

izr. prof. dr. Janja Kramer Stajnko, univ. dipl. inž. grad.
janja.kramer@um.si



Matjaž Nekrep Perc, univ. dipl. inž. grad.
matjaz.nekrep@um.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno
inženirstvo in arhitekturo, Smetanova ulica 17, Maribor



Znanstveni članek
UDK 556.18:624.131.23:502.131.1

MONITORING IN ANALIZA TRANSPORTA LEBDEČIH PLAVIN V REKI DRAVI

MONITORING AND ANALYSIS OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT IN THE DRAVA RIVER

Povzetek

Učinkovito upravljanje premeščanja lebdečih plavin v vodotokih je ključno za oblikovanje trajnostnih strategij razvoja vodnih virov in ima osrednjo vlogo pri obvladovanju poplavne ogroženosti, optimizaciji hidroenergetske rabe in ohranjanju rečne morfologije. V študiji je podana analiza dinamike lebdečih plavin v slovenskem delu reke Drave, ki temelji na obsežnem naboru empiričnih podatkov, pridobljenih z večletnimi meritvami na več merilnih mestih.

Transport lebdečih plavin je dinamičen proces, ki je odvisen od hidravličnih značilnosti toka, sezonskih sprememb virov plavin ter antropogenih vplivov na rečno strugo. Akumulacija plavin v zadrževalnikih in strugi vpliva na hidrološko ravnoesje, saj zmanjšuje infiltracijo vode v podzemne vodonosnike in spreminja režim sedimentacije. Analiza visokovodnega dogodka iz leta 2018, izvedena z vidika odvisnosti koncentracije lebdečih plavin od pretoka, omogoča poglobljen vpogled v izvor in transport plavin na merjenem odseku reke Drave.

V Sloveniji se lebdeče plavine v reki Dravi upravljajo pretežno s konvencionalnimi metodami, kot sta sedimentacija in ponovna vključitev v rečne ter vodne ekosisteme. V prispevku so predlagane dodatne dolgoročne strategije celostnega upravljanja plavin, ki bi prispevale k učinkovitejšemu gospodarjenju z vodnimi viri, optimizaciji hidroenergetskih sistemov ter zmanjšanju negativnih ekoloških posledic.

Ključne besede: površinske vode, lebdeče plavine, reka Drava, celostno upravljanje vodnih virov

Summary

The transport of suspended sediments is a dynamic process that is influenced by the hydraulic properties of the river, the seasonal fluctuations of sediment sources and anthropogenic influences on the riverbed. The accumulation of sediments in reservoirs and riverbeds affects the water balance by reducing water infiltration into aquifers and changing the sedimentation regime. The analysis of the 2018 flood event, which was carried out from the point of view of the dependence of suspended sediment concentration on discharge, provides a detailed insight into the origin and transport of sediments in the monitored section of the Drava River.

In Slovenia, suspended sediment management in the Drava River is primarily based on conventional methods such as sedimentation and reintegration into the river and aquatic ecosystems. This study proposes additional long-term strategies for integrated sediment management that could increase the efficiency of water resource management, optimize hydropower systems and mitigate adverse ecological impacts.

Key words: Surface waters, suspended sediments, Drava River, integrated water resources management

1 UVOD

Premeščanje plavin v površinskih vodah je kompleksen in dinamičen proces, ki ima velik vpliv zlasti na varstvo okolja, hidroenergetsko izrabo vodotokov, obvladovanje poplavne ogroženosti in upravljanje vodnih virov. V zadnjem času je bilo izvedenih več študij o dinamiki lebdečih plavin na slovenskih rekah, ki predstavljajo velik del materiala, premeščajočega se vzdolž vodotokov [Bezák, 2013; Dolinar, 2014b; Kramer Stajnko, 2020; Mikoš, 2012; Ulaga, 2023]. Odlaganje plavin v vodnih telesih pomembno vpliva na kopičenje mulja v rečnih strugah, poplavnih območjih in površinskih vodah, hkrati pa ima nezanemarljiv vpliv na okolje zaradi različnih onesnaževal, ki so vezana na delce plavin.

Premeščanje lebdečih plavin v reki Dravi pomembno vpliva na hidroenergetsko izrabo vodotoka ter dolgoročno načrtovanje ukrepov za poplavno varnost in trajnostno upravljanje vodnih virov. Nastanek in prisotnost plavin v rečnem ekosistemu sta posledica geoloških in geomorfoloških procesov, pri čemer prevladujeta preperevanje zemeljske skorje in erozijski mehanizmi, ki sproščajo delce v vodotok. Intenziteta transporta plavin je tesno povezana s hidravličnimi razmerami, na količino in hitrost premeščanja pa vplivajo tako trenutne razmere kot dolgoročne podnebne spremembe. Povišane temperature in povečano taljenje ledenikov v zadnjem obdobju prispevajo k večji mobilizaciji plavinskega materiala, kar vodi v spremenjeno sedimentacijsko ravnovesje v rečni strugi [ARSO VODE, 2023].

Antropogeni vplivi, kot so gradnja hidroenergetskih objektov in hidrotehnični posegi, bistveno preoblikujejo transportne procese plavin. Akumulacijski bazeni zadržujejo velik delež plavin, kar povzroča zapolnjevanje rezervoarjev, zmanjšano prepustnost rečnega dna ter motnje v hidrološkem ciklu, vključno z omejeno infiltracijo vode v podzemne vodonosnike. Razumevanje teh dinamičnih interakcij je ključno za razvoj učinkovitih strategij upravljanja rečnih sistemov in optimizacijo hidrološkega režima Drave.

Raziskave v slovenskih rekah [Bezák, 2013; Dolinar, 2014b; Gregorc, 2010; Knapič, 2019; Ulaga, 2005, 2023] so pokazale, da se največ plavin premešča v obdobjih visokih vodostajev, vendar vsak visokovodni dogodek ne poveča nujno njihove količine. Na dinamiko plavin vplivajo pretekli hidrološki dogodki, intenzivnost padavin in drugi dejavniki. Pri analiziranju visokovodnih dogodkov se razmerje med koncentracijo lebdečih plavin in pretokom pogosto izraža v obliki histereznih zank, ki omogočajo določitev izvora plavin. Te zanke se lahko oblikujejo v pozitivni ali negativni smeri, odvisno od dinamike prenosa plavin. Pozitivna histereza pomeni, da je koncentracija lebdečih plavin v fazi naraščanja visokovodnega vala višja kot v fazi njegovega upadanja pri enakem pretoku. Tak vzorec kaže na bližnji vir sedimenta, kot so rečno dno ali brežine, kjer erozijski procesi sprožijo takojšnje sproščanje delcev. Nasprotno pa negativna histereza nastane, kadar se plavine v večji meri sproščajo iz oddaljenih virov ali pri erozijsko nestabilnih brežinah, kjer je izpostavljenost materiala vodnemu toku večja. V teh primerih pride do zamika v sproščanju plavin, kar pomeni, da je njihova koncentracija v fazi upadanja vala višja kot v fazi naraščanja pri isti vrednosti pretoka. [Bača, 2008; Bogen, 1980; Eder, 2010; Garnett Williams, 1989]

Med poplavnimi dogodki se ob prelitju vode iz rečne struge delci plavin odložijo na poplavnih ravninah in kmetijskih površinah, kar lahko povzroči trajne spremembe v sestavi tal. Lebdeče plavine pogosto vežejo različne organske in anorganske snovi, vključno s potencialno škodljivimi onesnaževali, kar vodi v kemično degradacijo prizadetih območij. Prisotnost visoke koncentracije plavin v poplavnih vodah pomembno vpliva na obseg škode. Poleg mehanskega odlaganja materiala, ki lahko spremeni morfologijo terena, zamuljenje površin zmanjšuje sposobnost ponovnega ponikanja vode, kar podaljšuje trajanje in intenziteto poplavnih razmer. Raziskave kažejo, da se pri poplavah z visoko vsebnostjo plavin hidravlična učinkovitost rečnih sistemov zmanjša, saj se upočasni odtokanje vode, kar povečuje obremenitev infrastrukture in pospešuje erozijske procese na prizadetih območjih. [Brilly, 1999]

Nacionalni hidrološki monitoring površinskih voda, določen v skladu z Vodno direktivo 2000/60/ES, vključuje sistematično spremljanje hidroloških in fizikalno-kemijskih parametrov vodotokov. Meritve zajemajo vodostaj, hitrost toka, pretoke, geometrijske značilnosti rečnih profilov, temperaturo vode ter koncentracijo lebdečih plavin. Obseg spremljanja je določen v okviru programa monitoringa, ki ga izvaja Agencija Republike Slovenije za okolje. Program natančno opredeljuje merilne parametre, metodologijo izvajanja meritev ter pogostost zajema podatkov. Med pomembnejše elemente državnega monitoringa spada tudi analiza lebdečih plavin in njihovega transporta, pri čemer se redne meritve v okviru nacionalnega monitoringa izvajajo predvsem na večjih vodotokih. [ARSO VODE, 2021]

Za celovito upravljanje premeščanja plavin je ključno izvajanje natančnih terenskih meritev, ki omogočajo zajem podatkov o dinamiki lebdečih plavin pod vplivom spremenljivih hidravličnih razmer. Terensko pridobljeni podatki predstavljajo temelj za razvoj in nadgradnjo modelov prenosa plavin, ki omogočajo dolgoročno načrtovanje strategij upravljanja plavin ter izboljšanje kalibracije numeričnih simulacij. Terenske meritve lebdečih plavin omogočajo kvantifikacijo mase premeščenih plavin skozi določen prečni profil vodotoka v opazovanem časovnem intervalu. Ti podatki so ključni za analizo časovno-prostorskih vzorcev transporta plavin in oceno vpliva hidravličnih dejavnikov na rečno morfodinamiko.

Merjenje lebdečih plavin kljub številnim razvitim metodam in instrumentom ostaja izziv, saj premeščanje poteka v spremenljivih pogojih. Za pridobitev čim bolj natančnih modelov sta potrebna kombinacija neposrednih in posrednih meritev ter sistematičen monitoring. Dolgoročne rešitve za upravljanje sedimentov so ključne za zmanjšanje negativnih vplivov na vodne vire, hidroenergetske sisteme in ekosisteme.

Članek predstavlja pregled meritev lebdečih plavin na večji mestih v reki Dravi pri povprečnih pretokih v desetletnem obdobju ter analiz meritev lebdečih plavin med visokovodnim valom v izbranem obdobju izjemno povečanega pretoka. Raziskava obravnava časovno dinamiko premeščanja plavin na različnih skalah ter identificira njihove glavne vire. Poleg analize obstoječih strategij upravljanja predlaga tudi smernice za nadaljnje raziskave in izboljšave pri upravljanju transporta plavin.

2 MONITORING IN ANALIZA LEBDEČIH PLAVIN V REKI DRAVI

Reka Drava, eden največjih desnih pritokov Donave, ima ključno vlogo pri hidroenergetski izrabi, saj je njen vodni potencial skoraj v celoti izkoriščen za proizvodnjo električne energije. Izvira v Južni Tirolski v Italiji in teče skozi Avstrijo, Slovenijo ter Hrvaško, kjer se pri Osijeku izliva v Donavo. V Sloveniji Drava teče v dolžini 117,7 km in pokriva povodje s skupno površino 4.662 km². Povprečni pretok reke znaša 292 m³/s (HE Dravograd), k čemur pomembno prispevajo tudi pritoki, kot sta Meža z 12 m³/s in Dravinja z 11 m³/s. Poleg teh pritokov Drava vzdolž celotne poti sprejema še več manjših hudourniških dotokov. [D Lóczy, 2019] Hidroenergetski potencial reke je izkoriščen s sistemom 22 hidroelektrarn, ki so razporejene v Avstriji, Sloveniji in na Hrvaškem, od tega jih osem deluje v Sloveniji. Na slovenskem delu so bili pri Zlatoličju in Forminu zgrajeni umetni stranski kanali, namenjeni izboljšanju hidravlične učinkovitosti energetskega sistema.

Zaradi intenzivne regulacije rečnega toka ima Drava močno spremenjeno morfodinamiko, kar neposredno vpliva na obnašanje premeščanja lebdečih plavin in sedimentacijske procese. Politične in upravljavske strukture v državah, skozi katere teče reka, so v preteklosti vplivale na raziskovalne in regulativne dejavnosti. Do političnih sprememb ob koncu 20. stoletja so bile te aktivnosti zanemarjene, kar je vodilo v pomanjkanje celovitih študij o rečnem okolju.

Izgradnja hidroelektrarn na reki Dravi je močno vplivala na premeščanje plavin, saj je njihova prodonosnost na odseku med Markovci in Zavrcem danes kar 400-krat manjša kot pred postavitvijo hidroelektrarne Formin [MKGP, 2022]. Zmanjšan transport plavin je povzročil poglobljanje in zoževanje rečne struge ter znižanje njene povprečne gladine za 1,6 metra, kar je privedlo do upada podtalnice in postopnega izsuševanja okoliške pokrajine. Po izgradnji hidroelektrarne Zlatoličje se je gladina podtalnice na vzhodnem delu Dravskega polja znižala za 2 do 3 metre, v bližini odvodnega kanala pa celo do 9 metrov [MKGP, 2022]. Hkrati akumulacijska jezera hidroelektrarn predstavljajo območja intenzivnega kopičenja plavin, predvsem finih delcev mulja, ki se zaradi zmanjšane pretočnosti odlagajo in vplivajo na vodne ekosisteme. Na območju Dravogradskega jezera so ti procesi povzročili nastanek obsežnega močvirja v Črneškem zalivu. Za ublažitev negativnih posledic sedimentacije so leta 2012 v okviru ekološke sanacije iz naplavljenega mulja oblikovali umetni otok pri Spodnji Vižingi, s čimer so želeli izboljšati ekološko stanje vodnega okolja in zmanjšati vpliv kopičenja plavin. [MKGP, 2022]

V zadnjem obdobju so se pojavile raziskave, usmerjene v analizo možnosti ponovne uporabe plavin iz Drave v gradbeni industriji, vendar celovite študije o tokovih plavin in njihovih vplivih na rečno dinamiko ostajajo omejene. [Ducman, 2022; Knapič, 2019; Mikoš, 2017].

Zgodovinski podatki kažejo, da so bile meritve lebdečih plavin na reki Dravi na merilnem mestu na Ptujju izvajane med letoma 1956 in 1975, pri čemer v okviru državnega hidrološkega monitoringa sistematičnih meritev ni bilo. Leta 2013 je bila vzpostavljena izmenjava podatkov o motnosti vode med Agencijo Republike Slovenije za okolje (ARSO) in Dravskimi

elektrarnami Maribor (DEM) za izbrane lokacije monitoringa. Meritve motnosti z optičnimi senzorji so se v akumulacijah hidroelektrarn uvajale postopoma: prvi senzor je bil nameščen leta 2011 v akumulaciji Hidroelektrarne Dravograd, leta 2012 na dveh drugih lokacijah v Vuzenici in na Mariborskem otoku, ter leta 2013 na četrti lokaciji v Markovcih. Kljub dostopnosti surovih urnih podatkov, ki jih je zagotovil DEM, relacija med izmerjeno motnostjo in koncentracijo lebdečih snovi v vodi ni bila določena, kar otežuje natančno kvantifikacijo sedimentnih tokov. Meritve se izvajajo s senzorji tipa Solitax LXV (HACH), ki delujejo na podlagi metode širjenja svetlobe pod kotom 90° (ISO 7027) in omogočajo meritve motnosti v razponu 0,001–4000 FNU oziroma koncentracije lebdečih delcev v območju od 0,001 do 50 g/l. Podatki so pridobljeni na petminutni ravni in prikazani kot koncentracije celotnih suspendiranih snovi (TSS – Total Suspended Solids) v mg/l. Za zagotavljanje neprekinjenega in zanesljivega delovanja so senzorji opremljeni z avtomatskim sistemom samočiščenja, ki se aktivira vsake štiri ure. Rezultati meritev kažejo, da se v običajnih hidroloških razmerah koncentracija lebdečih delcev v vodi giblje med 10 in 20 g/m³, medtem ko ob povečanih pretokih, ki lahko dosežejo do 1400 m³/s, koncentracija plavin znatno naraste in preseže 320 g/m³. [Hutevec, 2016]

V okviru slovensko-avstrijskega programa čezmejnega sodelovanja SI-AT 2008–2013 z naslovom Drava-Mura Crossborder Initiative – DRA-MUR-CI je bil eden od delovnih sklopov namenjen spremljanju premeščanja lebdečih plavin. V ta namen so bile izvedene meritve in modeliranje transporta plavin na izbranih monitoring postajah reke Drave, in sicer na Šturmovem potoku, v Zavrcu ter na Ptujju.

Leta 2018 so bile v okviru projekta HyMoCARES po naročilu izvajalca Inštituta za vode Republike Slovenije izvedene dodatne meritve lebdečih plavin v Zgornjem Dupleku in Zlatoličju, kjer so potekale neprekinjeno eno leto. Monitoring je vključeval tudi spremljanje visokovodnega dogodka oktobra 2018, kar je omogočilo podrobnejšo analizo vpliva povečanih pretokov na premeščanje plavin. Zbrani podatki so prispevali k boljšemu razumevanju dinamike plavin v reki Dravi ter omogočili nadgradnjo obstoječih modelov procesov premeščanja plavin. [UM FGPA, 2019]

3 KRATEK POVZETEK METOD DOLOČEVANJA VSEBNOSTI LEBDEČIH PLAVIN

Merjenje in kvantifikacija lebdečih plavin v vodotokih kljub razvoju številnih učinkovitih metod ostajata izjemno kompleksna izziva, ki zahtevata uporabo poenostavitve in predpostavk. Premeščanje plavin je dinamičen in nelinearen proces, pri katerem nobena posamezna merilna tehnika ne more v celoti zajeti časovno in prostorsko spremenljivih pogojev v rečnih strugah.

Eden ključnih izzivov pri določanju količine lebdečih plavin je dejstvo, da vodotoki več kot 50 % celotne obremenitve s plavinami prenesejo v obdobjih poplav. Ker se tovrstni dogodki pojavljajo v kratkih časovnih intervalih in so pogosto nepredvidljivi, je pridobivanje reprezentativnih vzorcev oteženo, še posebno v odsotnosti avtomatiziranih merilnih sistemov. Kla-

sične metode vzorčenja in laboratorijske analize koncentracij plavin so v najboljšem primeru logistično zahtevne in ekonomsko neučinkovite.

Poleg tega konvencionalne metode, ki temeljijo na laboratorijski obdelavi odvzetih vzorcev, pogosto vključujejo merilne in analitične napake, ki vplivajo na natančnost določanja koncentracije plavin. To je eden ključnih razlogov za razvoj in implementacijo alternativnih metod, ki so po možnosti neinvazivne in omogočajo kontinuirano spremljanje lebdečih delcev v vodotokih [UM FGPA, 2013].

Metode za določanje lebdečih plavin v rekah se delijo na neposredne (lebdeče plavine določamo na osnovi odvzetega vzorca vode) in posredne ali surogatne (lebdečih plavin ne vzorčimo, ampak koncentracijo in zrnastost določamo z merilniki, ki oddajajo ali sprejemajo mehansko ali elektromagnetno valovanje) [Mikoš, 2012].

1. Neposredne metode (vzorčenje)

Te metode vključujejo fizično zajemanje vzorcev vode in plavin za kasnejšo laboratorijsko analizo.

- Stekleničenje: vzorci se odvijemajo ročno ali samodejno s steklenicami ali vrečkami. Metoda je preverjena in omogoča določitev koncentracije in zrnastosti. Njene slabosti so slaba časovna ločljivost, potreba po laboratorijski analizi in invazivnost.
- Črpalno vzorčenje: vzorci se zajemajo z uporabo črpalk. Metoda omogoča avtomatizacijo in določitev koncentracije plavin. Njene slabosti so omejena sesalna višina in potreba po laboratorijski obdelavi vzorcev.

2. Posredne metode (surogatne metode)

Namesto vzorčenja se lastnosti plavin ocenjujejo z različnimi senzorji, ki merijo fizikalne pojave.

- Optične metode (meritev sipanja ali absorpcije svetlobe) so relativno poceni in omogočajo daljinsko zaznavanje. Njihova slabost je odvisnost od zrnastosti ter možnost onesaženja senzorjev.
- Akustične metode (zvočni odboj od delcev) so neinvazivne in zagotavljajo dobro prostorsko ločljivost. Njihova slabost je slabljenje signala pri visokih koncentracijah plavin in samo umerjanje signala za pretvorbo v koncentracijo plavin. Med akustične metode spada tudi metoda meritve z ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). ADCP postaja vse bolj priljubljen za spremljanje koncentracije lebdečih plavin, saj omogoča oceno hitrosti in koncentracije delcev v vodi s pomočjo zvočnega valovanja. Metoda je neinvazivna in omogoča sprotne merjenje, vendar zahteva kalibracijo. Pri visokih koncentracijah je njena natančnost zmanjšana.
- Laserska difrakcija (meritev odboja laserskega žarka) omogoča natančno oceno zrnastosti, vendar je metoda draga, invazivna in ima omejen spekter zrnastosti.
- Jedrske metode (merjenje prehoda gama- ali rentgenskih žarkov) so uporabne pri širokem razponu koncentracij, vendar imajo nizko občutljivost in okoljske omejitve.
- Daljinsko spektralno zaznavanje (satelitske slike, multispektralne analize) je uporabno za široka območja, vendar ima ta metodo slabo ločljivost in omejeno uporabnost v rekah, predvsem v manjših vodotokih.

Za določitev koncentracije lebdečih plavin, predstavljenih v tem članku, je bila uporabljena kombinacija neposrednih in posrednih metod, pri čemer je bila izbira metode prilagojena razpoložljivosti raziskovalne opreme ter specifičnim hidrološkim in okoljskim razmeram na merilnih lokacijah. Neposredne metode so obsegale ročni odvzem vzorcev vode (stekleničenje) na več vertikalah in različnih globinah glede na trenutno globino vode v prerezu. Posredne metode so vključevale uporabo akustičnega Dopplerjevega merilnika pretokov (ADCP) tipa RioGrande ZedHed s frekvenco 1200 kHz, proizvajalca Teledyne RD Instruments (San Diego, Kalifornija, ZDA). Podrobnejši opis metodologije je na voljo v [Kramer Stajnko, 2023].

Koncentracija lebdečih plavin je bila določena z laboratorijsko analizo zbranih vzorcev vode. Primarna metoda določanja je temeljila na filtracijski tehniki, skladni s slovenskim standardom SIST EN 872:2005, ki določa postopke za kvantifikacijo suspendiranih delcev v vodi. Podrobnejši opis metodologije je na voljo v [Dolinar, 2014a].

Za vzorčenje so bili uporabljeni različni tipi vzorčevalnikov, od enostavnih naprav, ki so bile prilagojene ekstremnim hidrodinamičnim pogojem, kot je visokovodni val, do globinsko integriranih vzorčevalnikov. Slednji so podrobneje opisani v študiji [UM FGPA, 2019].

4 REZULTATI IN ANALIZA MERITEV

V članku so predstavljeni rezultati meritev lebdečih plavin, izvedenih v daljšem časovnem obdobju na petih izbranih merilnih mestih: Šturmov potok, Zavrč, Ptuj, Studenška brv Maribor in Zgornji Duplex (slika 1). V raziskavi so bile uporabljene različne merilne tehnike, pri čemer je pridobljeno znanje omogočilo identifikacijo optimalne metode za njihovo dolgoročno spremljanje.

Če hidroloških parametrov ni bilo mogoče izmeriti neposredno na terenu z razpoložljivo merilno opremo, so bili podatki o pretoku vode v bližini merilnih mest pridobljeni iz sekundarnih virov. Za območja v neposredni bližini Hidroelektrarne Fala (merilno mesto Šturmov potok) in Hidroelektrarne Mariborski otok (merilno mesto Studenška brv) so podatke zagotovile Dravske elektrarne Maribor (DEM), upravljavec hidroenergetskih objektov na reki Dravi. Na merilnih mestih Borl (v bližini merilnega mesta v Zavrču) in Ptuj so bili podatki o pretoku in vodostaju pridobljeni iz merilne mreže Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO).



Slika 1. Lokacije meritev koncentracije lebdečih plavin v reki Dravi.

4.1 Merilno mesto Šturmov potok

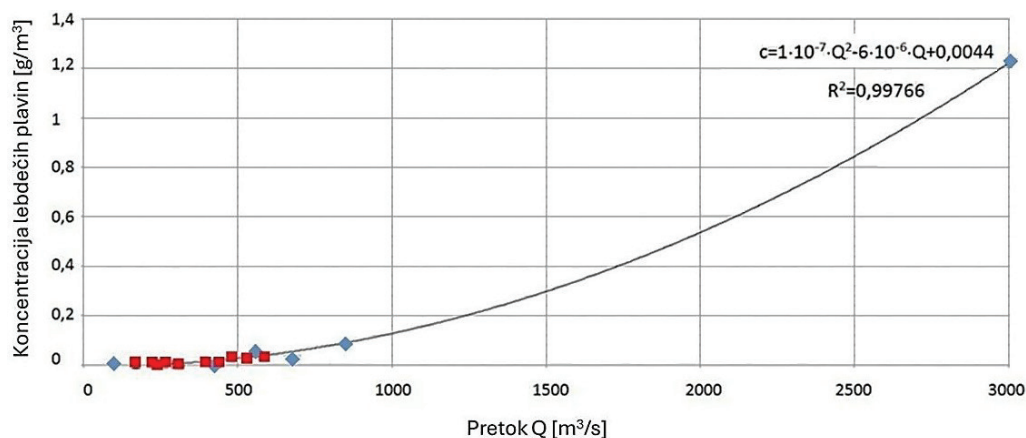
Meritve na merilnem mestu Šturmov potok so, skladno z že opisano metodologijo, potekale z uporabo ADCP-merilnika, s katerim se je zajel prečni hitrostni profil in določil trenutni pretok (slika 2). Vzorci vode so bili odvzeti na treh vertikalah pri globinah 2 m in 4 m. Povprečne izmerjene vrednosti pretoka, temperature vode in koncentracije lebdečih plavin so prikazane v preglednici 1.

Drava – Šturmov graben			
Datum	Pretok Q [m³/s]	Temperatura T [°C]	Povprečna koncentracija plavin C [mg/l]
1. 6. 2009	385,1	13,2	17,1
1. 7. 2009	523,3	14,7	30,8
3. 8. 2009	494,0	19,7	23,8
14. 10. 2009	441,3	12,8	12,5
14. 1. 2010	314,3	3,4	4,1
20. 4. 2010	188,3	10,9	3,7
17. 6. 2010	555,8	16,7	51,5
16. 9. 2010	428,9	15,2	14,8
31. 1. 2011	312,4	3,5	2,3
22. 3. 2011	168,7	7,8	5,5

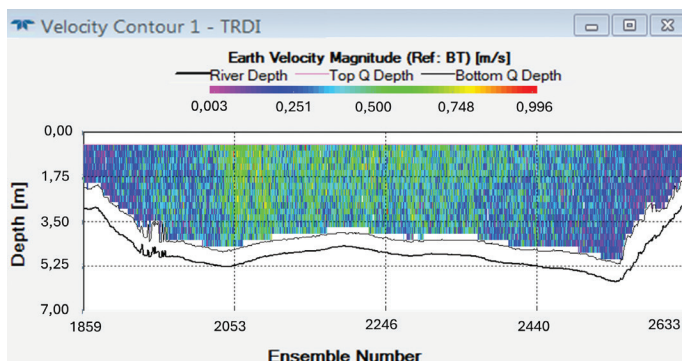
Preglednica 1. Rezultati meritev (izmerjeni pretok, temperatura in povprečna koncentracija lebdečih plavin v odvzetih vzorcih) na merilnem mestu Šturmov potok.

Slika 3 prikazuje sočasno izmerjene vrednosti pretoka in koncentracije lebdečih plavin, pri čemer je opazna sorazmerna povezava med spremenljivkama. Rezultati nakazujejo neposredno soodvisnost pretoka in koncentracije lebdečih plavin, kar potrjuje trend naraščanja koncentracije lebdečih delcev s povečevanjem pretoka in obratno.

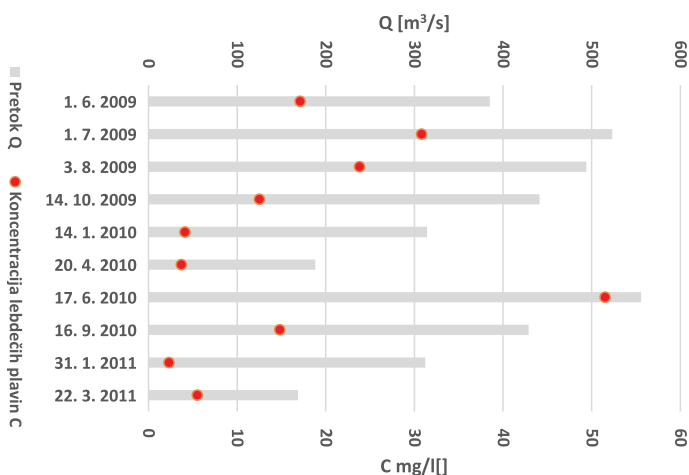
Soodvisnost teh parametrov je mogoče zadovoljivo opisati s kvadratnimi regresijskimi funkcijami, kot je prikazano na sliki 4.



Slika 4. Korelacija med koncentracijo lebdečih plavin in pretokom na lokaciji Šturmov potok.



Slika 2. Izmerjen hitrostni profil na merilnem mestu Šturmov potok; prikazana je velikost hitrosti toka (v m/s), referenčno na dno (BT – Bottom Track) po globini vodotoka (v m) vzdolž prečnega prereza.



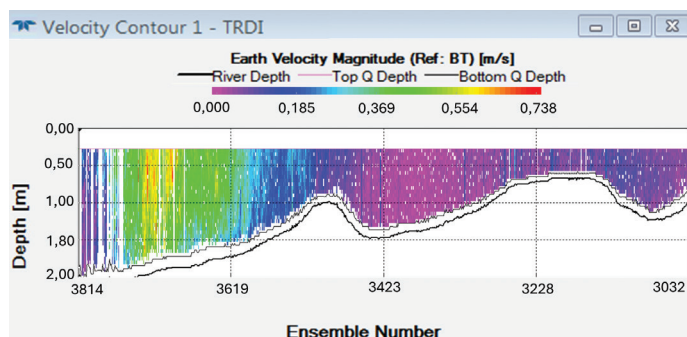
Slika 3. Izmerjeni pretoki in koncentracije lebdečih plavin na merilnem mestu Šturmov potok.

Kakovost prilaganja regresijskega modela eksperimentalnim podatkom je ocenjena s koeficientom determinacije (R^2), ki služi kot indikator natančnosti aproksimacije merjenih vrednosti z izbrano funkcijo.

Pri visokih pretokih, kjer ni eksperimentalnih podatkov, modelirana krivulja predstavlja napoved koncentracije lebdečega materiala na podlagi ekstrapolacije regresijske enačbe. Ker regresijski model temelji na podatkih iz nižjega območja pretokov, je pri interpretaciji ekstrapoliranih vrednosti potrebna previdnost. Dejanske koncentracije lebdečih plavin pri ekstremnih pretokih lahko odstopajo od napovedanih vrednosti zaradi dodatnih vplivov, kot so spremembe v transportnih mehanizmi, eroziji rečne struge in novih sedimentnih virih. Zato je za natančnejše napovedi priporočljivo pridobiti dodatne podatke iz obdobj visokih pretokov in preveriti zanesljivost modela v tem območju.

4.2 Merilno mesto Zavrch

Na merilnem mestu Zavrch so bile uporabljene enake metodologije meritev kot na merilnem mestu Šturmov potok. V tem delu reke se na koncu Ptujkega jezera kanal loči od glavne struge Drave pri pregradi Markovci, da zagotavlja dovod vode v Hidroelektrarno Formin, ki je bila zgrajena med letoma 1964 in 1969. Maksimalna kapaciteta derivacijskega kanala je 500 m³/s, pri čemer presežna voda ob doseženi kapaciteti odteka v naravno rečno strugo. Zahtevani ekološko sprejemljiv pretok na tem območju znaša 10 m³/s v zimskem in zgodnjepomladanskem obdobju (15. oktober–15. marec) ter 20 m³/s v poletno-jesenskem obdobju (15. marec–15. oktober). Merilno mesto je bilo izbrano z namenom, da se ugotovi, koliko lebdečih plavin se ob razcepu struge preusmeri v naravno strugo.



Slika 5. Izmerjen hitrostni profil na merilnem mestu Zavrch; prikazana je velikost hitrosti toka (v m/s), referenčno na dno (BT – Bottom Track) po globini vodotoka (v m) vzdolž prečnega prereza.

Na merilnem mestu so bile izmerjene relativno nizke vrednosti pretokov (preglednica 2), kar je potrjeno tudi z izmerjenim hitrostnim profilom (slika 5). Kljub temu je v vseh obdobjih zagotovljen minimalni predpisani ekološko sprejemljiv pretok. Analiza oblike hidravličnega profila kaže, da gre za rečni odsek v zavoju, kar potrjuje izrazita erozija na levi brežini in akumulacija transportiranih plavin na desni strani zaradi vpliva sekundarnih tokov, kar je razvidno tudi iz slike 6.

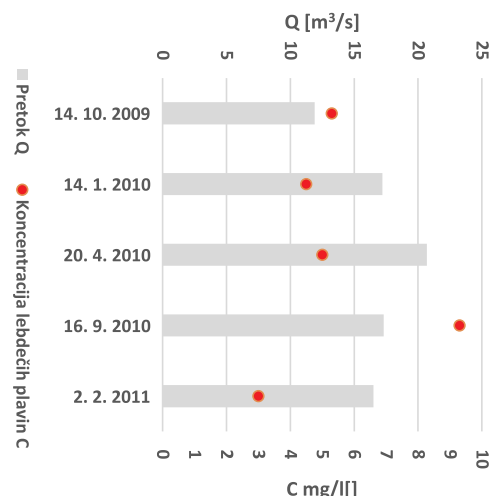
Zaradi izrazite kompleksnosti hidroloških in morfoloških razmer ni mogoče vzpostaviti statistično značilne korelacije med pretokom in povprečno izmerjeno koncentracijo lebdečih plavin kot v primeru prejšnje lokacije. Razcep struge pri pregradi Markovci, kjer se del vode usmerja v derivacijski kanal, pomembno spreminja naravno dinamiko toka v glavni strugi. Tako prihaja do zmanjšane in nestanovitnega pretoka, ki

Drava – Zavrch			
Datum	Pretok Q [m ³ /s]	Temperatura T [°C]	Povprečna koncentracija plavin C [mg/l]
14. 10. 2009	11,9	11,6	5,3
14. 1. 2010	17,2	4,2	4,5
20. 4. 2010	20,7	11,2	5,0
16. 9. 2010	17,3	16,7	9,3
2. 2. 2011	16,5	3,0	3,0

Preglednica 2. Rezultati meritev (izmerjeni pretok, temperatura in povprečna koncentracija lebdečih plavin v odvzetih vzorcih) na merilnem mestu Zavrch.



Slika 6. Zračni posnetek merilnega mesta pri Zavrchu, z vidno erozijo leve brežine in akumulacijo plavin na desni strani.



Slika 7. Izmerjeni pretoki in koncentracije lebdečih plavin na merilnem mestu Zavrch.

je sicer znotraj meja ekološko sprejemljivih vrednosti, a zaradi zmanjšane energije toka omejuje zmožnost transporta plavin. To je razvidno tudi iz primerjave pretoka in koncentracije lebdečih plavin, prikazane na sliki 7.

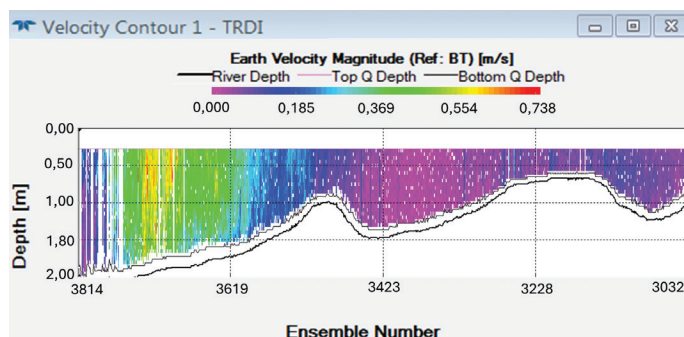
4.3 Merilno mesto Ptuj

Merilno mesto na Ptujju je locirano tik za sotočjem naravne rečne struge in umetnega derivacijskega kanala, v neposredni bližini pa je tudi avtomatska vodomerna postaja ARSO. Metodologija meritev na tem mestu sledi enakim postopkom, kot so bili uporabljeni na predhodno opisanih merilnih mestih. V obdobjih povišanih pretokov so bili dodatni vzorci vode za določitev koncentracije lebdečih plavin odvzeti z bližnjega mostu, pri čemer se v teh primerih ni izvedla meritev prečnega profila struge z uporabo ADCP-merilnika. Rezultati meritev za

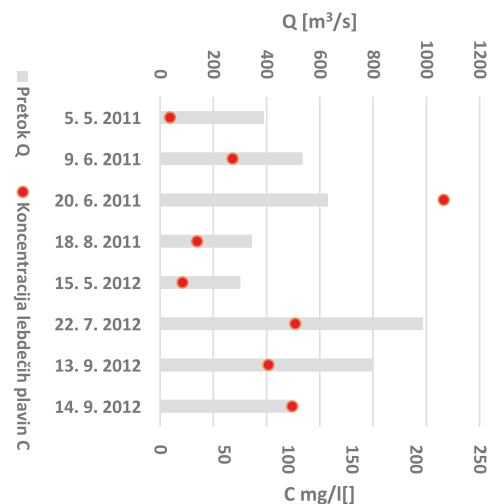
merilno mesto Ptuj so predstavljeni v preglednici 3, medtem ko je prečni hitrostni profil s pripadajočimi vrednostmi pretoka prikazan na sliki 8.

Drava – Ptuj			
Datum	Pretok Q [m³/s]	Temperatura T [°C]	Povprečna koncentracija plavin C [mg/l]
5. 5. 2011	390,8	13,9	7,8
9. 6. 2011 z mostu	536,0	16,4	56,7
20. 6. 2011 z mostu	631,0	14,7	222,0
18. 8. 2011	345,2	20,3	29,0
15. 5. 2012	301,2	15,1	17,7
22. 7. 2012 z mostu	988,0	15,9	105,7
13. 9. 2012 z mostu	796,0	15,4	84,7
14. 9. 2012	489,1	14,5	103,3

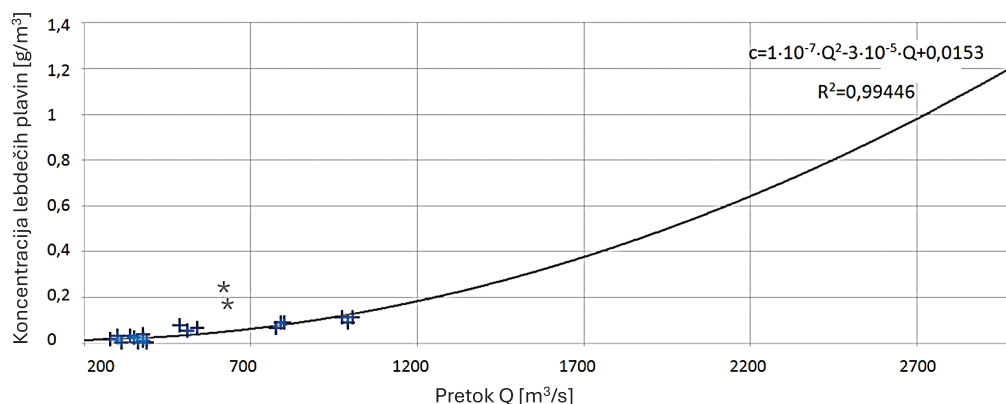
Preglednica 3. Rezultati meritev (izmerjeni pretok, temperatura in povprečna koncentracija lebdečih plavin v odvzetih vzorcih) na merilnem mestu Ptuj.



Slika 8. Izmerjen hitrostni profil na merilnem mestu Ptuj; prikazana je velikost hitrosti toka (v m/s), referenčno na dno (BT – Bottom Track) po globini vodotoka (v m) vzdolž prečnega prereza.



Slika 9. Izmerjeni pretoki in koncentracije lebdečih plavin na merilnem mestu Zavrč.



Slika 10. Korelacija med koncentracijo lebdečih plavin in pretokom na lokaciji Ptuj.

Analiza izmerjenih koncentracij lebdečih plavin je pokazala eno izrazitejšo odstopanje od pričakovanega trenda (20. 6. 2011, slika 9), kar je mogoče pripisati povečanemu pretoku in posledičnemu spiranju plavinskega materiala, ki se je premical v vodni tok. Podobno so bile višje in nesorazmerne koncentracije lebdečih plavin v primerjavi s pretokom zaznane tudi septembra 2012, ko je povišan pretok z zamikom sprožil mobilizacijo in transport plavin.

Na podlagi zbranih podatkov je bila sestavljena kvadratna regresijska funkcija, ki opisuje razmerje med pretokom in koncentracijo lebdečih plavin, prikazana na sliki 10. Rezultati nakazujejo, da pri višjih pretokih koncentracija lebdečih delcev narašča nelinearno. Ta pojav je mogoče razložiti s povečano erozijo in mobilizacijo plavin iz rečnega dna in brežin. Trend rasti koncentracije lebdečih plavin pri visokih pretokih potrjuje hipotezo o aktivaciji dodatnih transportnih mehanizmov, kot sta dvigovanje materiala z dna rečne struge in prispevek lebdečega materiala iz bočnih pritokov.

4.4 Merilno mesto Studenška brv

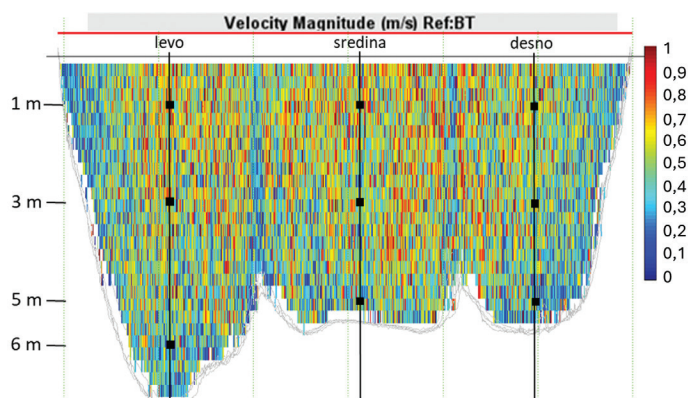
Na merilnem mestu Studenška brv je predstavljen primer določanja koncentracije lebdečih plavin z ADCP-merilnikom, pri čemer je uporabljena kombinacija direktne in indirektna metode meritev. S pomočjo pripadajoče programske opreme VISEA-PDT (Plume Detection Toolbox), ki jo razvija podjetje Aqua Vision, je omogočena simulacija koncentracije lebdečih plavin v izbranem prečnem profilu. Ta simulacija temelji na kalibraciji modela, izvedeni na podlagi količin lebdečih plavin,

Točka odvzema vzorca	Koncentracija plavin C [mg/l]
levo – 1 m	6,0
levo – 3 m	8,3
levo – 6 m	9,2
sredina – 1 m	10,0
sredina – 3 m	7,8
sredina – 5 m	7,4
desno – 1 m	7,0
desno – 3 m	6,8
desno – 5 m	7,4

Preglednica 4. Izmerjena koncentracija lebdečih plavin v posameznih točkah.

Drava – Ptuj			
Datum	Pretok Q [m³/s]	Temperatura T [°C]	Povprečna koncentracija plavin C [mg/l]
19. 5. 2016	287	13,9	7,8

Preglednica 5. Rezultati meritev (izmerjeni pretok, temperatura in povprečna koncentracija lebdečih plavin v odvzetih vzorcih) na merilnem mestu Studenška brv.



Slika 11. Izmerjen hitrostni profil na merilnem mestu Studenška brv z mesti odvzema vzorcev za kalibracijo; prikazana je magnituda hitrosti toka (v m/s).

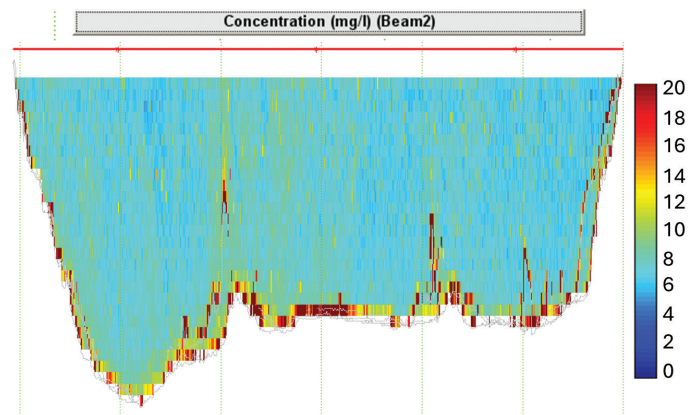
pridobljenih s točkovnim vzorčenjem po prečnem profilu (stekleničenje) (slika 11, preglednica 4). Rezultati meritve so podani v preglednici 5.

Dejanska vrednost koncentracije lebdečih plavin se določa iterativno, saj sta tako jakost povratnega akustičnega signala kot koncentracija lebdečih plavin odvisni od prisotnosti delcev, ki povzročajo oslabitev signala. Pri tem se upoštevata izguba zvočne energije zaradi absorpcije delcev in sipanja v vodnem mediju. Zaradi te soodvisnosti je treba določanje koncentracije lebdečih delcev izvesti z večkratnimi iterativnimi prilagoditvami, kar samodejno izvaja programska oprema VISEA-PDT (Plume Detection Toolbox).

Povezava med absolutno vrednostjo odbitega signala in koncentracijo lebdečih plavin je podana z empiričnim izrazom:

$$10 \log (C) = A I + B \quad (1)$$

kjer so C – koncentracija lebdečih plavin [mg/l], I – izmerjen absolutni odboj [dB], A in B – empirični kalibracijski konstanti, pridobljeni s postopkom iteracije na osnovi vnešenih, dejansko izmerjenih vrednosti koncentracij lebdečih plavin. V obravna-



Slika 12. Koncentracija lebdečih plavin (v mg/l) po pretvorbi iz absolutne vrednosti odbitega signala z iteracijo na osnovi dejansko izmerjenih vrednosti koncentracij lebdečih plavin (preglednica 5).

vanem primeru sta vrednosti konstant določeni kot $A=0,0221$ in $B=1,8696$. Rezultirajoča koncentracija lebdečih plavin po profilu je prikazana na sliki 12.

Koncentracija lebdečih plavin (v mg/l) po pretvorbi iz absolutne vrednosti odbitega signala z iteracijo na osnovi dejansko izmerjenih vrednosti koncentracij lebdečih plavin (preglednica 5)

Uporaba akustičnega Dopplerjevega merilnika pretoka (ADCP) za določitev koncentracije in razporeditve lebdečih plavin po rečnem profilu se je izkazala za dobro alternativo drugim metodam, kadar se uporablja v povezavi z ustrezno programsko opremo, ki omogoča pretvorbo akustičnih signalov v koncentracijo plavin. Takšen pristop omogoča celovit prikaz premeščanja plavin skozi izbrani prečni profil vodnega telesa.

4.5 Merilno mesto Zgornji Duplex

Na merilnem mestu v Zgornjem Duplexu, med Mariborom in Ptujem, kjer je struga od pregrade Melje za potrebe hidroelektrarne Zlatoličje že ločena na naravno strugo in umetni kanal, je bila izvedena meritev visokovodnega dogodka, ki se je zgodil v jeseni 2018. Meritve so se začele izvajati 29. 10. 2018, ko je pretok reke Drave presegel $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Pretok v naravni strugi se je povečal z začetnih $10 \text{ m}^3/\text{s}$ na $1391 \text{ m}^3/\text{s}$, pri čemer je visoka voda trajala tri dni. Na merilnem mestu so se odvzemali vzorci vode, saj meritev z ADCP-merilnikom zaradi zahtevnih razmer ni bila mogoča. Podatki o pretoku so bili pridobljeni iz avtomatizirane merilne postaje na pregradi Melje (DEM), kjer so bili v realnem času dostopni prek spletne platforme Dravskih elektrarn. Za določitev koncentracije lebdečih plavin v odvisnosti od pretoka med visokovodnim dogodkom so bili vzorci vode ročno zajeti iz mostu z uporabo 1000 ml plastičnih steklenic v enournih oziroma dvournih intervalih. Vzorčenje je potekalo do 4. novembra 2018, pri čemer je bilo v zadnjih štirih dneh, ko je pretok upadel pod $500 \text{ m}^3/\text{s}$, odvzet le en vzorec na dan.

Rezultati meritev koncentracije lebdečih plavin v odvisnosti od pretoka med visokovodnim dogodkom v oktobru 2018 so prikazani na sliki 13. Najnižja vrednost pretoka je bila izmerjena 5. novembra 2018 ob 15.13 in je znašala $92 \text{ m}^3/\text{s}$, medtem ko je bil največji pretok dosežen 30. oktobra 2018 ob 18.33 in je znašal $1391 \text{ m}^3/\text{s}$. Najnižja koncentracija lebdečih plavin je bila

105 mg/l (5. novembra 2018 ob 15.13), najvišja pa 2450 mg/l (31. oktobra 2018 ob 00.28).

Ugotovljeno je, da se koncentracije lebdečih plavin pri naraščajočem vodostaju razlikujejo od tistih, izmerjenih pri enakem vodostaju med fazo upadanja vode. Njihova dinamika v vodotokih je odvisna od številnih dejavnikov, med katerimi so ključni energijski pogoji, določeni s pretokom, razpoložljivost plavin, intenzivnost padavin, raba tal in vegetacijska pokrovnost. Ti dejavniki pomembno vplivajo na pojav časovne zamaknenosti odziva, značilne za analizo odnosa med odtokom in koncentracijo lebdečih plavin. Histerezne vzorce tega pojava zaznamujejo nelinearne spremembe v premeščanju plavin, ki so odvisne od hidravličnih pogojev, pri čemer pomembno vlogo igrajo procesi erozije, odlaganja in ponovnega dviga materiala v vodno telo.

V tem primeru se oblikuje histerezna zanka v nasprotni smeri urinega kazalca, kar nakazuje, da so bili viri plavin v oddaljenih delih porečja in so prispevali k površinskemu odtoku. To pomeni, da so plavine dosegle vodotok šele v fazi upadanja pretoka. Zamik premeščanja plavin bi lahko povzročila tudi erozija materiala v porečju, ki se je v prejšnjem poplavnem dogodku odložil na pobočjih in ni dosegel rečnega toka, ob naslednjem visokovodnem dogodku pa so ga površinski odtoki transportirali v strugo. Visoke koncentracije lebdečih plavin v fazi upadanja pretoka so pogosto povezane tudi z zrušitvijo rečnih brežin.

Za natančno opredelitev dejavnikov, ki prispevajo k povečanju koncentracije lebdečih plavin v fazi upadanja pretoka, je potrebna dodatna analiza podatkov o rabi tal in intenziteti padavin.

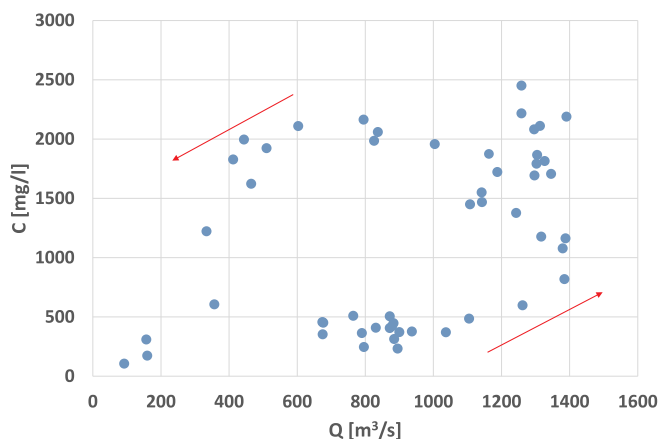
Rezultati jasno kažejo, da se na tem delu reke Drave večina materiala premešča med visokovodnimi dogodki, kar lahko povzroči znatne težave in škodo na poplavljenih območjih, kot so onesnaženje kmetijskih površin in zmanjšana učinkovitost povratnih valov. Zato so nujni posebni ukrepi in dodatne zaščitne strategije za zmanjšanje negativnih vplivov na ta območja.

5 SKLEP

V članku so predstavljeni rezultati večletnih meritev lebdečih plavin, izvedenih na različnih lokacijah reke Drave v obdobjih povprečnih pretokov in med enim visokovodnim dogodkom. Pri raziskavi so bile uporabljene različne merilne tehnike in njihove kombinacije, prilagojene specifičnim terenskim razmeram, z namenom zagotavljanja visoke natančnosti in reprezentativnosti pridobljenih podatkov. Zaradi izrazitih časovnih in prostorskih nihanj koncentracije lebdečih plavin v posameznem profilu je njihovo zanesljivo določanje mogoče le z usklajeno uporabo indirektnih in direktnih merilnih metod.

Raziskava transporta lebdečih plavin med visokovodnim valom potrjuje hipotezo, da se največji delež plavin premešča med poplavnimi dogodki. Analiza rezultatov in prisotnost značilne antihisterezne zanke, ki opisuje korelacijo med pretokom in koncentracijo lebdečih plavin nakazuje, da so glavni viri plavin locirani na poplavnih območjih oziroma da so posledica erozijskih procesov na brežinah vodotoka.

Za vzpostavitev učinkovitega modela dinamike lebdečih plavin v reki Dravi je potrebno kontinuirano spremljanje transporta plavin. Poleg obstoječih senzorjev motnosti, nameščenih na štirih hidroelektrarnah, je nujna tudi uporaba fizičnega vzorčenja in drugih dopolnilnih metod, ki omogočajo pridobitev



Slika 13. Odvisnost med koncentracijo lebdečih plavin C in pretokom vode Q med visokovodnim dogodkom oktobra 2018.

reprezentativnega pregleda režima premeščanja plavin v izbranem prečnem profilu. Takšna kombinacija merilnih pristopov bi omogočila zanesljivejši napovedi transporta plavin in posledično optimizacijo strategij njihovega upravljanja.

Sistematično spremljanje transporta plavin v reki Dravi je ključnega pomena za učinkovito načrtovanje njihovega upravljanja in predstavlja pomemben izziv za upravljavce hidroelektrarn, saj neposredno vpliva na njihovo operativno učinkovitost. Ocenjuje se, da se v akumulacijskih bazenih letno odloži med 30.000 in 40.000 m³ sedimentnega materiala, kar lahko vodi v postopno zmanjševanje uporabne prostornine akumulacij in posledično vpliva na delovanje hidroenergetskih sistemov [Ducman, 2022]. Analiza opazovanj je pokazala postopno zmanjševanje skupne prostornine akumulacij. Ugotovljeno je bilo, da se je od začetka delovanja hidroelektrarn do leta 2014 skupna prostornina zmanjšala za 32 %. Poleg tega se uporabna prostornina akumulacij letno zmanjša za približno 33.000 m³, kar dodatno omejuje njihovo zmogljivost in učinkovitost [Knapič, 2019]

Na podlagi natančnega modela transporta lebdečih plavin bi se lahko določili ustrezni ukrepi za upravljanje plavin, bodisi s preusmerjanjem proti osrednjemu toku reke bodisi z implementacijo sedimentnih pregrad, lovnikov ali zaves. Pri tem je ključno, da so vsi predlagani ukrepi trajnostno naravnani ter ne povzročajo negativnih vplivov na druge uporabnike rečne ekosistema in naravno okolje v njegovi neposredni bližini.

6 ZAHVALA

Del rezultatov, prikazanih v članku, je pridobljen v sklopu naloge »Meritve kalnosti reke Drave v času normalnih pretokov in v času visokovodnega vala med jezom Melje in Ptujskim jezerom« naročnika Inštituta za vode Republike Slovenije kot del projekta HyMoCARES.

7 LITERATURA

ARSO VODE, Program hidrološkega monitoringa površinskih voda. Ljubljana, Retrieved from http://www.arso.gov.si/vode/poročila_in_publikacije/, 2021.

ARSO VODE, Pregled hidroloških razmer površinskih voda v Sloveniji, Poročilo o monitoringu za leto 2020. Ljubljana, 2023.

Bača, P., Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia / Effet d'hystérèse dans la concentration des sédiments en suspension dans le bassin versant de Rybárik (Slovaquie), Hydrological Sciences Journal, 53(1), 224–235, <https://doi.org/10.1623/hysj.53.1.224>, 2008.

Bezák, N., Šraj, M., Mikoš, M., Pregled meritev vsebnosti suspendiranega materiala v Sloveniji in primer analize podatkov, Gradbeni Vestnik, (62), 2013.

Bogen, J., The hysteresis effect of sediment transport systems, Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography, 34(1), 45–54, <https://doi.org/10.1080/00291958008545338>, 1980.

Brilly, M., Matjaž, M., Šraj, M., Vodne ujme. Ljubljana, Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/236974255>, 1999.

Dolinar, B., (a), Merilni nadzor lebdečih plavin v reki Dravi, Materiali in Geokolje, 61, 79–86, 2014.

Dolinar, B., (b), Suspendirani sedimenti v reki Dravi, Gradbeni Vestnik, 63(april), 94–100, 2014.

Ducman, V., Bizjak, K. F., Likar, B., Kolar, M., Robba, A., Imperl, J., ... Gregorc, B., Evaluation of Sediments from the River Drava and Their Potential for Further Use in the Building Sector, Materials, 15(12), <https://doi.org/10.3390/ma15124303>, 2022.

Eder, A., Strauss, P., Krueger, T., Quinton, J. N., Comparative calculation of suspended sediment loads with respect to hysteresis effects (in the Petzenkirchen catchment, Austria), Journal of Hydrology, 389(1–2), 168–176, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.043>, 2010.

Garnett Williams, Sediment Concentration Versus Water Discharge During Single Event.Pdf, Journal of Hydrology, Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169489902540>, 1989.

Gregorc, B., Spremljanje vsebnosti suspendiranega materiala v rečni vodi Drave s pomočjo on-line meritev, Ekolist, 2010.

Hutevec, M., Problematika kalnosti v vodotokih. Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Retrieved from <http://www3.fgg.uni-lj.si/DRUGG-DigitalniRepozitorijULFGGhttp://drugg.fgg.uni-lj.si/http://drugg.fgg.uni-lj.si/5955/http://www3.fgg.uni-lj.si/en/DRUGG-TheDigitalRepositoryhttp://drugg.fgg.uni-lj.si/http://drugg.fgg.uni-lj.si/5955/>, 2016.

Knapič, M., Ulaga, F., Preglau, A., Upravljanje S Sedimenti V Akumulacijskih Bazenu Hidroelektrarn Na Reki Dravi : Predstavitel Pilotnega Projekta Plavljenja Sedimentov V Matico, Mišičev Vodarski Dan, 171–176, 2019.

Kramer Stajnko, J., Jecl, R., Nekrep Perc, M., Measurement and modeling of suspended sediment dynamics in watercourses, WIT Transactions on Engineering Sciences, 128, 61–67, <https://doi.org/10.2495/AFM200061>, 2020.

Kramer Stajnko, J., Jecl, R., Nekrep Perc, M., Advances in Monitoring and Understanding the Dynamics of Suspended-Sediment Transport in the River Drava, Slovenia: An Analysis More than a Decade-Long, Applied Sciences (Switzerland), 13(15), <https://doi.org/10.3390/app13159036>, 2023.

Lóczy, D., The Drava River, (Dénes Lóczy, Ed.), Cham: Springer International Publishing, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92816-6>, 2019.

Mikoš, M., Metode Terenskih Meritev Suspendiranih Sedimentov V Rekah Methods of Field Measurements of Suspended Sediments in Rivers, Gradbeni Vestnik, 61, 151–158, 2012.

Mikoš, M., Rečni sedimenti in mineralni agregati v gradbeništvu, Gradbeni Vestnik, 64(december), 28, 2017.

MKGP, Naravovarstveni E-vodnik po Dravi: poglavje Narava, 2022.

Ulaga, F., Monitoring suspendiranega materiala v slovenskih rekah, Acta Hydrotechnica, 23/39(2005), 117–128, 2005.

Ulaga, F., Suspendirane snovi v slovenskih rekah v letih 2021 in 2022, Ujma, 37, 134–138, 2023.

UM FGPA, Model obvladovanja sedimentov v akumulacijah HE na Dravi za ravnanje s sedimenti v akumulaciji ČHE Kozjak, 2–84, Retrieved from www.fgpa.si, 2013.

UM FGPA, Meritve kalnosti reke Drave v času normalnih pretokov in v času visokovodnega vala med jezom Melje in Ptujskim jezerom: končno poročilo. Maribor, Retrieved from www.fgpa.si, 2019.