

## **Analiza morfoloških promena reke Dunav uzvodno od ušća reke Save**

Jasna Muškatirović<sup>1</sup>, Ljubiša Mihajlović<sup>2</sup>, Ivan Mitrović<sup>3</sup>  
Michel Zuijderwijk<sup>4</sup>, Soren Tjerry<sup>5</sup>

**APSTRAKT:** Sistematska merenja rečnih profila duž Dunava omogućila su analizu morfoloških promena na deonici od srpsko-mađarske granice do Zemuna. Radi se o deonici koju karakteriše nestabilno rečno korito i na kojoj postoje uska grla za plovidbu. Određivanje kritičnih sektora, kao i izbor optimalnih hidrotehničkih rešenja radi obezbeđenja uslova za sigurnu i bezbednu plovidbu zavise i od karaktera morfoloških promena..

U radu su analizirane morfološke promene rečnog korita duž toka, njihov karakter i trend. Tokom poslednjih 25 god. na analiziranoj deonici Dunava karakteristični su procesi erozije, odnosno produbljivanja rečnog korita, koji su posebno intenzivirani u periodu od 2008 do 2011 god. Registrovane značajne morfološke promene u ovom periodu predstavljaju dodatni izazov u primeni 1D i 2D modela za simulaciju tečenja vode i nanosa.

Ključne reči: Hidrografska merenja, morfološke promene rečnog toka, erozija korita

## **Analysis of Morphological Changes of the Danube River Upstream from the Sava River Confluence**

**ABSTRACT:** Systematic hydrographic surveys of the Danube River cross-sections enabled the analysis of morphological changes of the river stretch from the Serbian-Hungarian border to Zemun. This stretch of the Danube River is characteristic for the unstable bed and number of critical sectors for navigation. Definition of critical sectors, as well as definition of optimal hydraulic solutions which would provide safe navigation depends, among other things, on character of morphological changes along the river.

Morphological changes of the river bed, their character, and trends were analyzed in this paper. Erosion processes, i.e. deepening of the river bed, are characteristic for last 25 years, especially intensified since 2008. These observed morphological changes caused additional challenge in application of 1D and 2D models for flow and sediment transport simulation.

Key words: hydrographic survey, morphological changes of the river bed, bed erosion

---

<sup>1</sup> Dr Jasna Muškatirović, dipl.građ.inž., načelnik, Direkcija za vodne puteve, Francuska 9, Beograd

<sup>2</sup> Ljubiša Mihajlović, dipl.građ.inž., pomoćnik direktora, Direkcija za vodne puteve, Francuska 9, Beograd

<sup>3</sup> Mr Ivan Mitrović, menadžer projekta, Direkcija za vodne puteve, Francuska 9, Beograd

<sup>4</sup> Michel Zuijderwijk, Witteveen+Bos, Bulevar Mihaila Pupina 12. Novi Beograd

<sup>5</sup> Dr Soren Tjerry, DHI, Agern Allé 5,DK-2970 Hørsholm, Denmark

## 1. Uvod

Sredinom 2011. godine započet je projekat, finansiran od strane Delegacije EU u Srbiji, pod nazivom „*Priprema projektne i tenderske dokumentacije za hidrotehničke radove na kritičnim sektorima reke Dunav u Srbiji*“. Konzorcijum koji realizuje ovaj projekat čine holandski Witteveen+Bos, danski DHI i srpski Energoprojekt. Osnovni cilj projekta je priprema projektne dokumentacije za radove na reci Dunav kojima bi se obezbedili uslovi za bezbedno odvijanje plovidbe i uklonili kritični sektori.

Projekat se odvija u tri faze: Faza 1 – Prethodna studija opravdanosti sa Generalnim projektom, Faza 2 – Studija opravdanosti sa Idejnim projektom i Faza 3 – Glavni projekat i Tenderska dokumentacija.

U okviru Faze 1 projekta, kako bi se definisali kritični sektori, bilo je neophodno izvršiti proračun novih niskih plovidbenih nivoa (NPN; EN), prema preporukama Dunavske komisije, a na osnovu hidroloških podataka za period 1981 – 2010. Trenutno važeći niski plovidbeni nivoi su određeni za period 1971 – 2000.

U okviru procesa proračuna novih niskih plovidbenih nivoa na reci Dunav na teritoriji Republike Srbije analizirane su morfološke promene u koritu Dunava, posebno na delu uzvodno od ušća Save u Dunav do srpsko-mađarske granice, kao i promene u krivama proticaja na vodomernim stanicama na kojima postoje merenja protoka vode za duži vremenski period (Bezdan i Bogojevo).

Kako su morfološke promene od izuzetnog značaja za analizu kritičnih sektora za plovidbu i iznalaženje optimalnih hidrotehničkih rešenja, koja neće ugroziti ekološke vrednosti reke Dunav i njenog priobalja, one su veoma detaljno analizirane u okviru Faze 1 projekta „*Priprema projektne i tenderske dokumentacije za hidrotehničke radove na kritičnim sektorima reke Dunav u Srbiji*“.

U ovom radu predstavljena je analiza morfoloških promena korita Dunava uzvodno od ušća reke Save u Dunav na bazi raspoloživih sistematskih hidrografskih merenja rečnog korita u periodu od 1987 do 2011. godine. S obzirom na ograničeni vremenski period neki zaključci se ne mogu generalisati već samo mogu poslužiti kao indikator morfoloških promena po pojedinim sektorima, kako po intenzitetu tako i formi promena (erozija, zasipanje u okviru celog profila, preraspodela nanosa u okviru profila, bagerovanje, rušenje obala, efekti postojećih građevina). Sagledavanje tendencija deformacija rečnog korita treba da pospeši i unapredi projektovanje hidrotehničkih objekata u koritu Dunava radi obezbeđenja neophodnih uslova za bezbedno odvijanje plovidbe.

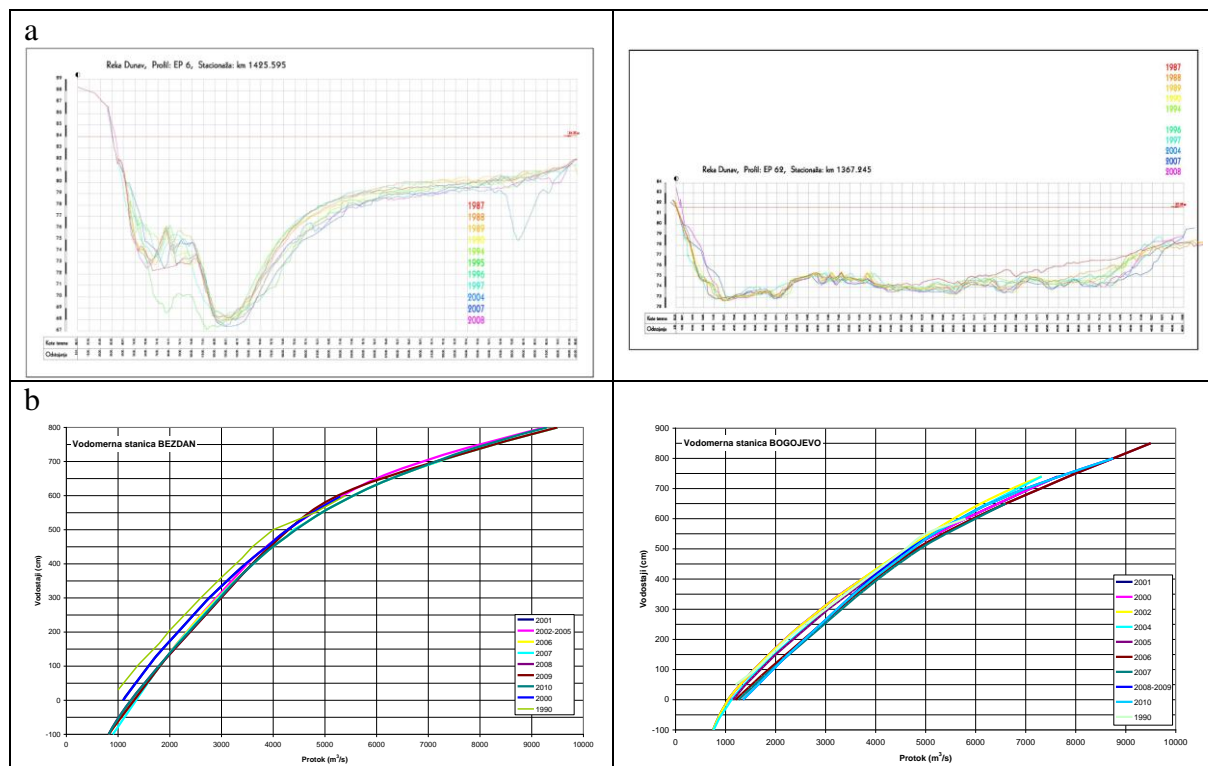
## 2. Analiza poprečnih profila

Direkcija za vodne puteve (Plovput) svake godine vrši sistematska hidrografska merenja rečnog korita reke Dunav od srpsko-mađarske granice do Grocke. Sa merenjima se započelo 1964. godine, na unapred definisanim profilima (EP profili – evidencioni profili) na međusobnom rastojanju od oko 1000m. Od 2007. godine broj profila koji se meri je povećan i uvedeni su profili koji se nalaze na približnom međusobnom rastojanju od oko 200m (NO profili). Direkcija za vodne puteve za svoje analize koristi elektronsku bazu podataka u koju su pohranjena sva hidrografska merenja od 1987. na ovamo.

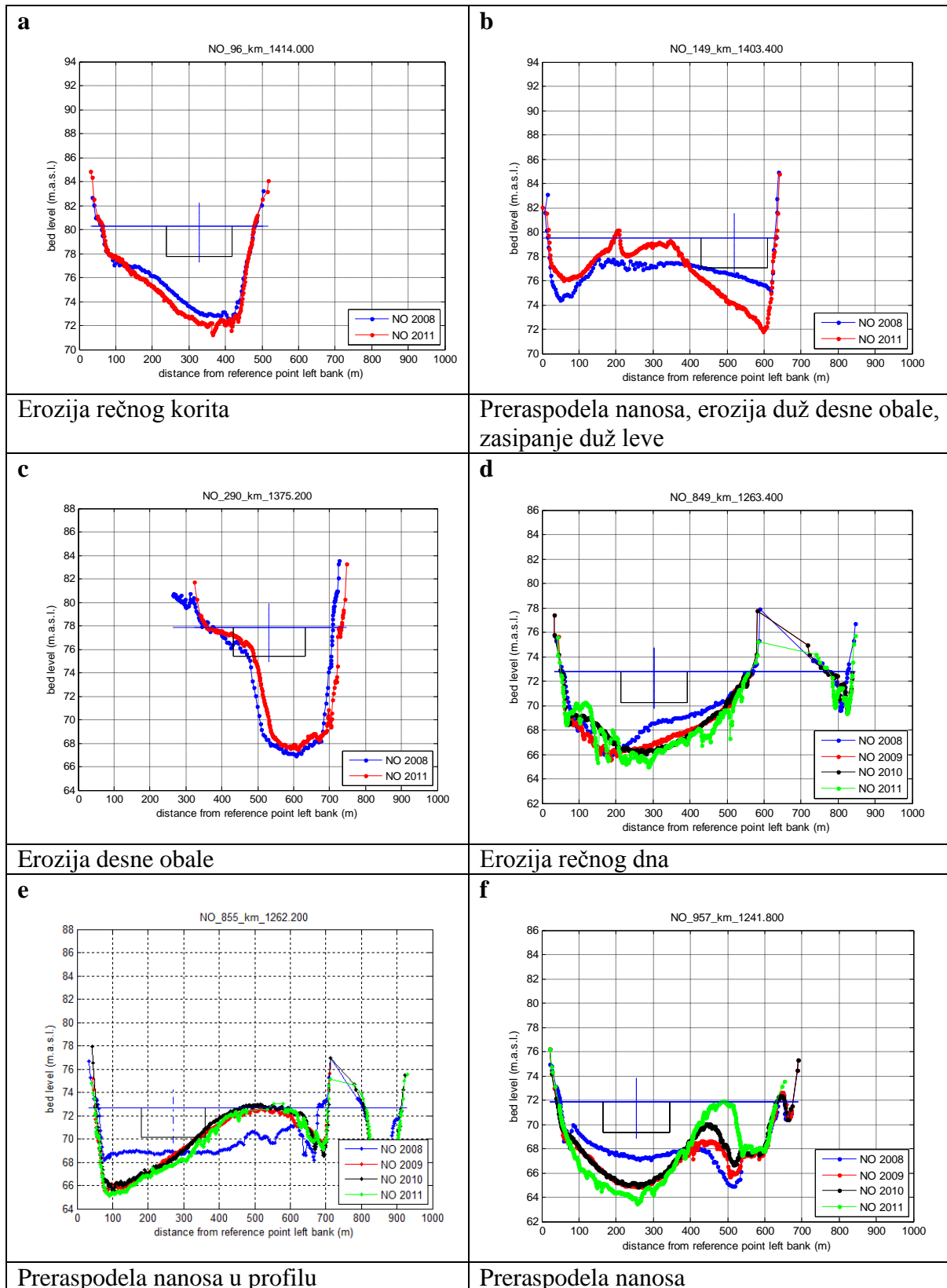
# 16. Savetovanje SDHI i SDH - Donji Milanovac, Srbija 2012. Conference SDHI and SDH - Donji Milanovac, Serbia 2012.

Kao što je poznato, niski plovidbeni nivoi, u profilu vodomerne stanice na kojoj se sistematski vrši merenje protoka, se definišu tako što se na krivoj trajanja protoka za tridesetogodišnji period odredi protok trajanja 94%, izuzimajući periode sa ledom, a potom se preko krive protoka za poslednju godinu definiše vodostaj, tj. nivo. Kada je izvršen proračun za vodomernu stanicu Bezdán konstatovano je da se  $Q_{94\%}$  za period 1981 – 2010. nije drastično promenio u odnosu na onaj izračunat za period 1971 – 2000, ali s obzirom da je kriva protoka značajno promenjena, samim tim i niski plovidbeni nivo je značajno niži (20cm niži u odnosu na trenutno važeći za vodomernu stanicu Bezdán). Ovo je bio razlog da se izvrši revizija niskih plovidbenih nivoa duž cele analizirane deonice, kako za potrebe definisanja kritičnih sektora, tako i za potrebe definisanja visine regulacionih građevina.

Proces erozije rečnog korita, posebno u periodu od 2008. do 2011. godine evidentiran je i kroz krive protoka Republičkog hidrometeorološkog zavoda, na vodomernim stanicama Bezdán i Bogojevo. Krive protoka, definisane na ovim stanicama poslednjih godina, značajno odstupaju od ranije uspostavljenih, u zoni malih voda, tj. proticaja na osnovu kojih se definiše niski plovidbeni nivo. Na slici 1 prikazani su profili vodomernih stanica Bezdán i Bogojevo i krive protoka za višegodišnji period.



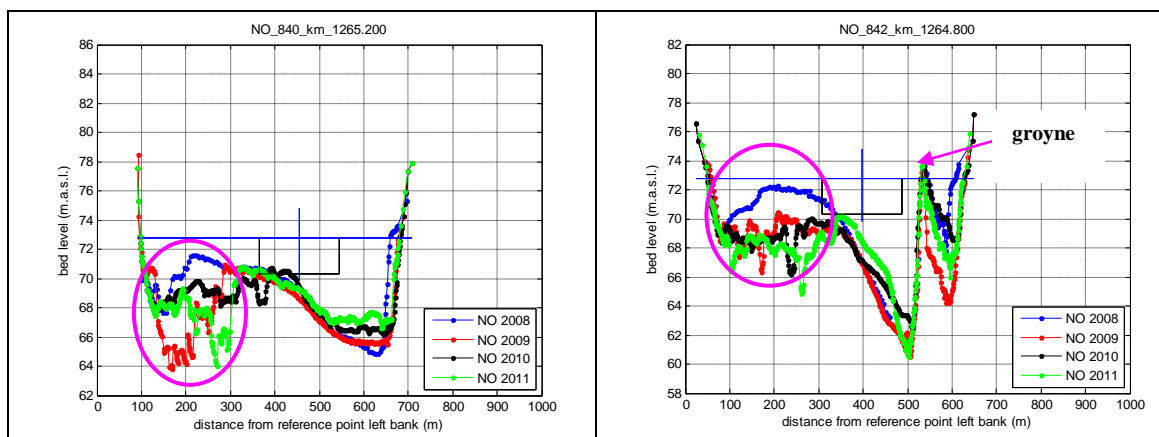
Slika 1. Vodomerne stanice Bezdán i Bogojevo: a) Profili stanica, b) krive protoka



Slika 2. Karakteristični primeri poprečnih profila reke Dunav

Promene rečnog korita Dunava na sektoru od srpsko-mađarske granice (km 1433+000) do Zemuna(1173+400), analizirane su na bazi snimljenih profila.

Morfološke promene se sagledavaju generalno u eroziji rečnog korita i preraspodeli naslaga nanosa po profilima na većem delu razmatrane deonice. Pored toga, evidentni su efekti bagerovanja, kao i efekti do sada izgrađenih hidrotehničkih objekata za potrebe poboljšanja plovidbenih uslova. Na slikama 2 i 3 prikazani su karakteristični primeri promena u okviru poprečnih profila.



Slika 3. Efekti bagerovanja na poprečne profile u zoni Futoga

Analiza geneze promena profila duž posmatrane deonice reke Dunav je značajan faktor prilikom definisanja kritičnih sektora.

Na osnovu analize poprečnih profila reke Dunav (snimljenih od 1987. do 2011.) došlo se do sledećih zaključaka:

- Ceo analizirani period karakterišu neprekidne morfološke promene rečnog korita karakteristične za aluvijalne tokove formirane u sopstvenom nanosu;
- Evidentna je erozija u skoro svim profilima sa izuzetkom profila nizvodno od Novog Sada u kojima je do 2007. god. registrovano i zasipanje;
- Proces erozije rečnih profila (produbljivanje) intenziviran je u periodu 2008 – 2011. god. u odnosu na period 1987 – 2007. god., pri čemu su najveće promene registrovane između hidrografskih merenja 2010. i 2011 god.;
- Registrovane promene, značajno produbljivanje rečnog korita, posebno u toku 2011 god. zahteva analizu režima vode i nanosa i intervencije u toku ne samo na analiziranoj deonici već i u okviru sliva da bi se utvrdili mogući uzroci.

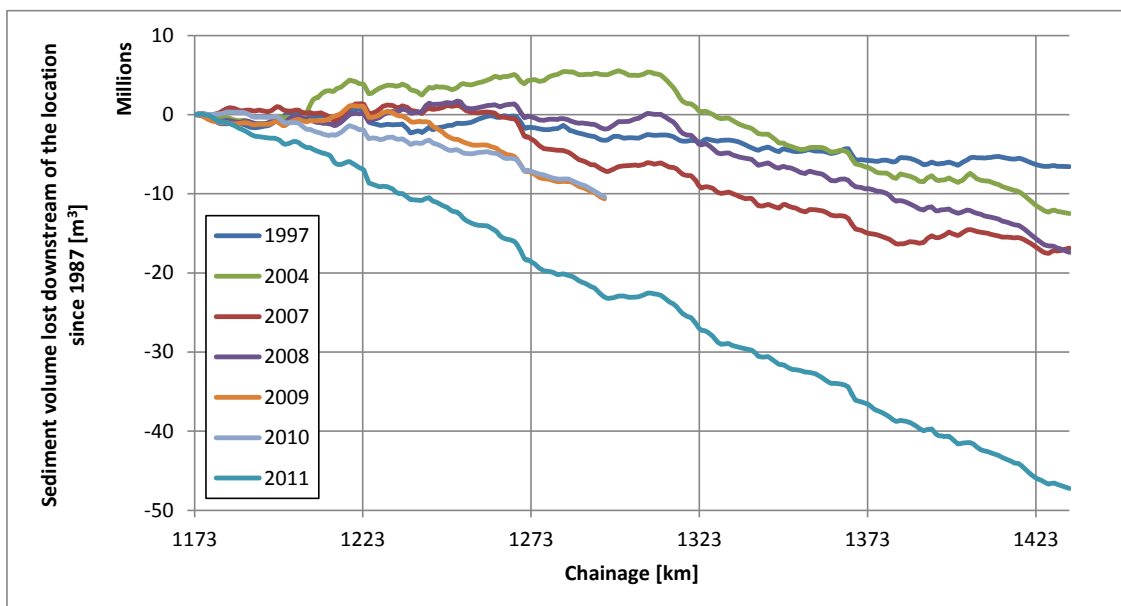
### 3. Karakter morfoloških promena

Karakter promena rečnog korita u periodu od 1987. do 2011. god. analiziran je preko integrisanih zapremina erodiranog, odnosno istaloženog nanosa na analiziranom sektoru Dunava.

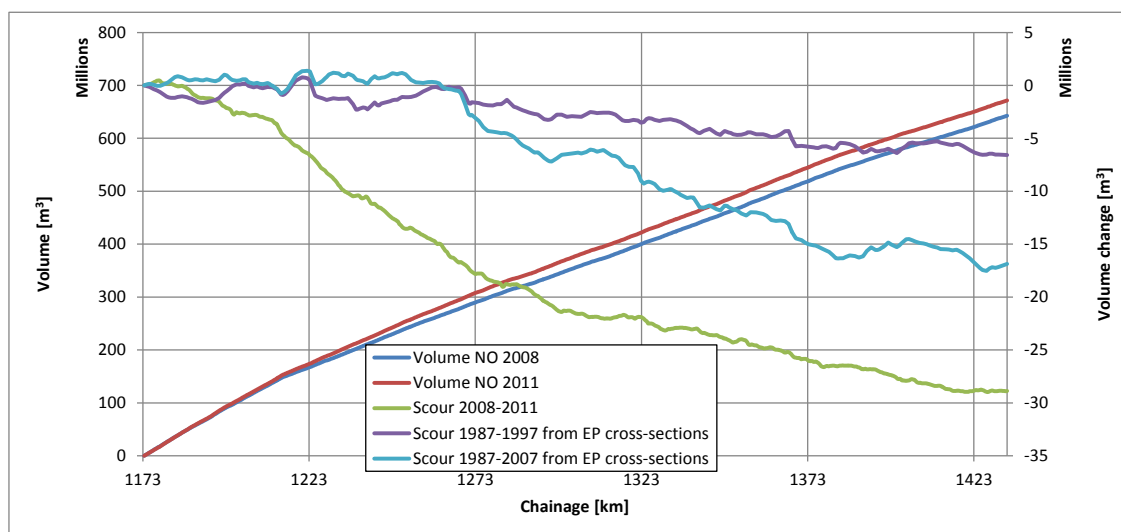
Na osnovu snimljenih EP profila za svaku godinu određena je zapremina vode ispod utvrđenog nivoa malih voda (nivoi dobijeni linearnom interpolacijom niskog plovidbenog nivoa) između profila. Za sve profile duž analiziranog sektora određena je površina profila, a onda i kriva zapremine vode. Integrisana kriva zapremine je

određena tako što je usvojeno da je integrisana zapremina nula u Zemunu i jednaka zapremini vode nizvodno od svakog poprečnog preseka. Integrisana zapremina vode na srpsko-mađarskoj granici je ukupna integrisana zapremina na analiziranom sektoru. Da bi se kvantifikovale morfološke promene u periodima za koje postoje snimanja profila integrisana kriva zapremine za 1987 god oduzeta je od integrisanih krivih zapremine utvrđenih za 1997, 2004, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 god., čime je utvrđeno kolika je zapremina nanosa transportovana nizvodno, a kolika je istaložena, slika 4.

Prikazane su integrisane zapremine erodiranog, odnosno istaloženog nanosa duž analizirane deonice za pojedine vremenske periode. Za period od 2008 do 2011 ponovljena je ista procedura korišćenjem NO profila. Na slici 5 prikazana je integrisana zapremina erodiranog nanosa korišćenjem ovih profila.



Slika 4. Integrisane promene zapremine rečnog korita za 1997, 2004, 2007, 2008, 2009, 2010 i 2011. god. u odnosu na 1987god



Slika 5. Proračunate zapremine vode ispod ranije definisanog nivoa vode

Kao što se vidi na celoj analiziranoj deonici je dominantan proces erozije, odnosno produbljavanja rečnog korita. Najveće promene su se odigrale u periodu 2008-2011 god.

Ukupna zapremina erodiranog nanosa na analiziranoj deonici u pomenutom periodu iznosi 28,5 mil.m<sup>3</sup>. Intenzitet erozionog procesa je izraženiji na delu Dunava uzvodno od Bačke Palanke (km 1295+000) do srpsko-mađarske granice. Ukupna zapremina erodiranog nanosa na ovom delu toka je 22 mil.m<sup>3</sup>, dok na nizvodnom delu ista iznosi 6,5 mil.m<sup>3</sup>. Za period između 1987-2007 god. tj. za 20 godina ukupan gubitak nanosa je 17 mil.m<sup>3</sup>. I za ovaj period evidentna je intenzivnija erozija na uzvodnom delu Dunava. Integrisana zapremina erodiranog nanosa na sektoru uzvodno od profila na km 1270+000 iznosi oko 17 mil.m<sup>3</sup>, dok promene poprečnih profila nizvodno od ovog profila do Zemuna ukazuju na procese zasipanja. Najveće zasipanje na nizvodnom sektoru analizirane deonice je registrovano u periodu od 1987 do 2004 godine.

Na osnovu integrisanih krivih zapremine moguće je utvrditi približno osrednjeno produbljivanje korita na različitim sektorima za različite vremenske periode.

## 4. Uređenje kritičnih deonica za potrebe plovidbe

Određivanje kritičnih sektora za plovidbu na kojima nisu zadovoljeni uslovi za sigurnu i bezbednu plovidbu je delikatan zadatak gledano i sa aspekta neprekidnih morfoloških promena rečnog korita. Primena nekog od jednodimenzionalnih ili dvodimenzionalnih hidrauličkih modela podrazumeva tariranje i verifikaciju istih. S obzirom na izražene morfološke promene na razmatranoj deonici Dunava, posebno poslednje tri godine, verifikacija modela je izuzetno komplikovana i može imati uticaja na rezultate hidrauličkih proračuna, a samim tim i na parametre koji predstavljaju ograničavajuće uslove za plovidbu. Kako se radi o izboru sektora koji ne zadovoljavaju željene uslove eventualna odstupanja u proračunima ne mogu imati značajnijeg uticaja.

Sve ovo se imalo u vidu prilikom razvoja 1D hidrauličkog modela koji je korišćen za određivanje niskih plovidbenih nivoa i definisanje kritičnih sektora na Dunavu uzvodno od Zemuna..

Za potrebe primene 2D modela na kritičnim sektorima u toku 2012 god. izvršena su merenja poprečnih profila na svakih 50m.

Kod izbora konačnih rešenja za poboljšanje uslova plovidbe na kritičnim sektorima neophodno je imati u vidu i tendencije promena rečnog korita na svakom pojedinačnom kritičnom sektoru na bazi svih raspoloživih merenja rečnih profila. Ovo je jedan od bitnih uslova pri projektovanju hidrotehničkih radova.

## 5. Zaključci

Na deonici Dunava od Zemuna do srpsko-mađarske granice evidentne su značajne morfološke promene. Na osnovu analize poprečnih profila snimljenih u periodu od 1987. do 2011. godine konstatovano je produbljivanje rečnog korita na najvećem delu toka. Intenzitet erozije varira, s tim što su ovi procesi najizraženiji bili u periodu od 2008. do 2011. god. Ukupna zapremina erodiranog nanosa u tom periodu na

analiziranoj deonici iznosi 28,5 mil.m<sup>3</sup>. Najintenzivnija erozija je na delu uzvodno od Bačke Palanke, dok je ista na nizvodnom delu manje izražena.

Kako je u toku izrada dokumentacije za izbor kritičnih sektora za plovidbu i izbor hidrotehničkih radova radi obezbeđenja uslova za sigurnu i bezbednu plovidbu za svaki analizirani sektor mora se imati u vidu i registrovani trend morfoloških promena. Pored toga neophodno je sprovesti i analize da bi se utvrdili uzroci registrovane degradacije uzvodnog dela rečnog toka Dunava kroz Srbiju.

## Literatura

1. Group of authors, *Preparation of Documentation for River Training and Dredging Works on Selected Sectors Along the Danube River - Phase 1 Pre-feasibility Study*, Final report, Witteveen – Bos, DHI, Energoprojekt, EuropeAid/129691/C/SER/RS, Tender No: 10SER01/14/11