

UDK/UDC: 004.414.23:556.536(282.243.7)

Prejeto/Received: 14.04.2021

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 11.05.2021

DOI: [10.15292/acta.hydro.2021.08](https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2021.08)

Objavljeno na spletu/Published online: 21.06.2021

ENODIMENZIJSKO MODELIRANJE PREMEŠČANJA PLAVIN S TRANSPORTNIMA ENAČBAMA ENGELUND–HANSEN IN ACKERS–WHITE ZA SPODNJO DONAVO

ONE-DIMENSIONAL SEDIMENT TRANSPORT MODELLING WITH ENGELUND–HANSEN AND ACKERS–WHITE TRANSPORT EQUATIONS FOR THE LOWER DANUBE RIVER

Davor Kvočka¹

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

Izvleček

Premeščanje plavin ima lahko negativne posledice za rečno okolje, saj lahko privede do poslabšanja ekološke raznolikosti in povečanja poplavne ogroženosti. Modeliranje premeščanja plavin je tako eno ključnih orodij pri upravljanju porečij in načrtovanju rečnih urejevalnih objektov. V tej študiji smo preverili primernost 1D modeliranja celotne premostitvene zmogljivosti plavin z uporabo transportnih enačb Engelund–Hansen in Ackers–White za območje spodnje Donave. V študiji smo ovrednotili vpliv zrnastostnega razvrščanja na natančnost 1D modelnih rezultatov, primernost 1D modeliranja premeščanja plavin v okviru inženirskih projektov in primernost enačb Engelund–Hansen in Ackers–White za oceno pretoka plavin na območju spodnje Donave. Modelne rezultate smo primerjali s terenskimi meritvami, pri čemer smo natančnost modelnih rezultatov ovrednotili s statističnimi testi. Dobljeni rezultati kažejo: (i) zrnastostno razvrščanje nima bistvenega vpliva na rezultate 1D modeliranja, (ii) 1D modeliranje premeščanja plavin podaja dovolj natančne rezultate za praktično inženirsko uporabo (npr. ocena obsega poglabljanja dna) in (iii) enačba Engelund–Hansen je načeloma bolj primerna za modeliranje premeščanja plavin na območju spodnje Donave.

Ključne besede: rečne plavine; modeliranje transporta plavin; rečna hidravlika; enačba Engelund–Hansen; enačba Ackers–White; Donava.

Abstract

Sediment transport can have a negative impact on riparian environments, as it can lead to the deterioration of ecological diversity and increase flood risks. Sediment transport modelling is thus a key tool in river basin management and the development of river training structures. In this study, we examined the appropriateness of 1D modelling for total sediment transport loads using the Engelund–Hansen and Ackers–White transport equations for the Lower Danube River. The study evaluated the effect of sediment grading on the accuracy of 1D model results, the appropriateness of 1D sediment transport modelling within technical or engineering projects, and the appropriateness of the Engelund–Hansen and Ackers–White equations for estimating sediment yield in the area of the Lower Danube River. The model results have been compared to field measurements, with the accuracy of the modelling results being evaluated with statistical tests. The obtained

¹ Stik / Correspondence: davor.kvocka@fgg.uni-lj.si

© Kvočka D.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Kvočka D.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence.](#)

results show: (i) the sediment grading does not have a significant impact on the 1D modelling results, (ii) 1D sediment transport modelling gives sufficiently accurate results for practical engineering use (e.g. the estimation of dredging activities), and (iii) the Engelund–Hansen equation is generally better for sediment transport modelling in the Lower Danube River.

Keywords: river sediment; sediment transport modelling; river hydraulics; Engelund–Hansen equation; Ackers–White equation; Danube.

1. Uvod

Premeščanje plavin ima lahko velik vpliv na rečno okolje, saj se z erozijo in usedanjem plavin spreminja morfološka podoba rečne struge, kar pa lahko vodi v dolgotrajno degradacijo rečne struge, manjšo hidravlično prevodnost in krajšo življenjsko dobo rečnih urejevalnih objektov (Choi in Lee, 2015). Ocena količine plavin, ki se premika skozi določen rečni odsek, ima tako pomembno vlogo pri upravljanju vodnih virov, vzdrževanju in ohranjanju ekološke raznolikosti, oceni kratkoročnih in dolgoročnih napovedi morfoloških sprememb in oblikovanju zaščitnih ukrepov (Allan in Castillo, 2007; MacArthur et al., 2008; Hicks in Gomez, 2016; Naito et al., 2019).

Številni raziskovalci so združili teoretično in eksperimentalno znanje o gibanju rečnih plavin in predlagali različne pristope in transportne enačbe za oceno količin premeščenih plavin, pri čemer so predlagane enačbe običajno umerjene za določen tip plavin, npr. gramoz (Meyer-Peter in Müller, 1948; Einstein, 1950; Wiberg in Smith, 1989; Parker, 1990; Recking, 2013), pesek (Engelund in Hansen, 1967; van Rijn, 1984a; 1984b; 2007a; 2007b), drobni peski in debeli melji (Westrich in Juraschek, 1985; Huybrechts et al., 2013). Nekateri avtorji so predlagali enačbe, ki upoštevajo širok razpon različnih velikosti plavin (Ackers in White, 1973; 1993), medtem ko so drugi razvili enačbe za struge, kjer se lahko pojavijo ekstremni hidravlični pogoji, npr. hudourniki oz. strme struge (Smart, 1984; Rickenmann, 1991).

Teoretični in empirični pristopi za oceno stopnje premeščanja plavin običajno temeljijo na poenostavljenih predpostavkah, npr. pristopi, ki so bili razviti ob predpostavki stalnega in enakomernega toka (De Sutter et al., 2001). Posledično se razvite transportne enačbe za oceno stopnje premeščanja plavin v realnih pogojih opirajo tudi na različne kalibracijske parametre, ki

so bili v večini primerov določeni na podlagi laboratorijskih testov (Sinnakaudan et al., 2006). Laboratorijski testi so se običajno izvajali pri nizkih globinah toka (tj. pri globinah manjših od 0,5 m), kar pa lahko predstavlja težavo, ko se transportne enačbe uporabi za oceno pretoka plavin na velikih rekah z večjimi globinami toka. Na primer, povprečne globine toka za Donavo, eno izmed največjih evropskih rek, se gibljejo med 5 in 10 m (CH2M, 2018). Posledično lahko pride do velikih odstopanj med ocenjenimi vrednostmi stopnje premeščenih plavin in dejanskimi izmerjenimi vrednostmi, saj je v laboratorijskih razmerah Reynoldsovo število veliko manjše, Froudovo število veliko večje in hidravlični gradienti precej strmejši v primerjavi z razmerami v velikih naravnih rekah (Molinas in Wu, 2001).

Dva izmed najbolj široko uporabljenih pristopov za oceno stopnje premeščanja plavin sta enačbi Engelund in Hansen (1967) (EH) in Ackers in White (1973) (AW) (Naito et al., 2019; Petkovsek, 2020). Engelund in Hansen (1967) sta uporabila Bagnoldov koncept moči toka (Bagnold, 1966) in načelo podobnosti za določitev enačbe za premeščanje plavin. Enačba EH je bila razvita na podlagi 116 laboratorijskih testov (Guy et al., 1966), ki so vključevali štiri različne premere zrn plavin (0,19, 0,27, 0,45 in 0,93 mm) in različne pretoke do maksimalne globine toka 0,34 m.

Ackers in White (1973) sta izrazila mobilnost in stopnjo premeščanja plavin z uporabo brezdimenzijskih parametrov, pri čemer je njuna analiza prav tako temeljila na Bagnoldsovem konceptu moči toka. Vrednosti brezdimenzijskih parametrov so bile določene na podlagi 925 laboratorijskih testov, ki so vključevali različne pretoke do maksimalne globine toka 0,4 m in za premere zrn med 0,04 in 4 mm. Nekateri testi so pokazali, da enačba AW precenjuje vrednosti stopnje premeščenih lebdečih plavin (Wu et al., 2008). Posledično je bila enačba AW posodobljena

(Ackers in White, 1993). Posodobljena metoda ocenjuje nižje stopnje premeščanja lebdečih plavin, medtem ko se parametri za oceno premeščanja rinjenih plavin niso spremenili (Petkovsek, 2020).

Navkljub vesplošno razširjeni uporabi imata metodi EH in AW nekaj pomanjkljivosti. Prvič, obe metodi temeljita na odvisnosti med pretokom in lastnostmi plavin (npr. velikost zrn, specifična teža). Posledično lahko hitro pride do napak v oceni pretoka plavin, saj podatki o lokalnih lastnostih plavin pogosto niso na voljo, prav tako pa imajo lahko velik vpliv na oceno premeščanja plavin tudi napake pri meritvi hitrosti rečnega toka (Bisantino et al., 2010). Drugič, obe enačbi temeljita na laboratorijskih poskusih, kar privede do vprašanj o primernosti enačb pri oceni premeščanja plavin v velikih naravnih rekah. Enačbe, razvite na podlagi laboratorijskih poskusov, imajo namreč tendenco, da precenijo stopnjo premeščanja plavin za velike reke (Molinas in Wu, 2001). Tretjič, enačbi EH in AW temeljita na uporabi enotne velikosti zrna. Premeščanje plavin v rekah je precej bolj kompleksno kot premeščanje enotnega zrna plavin, saj sta začetek gibanja in hitrost prenosa določene velikosti plavin odvisna od prisotnosti drugih plavin različnih velikosti (Molinas in Wu, 1998). Posledično to pomeni, da bi bilo treba pri oceni premeščanja plavin upoštevati zrnastostno razvrščanje, saj je lahko natančnost rezultatov na podlagi enačb, kot sta EH in AW, precej manjša pri oceni stopnje premeščanja plavin za vodotoke z velikim deležem različnih tipov plavin (Molinas in Wu, 1998; Naito et al., 2019).

Pri modeliranju premeščanja plavin je običajno treba upoštevati določene poenostavitve, če želimo simulacije izvesti v časovno sprejemljivem obdobju. Še posebej je to pomembno pri velikih inženirskih projektih, kjer je vedno treba iskati razmerje med kompleksnostjo modela in natančnostjo modelnih rezultatov ter trajanjem projekta in končnimi stroški (Overton in Meadows, 1976). Uporabniki modelov v sklopu inženirskih projektov se tako običajno soočijo z vprašanjem o ustreznosti dimenzionalnosti modela.

Čeprav točen odgovor na to vprašanje ne obstaja, je na splošno treba pri izbiri modela paziti, da ta upošteva vse relevantne procese z vidika hidrodinamike in premeščanja plavin, ki so pomembni za obravnavano območje. Church (2007)

je na primer izpostavil, da obstaja korelacija med časovno in dolžinsko komponento pri premeščanju plavin v rekah, pri čemer načeloma velja, da se morfološke spremembe na ravni povodja (tj. za rečne odseke reda velikost 10^4 m) zgodijo v vsaj enoletnem časovnem obdobju. Posledično to pomeni, da se za simuliranje premeščanja plavin v teh primerih lahko uporabijo enodimenzijski (1D) modeli (Papanicolaou et al., 2008). Še posebej je to praksa pri velikih inženirskih projektih, saj je splošno uveljavljeno mnenje, da so 1D modeli dovolj indikativni za oceno pretoka plavin v sklopu modeliranja velikih rečnih odsekov (CH2M, 2018).

V tem članku smo ovrednotili primernost 1D modeliranja premeščanja plavin z uporabo transportnih enačb EH in AW za območje spodnje Donave, tj. za približno 500 km dolg rečni odsek Donave med hidroelektrarno Đerdap II in mestom Silistra v Bolgariji. V sklopu študije smo preverili: (i) vpliv upoštevanja/neupoštevanja zrnastostnega razvrščanja na modelne rezultate, (ii) primernost uporabe 1D modeliranja premeščanja plavin za oceno transporta plavin v velikih rekah v sklopu inženirskih projektov in (iii) primernost metod EH in AW za oceno pretoka plavin na območju spodnje Donave. Modelne rezultate smo primerjali z meritvami, pri čemer smo ustreznost modelnih rezultatov ovrednotili z uporabo statističnih metod.

2. Metodologija

2.1 Območje obravnave

1D modeliranje premeščanja plavin se je izvedlo za skoraj 500 km dolg rečni odsek na območju spodnje Donave, ki se razteza med hidroelektrarno Đerdap II in mestom Silistra. 1D modeliranje se je izvedlo v sklopu tehničnega projekta FAST Danube (www.fastdanube.eu), katerega naloga je bila razvoj dolgoročnih in trajnostnih tehničnih rešitev, ki bi omogočile izboljšanje plovniš pogojev na skupnem bolgarsko-romunskem odseku reke Donave. Razvoj numeričnih modelov je bil potreben za lažje razumevanje dolgoročnega obnašanja Donave na obravnavanem odseku in posledično boljše ocene o učinkih predlaganih tehničnih rešitev na plovnost in rečno okolje (CH2M, 2018). Celotno območje modeliranja je prikazano na sliki 1.



Slika 1: Območje obravnave, ki se razteza med HE Đerdap II in mestom Silistra (območje 1D modela je označeno z rdečo bravo).

Figure 1: Study area, which stretches between Iron Gates II and the town of Silistra (the 1D model domain is highlighted in red).

2.2 Opis in razvoj modelov

2.2.1 1D hidravlični model

Za postavitev 1D hidravličnega modela za obravnavani odsek Donave je bil uporabljen program Flood Modeller (Jacobs, 2021a). Program uporablja implicitno Preissmannovo shemo za reševanje enačb za tok s prosto gladno, pri čemer shema temelji na 1D Saint-Venantovi enačbi. Geometrija rečnega kanala je opisana z vrsto zaporednih prečnih prereзов, ki temeljijo na geodetskih posnetkih in se jih lahko poljubno prilagaja za potrebe različnih projektov, npr. prilagoditev profilov zaradi vpliva rečnih urejevalnih objektov. Program za vsak prečni prerez izračuna koto gladine in globino vode, pretok in povprečno hitrost toka za vsak časovni interval simulacije. 1D modeliranje s programom Flood Modeller temelji na več kot 40 letih kontinuiranega razvoja programske opreme, pri čemer se program uporablja tako v industriji kakor tudi v raziskavah (Teng et al., 2017).

1D hidravlični model je sestavljen iz 1175 prečnih prereзов, ki se na obeh straneh reke raztezajo ali do vrha obrambnega nasipa (običajno na levem bregu reke) ali pa do naravno višjega terena (običajno na desnem bregu reke). Za zgornji robni pogoj je bil uporabljen časovno spreminjajoči se iztok iz HE Đerdap (merjeni pretoki), medtem ko je bil za spodnji robni pogoj uporabljen časovno

spreminjajoči se nivo vodne gladine (merjeni podatki iz rečne merilne postaje v Calarasiju). Model prav tako upošteva vse večje pritoke Donave na obravnavanem odseku (npr. Olt). Natančen opis razvoja 1D hidravličnega modela je podan v CH2M (2018).

2.2.2 1D model premeščanja plavin

1D model premeščanja plavin je bil prav tako postavljen s programom Flood Modeller, saj program vsebuje t. i. transportni modul za plavine, ki omogoča analizo spreminjanja rečne morfologije in se lahko uporablja za preučevanje sedimentacijskih in erozijskih procesov v naravnih in umetno ustvarjenih rečnih kanalih. Modul je zmožen oceniti stopnjo premeščanja plavin, morfološke spremembe rečnega dna in količine erodiranega/odloženega materiala znotraj obravnavanega območja. Modul ponuja možnost uporabe šestih različnih transportnih enačb: Engelund in Hansen (1967), Ackers in White (1973), modificirana Ackers in White (1993), Westrich in Juraschek (1985), Parker (1990) in modificirana Parker (1990), ki upošteva izračun kritične strižne napetosti po Shvidchenko et al. (2001). Transportni modul za plavine omogoča simulacijo tako kohezivnih kakor tudi nekohezivnih plavin.

Transportni modul za plavine omogoča tudi upoštevanje vpliva zrnastostnega razvrščanja. Kot je že bilo povedano, večina transportnih enačb temelji na uporabi enotne velikosti zrna. To pomeni, da transportne enačbe obravnavajo rečne plavine kot homogen sloj enako velikih zrn. Flood Modeller ponuja dve možnosti obravnave rečnih plavin v dnu: (i) možnost »composite«, ki omogoča simulacijo samo ene velikosti zrna (homogen sloj plavin v dnu), in (ii) možnost »sorted«, ki omogoča simulacijo več različnih velikosti zrn (nehomogen sloj plavin v dnu). Flood Modeller izračuna stopnjo premeščanja plavin tako, da pomnoži predvideno stopnjo prenosa (izračunano s pomočjo transportnih enačb) z deležem določene frakcije v rečnem dnu. Pri možnosti »composite« se upošteva enotni material v dnu, kar pomeni, da se stopnja premeščanje plavin izračuna na podlagi enotne velikosti zrna.

Pri možnosti »sorted« lahko uporabnik vnese do deset različnih velikosti zrn, pri čemer uporabnik poda povprečno velikost zrna določene frakcije in povprečni delež frakcije v obravnavanem sloju plavin v dnu. Model razdeli prečni profil v tri plasti: aktivna plast na rečni površini, naložena plast tik pod aktivnem slojem in material v dnu. Količina plavin posamezne frakcije se zabeleži v vsaki od treh plasti vzdolž obravnavanega odseka. Z usedanje ali erozijo materiala pride do mešanja plavin v posameznem prečnem profilu. Aktivna plast se tako ves čas posodablja, medtem ko je aktivacija naložene plasti odvisna od vrste procesa, tj. erozije ali usedanja. Debelina aktivne plasti se nastavi na začetku simulacije in se med simulacijo ne spreminja. To pomeni, da se material, erodiran iz aktivne plasti, nadomesti z enako količino materiala iz spodnje plasti, tj. naložene plasti ali materiala v dnu. V primeru usedanja je količina materiala, ki se doda v aktivno plast, enaka količini materiala, ki se iz aktivne plasti prenese v naloženo plast. Možnost »sorted« omogoča tudi uporabo različnih transportnih enačb za različne frakcije plavin (Jacobs, 2021b).

V tej študiji smo uporabili transportni enačbi EH in AW. Enačba EH je v programu Flood Modeller podana na naslednji način:

$$G = K \frac{0.05 W V^2 h^{1.5} S^{1.5}}{(s - 1)^2 D \sqrt{g}} \quad (1)$$

kjer je G volumetrična stopnja premeščanja plavin (m^3/s), K kalibracijski koeficient, W širina toka (m), V hitrost toka (m/s), h globina toka (m), S naklon vodne gladine, s relativna gostota plavin, D premer zrna (mm) in g gravitacijski pospešek (m/s^2).

Enačba AW je v programu Flood Modeller podana na naslednji način:

$$G = K \frac{Q G_{gr} D \left(\frac{V}{V_*}\right)^n}{h} \quad (2)$$

kjer je G volumetrična stopnja premeščanja plavin (m^3/s), K kalibracijski koeficient, Q pretok (m^3/s), G_{gr} brezdimenzijska stopnja premeščanja plavin, V hitrost toka (m/s), V_* strižna hitrost (m/s), n tranzicijski parameter in h globina toka (m), pri čemer je G_{gr} izražen kot:

$$G_{gr} = c \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^M \quad (3)$$

kjer so c , M in A empirični koeficienti, odvisni od velikosti G_{gr} , in F_{gr} mobilnost zrna, ki je podana kot:

$$F_{gr} = \frac{V_*^n}{\sqrt{g D (s - 1)}} \left(\frac{V}{\sqrt{32} \log 10 \left(\frac{10h}{D} \right)} \right)^{1-n} \quad (4)$$

kjer sta s relativna gostota plavin in g gravitacijski pospešek (m/s^2).

1D model premeščanja plavin ne zahteva dodatnih sprememb že postavljenega 1D hidravličnega modela. Dodatno je treba vnesti samo vhodne podatke za modul plavin, ki se nanašajo na določitev lastnosti plavin (velikost zrna, zrnastostno razvrščanje, deleže posameznih frakcij ipd.), izbiro transportne enačbe in izbiro dinamičnega posodabljanja geometrije rečnega kanala. Podrobnejši opis transportnega modula za plavine je podan v Jacobs (2021b), medtem ko je natančen opis razvoja 1D modela premeščanja plavin podan v CH2M (2018).

2.3 Terenske meritve in podatki

V sklopu projekta FAST Danube sta bili opravljene dve seriji meritev (CH2M, 2017a; 2017b). Hidrodinamične meritve in meritve plavin iz prve serije so bile uporabljene za kalibracijo numeričnih modelov, medtem ko so bile meritve iz druge serije uporabljene za validacijo modelov (CH2M, 2018). V sklopu obeh serij meritev so se opravile tudi ločene batimetrične meritve rečnega dna, v sklopu prve serije pa tudi meritve sestave plavin v rečnem dnu. Prvo serijo meritev so opravili med 15. aprilom in 12. junijem 2017, pri čemer so z meritvami začeli v bližini HE Đerdap II in meritve opravljali dolvodno. Drugo serijo meritev so opravili med 11. julijem in 25. avgustom 2017, pri čemer so z meritvami začeli v bližini mesta Silistra in meritve opravljali gorvodno.

Za kalibracijo in validacijo 1D hidravličnega modela sta bila uporabljena dva vira podatkov: (i) podatki o pretoku in nivoju vodne gladine, ki so bili pridobljeni iz rečnih merilnih postaj in (ii) terenske hidrodinamične meritve, ki so bile opravljene vzdolž rečnega korita (574 meritvenih profilov v prvi seriji in 585 meritvenih profilov v drugi seriji). Za vsak merilni profil sta bila zabeležena čas meritve, nivo vodne gladine in velikost pretoka. Lokacije hidrodinamičnih merilnih profilov so bile nato povezane z najbližje ležečimi prečnimi profili, ki so bili uporabljeni za razvoj hidravličnega modela, kar je omogočilo direktno primerjavo rezultatov modela in meritev. Podrobnejši opis postopka kalibracije in validacije 1D hidravličnega modela je podan v CH2M (2018).

Za kalibracijo in validacijo 1D modela premeščanja plavin sta bila uporabljena dva vira podatkov: (i) terenske meritve koncentracij lebdečih plavin (SSC), ki so bile opravljene vzdolž rečnega korita (376 meritvenih profilov v prvi seriji in 379 meritvenih profilov v drugi seriji), in (ii) spremembe v geometriji rečnega dna, ki so bile določene na podlagi razlike med batimetričnimi meritvami, opravljenimi v prvi in drugi seriji. Terenske meritve SSC so bile izvedene z lasersko difrakcijsko napravo LISST-200X, ki je bila posebej razvita za in-situ določanje koncentracije lebdečih plavin v vodi in spada v najnovejši razred laserskih difrakcijskih analizatorjev delcev.

Meritve SSC so bile opravljene na devetih različnih točkah vzdolž vsakega meritvenega profila in na treh različnih globinah na vsaki točki merjenja. Lokacije meritev SSC so bile nato povezane z najbližje ležečimi prečnimi profili. 1D model poda povprečno vrednost SSC za posamezen prečni profil, zato so bile SSC meritve ustrezno povprečene za vsak posamezni profil, da je bila omogočena neposredna primerjava modelnih rezultatov in meritev. V sklopu druge serije meritev so bile izmerjene zelo visoke vrednosti SSC, čeprav so bile meritve opravljene pri nizkih pretokih (2000–3000 m³/s). Anomalija je verjetno posledica prisotnosti visokega deleža organskih snov in alg, ki so verjetno posledica sovpadanja druge serije meritev z nizkim vodostajem Donave in izjemno vročega vremena (CH2M, 2018). Merilna naprava, ki je bila uporabljena za meritve SSC, ne razlikuje med plavinami in organsko snovjo, zato ni bilo možno izvesti naknadnega popravka meritev.

Na območju vseh prečnih profilov, ki so se uporabili za razvoj 1D hidravličnega modela in modela premeščanja plavin, je bila tudi določena povprečna sprememba v koti rečnega dna, ki se je določila na podlagi povprečne razlike med batimetričnimi meritvami, opravljenimi v prvi in drugi seriji. Povprečna razlika med dvema batimetričnima meritvama je povedala, za koliko se je v povprečju poglobil (negativna vrednost) ali zvišal (pozitivna vrednost) nivo rečnega dna na lokaciji posameznega prečnega profila. Določitev povprečne vrednosti merjene spremembe nivoja dna za posamični prečni profil je tako omogočila neposredno primerjavo meritev in modelnih rezultatov, saj 1D model podaja samo povprečno vrednost spremembe za celotni prečni profil. Podrobnejši opis postopka kalibracije in validacije 1D modela premeščanja plavin je podan v CH2M (2018).

2.4 Pristopi za modeliranje premeščanja plavin

V sklopu študije smo preverili štiri različne pristope 1D modeliranja premeščanja plavina, in sicer:

- uporaba enačbe EH z upoštevanjem enotne velikosti zrna (možnost »composite« v transportnem modulu za plavine v programu Flood Modeller) – **pristop EH-composite**

- uporaba enačbe EH z upoštevanjem več različnih velikosti zrn, tj. zrnastostnega razvrščanja (možnost »sorted« v transportnem modulu za plavine v programu Flood Modeller) – **pristop EH-sorted**
- uporaba enačbe AW z upoštevanjem enotne velikosti zrna (možnost »composite« v transportnem modulu za plavine v programu Flood Modeller) – **pristop AW-composite**
- uporaba enačbe AW z upoštevanjem več različnih velikosti zrn, tj. zrnastostnega razvrščanja (možnost »sorted« v transportnem modulu za plavine v programu Flood Modeller) – **pristop AW-sorted**

Velikost zrna za pristopa EH-composite in AW-composite je bila 0,4 mm in je bila določena na podlagi povprečne vrednosti D_{50} za celotni obravnavani odsek modeliranja. Povprečna velikost zrn in njihov delež za pristopa EH-sorted in AW-sorted sta bila določena na podlagi povprečne vrednosti velikosti zrna posamezne frakcije in povprečnega deleža frakcije v sklopu sestave plavin dna. Povprečne velikosti zrn in povprečni delež frakcij uporabljenih za pristopa EH-sorted in AW-sorted so podane v preglednici 1.

2.5 Statistična analiza rezultatov

Samo hidravlično modeliranje ni tema tega članka, vendar bomo vseeno ovrednotili rezultate

Preglednica 1: Vrednosti povprečnih velikosti zrn in povprečnih deležev frakcij, ko so bile uporabljene v pristopih EH-sorted in AW-sorted.

Table 1: The values of mean particle sizes and the average proportion of fractions, which were used in the EH-sorted and AW-sorted approaches.

Zrnastostni razred	Povprečna velikost zrna [mm]	Povprečni delež frakcije
drobni melj	0,0057	0,007
srednji melj	0,0114	0,008
debela melj	0,0216	0,008
debela melj	0,0438	0,006
drobni pesek	0,0877	0,016
drobni pesek	0,1785	0,181
srednji pesek	0,3576	0,49
debela pesek	0,7265	0,23
debela pesek	1,4560	0,044
drobni prod	2,7560	0,01

hidravličnega modeliranja, saj modeliranje premeščanja plavin temelji na rezultatih hidravličnega modeliranja. Natančnost rezultatov hidravličnega modela smo preverili s pomočjo koeficienta učinkovitosti modela, ki sta ga predlagala Nash in Sutcliffe (1970). Koeficient učinkovitosti modela Nash-Sutcliffe (NSE) izračunamo na naslednji način:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{mean})^2} \quad (5)$$

kjer je O_i izmerjena vrednost, P_i izračunana vrednost in O_{mean} povprečje izmerjenih vrednosti.

Vrednost koeficienta NSE oz. učinkovitost se giblje med $-\infty$ in 1. Učinkovitost 1 (tj. $NSE = 1$) ustreza popolnemu ujemanju med predvidenimi oz. modelnimi vrednostmi in izmerjenimi vrednostmi. Učinkovitost 0 ($NSE = 0$) pomeni, da so napovedi modela enako natančne kot povprečje izmerjenih vrednosti. Učinkovitost manjša od nič ($NSE < 0$) pomeni, da je povprečna vrednost izmerjenih vrednosti boljši napovedovalec kot sam model. V splošnem velja, da bližje kot je vrednost koeficienta NSE 1, bolj natančen je model. Koeficient NSE je bil primarno razvit za vrednotenje hidroloških modelov, vendar se ga načeloma lahko uporablja za vrednotenje katerega koli tipa modelov, kot npr. hidravličnih in hidrodinamičnih modelov (Kvočka et al., 2015; Čož et al., 2019).

Rezultate modeliranja premeščanja plavin smo ovrednotili z dvema različnima statističnima testoma, ki primerjata predvidene oz. modelne in izmerjene vrednosti, in sicer: MAE (povprečna absolutna napaka) (angl. mean absolute error) in (ii) PBIAS (odstotek pristranskosti) (angl. percent bias). MAE poda vrednost povprečne absolutne napake med predvidenimi in izmerjenimi vrednostmi, tj. pove nam, koliko so v povprečju predvidene vrednosti oddaljene od izmerjenih vrednosti. Za MAE načeloma velja, da nižja kot je vrednost MAE, bolj natančen je model, pri čemer MAE = 0 pomeni, da se model popolnoma ujema z meritvami. Nekateri avtorji navajajo, da se za majhne vrednosti MAE lahko smatrajo vrednosti, ki so manjše od polovične vrednosti standardnega odklona meritev (Moriasi et al., 2007). Vseeno je treba poudariti, da ne obstajajo natančno določene slabe ali dobre vrednosti MAE (Šraj et al., 2012). Vrednost MAE izračunamo na naslednji način:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (6)$$

kjer je O_i izmerjena vrednost, P_i izračunana oz. modelna vrednost in n število meritev.

PBIAS meri povprečno tendenco predvidenih oz. modelnih vrednosti po odstopanju od izmerjenih vrednosti, tj. koliko model teži k večjim ali manjšim napovedim glede na izmerjene vrednosti (Gupta et al., 1999). Načeloma velja, da nižja kot je vrednost PBIAS, bolj natančen je model, pri čemer PBIAS = 0 pomeni, da se model popolnoma ujema z meritvami. Pozitivna vrednost indeksa PBIAS nakazuje, da so modelne vrednosti v splošnem nižje od izmerjenih, medtem ko negativna vrednost indeksa PBIAS nakazuje, da so modelne vrednosti v splošnem višje od izmerjenih (Gupta et al., 1999). Za modeliranje premeščanja plavin načeloma velja, da so modelni rezultati zadovoljivi, če je vrednost indeksa PBIAS manjša od $\pm 55\%$ (Moriasi et al., 2007). Vrednost PBIAS izračunamo na naslednji način:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \cdot 100 \quad (7)$$

kjer je O_i izmerjena vrednost in P_i izračunana oz. modelna vrednost.

3. Rezultati in diskusija

3.1 Hidravlično modeliranje

Preglednica 2 prikazuje vrednosti koeficientov NSE za rezultate hidravličnega modeliranja, pri čemer smo primerjali modelne rezultate in izmerjene vrednosti vodne gladine in pretoka, ki so jih zabeležili v sklopu dveh merilnih serij (poglavje 2.3). Vrednosti koeficientov NSE, prikazani v preglednici 2, kažejo, da se rezultati hidravličnega modeliranja izjemno dobro ujemajo s terenskimi meritvami. Vrednost koeficienta NSE v bližini vrednosti 1 nakazuje večjo natančnost modela. Posledično lahko zaključimo, da razviti 1D hidravlični model daje zanesljive rezultate, kar je zelo pomembno tudi z vidika modeliranja premeščanja plavin, saj je natančnost transportnih enačb odvisna tudi od natančnosti upoštevanih hidravličnih parametrov.

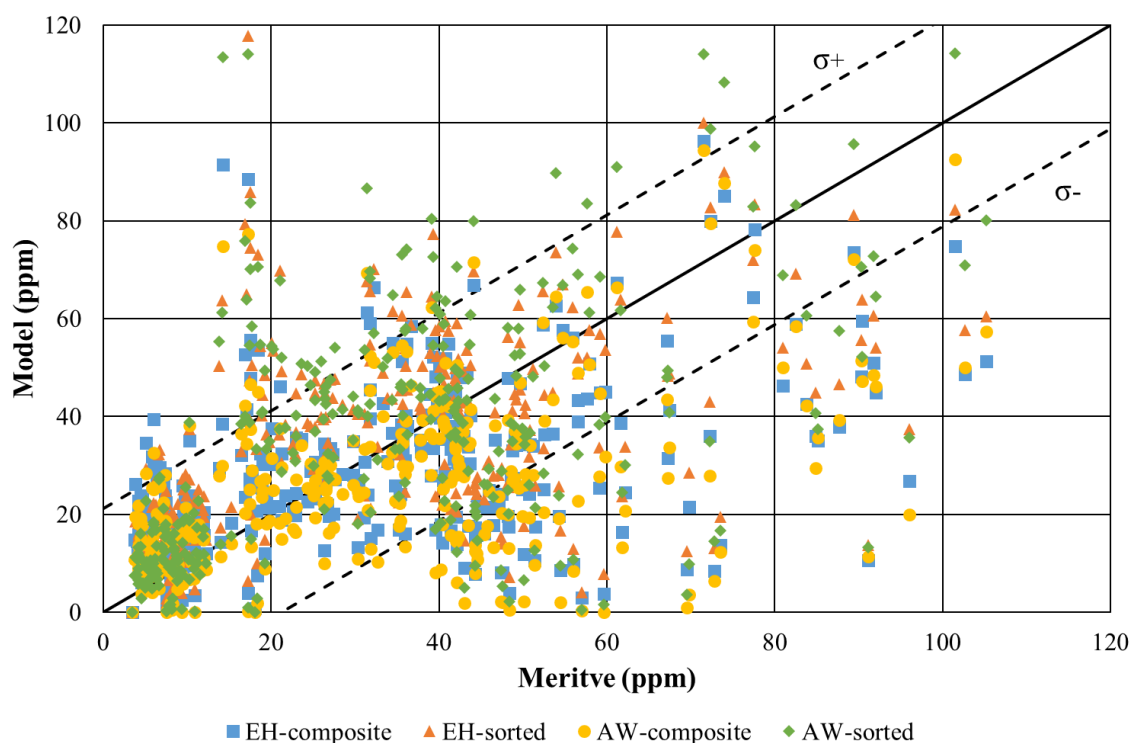
3.2 Modeliranje premeščanja plavin

Slika 2 prikazuje primerjavo med predvidenimi in izmerjenimi koncentracijami lebdečih plavin (SSC) za obravnavane štiri pristope modeliranja premeščanja plavin, tj. EH-composite, EH-sorted, AW-composite in AW-sorted. Kot je navedeno v poglavju 2.3, so bile v sklopu druge serije izmerjene nenavadno visoke vrednosti SSC, ki so bile verjetno posledica prisotnosti visokega deleža organskih snovi (CH2M, 2018). Meritve SSC, opravljene v sklopu druge serije meritev, so posledično zelo nezanesljive, zato smo upoštevali samo meritve SSC, opravljene v prvi seriji meritev. Na sliki 2 lahko vidimo, da se rezultati modela zadovoljivo ujemajo z izmerjenimi vrednostmi, saj se večina rezultatov nahaja znotraj meje standardnega odklona meritev (σ). Iz slike 2 je tudi razvidno, da ni vidnejših razlik med obravnavanimi štirimi pristopi modeliranja premeščanja plavin, kar nakazuje, da pri 1D modeliranju premeščanja plavin na območju spodnje Donave ni bistvenih razlik med tem, ali upoštevamo samo eno velikost zrna (npr. D_{50}) ali pa upoštevamo večje število frakcij.

Preglednica 2: Vrednosti koeficientov NSE za rezultate hidravličnega modeliranja. Vrednosti NSE so bile izračunane za primerjavo modelnih rezultatov in izmerjenih vrednosti vodne gladine in pretoka.

Table 2: The NSE coefficient values for the results of hydraulic modelling. The NSE values were calculated to compare model results against measured water levels and discharge.

Serija	NSE	
	Gladina vode	Pretok
prva	0,95	0,98
druga	0,92	0,95



Slika 2: Primerjava med predvidenimi in izmerjenimi koncentracijami lebdečih plavin (SSC) za obravnavane štiri pristope modeliranja premeščanja plavin.

Figure 2: The comparison between predicted and measured suspended sediment concentrations (SSC) for the four considered sediment transport modelling approaches.

Minimalne razlike med obravnavanimi štirimi pristopi lahko bolje vidimo v preglednici 3, ki prikazuje vrednosti MAE in PBIAS, izračunane za primerjavo med modelnimi in izmerjenimi vrednostmi SSC. Iz preglednice 3 lahko razberemo, da so vrednosti MAE in PBIAS nizke za vse štiri modelne pristope. Na primer, vrednost standardnega odklona meritev SSC je 23,1 ppm, kar pomeni, da so vse izračunane vrednosti MAE zelo blizu polovični vrednosti standardnega odklona. Prav tako so vse vrednosti PBIAS manjše od 55 %,

kar nakazuje zadovoljivo natančnost modela. Na podlagi preglednice 3 lahko tudi sklepamo, da je metoda EH malenkost primernejša za obravnavani rečni odsek kot metoda AW.

Zanimivo je tudi, da modelni pristopi, ki vključujejo zrnastostno razvrščanje, rahlo precenijo vrednosti SSC, medtem ko modelni pristopi, ki vključujejo samo eno velikost zrna, rahlo podcenijo vrednosti SSC. Razlika je posledica večje premešanosti plavin pri višjih rečnih pretokih v velikih rekah, ki lahko vpliva na slabše modelne rezultate, ko se upošteva

enotna velikost zrna (Molinas in Wu, 1998). Vseeno pa so razlike med pristopi v našem primeru majhne, kar nakazuje, da neupoštevanje različnih velikost zrn pri 1D modeliranju lebdečih plavin na območju spodnje Donave nima občutnega vpliva na samo natančnost končnih rezultatov.

Slika 3 prikazuje primerjavo med predvidenimi in izmerjenimi povprečnimi vrednostmi sprememb v višini kote rečnega dna za obravnavane štiri pristope modeliranja premeščanja plavin, tj. EH-composite, EH-sorted, AW-composite in AW-sorted. Na sliki 3 lahko vidimo, da se rezultati modela zadovoljivo ujemajo z izmerjenimi vrednostmi, saj se večina rezultatov nahaja znotraj meje standardnega odklona meritev (σ). Iz slike 3 je tudi razvidno, da ni vidnejših razlik med obravnavanimi štirimi pristopi modeliranja premeščanja plavin, kar zopet nakazuje, da pri 1D modeliranju premeščanja plavin na območju spodnje Donave upoštevanje oz. neupoštevanje zrnastostnega razvrščanja nima bistvenega vpliva na rezultate modeliranja.

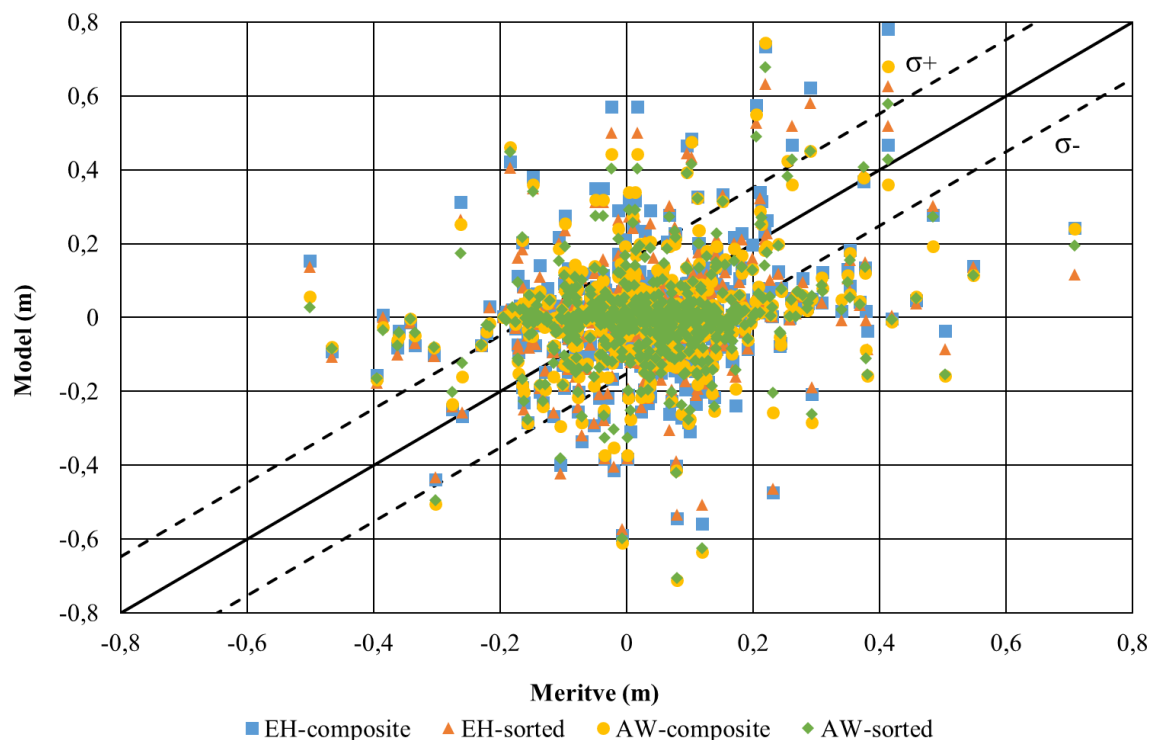
Minimalne razlike med obravnavanimi štirimi pristopi lahko zopet bolje vidimo v preglednici 4, ki prikazuje vrednosti MAE in PBIAS, izračunane za

primerjavo med modelnimi in izmerjenimi povprečnimi vrednostmi sprememb v višini kote rečnega dna. Iz preglednice 4 lahko razberemo, da so vrednosti MAE in PBIAS zelo podobne za vse štiri obravnavane modelne pristope. Statistično gledano rezultati modeliranja spremembe v geometriji rečne struge niso tako natančni kot rezultati modeliranja premeščanja lebdečih plavin, saj so vrednosti PBIAS večje od 55 %, prav tako pa so vrednosti MAE večje od polovične vrednosti standardnega odklona meritev, ki v tem primeru znaša 0,15 m. Vseeno je treba upoštevati dejstvo, da natančno modeliranje geomorfoloških sprememb rečne struge ni možno (Guan et al., 2015), in da se kot zadovoljivo natančen smatra tisti hidro-morfološki model, katerega modelni rezultati so enakega reda velikosti kot terenske meritve (Benmansour et al., 2013; CH2M, 2018; Benisiewicz et al., 2021). Ob upoštevanju vseh poenostavitev, upoštevanih pri 1D modeliranju premeščanja plavin in obdelavi terenskih meritev, lahko zaključimo, da se modelni rezultati vseh štirih upoštevanih modelnih pristopov zadovoljivo ujemajo s terenskimi meritvami.

Preglednica 3: Vrednosti MAE in PBIAS za obravnavane štiri pristope modeliranja premeščanja plavin – izračunano za primerjavo med modelnimi in izmerjenimi vrednostmi SSC.

Table 3: The values of MAE and PBIAS for the four considered sediment transport-modelling approaches – calculated to compare the model against measured SSC values.

Pristop	MAE [ppm]	PBIAS [%]
EH-composite	15,3	11,1
EH-sorted	16,2	-9,9
AW-composite	15,1	21,0
AW-sorted	16,5	-7,9



Slika 3: Primerjava med predvidenimi in izmerjenimi povprečnimi vrednostmi sprememb v višini kote rečnega dna za obravnavane štiri pristope modeliranja premeščanja plavin.

Figure 3: The comparison between predicted and measured averaged bed level changes for the four considered sediment transport-modelling approaches.

Preglednica 4: Vrednosti MAE in PBIAS za obravnavane štiri pristope modeliranja premeščanja plavin – izračunano za primerjavo med modelnimi in izmerjenimi povprečnimi vrednostmi sprememb v višini kote rečnega dna.

Table 4: The values of MAE and PBIAS for the four considered sediment transport-modelling approaches – calculated to compare the model against the measured averaged bed level changes.

Pristop	MAE [m]	PBIAS [%]
EH-composite	0,14	86,4
EH-sorted	0,14	91,0
AW-composite	0,13	91,1
AW-sorted	0,13	94,0

Zgoraj predstavljeni rezultati nakazujejo, da:

- vpliv zrnastostnega razvrščanja oz. upoštevanje več različnih velikosti zrn nima bistvenega vpliva na rezultate modeliranja premeščanja plavin na območju spodnje Donave. Čeprav nekateri avtorji navajajo, da modeliranje premeščanja plavin, ki upošteva samo eno velikost zrna (npr. D_{50}), ni primerno za modeliranje transportnih procesov v velikih rekah (Molinas in Wu, 1998; 2001; Naito et al.,

2019), lahko na podlagi rezultatov sklepamo, da za potrebe 1D modeliranja zelo dolgih odsekov (npr. nekaj sto kilometrov) zadostuje že upoštevanje ene velikosti zrna. To je verjetno posledica relativne homogenosti plavin v dnu na tem delu Donave. Okoli 50 % vseh plavin namreč predstavlja srednji pesek, medtem ko peski predstavljajo 97 % vseh plavin na tem območju (glej preglednico 1). Posledično modeliranje premeščanja plavin z

upoštevanjem enotne velikosti zrna ne vpliva bistveno na kakovost modelnih rezultatov.

- 1D modeliranje premeščanja plavin za velike reke in dolge rečne odseke podaja dovolj natančne rezultate za uporabo v tehnične oz. inženirske namene. Namen 1D modeliranja je predvsem ocena pretoka in dotoka plavin, premestitvene zmogljivosti in splošnih vzorcev erozije in sedimentacije. Ti podatki so uporabni predvsem za pripravo in izvedbo rednega vzdrževanja plovni poti, prav tako pa so lahko v pomoč v začetnih fazah razvoja inženirskih rešitev, npr. razvoj rečnih urejevalnih objektov (CH2M, 2018).
- Obe obravnavani enačbi, tj. Eh in AW, podajata zadovoljive rezultate pri 1D modeliranju premeščanja plavin na območju spodnje Donave. Na območju spodnje Donave je rečno dno v veliki meri sestavljeno iz peska, zato bi za vsa prihodnja modeliranja premeščanja plavin na območju spodnje Donave predlagali uporabo enačbe EH, saj načeloma podaja boljše rezultate pri modeliranju premeščanja plavin v velikih rekah, kjer prevladujejo peski (Molinas in Wu, 2001; Kiat et al., 2005; CH2M, 2018; Naito et al., 2019).

4. Zaključki

V sklopu študije smo ovrednotili štiri različne modelne pristope: enačba EH brez upoštevanja zrnastostnega razvrščanja (enotna velikost zrna), enačba EH z upoštevanjem zrnastostnega razvrščanja (več različnih velikosti zrn), enačba AW brez upoštevanja zrnastostnega razvrščanja (enotna velikost zrna) in enačba AW z upoštevanjem zrnastostnega razvrščanja (več različnih velikosti zrn). Primerjava s terenskimi meritvami in nadaljnje vrednotenje natančnosti modelnih rezultatov s statističnim testi sta pokazala, da so vsi štirje modelni pristopi približno enako učinkoviti oz. podajajo zadovoljivo natančne modelne napovedi o premeščanju lebdečih plavin in spremembah v geometriji rečnega dna.

Na podlagi dobljenih rezultatov je mogoče zaključiti: (i) vpliv zrnastostnega razvrščanja oz. upoštevanje več različnih velikosti zrn nima

bistvenega vpliva na rezultate 1D modeliranja premeščanja plavin na območju spodnje Donave, kar je verjetno posledica enostavnosti 1D pristopa in relativno visoke homogenosti rečnih plavin (več kot 90 % vseh plavin na območju spodnje Donave so peski), (ii) 1D modeliranje premeščanja plavin za velike reke in dolge rečne odseke podaja dovolj natančne rezultate za uporabo v tehnične oz. inženirske namene, kot npr. za oceno obsega vzdrževalnih del in začetne faze razvoja rečnih urejevalnih objektov, in (iii) za območje spodnje Donave predlagamo uporabo transportne enačbe EH, saj načeloma podaja boljše rezultate pri modeliranju premeščanja plavin za reke, kjer v rečnem dnu prevladujejo peski.

Vseeno je treba poudariti, da ima 1D modeliranje premeščanja plavin omejeno uporabo. Za natančen razvoj rečnih urejevalnih struktur in protipoplavnih ukrepov je treba oceniti premeščanje plavin z uporabo dvodimenzijskih (2D) ali trodimenzijskih (3D) modelov, saj je poznavanje in razumevanje lokalnih erozijskih in sedimentacijskih vzorcev v bližini tehničnih objektov (npr. vpliv turbulentnega toka na erozijske procese okoli vrha jezic) ključno za razvoj učinkovitih rešitev.

Viri

Ackers, P. in White, W. R. (1973). Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, **99(11)**, 2041–2060.
<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003791>.

Ackers, P. in White, W. R. (1993). Sediment transport in open channels: Ackers and White update. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water, Maritime and Energy*, **101(4)**, 247–249.
<https://doi.org/10.1680/iwtme.1993.25490>.

Allan, J. D. in Castillo, M. M. (2007). *Stream Ecology: Structure and function of running waters*. Springer Netherlands, Netherlands: 436 str.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5583-6>.

Bagnold, R. A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. United States Government Printing Office, Washington, USA, 422-I: 37 str. Dostopno na: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp422I> (Pridobljeno: 02/04/2021).

- Benisiewicz, B., Momblanch, A., Leggatt, A. in Holman, I. P. (2021). Erosion and Sediment Transport Modelling to Inform Payment for Ecosystem Services Schemes. *Environmental Modeling & Assessment* **26**(1), 89–102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10666-020-09723-9>.
- Benmansour, M., Mabit, L., Nouira, A., Moussadek, R., Bouksirate, H., Duchemin, M. in Benkdad, A. (2013). Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex. *Journal of Environmental Radioactivity* **115**, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.07.013>.
- Bisantino, T., Gentile, F., Milella, P. in Trisorio Liuzzi, G. (2010). Effect of Time Scale on the Performance of Different Sediment Transport Formulas in a Semiarid Region. *Journal of Hydraulic Engineering* **136**(1), 56–61. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000125).
- CH2M. (2017a). FAST Danube: Measurements Report-first campaign - Surveys, investigations & measurements CH2M, Bucharest, Romania: 56 str. Dostopno na: http://www.fastdanube.eu/sites/default/files/official_docs/FAST-Danube_MeasurementsReport_FirstCampaign_31Jul17_EN_FinVer.pdf (Pridobljeno: 22/03/2021).
- CH2M. (2017b). FAST Danube: Measurements Report-second campaign - Surveys, investigations & measurements CH2M, Bucharest, Romania: 30 str. Dostopno na: http://www.fastdanube.eu/sites/default/files/official_docs/Report%20Campaign%202021_1003%20fin.pdf (Pridobljeno: 22/03/2021).
- CH2M. (2018). FAST Danube: New Mathematical Models Report - Development/Calibration/Validation. CH2M, Bucharest, Romania: 131 str. Dostopno na: http://www.fastdanube.eu/sites/default/files/official_docs/FAST-Danube_ModelBuildCalibrationReport_Revised_23Jan18_clean1.pdf (Pridobljeno: 22/03/2021).
- Choi, S.-U. in Lee, J. (2015). Prediction of Total Sediment Load in Sand-Bed Rivers in Korea Using Lateral Distribution Method. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* **51**(1), 214–225. <https://doi.org/10.1111/jawr.12249>.
- Church, M. (2007). Multiple scales in rivers. In H. Habersack, H. Piégay, & M. Rinaldi (Eds.), *Developments in Earth Surface Processes* **11**, 3–28. [https://doi.org/10.1016/S0928-2025\(07\)11111-1](https://doi.org/10.1016/S0928-2025(07)11111-1).
- Čož, N., Ahmadian, R. in Falconer, R. A. (2019). Implementation of a Full Momentum Conservative Approach in Modelling Flow Through Tidal Structures. *Water* **11**(9), 1917. <https://doi.org/10.3390/w11091917>.
- De Sutter, R., Verhoeven, R. in Krein, A. (2001). Simulation of sediment transport during flood events: laboratory work and field experiments. *Hydrological Sciences Journal* **46**(4), 599–610. <https://doi.org/10.1080/02626660109492853>.
- Einstein, H. A. (1950). The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows. United States Department of Agriculture, Economic Research Service, Washington, USA: 89 str. Dostopno na: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ags:uersb:156389> (Pridobljeno: 01/04/2021).
- Engelund, F. in Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark: 63 str. Dostopno na: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:81101b08-04b5-4082-9121-861949c336c9> (Pridobljeno: 22/03/2021).
- Guan, M., Wright, N. G., Sleight, P. A. in Carrivick, J. L. (2015). Assessment of hydro-morphodynamic modelling and geomorphological impacts of a sediment-charged jökulhlaup, at Sólheimajökull, Iceland. *Journal of Hydrology* **530**, 336–349. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.062>.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S. in Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering* **4**(2), 135–143. [https://doi.org/CE1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/CE1084-0699(1999)4:2(135)).
- Guy, H. P., Simons, D. B. in Richardson, E. V. (1966). Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956–61. United States Government Printing Office, Washington, USA, 462-I: 96 str. Dostopno na: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp462I> (Pridobljeno: 02/04/2021).
- Hicks, M. D. in Gomez, B. (2016). Sediment transport. In G. M. Kondolf & H. Piégay (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology* 324–356. Chichester, UK ; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118648551.ch15>.
- Huybrechts, N., Zhang, Y. F. in Verbanck, M. A. (2013). Coupled estimation of the energy slope and associated sand-silt transport during high stream power events in alluvial rivers. *International Journal of Sediment Research*, **28**(1), 58–65. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(13\)60018-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(13)60018-9).
- Jacobs. (2021a). Flood Modeller. Dostopno na: <https://www.floodmodeller.com/> (Pridobljeno: 06/04/2021).
- Jacobs. (2021b). Flood Modeller - Support Manual. Dostopno na:

http://help.floodmodeller.com/floodmodeller/#t=General_Introduction.htm (Pridobljeno: 06/04/2021).

Kiat, C. C., Ghani, A. A., Zakaria, N. A., Hasan, Z. A. in Abdullah, R. (2005). Sediment transport equation assessment for selected rivers in Malaysia. *International Journal of River Basin Management* **3**(3), 203–208. <https://doi.org/10.1080/15715124.2005.9635259>.

Kvočka, D., Falconer, R. A. in Bray, M. (2015). Appropriate model use for predicting elevations and inundation extent for extreme flood events. *Natural Hazards* **79**(3), 1791–1808. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1926-0>.

MacArthur, R. C., Neill, C. R., Hall, B. R., Galay, V. J. in Shvidchenko, A. B. (2008). Overview of Sedimentation Engineering. In M. Garcia (Ed.), *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice* (str. 1–20): American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784408148.ch01>.

Meyer-Peter, E. in Müller, R. (1948). *Formulas for bed-load transport*. Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Research, Stockholm, Sweden, 39–64.

Molinas, A. in Wu, B. (1998). Effect of Size Gradation on Transport of Sediment Mixtures. *Journal of Hydraulic Engineering* **124**(8), 786–793. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:8\(786\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:8(786)).

Molinas, A. in Wu, B. (2001). Transport of sediment in large sand-bed rivers. *Journal of Hydraulic Research* **39**(2), 135–146. <https://doi.org/10.1080/00221680109499814>.

Moriasi, N. D., Arnold, G. J., Van Liew, W. M., Bingner, L. R., Harmel, D. R. in Veith, L. T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* **50**(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.

Naito, K., Ma, H., Nittrouer, J. A., Zhang, Y., Wu, B., Wang, Y., Fu, X. in Parker, G. (2019). Extended Engelund–Hansen type sediment transport relation for mixtures based on the sand-silt-bed Lower Yellow River, China. *Journal of Hydraulic Research* **57**(6), 770–785. <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1555554>.

Nash, J. E. in Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).

Overton, D. E. in Meadows, M. E. (1976). *Stormwater Modeling*. Academic Press: 370 str. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-531550-0.50001-X>.

Papanicolaou, A. N., Elhakeem, M., Krallis, G., Prakash, S. in Edinger, J. (2008). Sediment Transport Modeling Review - Current and Future Developments. *Journal of Hydraulic Engineering* **134**(1), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(1)).

Parker, G. (1990). Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. *Journal of Hydraulic Research* **28**(4), 417–436. <https://doi.org/10.1080/00221689009499058>.

Petkovsek, G. (2020). A review of Ackers and White sediment transport predictor. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, **173**(1), 1–13. <https://doi.org/10.1680/jwama.18.00039>.

Recking, A. (2013). Simple Method for Calculating Reach-Averaged Bed-Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, **139**(1), 70–75. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000653](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000653).

Rickenmann, D. (1991). Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep Slopes. *Journal of Hydraulic Engineering* **117**(11), 1419–1439. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:11\(1419\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:11(1419)).

Shvidchenko, A. B., Pender, G. in Hoey, T. B. (2001). Critical shear stress for incipient motion of sand/gravel streambeds. *Water Resources Research* **37**(8), 2273–2283. <https://doi.org/10.1029/2000WR000036>.

Sinnakaudan, S. K., Ab Ghani, A., Ahmad, M. S. in Zakaria, N. A. (2006). Multiple Linear Regression Model for Total Bed Material Load Prediction. *Journal of Hydraulic Engineering* **132**(5), 521–528. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:5\(521\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:5(521)).

Smart, G. M. (1984). Sediment Transport Formula for Steep Channels. *Journal of Hydraulic Engineering* **110**(3), 267–276. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:3\(267\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:3(267)).

Šraj, M., Bezak, N. in Brilly, M. (2012). Vpliv izbire metode na rezultate verjetnostnih analiz konic, volumnov in trajanj visokovodnih valov Save v Litiji. *Acta hydrotechnica* **25**(42), 41–58.

Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D. in Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software* **90**, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>.

- van Rijn, L. C. (1984a). Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering* **110**(10), 1431–1456.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:10\(1431\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431)).
- van Rijn, L. C. (1984b). Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering* **110**(11), 1613–1641.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:11\(1613\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:11(1613)).
- van Rijn, L. C. (2007a). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering* **133**(6), 649–667.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:6\(649\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:6(649)).
- van Rijn, L. C. (2007b). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport. *Journal of Hydraulic Engineering* **133**(6), 668–689.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:6\(668\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:6(668)).
- Westrich, B. in Juraschek, M. (1985). *Flow transport capacity for suspended sediment*. Proceedings of the 21st IAHR World Congress, Melbourne, Australia, 590–594.
- Wiberg, P. L. in Smith, J. D. (1989). Model for Calculating Bed Load Transport of Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering* **115**(1), 101–123.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1989\)115:1\(101\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:1(101)).
- Wu, B., van Maren, D. S. in Li, L. (2008). Predictability of sediment transport in the Yellow River using selected transport formulas. *International Journal of Sediment Research* **23**(4), 283–298.
[https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(09\)60001-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(09)60001-9).