

HIDRAVLIČNA MODELNA RAZISKAVA IZLIVNEGA ODSEKA KRKE

Poročilo o izvedenih delih

22.7.2019

1. UVOD

Raziskava se izvaja na podlagi pogodbe št. 9K-006/19-A201/030A (št. naročnika) oz. št. 3/19 (št. prevzemnika) z dne 21.02.2019 med naročnikom IBE d.o.o., Hajdrihova 4, Ljubljana, in izvajalcem Inštitutom za hidravlične raziskave, Hajdrihova 28, Ljubljana.

1.1. Namen naloge

Izlivni odsek Krke bo v skladu z idejnim projektom za HE Mokrice, IBE, april 2013 z dopolnitvami do vključno aprila 2018, sonaravno preurejen tako, da bo v odseku izpolnjenih več zahtev, od katerih sta najpomembnejši zahteva za znižanje gladin poplavnih vod Krke v Velikih Malencah in Krški vasi ter zahteva za ohranitev rečnega ekosistema.

Predvidene so naslednje ureditve:

- Izvedba prehodnega kaskadnega odseka pri izlivu Krke za omejitev širjenja zaježitve Save v Krko in ureditve drstišča.
- Izvedba prodišč - drstišč na izbranih odsekih.
- Izvedba prečno in vzdolžno razgibanega reliefa dna med prodišči.
- Delno zasutje – sonaravno nadvišanje dna z rečnim prodom in kamenjem v odsekih med drstišči.
- Izvedba izkopa levega brega za razširitev pretočnega profila Krke v dolžini 1 km kot kompenzacijski ukrep zmanjšane pretočnega preseka zaradi nadvišanj dna.
- Izvedba 12 kotanjastih poglobitev – jezerc, hidravlično povezanih s Krko, na novo vzpostavljenem izkopanem platoju v razširjenem 500 m dolgem odseku Krke od jeklenega mostu dolvodno.
- Izvedba vzdolžnega nasipa na levem bregu Krke od AC mostu dolvodno v dolžini 0,8 km, ki preprečuje bočno prelivanje visokih vod Save v Krko in s tem ukrepom tudi prestavi izliv Krke v Savo za 500 m dolvodneje.
- Zmanjšanje hidravličnega padca pri pragu v Krški vasi, z ureditvijo drče.

Naloga fizičnih hidravličnih modelov izlivnega odseka Krke je preveriti hidravlično ustreznost obstoječih projektnih rešitev glede na projektne zahteve in na obstojnost ureditev dna struge pri visokih vodah ter v primeru neizpolnjevanja zahtev ponuditi ustrezne nadomestne rešitve.

V tem vmesnem poročilu je predstavljen fizični hidravlični model in trenutni rezultati modelnih raziskav in analiz.

2. Fizični hidravlični model v merilu 1:30

Fizični hidravlični model izlivnega odseka Krke je zgrajen na zunanjem laboratorijskem preizkuševališču Inštituta za hidravlične raziskave.

2.1. Opis modela

Fizični hidravlični model (Slika 2.1) obsega 2,87 km struge Krke in del poplavnega področja od Krške vasi do sotočja s Savo ter 0,5 km Save. Model je zgrajen v nedistorziranem merilu 1:30, kar pomeni, da je modelna dolžina odseka Krke na laboratorijski ploščadi enaka 96 m. Na modelu so vgrajeni oz. prikazani tudi obstoječi pragovi, infrastrukturni objekti (mostovi, ceste), stavbe in protipoplavne zaščite.

Prilagoditev prostorskim omejitvam hidravličnega laboratorija je zahtevala, da je model zrcaljen, kar pa ne vpliva na modelne rezultate. Zaradi lažjega predstavljanja pa so slike modela v tem poročilu že zrcaljene nazaj v "naravno" stanje.

Model je opremljen z dovodom in odvodom vode, z merilnikoma pretoka vode na in z modela ter z ostnimi merili za merjenje nivoja gladine na pragu v Krški vasi in na drstiščih.



Slika 2.1: Fizični model izlivnega odseka Krke v merilu 1:30.

2.2. Izhodiščna varianta ureditev na izlivnem odseku Krke

Izhodiščna varianta ureditev na fizičnem hidravličnem modelu (z delovnim naslovom M1) predstavlja skup projektnih rešitev po IDZ, ki jo je pripravil IBE, d.d., Ljubljana, kot projektant ureditev, izboljšav, ki sta jih pripravila Savaprojekt, d.d., Krško in Freiwasser z Dunaja, ter posameznih detajlov, ki so bili dogovorjeni s projektantom, in sicer:

- kaskadni odsek dolžine 195 m premošča višinsko razliko med kotama 140,20 m n.m. in 141,40 m n.m. s stopnjami višine 0,1 m (Slika 2.2);
- ribja steza dolžine 290 m in naklona 1,7 % se nahaja na DB Krke in Save ob kaskadnem delu in premošča višinsko razliko 5 m med kotama 136,30 m n.m. in 141,30 m n.m. (Slika 2.2);
- drstišče 1 dolžine 100 m je v primerjavi z IDZ predstavljeno 80 m gorvodno in se nahaja neposredno pred ribjo stezo in kaskadnim odsekom (Slika 2.2), med kotama 141,40 m n.m. in 141,70 m n.m.;
- drstišče 2 dolžine 172 m se nahaja med kotama 141,60 m n.m. in 141,80 m n.m.;
- drstišče 3 dolžine 146 m se nahaja med kotama 141,80 m n.m. in 142,30 m n.m.;
- drstišče 4 dolžine 100 m se nahaja med kotama 142,40 m n.m. in 142,70 m n.m.;

- struga Krke med drstišči ni zasuto, izvedel se je le prehod dolžine 100 – 150 m med obstoječim dnom in gorvodnim pragom drstišča;
- razširitev korita Krke na LB dolvodno od AC se nahaja na kotah med 143,10 m n.m. in 142,10 m n.m.; dolvodno od starega mostu se na razširitvenem platoju nahaja 10 kotanj.



Slika 2.2: Drstišče 1, razširitev s kotanjami na LB ter ribja steza na DB s kaskadnim odsekom na fizičnem modelu izlivnega odseka Krke.

3. Modelni prod

Fizični hidravlični model ima gibljivo dno, tj. zapolnjeno z ustreznim modelnim rečnim prodom, kar omogoča raziskavo morfoloških sprememb rečnega korita in predvidenih drstišč.

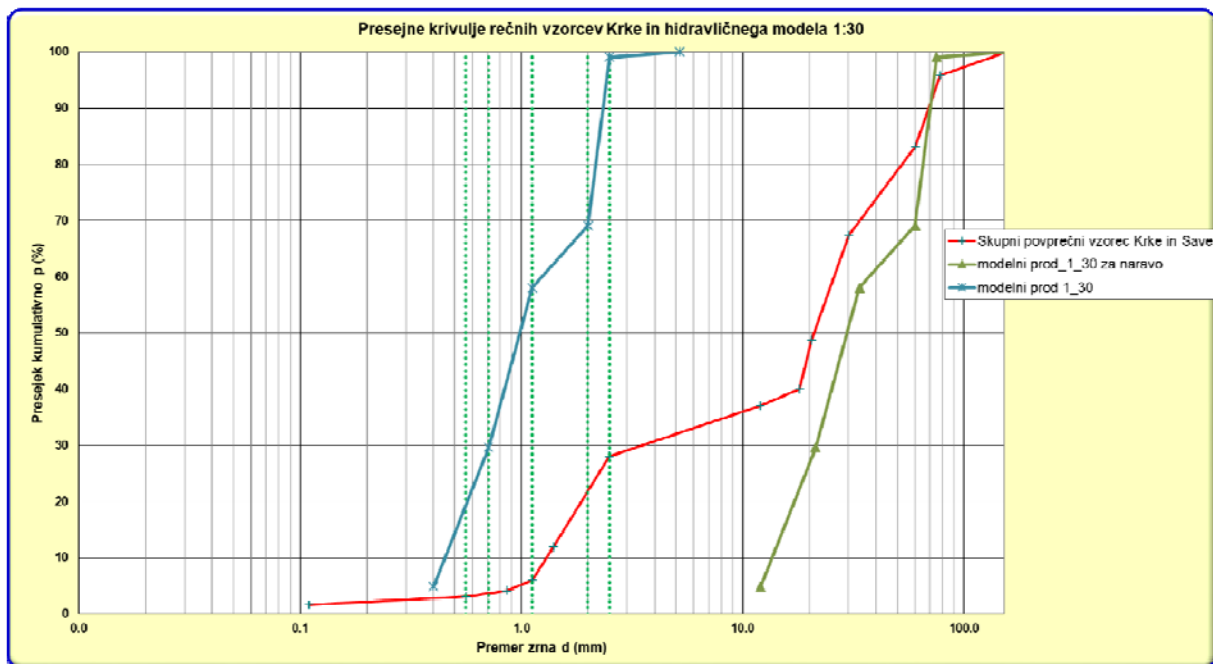
3.1. Sejalna analiza vzorcev in modelnega proda

V spodnjem grafikonu (Slika 3.1) je prikazana granulometrična sestava naravnega in modelnega proda. Vzorci naravnega proda so bili odvzeti iz prodišč Krke in Save v območju modela.

Modelni prod ima enake lastnosti (gostota, oblika) kot naravni prod. Primerjava granulometrične krivulje naravnega proda in v vrednosti za naravo preračunanega modelnega proda pokaže, da sta si v območju bolj grobih frakcij podobna. Zaradi modelnih omejitev niso prisotne drobnejše frakcije (< 0,4 mm za model oz. 12 mm za naravo).

Karakteristične vrednosti za naravni in modelni prod so naslednje:

- d_{50} za naravni prod je 21mm
- d_{50} za modelni prod je 1mm (= 30mm za naravo)



Slika 3.1: Granulometrična sestava naravnega in modelnega proda.

Glede na dejstvo, da bodo drstišča ustvarjena v skladu s projektnimi zahtevami umetno iz materiala, ki ne izvira iz struge Krke na lokacijah drstišč, razlika med modelnim in naravnim prodom Krke ni problematična.

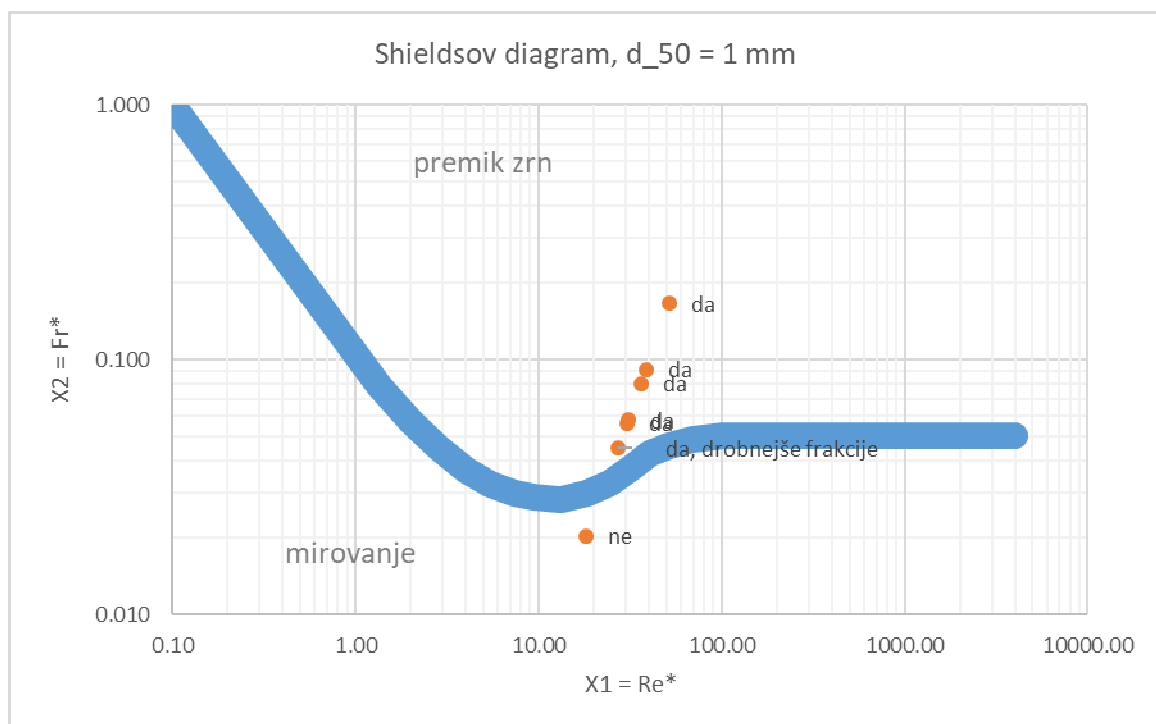
3.2. Preizkus gibljivosti modelnega proda v hidravličnem žlebu

V literaturi obstajajo podatki (Shieldsov diagram) , ki na podlagi Reynoldsovega števila zrna Re^* in Froudovega števila zrna Fr^* opredeljujejo, ali prod miruje ali je v gibanju. Običajno se pri tem upošteva karakteristično zrno d_{50} .

Da bi ugotovili primerljivost uporabljenega modelnega proda s podatki iz literature, smo v hidravličnem žlebu širine 0,5 m (Slika 3.2) izvedli testno meritev gibljivosti. Upoštevali smo srednji nizki pretok sQ_n za Krko (= 10,9 m³/s). S postopnim nižanjem spodnje vode se je povečala hitrost vode oz. strižna napetost. Na modelu smo opazovali, ali zrna mirujejo ali se je že pojavil premik (Slika 3.3).



Slika 3.2: Preizkus gibljivosti modelnega proda v hidravličnem žlebu.

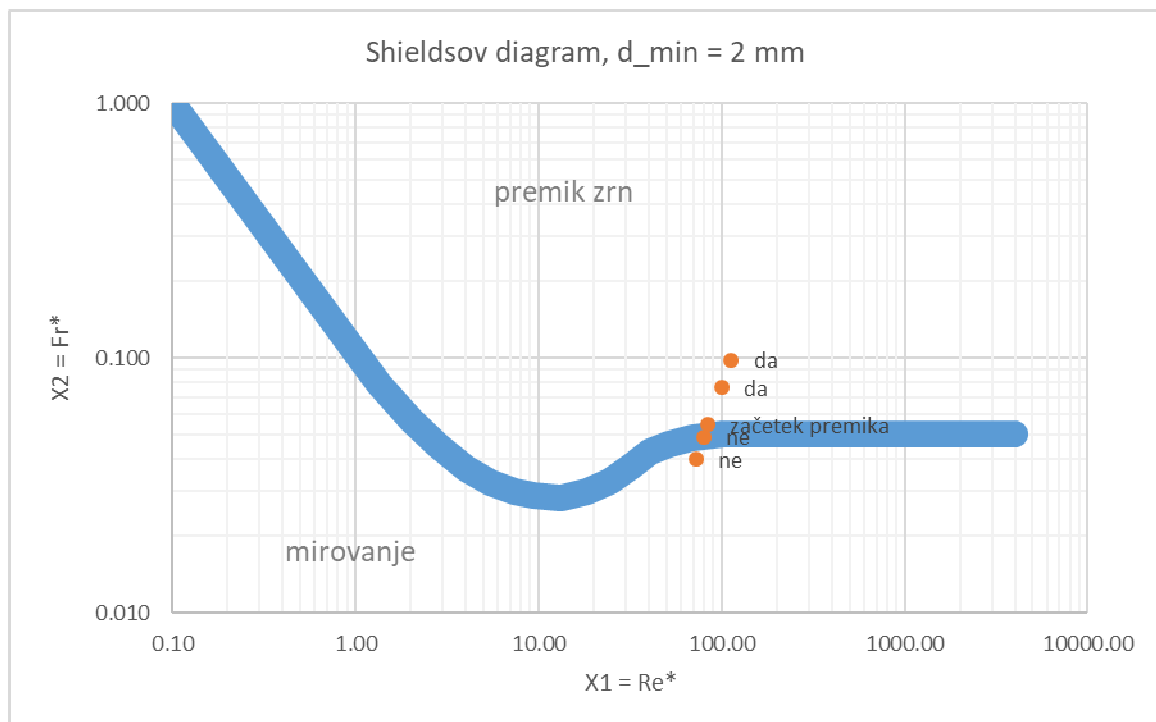


Slika 3.3: Primerjava gibljivosti modelnega proda s Shieldsovim diagramom, $d_{\text{karakteristični}} = d_{50} = 1 \text{ mm}$.

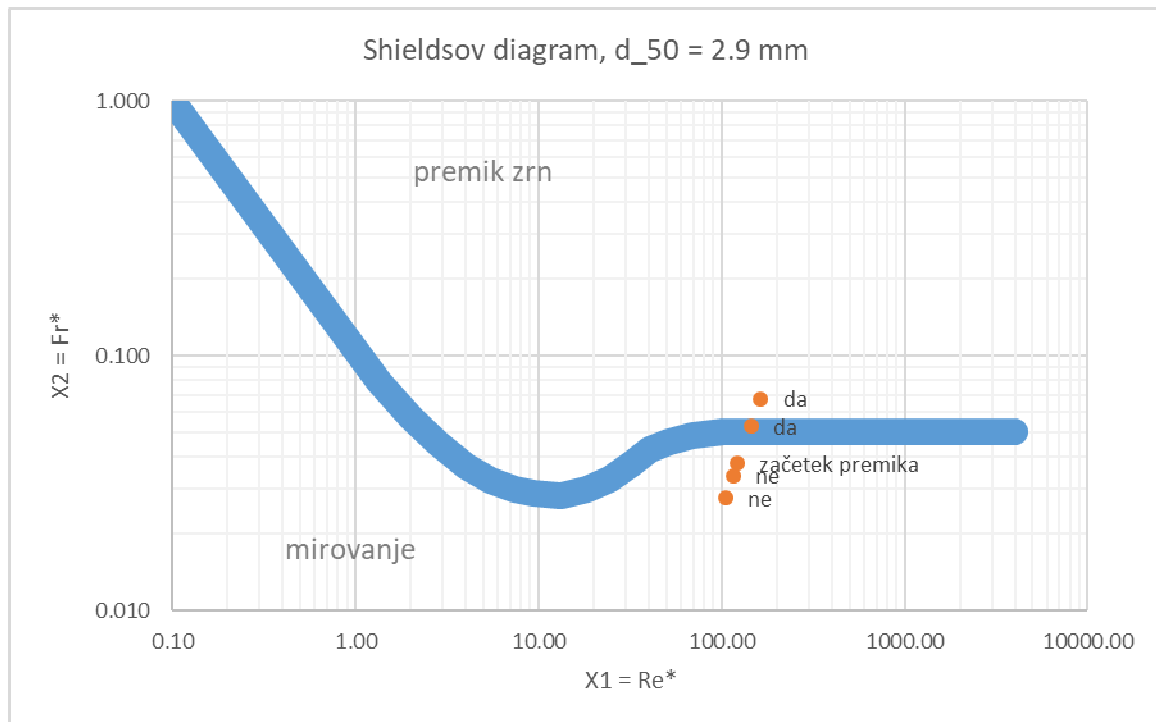
V naslednjem poskusu smo odsejali vsa zrna, ki so manjša ali enaka 2mm (tj. 60 mm za naravo). Rezultat opazovanja sta grafikona na slikah Slika 3.4 in Slika 3.5. V grafikonu na Slika 3.4 smo za karakteristično zrno upoštevali minimalni premer zrn, tj. $d_{\text{min}} = 2 \text{ mm}$. V grafikonu na Slika 3.5 pa smo za isti vzorec upoštevali novo vrednost d_{50} , tj. $d_{50} = 2,9 \text{ mm}$.

Primerjava rezultatov gibljivosti modelnega proda je pokazala dobro ujemanje s Shieldsovim diagramom. Pri materialu, ki smo mu odsejali drobne frakcije, je upoštevanje premera minimalnega zrna d_{\min} pokazalo celo boljše ujemanje kot upoštevanje d_{50} .

Na podlagi teh rezultatov smo ocenili, da je s pomočjo Shieldsovega diagrama možno oceniti velikost zrna (oz. velikostni red), ki še zagotavlja stabilnost v danih pogojih (gl. pogl. 6.3).



Slika 3.4: Primerjava gibljivosti modelnega proda z odsejanimi frakcijami, manjšimi od 2mm, s Shieldsovim diagramom, $d_{\text{karakteristični}} = d_{\min} = 2 \text{ mm}$



Slika 3.5: Primerjava gibljivosti modelnega proda z odsejanimi frakcijami, manjšimi od 2mm, s Shieldsovim diagramom, $d_{\text{karakteristični}} = d_{50} = 2,9\text{mm}$

4. Numerični hidravlični model

V raziskavo smo vključili tudi numerični hidravlični model, ki smo ga izdelali za raziskavo faz gradnje HE Mokrice. Model med drugim vključuje tudi obravnavani odsek Krke. Za potrebe te raziskave smo numerični model nadgradili z aktualnimi in ažurnimi podatki (tj. podatki batimetrije Krke iz leta 2019, izhodiščna varianta ureditev izlivnega odseka Krke, ...).

5. Hidravlični robni pogoji

Hidravlični robni pogoji, ki smo jih upoštevali v raziskavi, sledijo 3 zahtevam.

5.1. Protipoplavna zaščita Krške vasi

Ureditev izlivnega odseka Krke ne sme ogroziti poplavne varnosti v Krški vasi, kjer so že zgrajene oz. se gradijo protipoplavne zaščite, ki varujejo naselje na koti 147,00 m n.m..

Kot najbolj neugodni primer smo upoštevali koincidenco Q_{100} Save in Q_{100} Krke, kar pomeni $Q_{\text{Sava_HEBR}} = 3688 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q_{\text{Krka}} = 440 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.2. Hidravlične razmere na drstiščih po zahtevah ihtiologije

Po priporočilih iz strokovne literature naj bi bili ihtiološki pogoji izpolnjeni najmanj 300 dni na leto (med 30 dnevnim pretokom Q_{30d} in 330 dnevnim pretokom Q_{330d}). Za izlivni odsek so bili ti podatki določeni iz povprečne letne krivulje trajanja dnevnih pretokov v obdobju 1987 – 2016 na VP Podbočje, povečano za 3,4%, tj. med $Q_{30d} = 13,4 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q_{330d} = 140,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Ker se je v dosednji analizi za minimalni pretok pri urejanju drstišč stalno upošteval srednji nizki pretok $sQ_n = 10,9 \text{ m}^3/\text{s}$, v raziskavi tako upoštevamo območje pretokov med $10,9 \text{ m}^3/\text{s}$ in $141 \text{ m}^3/\text{s}$.

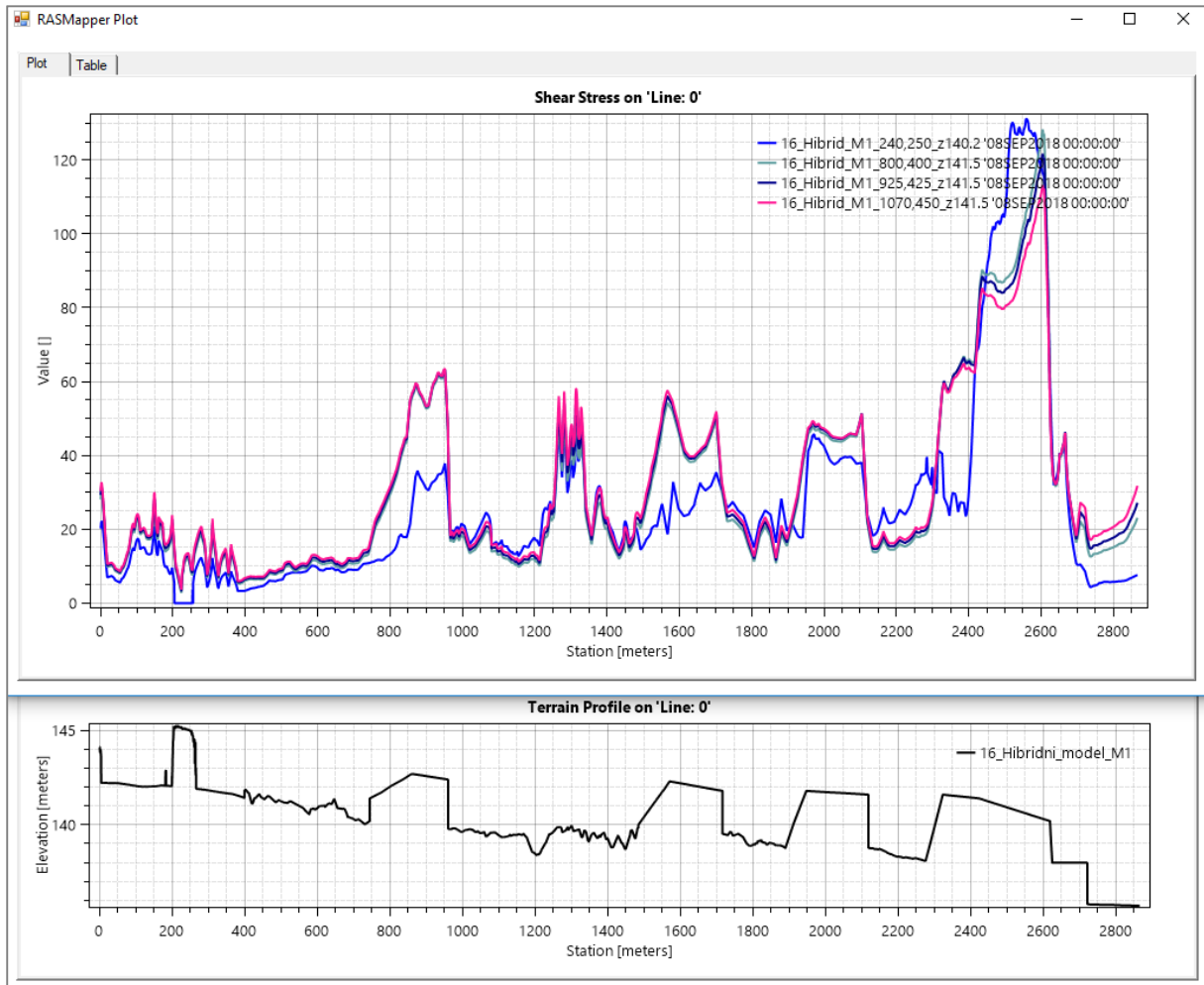
Opomba: zahtevane globine vode in hitrosti v času drstenja za posamezne vrste rib ter tudi drugi ihtiološki pogoji so trenutno še predmet študije, ki jo pripravlja Zavod za ribištvo, in jih bomo upoštevali pri optimizaciji drstišč, ko bodo na voljo.

5.3. Hidravlične razmere na drstiščih po kriteriju stabilnosti drstišč

Stabilnost drstišč je povezana s koincidenco visoke vode Krke in nizkih pretokov Save. Te podatke (Preglednica 5-1) smo upoštevali v numeričnem modelu, s katerim smo izračunali strižne napetosti na drstiščih (Slika 5.1).

V raziskavi stabilnosti drstišč se tako upošteva naslednja najbolj neugodna kombinacija pretokov (pretoki so ločeno navedeni za Savo in Krko pred sotočjem):

- drstišče 1 do 4: $Q_{\text{Sava_HEBR}} = 1070 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{Krka}} = 450 \text{ m}^3/\text{s}$, $K_{\text{HEMO}} = 141,5 \text{ m n.m.}$
- za kaskadni odsek : $Q_{\text{Sava_HEBR}} = 240 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{Krka}} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, $K_{\text{HEMO}} = 140,2 \text{ m n.m.}$



Slika 5.1: Izračunane strižne napetosti na izlivnem odseku Krke.

Preglednica 5-1: Kombinacije pretokov Krke in Save za določitev najneugodnejših hidravličnih pogojev pri raziskavi stabilnosti drstič (vir: IBE).

Q Krke	Q Save dolvodno od Krke	Gladina na jezu HEMO	
100	220	140.2	(spodnja obratovalna kota)
125	240	140.2	
150	280	140.2	
175	340	140.2	
200	400	140.2	
225	420	140.2	
250	490	140.2	
275	580	141.5	(nominalna kota zajezbe)
300	690	141.5	
325	840	141.5	
350	970	141.5	
375	1080	141.5	
400	1200	141.5	
425	1350	141.5	
450	1520	141.5	

opomba: v zgornji preglednici je za Q Save že navedena vsota pretokov Save in Krke.

6. Rezultati raziskave

V nadaljevanju so prikazani trenutni rezultati raziskave, ki se v veliki večini nanašajo na izhodiščno varianto (M1).

6.1. Globina vode in hitrosti na drstičih pri ihtioloških hidravličnih pogojih

Pri ihtioloških hidravličnih robnih pogojih smo za izhodiščno varianto (M1) izmerili globino vode na drstičih in izmerili hitrosti vode. Rezultati meritev so prikazani v preglednici Preglednica 6-1, za minimalni obravnavani pretok $10,9 \text{ m}^3/\text{s}$ in za maksimalni obravnavani pretok $141 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri obeh pretokih je bilo prodno dno stabilno brez prodnega premika.

Hitrosti vode smo izmerili s pomočjo meritve hitrosti plovcev iz voska, ki so se izkazali za primerne, saj so v večji meri potopljeni. Ocenjujemo pa, da so povprečne hitrosti v vertikali glede na hitrosti, izmerjene s plovci, za približno 10% nižje.

Preglednica 6-1: Meritev globine vode in hitrosti na drstiščih pri izhodiščni varianti.

Q _{Krka}	10,9 m ³ /s			141 m ³ /s		
	h	v _{povpr}	v _{95%}	h	v _{povpr}	v _{95%}
	[m]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m/s]	[m/s]
drstišče 4	0,25	0,9	0,7 – 1,1	1,31	2,3	1,9 – 2,6
drstišče 3	0,27	1,0	0,6 – 1,4	1,40	2,2	1,5 – 2,9
drstišče 2	0,27	0,7	0,4 – 0,9	1,34	2,0	1,6 – 2,3
drstišče 1	0,27	0,8	0,6 – 0,9	1,24	2,3	1,7 – 2,8

opomba: v_{95%} pomeni obseg hitrosti, v katerem se statistično nahaja 95% vseh izmerjenih hitrosti na drstišču.

6.2. Stabilnost drstišč pri VV pretokih

Stabilnost drstišč smo za izhodiščno varianto (M1) preverili pri pretoku Krke = 440 m³/s (= Q₁₀₀). Pretok Save posredno vpliva na višino vode na sotočju. Model je pokazal, da so glede na koto gladine na sotočju K_{sot}:

- K_{sot} = 145,81 m n.m. (tj. za Q_{Sava_HEBR} = 3688 m³/s = Q₁₀₀) ... drstišča stabilna
- K_{sot} = 145,06 m n.m. (tj. za Q_{Sava_HEBR} = 2845 m³/s = Q₂₀) ... drstišča stabilna
- K_{sot} = 144,14 m n.m. (tj. za Q_{Sava_HEBR} ≈ 2100 m³/s) ... začetek prodnega premika na drstiščih 2 in 3

Glede na to, da hidravlični robni pogoji v primeru, ko se je pojavil začetek prodnega premika, »blažji« kot v računskem primeru (gl. pogl. 5.3), ugotavljamo, da ureditev drstišč s prodnim zasutjem, enakim obstoječemu produ (izhodiščna varianta), ne zagotavlja stabilnosti drstišč.

6.3. Ocena minimalnega premera zrna d_{min} na drstiščih in kaskadi za izhodiščno varianto

Na podlagi ugotovitev gibljivosti modelnega proda in primerjave s Shieldsovim diagramom smo za hidravlične robne pogoje na osnovi maksimalnih strižnih napetosti (gl. pogl. 5.3) analitično določili minimalno zrno, pri katerem ni pričakovati prodnega premika, in sicer:

- za drstišče 4: d_{min} = 80mm
- za drstišče 3: d_{min} = 70mm
- za drstišče 2: d_{min} = 60mm
- za drstišče 1: d_{min} = 80mm
- za kaskadni odsek: d_{min} = 1300mm

Ker se je na modelu prodni premik pojavil najprej na drstiščih 2 in 3, so zgoraj navedeni rezultati sicer nekoliko kontradiktorni, vendar ocenjujemo, da imajo vrednosti minimalnega

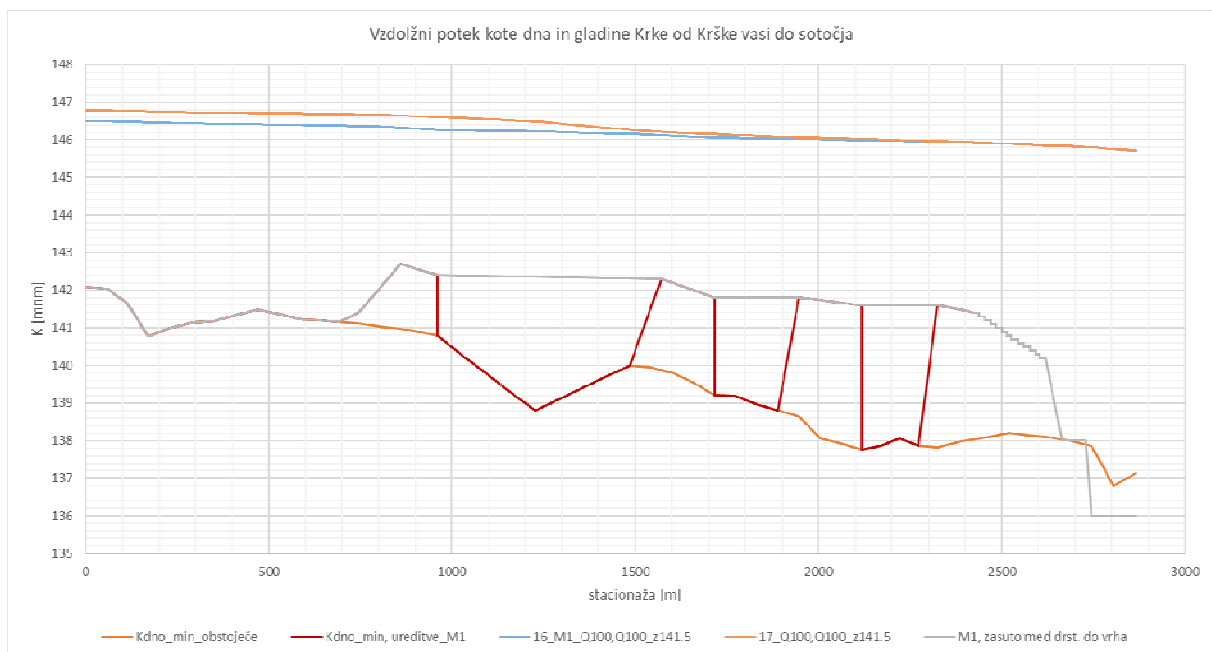
zrna predvsem značaj velikostnega reda. Potrditev teh vrednosti bo lahko podal šele fizični model.

Tudi podana minimalna velikost skal na kaskadnem delu je vprašljiva in zgolj informativna.

6.4. Zasutje struge Krke med drstišči do vrha drstišč

Z numeričnim modelom smo po dogovoru s projektantom določili vpliv variante zasutja struge do vrha drstišč na poplavno varnost Krške vasi pri pretokih Q_{100} ($Q_{Sava_HEBR} = 3688 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{Krka} = 440 \text{ m}^3/\text{s}$). Ta primer predstavlja skrajno varianto z vidika varnosti pred poplavami v Krški vasi, namreč v praksi bi se, bodisi z načrtnim zasipanjem bodisi po naravni poti (tj. po delovanju visoke vode), vzpostavila dinamično oblikovanje morfologije struge s poglobitvami in prodišči, pri katerem bi bil dvig nivoja gladine pri VV nižji od izračunanega.

V grafikonu na sliki Slika 6.1 je razvidno, da je dvig gladine zaradi zasutja korita med drstišči 1 do 3 bolj ali manj zanemarljiv in da šele zasutje korita med drstiščem 3 in 4 vpliva na porast gladine v Krški vasi za 30 cm.



Slika 6.1: Primerjava vzdolžnega poteka gladine Krke pri izhodiščni varianti in varianti z zasutim koritom Krke med drstišči pri pretoku Q_{100} ($Q_{Sava_HEBR} = 3688 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{Krka} = 440 \text{ m}^3/\text{s}$).

6.5 Zaključek

Dosedanji rezultati HMR kažejo dobro osnovo, da se v nadaljevanju raziskave s parametriranjem pride do pravih rešitev, ki bodo zadostile zastavljene pogoje.

Poročilo pripravil:

mag. Primož Rodič, univ. dipl. inž. grad.