central Europe. Science 300, Page 1099.

BRICE, J.C. (1974): Evolution of meander loops. Bull. Geol. Soc. Am., 85, pages 581–586.

BRONSTERT, A. (2003): Floods and Climate Change: Interactions and Impacts. Risk Analysis Volume 23, Issue 3, June 2003 Pages 545–557.

COURTNEY, C. (2018): The Nature of Disaster in China: The 1931 Yangzi River Flood (Studies in Environment and History). Cambridge University Press, 304 pages.

CRNKOVIĆ, B. & BUŠIĆ, M. (1970): Mineraloško-petrografski nanos rijeke Save. [Mineralogical-petrological sediments of river Sava – in Croatian].– Zbornik radova Rud. Geol. Naftnog fakulteta. Sveučilišta u Zagrebu u povodu 30 god. rada (1939–1969), str 133–140.

DANIEL, J.F. (1971): Channel movement of meandering Indiana streams. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 732A, pages 1–18.

FELJA, I. (2020.): Rijeke – problemi, erozija i poplave. Predavanja iz kolegija Geologija zaštite okoliša.

FERREIRA DA SILVA, A. M (2006): On why and how do rivers meander. Journal of Hydraulic Research. Volume 44, pages 579–590.

GALOVIĆ, I., BUZALJKO, R. & BRKIČ, M. (1979): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000. Tumač za list Vinkovci. Geoloski zavod Zagreb 1987. i "Geoinženjering" OOUR Institut za geologiju Sarajevo.

GHINASSI, M., NEMEC, W., ALDINUCCI, M., NEHYBA, S., OZAKSOY, V. & FINDOLINI, F (2014): Plan-form evolution of ancient meandering rivers reconstructed from longitudinal outcrop sections. *Sedimentology*, June 2014, Vol-61, Issue-4, Pages 952–977.

GOMES, C. H., SPERANDIO, D.G. & DESSART, R.L. (2018): Remote Sensing analysis of the meanders migration in the Mamorecillo River between 1985 and 2012, Bolivia. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, January 2018, Vol-5, Issue-4, Pages 221–228.

GORJANOVIĆ-KRAMBERGER, D. (1913): Fosilni rinocerotidi Hrvatske i Slavonije, s obzirom na *Rhinoceros Mercki* iz Krapine: sa 13 tabula. *Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti*, Zagreb, 133 str.

GRIMMER, I. (1899): Nalazišta ugljena po Bosni i Hercegovini. *GZM. Sv. 2. 1899. Str. 397–479.*

GRGIĆ, L. (2020): Dinamika vodostaja rijeke Save i poplava na području Posavine. *Završni rad*, Šumarski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 27 str.

HERNITZ, Z. (1983): Dubinski strukturno – tektonski odnosi u području istočne Slavonije, Nafta, Zagreb, 221 str.

JACKSON, R.G. (1976): Depositional model of point bars in the lower Wabash River. *J. Sed. Petrol.*, 46, pages 579–594.

JULIEN, P. Y. (2002): *River Mechanics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 456 pages.

KASPEREK, R. (2015): Changes in the Meandering Upper Odra River as a Result of Flooding Part I. Morphology and Biodiversity. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 24, No. 6 (2015), pages 2459–2465.

KNOX, J. (1993): Large increases in flood magnitude in response to modest changes in climate. *Nature* 361, pages 430–432.

KOPIĆ, J. (2016): Određivanje specifične ranjivosti vodonosnika u priljevnom području regionalnog crpilišta "Istočna Slavonija". *Disertacija*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 197 str.

LEOPOLD, L. B. & WOLMAN, G. (1960): River meanders. Bulletin of the Geological society of America vol. 71., pages 769–794.

PAVELIĆ, D. (1998): Taložna evolucija slatkovodnog donjeg i srednjeg miocena sjeverne Hrvatske na temelju analize facijesa. Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 149 str.

PAVELIĆ, D. (2001): Tectonostratigraphic model for the North Croatian and North Bosnian sector of the Miocene Pannonian Basin System. Basin Research 13, Pages 359–376.

PAVELIĆ, D. & KOVAČIĆ, M. (2018): Sedimentology and stratigraphy of the Neogene rift-type North Croatian Basin (Pannonian Basin System, Croatia). Marine and petroleum geology 91, pages 455–469 .

PLATE, E. J. (2002): Flood risk and flood management. October 2002. Journal of Hydrology 267 (1-2): pages 2–11.

PRELOGOVIĆ, E., JAMIČIĆ, D., ALJINOVIĆ, B., VELIĆ, J., SAFTIĆ B. & DRAGAŠ, M. (1995): Dinamika nastanka struktura južnog dijela Panonskog bazena. Hrvatski geološki kongres, First Croatian geological congress Vlahović, Igor ; Ivo Velić, Marko Šparica, Zagreb: Institut za geološka istraživanja, 1995, str. 481–486..

SAFTIĆ, B., VELIĆ, J., SZTANO, O., JUHASZ, G. & IVKOVIĆ, Ž. (2003): Tertiary Subsurface Facies, Source Rocks and Hydrocarbon Reservoirs in the SW Part of the Pannonian Basin (Northern Croatia and South-Western Hungary). Geologia Croatica, 56 (1), str. 101–122.

SOKAČ, A. (1978): Pleistocene ostracode fauna of the Pannonian Basin in Croatia. Paleont. Jugoslav. 21, Zagreb, str. 1–51.

ŠPARICA, M., BUZALJKO, R. & PAVELIĆ, D. (1987): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000. Tumač za list Slavonski Brod. Beograd, Geol. zavod, Zagreb, Sav.geol.zavod, Beograd.

URUMOVIĆ, K., HERNITZ, Z. & ŠIMON, J. (1978): Geol. vjesnik, 30/1, Zagreb, str. 297–304.

VELIĆ, I. (2007). Stratigraphy and Palaeobiogeography of Mesozoic Benthic Foraminifera of the Karst Dinarides (SE Europe) - PART 1. Geologia Croatica, 60 (1), str. 1–60.

VELIĆ, J., WEISSER, M., SAFTIĆ, B., VRBANAC, B. & IVKOVIĆ, Ž. (2002): Petroleum-geological characteristics and exploration level of the three Neogene depositional megacycles in the Croatian part of the Pannonian basin.– Nafta, 53/6–7, pages 239–249.

Web izvori:

https://hr.wikipedia.org/wiki/Poplave_u_istočnoj_Hrvatskoj_u_svibnju_2014. (pristupljeno 11. 01. 2021.)

<https://www.jutarnji.hr/vijesti/hrvatska/najveca-prirodna-katastrofa-u-modernoj-hrvatskoj-evo-kako-izgleda-gunja-cetiri-godine-nakon-velike-poplave-7350612> (pristupljeno 11. 01. 2021.)

<https://enacademic.com/dic.nsf/enwiki/1574633> (pristupljeno 11. 01. 2021.)

https://www.geocaching.com/geocache/GC59WAY_meanders-associated-landforms (pristupljeno 11. 01. 2021.)

<https://www.sciencesource.com/archive/Oxbow-Lake-in-South-Carolina-SS2431870.html> (pristupljeno 11. 01. 2021.)

http://www.savacommission.org/dms/docs/dokumenti/sfrmp_micro_web/sfrmp_draft/sava_flood_risk_management_plan_draft_-_cro.pdf (pristupljeno 05. 01. 2021.)

<https://www.google.com/maps/> (pristupljeno 27. 12. 2020.)

<https://mapire.eu/en/> (pristupljeno 29. 12. 2020.)

<http://webgis.hgi-cgs.hr/gk300/default.aspx> (pristupljeno 12. 01. 2021.)

<https://hidro.dhz.hr> (pristupljeno 05. 01. 2021.)

10. POPIS SLIKA I TABLICA U TEKSTU

Slike:

Slika 1. Područje pogođeno poplavom 2014. godine.

Slika 2. Posljedice poplave u brodskoj Posavini 2014. godine.

Slika 3. Primjer meandrirajuće rijeke (Rio Cauto, Kuba).

Slika 4. Poprečan profil meandrirajuće rijeke.

Slika 5. Primjer mrtvaje.

Slika 7. vodostaji rijeke Save na vodomjernoj postavi Jasenovac za period od 1970. do 2012. godine.

Slika 8. Četiri depresije u hrvatskome dijelu Panonskog bazenskog sustava. Označeno crvenom bojom – Slavonsko-srijemska depresija.

Slika 9. Kronostratigrafska podjela centralnog Paratethysa, izmjenjeno iz Kovačić & Pavelić (2018).

Slika 10. Sedimenti poplavnih ravnica holocenske starosti (označeni svijetloplavom bojom).

Slika 11. Tipovi migracije meandrirajućih rijeka

Slika 12. Rezultati istraživanja provedenih na jednom od sustava meandara rijeke Mamorecillo.

Slika 13. Broj zabilježenih poplavnih događaja na slivu rijeke Save zabilježenih u razdoblju od 1824. godine do 2014. godine.

Slika 14. Jedandžbe korištene pri odredbi intervala pojavljivanja (T) i vjerojatnosti pojavljivanja pojedinih maksimalnih godišnjih protoka (P). U navedenim jednadžbama m označava rang protoka ($m=1$ označava najveći), dok N označava broj mjerenja odnosno broj godina.

Slika 15. Razdioba istraživanog područja na pojedine sektore meandara (1-7).

Slika 16. Migracija meandara unutar sektora 1. Korito rijeke Save 1780. godine, označen crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom.

Slika 17. Migracija meandara unutar sektora 2. Korito rijeke Save 1780. godine, označen crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom.

Slika 18. Migracija meandara unutar sektora 3. Korito rijeke Save 1780. godine, označen crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom.

Slika 19. Migracija meandara unutar sektor 4. Korito rijeke Save 1780. godine, označen crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom.

Slika 20. Migracija meandara unutar sektora 5. Korito rijeke Save 1780. godine, označen crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom.

Slika 21. Migracija meandara unutar sektora 6. Korito rijeke Save 1780. godine, označen crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom.

Slika 22. Migracija meandara unutar sektora 7. Korito rijeke Save 1780. godine, označen crvenom bojom, te recentni tok rijeke Save označen plavom bojom.

Slika 23. Geografski smještaj naseljenog mjesta Štitar.

Slika 24. Riječno korito Save kartiran 1780. godine (označen crvenom bojom), te recentno korito rijeke Save (označen plavom bojom).

Slika 25. Presušena mrtvaja broj 1, označena crvenom bojom.

Slika 26. Presušena mrtvaja broj 2, označena crvenom bojom.

Slika 27. Presušena mrtvaja broj 3, označena crvenom bojom.

Slika 28. Grafički prikaz intervala pojavljivanja maksimalnih godišnjih protoka hidrološke postaje Slavonski Brod.

Slika 29. Grafički prikaz intervala pojavljivanja maksimalnih godišnjih protoka hidrološke postaje Županja Stepenica.

Slika 30. Grafički prikaz intervala pojavljivanja maksimalnih godišnjih protoka hidrološke postaje Gunja.

Tablice :

Tablica 1: Vrijednosti intervala pojavljivanja (T) izraženih u godinama te vjerojatnosti pojavljivanja (P) izraženih u postotcima dobivenih iz podataka sakupljenih na hidrološkoj postaji Slavonski Brod.

Tablica 2: Vrijednosti intervala pojavljivanja (T) izraženih u godinama te vjerojatnosti pojavljivanja (P) izraženih u postotcima dobivenih iz podataka sakupljenih na hidrološkoj postaji Županja stepenica.

Tablica 3: Vrijednosti intervala pojavljivanja (T) izraženih u godinama te vjerojatnosti pojavljivanja (P) izraženih u postotcima dobivenih iz podataka sakupljenih na hidrološkoj postaji Gunja.