

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvirna različica izdajatelja.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University  
of Ljubljana  
Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is a publisher's version PDF file.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Rajar , R, Širca, A, Krzyk, M, Vidmar, A, Četina, M. 2012. Modeliranje 3D toka Save ob vtoku v kanal nuklearne elektrarne Krško ter primerjava z meritvami. Acta hydrotechnica 25, 43: 71-84.

<ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a43rr.pdf>

UDK/UDC: 004.414.23:532.1/.3(282.249)

Prejeto/Received: 5. 5. 2012

Izvorni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 15. 6. 2013

## MODELIRANJE 3D TOKA SAVE OB VTOKU V KANAL NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO TER PRIMERJAVA Z MERITVAMI

## MODELLING THE 3D FLOW IN THE SAVA RIVER AT THE ENTRANCE TO THE INFLOW CHANNEL OF NUCLEAR POWER PLANT KRŠKO AND COMPARISON WITH MEASUREMENTS

Rudi Rajar<sup>1,\*</sup>, Andrej Širca<sup>2</sup>, Mario Krzyk<sup>1</sup>, Andrej Vidmar<sup>1</sup>, Matjaž Četina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup>IBE d.d., Hajdrihova 4, 1000 Ljubljana

### Izvleček

Zaradi predvidene izgradnje HE Brežice bo gladina Save pri vtoku v dovodni kanal Nuklearne elektrarne Krško (NEK) dvignjena za 3 metre, kar bo spremenilo hidravlične in termične razmere pri vtoku hladilne vode v dovodni kanal. Projektna naloga je zahtevala simulacije hitrostnega polja in sprememb vtoka lebdečih plavin v bodočih razmerah, pa tudi toplotnih razmer v celotnem bazenu Brežice. Ker je hitrostno polje v bližini vtoka »polno 3-dimenzijsko« (3D), saj so vertikalne komponente hitrosti istega reda velikosti kot horizontalne, uporabljeni model PCFLOW3D pa je t. i. »kvazi 3D«, smo izvedli meritve hitrosti toka v Savi nad jezom v bližini NEK. Pri verifikaciji modela smo ugotovili, da daje dobre rezultate v področju gorvodno od vtoka, v bližini vtoka pa je model sicer še uporaben, rezultati pa so zaradi 3-dimenzionalnih karakteristik toka manj točni. Zato pripravljamo verzijo modela, ki bo uporabna tudi za simulacije »polno 3-dimenzijskega« toka. Sedanji model je pokazal, da se v bodočih razmerah vnos plavin v dovodni kanal za doslej znano sestavo in koncentracije plavin ne bo bistveno spremenil. Verifikacija toplotnega modula je bila že izvršena v letih 1995 in 1998 z meritvami v bazenu Vrhovo, tako v poletnih kot v zimskih razmerah in je pokazala dobro veljavnost in točnost modela.

**Ključne besede:** meritve hitrosti toka, 3D modeliranje, umerjanje modela, reka Sava.

### Abstract

A hydro-electric power plant (HEPP) Brežice will be built 7 km downstream of the Nuclear power plant Krško (NPPK). This will cause a 3 m rise of the water level, which will change the hydraulic and thermal conditions at the entrance of the cooling water to the inflow channel. The project task was to simulate the velocity field and sediment transport in the future conditions at his location, and to simulate thermal conditions in the entire Brežice reservoir. As the vertical velocity components in the vicinity of the inflow are of the same order of magnitude as the horizontal components, the velocity field is "fully 3D". As the applied model PCFLOW3D is in the "quasi 3D" form, we performed measurements of the velocities in the Sava River near the inflow to the channel. During the verification of the model we found that the model

---

\* Stik / Correspondence: [rudi.rajar@fgg.uni-lj.si](mailto:rudi.rajar@fgg.uni-lj.si)

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

© Rajar R. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence](#).

gives good results for the flow upstream of the inflow section, while near the inflow the results are less reliable. We are currently preparing a “fully 3D” version of the model. The present model showed that in the future conditions the sediment inflow into the inflow channel will not change significantly. Verification of the thermal module had already been carried out in 1995 and 1998 on the reservoir Vrhovo in both summer and in winter conditions. It was shown that the model can well simulate the thermal conditions.

**Keywords:** velocity measurements, 3D modelling, model calibration, Sava River.

## 1. Uvod

Za glavni hladilni sistem Nuklearne elektrarne Krško (NEK) voda v sedanjem stanju priteka iz reke Save po dovodnem kanalu (sliki 1 in 2). Potrebni pretok hladilne vode je  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ . Če je pretok Save manjši od  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , je za hlajenje iz Save dovoljeno odvzemati samo 25% pretoka. V kolikor to ne zadostuje za hlajenje NEK, morajo aktivirati hladilne stolpe.

V prihodnjih letih bo cca. 7 km dolvodno od NEK zgrajena hidroelektrarna Brežice, ki bo zajela vodo v Savi za 3 m. Pri tem se bo gladina ob NEK dvignila za nekaj več kot 3 m, odvisno od pretoka Save.

Izvršenih je bilo že več študij (IHR in FGG, 2010; IBE in FGG, 2011), ki so imele za cilj določiti, koliko se bodo spremenile razmere med sedanjim in bodočim (zajezenim) stanjem pri sledečih pojavih:

- hidrodinamičnih razmerah v reki Savi, predvsem v bližini vtoka v dovodni kanal NEK
- transportu lebdečih plavin v istem področju z glavnim vprašanjem, koliko se bo spremenil vnos plavin v vtočne objekte NEK, to sta dovodni kanal hladilne vode (»CW – Cooling Water«) in dovod bistvene oskrbne vode (»ESW – Essential Service Water«).
- termičnih razmerah v celotnem bazenu Brežice, saj se bodo zaradi zaježitve spremenili nekateri parametri Save, predvsem površina proste gladine in hitrost toka. V tem prispevku bolj detajlno obravnavamo prvo vprašanje, torej koliko se bodo v bodočem stanju spremenile hidrodinamične razmere, delno pa opisujemo tudi simulacije transporta plavin. Za simulacije je bil uporabljen model PCFLOW3D (poglavje 2). Model je doslej prirejen le za simulacijo tokov v

jezerih in morjih, kjer so vertikalne komponente hitrosti razmeroma majhne v primerjavi s horizontalnimi, ni pa sposoben dovolj točno simulirati tokov, kjer so vertikalne komponente hitrosti istega reda kot horizontalne (to so t. im. »polno-3D« modeli, angl. »fully-3D« modeli). Tokovi v bližini vtoka v dovodni kanal NEK pa so v resnici »polno-3D«. Da bi preverili, do kakšne točnosti je omenjeni model še sposoben simulirati take tokove, smo naredili dve seriji detajlnih meritev hitrosti toka v omenjenem področju Save, prikazanem na sliki 1. Ker je v NEK vedno prisoten problem odstranjevanja plavin, ki se usedejo v začetnem delu vtočnega kanala, kot tudi v začetnem delu vtoka v ESW, so bila glavna vprašanja v zvezi s tem:

1. Kako se bo transport in odlaganje plavin pri objektih vtoka v CW in ESW spremenilo v bodočem (zajezenem) stanju v primerjavi s sedanjim stanjem?
2. S kakšnimi konstrukcijskimi ukrepi bi bilo v bodočem stanju možno zmanjšati dotok lebdečih plavin v oba vtočna objekta?
3. Kako se bo v bodočem stanju spremenilo usedanje plavin ob pragu jezusa?

## 2. Metode

### 2.1 Simulacije hitrosti toka z modelom PCFLOW3D

Model PCFLOW3D je nestalni tridimenzionalni nelinearni baroklini model, razvit na Katedri za mehaniko tekočin UL FGG. Uporabljen in verificiran je bil že pri reševanju mnogih praktičnih problemov, predvsem pri problemih onesnaženja površinskih voda (Četina et al., 2000; Četina et al., 2003; Rajar et al., 2004;

Tomiyasu et al., 2006; Rajar et al., 2007). Princip modela je bil zato že večkrat opisan (npr. v Rajar in Četina, 1997; Rajar et al., 1997).

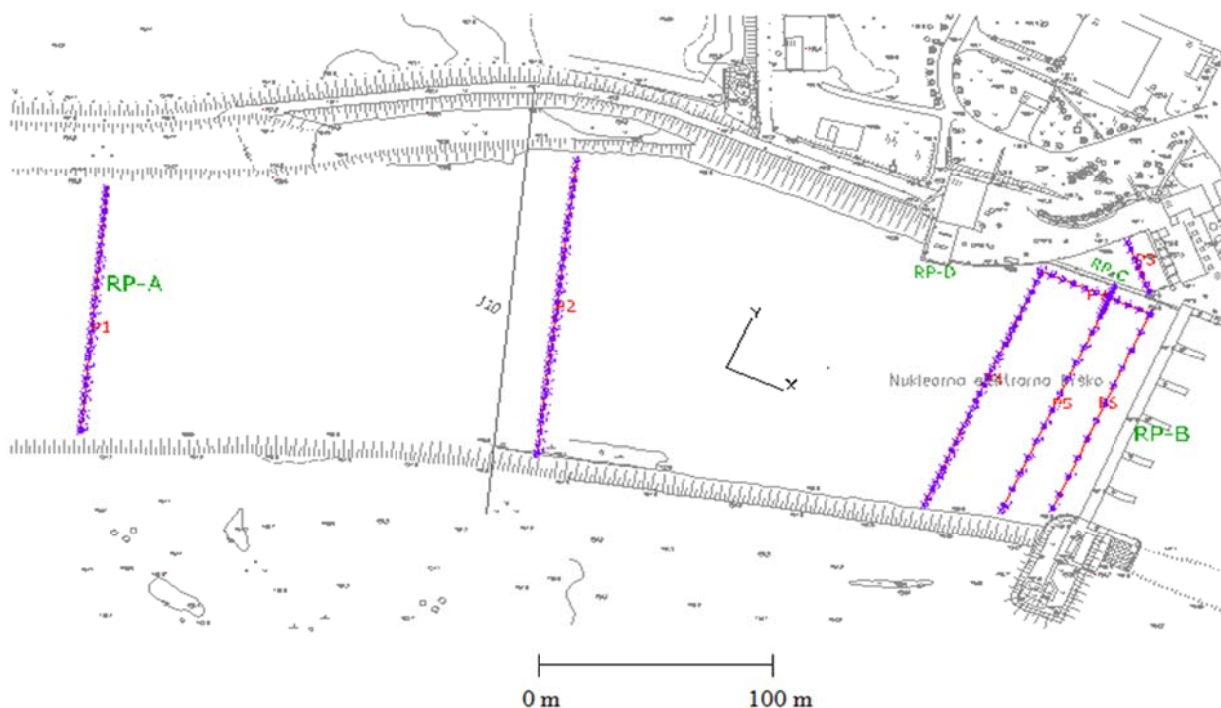
Hidrodinamika modela temelji na enačbah plitvih vod, v vertikalni smeri »z« uporabljamo hidrostatično aproksimacijo. Osnovni model sestoji iz štirih modulov: hidrodinamičnega (HD), transportno-disperzijskega (TD), sedimentacijskega (ST) in biogeokemičnega modula (BGC). Med zunanji silami, ki vplivajo na vrednosti hidrodinamičnih količin, lahko v modelu PCFLOW3D upoštevamo: veter, plimovanje, dotoke rek in notranje sile zaradi gradientov temperature in slanosti ter posledično gradientov gostote vode. Hidrodinamični račun poteka po metodi končnih volumnov, transport in disperzijo onesnažil pa lahko računamo z Eulerjevo metodo končnih razlik ali z Lagrangevo metodo sledenja delcev.

Vpliv turbulence je zajet s koeficienti turbulentne viskoznosti  $N_h$  in  $N_v$  (posebej za horizontalno in

vertikalno smer) ter s koeficienti turbulentne difuzije  $D_h$  in  $D_v$ . Vrednosti koeficientov določimo z dodatnimi enačbami, s t. i. modeli turbulence. Koeficienti turbulentne viskoznosti in difuzije so odvisni od hitrosti toka v posameznih točkah in njenih gradientov, spreminjajo se v času in prostoru. Za turbulentni transport onesnažila ali toplote je pomemben predvsem pojav difuzije, ki je posledica mikroturbulence, in povzroča, da se koncentracija snovi razprši po tekočini. Model PCFLOW3D omogoča poljubno kombinacijo horizontalnega in vertikalnega modela turbulence.

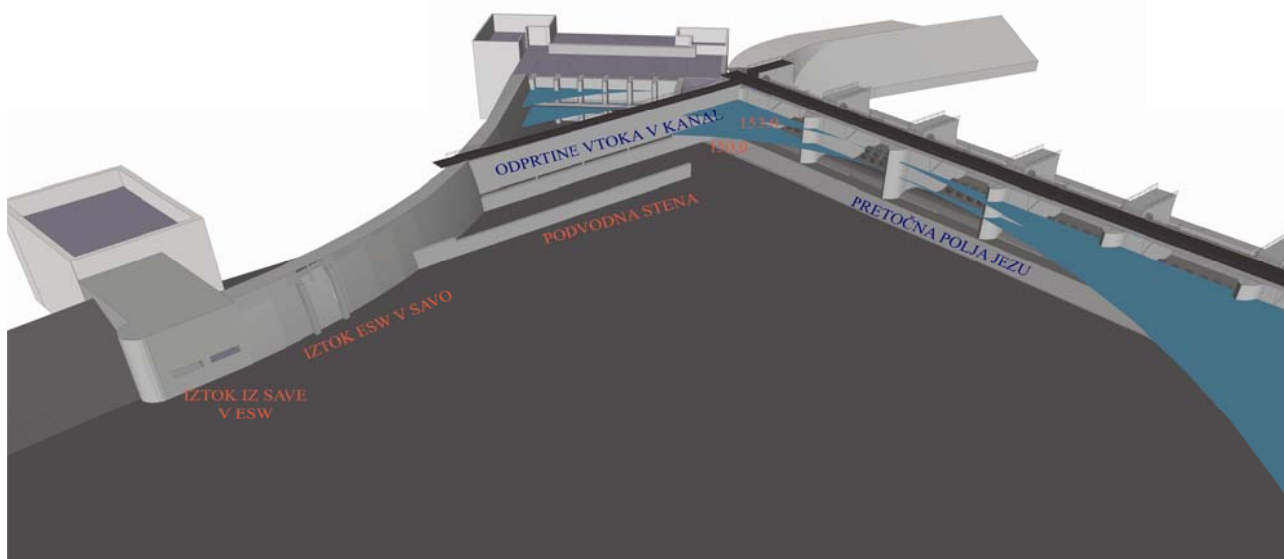
Vgrajeni so naslednji modeli turbulence:

- Model s konstantno viskoznostjo (vertikalno in/ali horizontalno),
- Model Koutitas vertikalno.
- Princip Smagorinsky horizontalno,
- Princip Smagorinsky vertikalno,
- Model Mellor-Yamada (vertikalno)



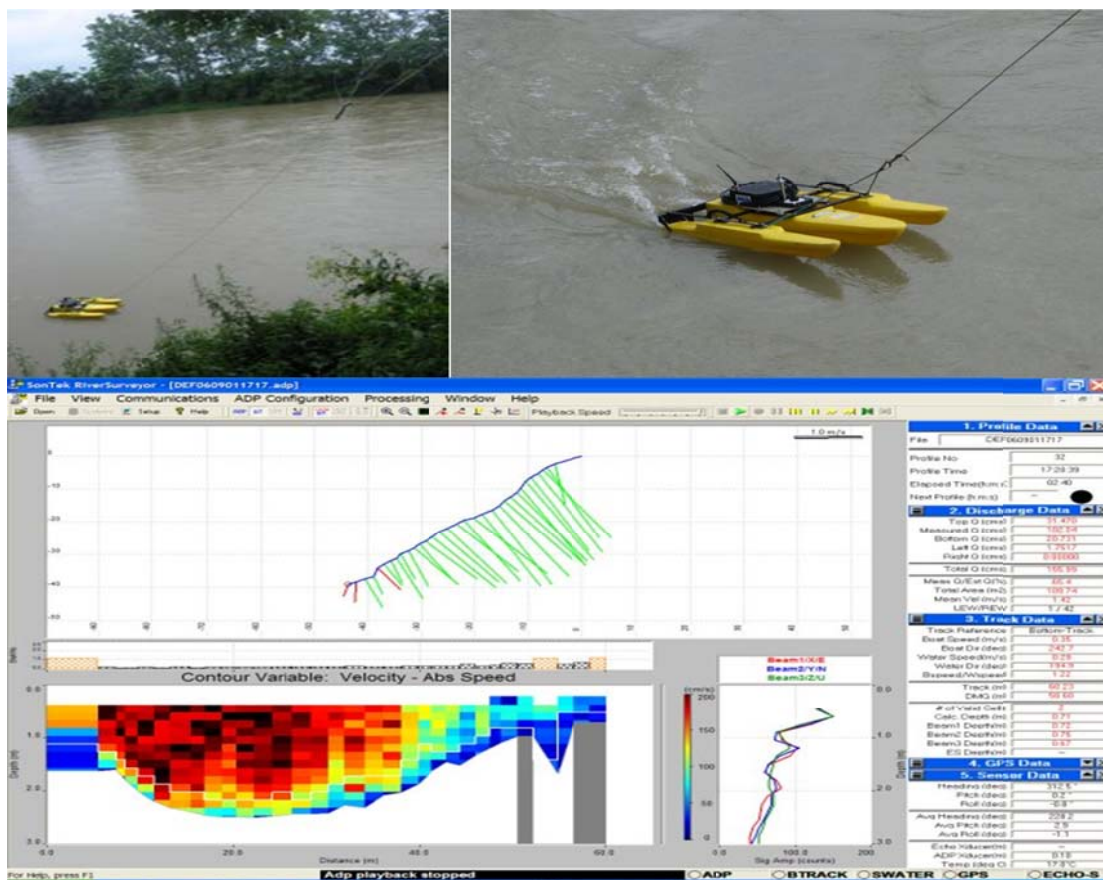
**Slika 1:** Lokacija robnih pogojev (RP-A do RP-D), ter lokacije meritev hitrosti pri prvi meritvi (MER I) in usmeritev koordinatnih osi matematičnega modela (smer X in Y).

**Figure 1:** Positioning of boundary conditions (RP-A to RP-D), location of velocity measurements in first measurement campaign (MER I) and direction of X and Y axes in the numerical model.



**Slika 2:** Tridimenzijski pogled na del področja – odsek A, v bližini vtoku v dovodni kanal NEK in prelivnega jezua. ESW = Essential Service Water- Bistvena oskrbna voda.

**Figure 2:** 3D view of part of the computational area – region A, near the inflow to the channel of NPPK and the weir. ESW = Essential Service Water. Podvodna stena=Underwater wall. Odprtine vtoka v kanal=Openings to the inflow channel. Pretočna polja jezua=Spillway weir. Iztok iz Save v ESW=Outflow from Sava River to ESW.



**Slika 3:** Fotografije plavajočega instrumenta in primeri izpiska ekrana s programom Sontek Stationary.

**Figure 3:** Photos of the floating instrument and example of the output of the program Sontek Stationary.



Model s konstantno viskoznostjo je večinoma premalo natančen, model Koutitasa pa je uporaben le za primere, kjer je glavni vzrok gibanja veter. Najtočnejši je model Mellor-Yamada, ki pa je pri simulacijah kompleksnega toka v Savi odpovedal zaradi nestabilnosti. Očitno verzija tega modela, ki je vgrajena v model PCFLOW3D, ne more simulirati tako kompleksnega toka. Tako smo uporabili model Smagorinsky, tako po horizontalni, kot po vertikalni smeri. V splošnem se ta model uporablja za horizontalno smer, vendar je bila verzija za vertikalno smer vgrajena v model PCFLOW3D in tudi preverjena (Kovšca, 2007).

## 2.2 Izvedba meritev na reki Savi z namenom verifikacije modela

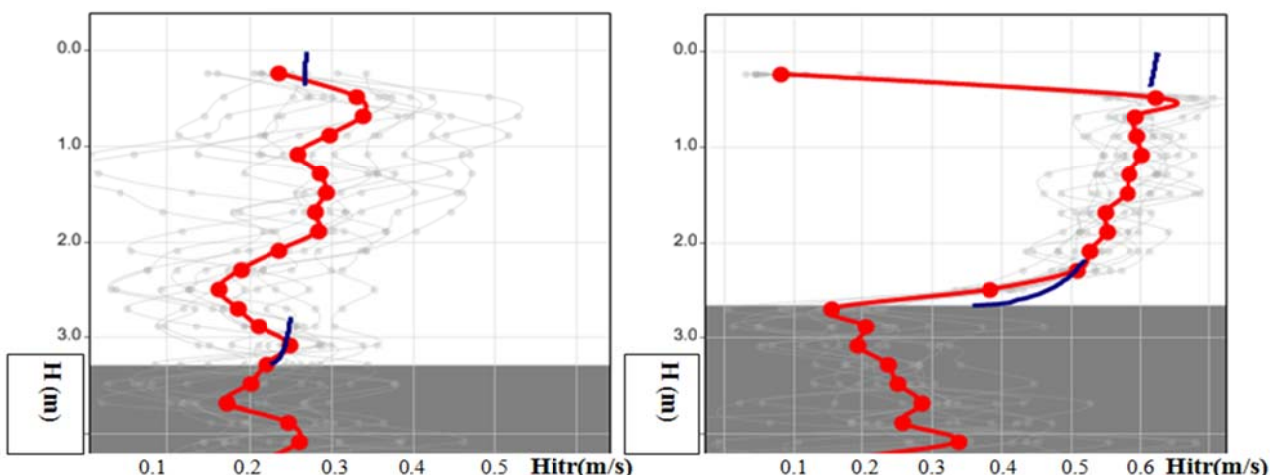
Meritve hitrosti toka so bile izvršene s plavajočim Dopplerjevim merilnim instrumentom, ki beleži vse tri komponente hitrosti z 1 % točnostjo (slika 3). Vse meritve so bile izvršene na vsakih 20 cm globine, pri čemer pa sta bili prva meritev ob gladini in spodnja ob dnu izločeni, ker na teh mestih instrument ne more dovolj točno registrirati odčitkov.

Deset metrov od vtoka v dovodni kanal NEK je v smeri prečno na tok locirana podvodna stena (slika 2), postavljena v smeri osnovnega toka Save

(x-smer). Stena je visoka okrog 2,5 m, njen vrh pa je ob normalnih pogojih (tudi v času meritev) 1,6 m pod gladino. Med to steno in vtokom v kanal je tok izredno turbulenten. Slika 4 kaže krivulje ponovljenih merjenih hitrosti po globini v dveh točkah na tem področju, močnejša krivulja pa prikazuje povprečje meritev. Posebno pri točki T11 se vidi izredno velik raztros meritev. Tu ima standardna deviacija v smeri osnovnega toka vrednost približno 0.1 m/s, (računana povprečno po celi globini), pri povprečni hitrosti 0.25 m/s. Zato pri tako turbulentnem toku ne moremo pričakovati, da bo matematični model lahko zelo natančno simuliral polje hitrosti.

Izvršeni sta bili dve seriji meritev. Meritev MER I je bila izvršena vzdolž linij P1 do P6 (slika 1). Vzdolž linij P5 in P6 so bile meritve ponovljene le dvakrat v vsaki točki in zaradi omenjenega velikega raztrosa merjenih rezultatov je bila 1. 2010 izvršena dodatna meritev (MER II) v bližini istih linij. V vsaki točki je bila meritev hitrosti ponovljena 10 krat in za kalibracijo matematičnega modela je bilo upoštevano povprečje 10 meritev.

Preglednica 1 prikazuje hidrodinamične razmere pri obeh meritvah in parametre, ki so bili upoštevani pri simulacijah v matematičnem modelu.



**Slika 4:** Prikaz izmerjenih hitrosti (MER II) v dveh točkah (T11 in T33, prva je v področju med usmerjevalno steno in vtokom v kanal NEK. Lokacija je prikazana na sliki 7. Rdeča črta kaže povprečje 10 meritev. Na levi sliki (T11) se vidi izredno močan raztros merjenih hitrosti.

**Figure 4:** Registered measured velocities (MER II) at two measuring points T11 and T33, the first situated between the underwater wall and the entrance to the inflow channel of NPPK. Location of the two points is shown in fig. 6. The left diagram (T11) shows extremely large scattering of the measured velocities.

**Preglednica 1:** Glavni parametri pri obeh meritvah, ki smo jih upoštevali pri izračunih za umerjanje matematičnega modela.  $Q_{save}$ = pretok v strugi Save;  $Q_{nek}$ = pretok v dovodni kanal NEK;  $Q_{jez}$ = pretok preko jezua NEK.

**Table 1:** Main measured parameters which were taken into account at the calibration of the numerical model.  $Q_{save}$ = discharge in the Sava River;  $Q_{nek}$ = discharge into the inflow channel of NPPK;  $Q_{jez}$ = discharge over the weir at NPPK.

	$Q_{save}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{nek}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{jez}$ [m <sup>3</sup> /s]	Kota glad. Z [m n.m.]	Lega zapornic	Odprtina zapornic	Za umerjanje	Datum
<b>MER I</b>	72-76	15,5- 21,4	54,5- 56,5	150,17	Tok preko zapornic	Krona na koti 149,70		20., 21. X. 2009
<b>V matem. modelu</b>	75	19	56	150,20	- " -	Kota 149,70	P2, P4	
<b>MER II</b>	192,60	9,66	182,94	150,15	Tok pod zaporni- cami	Nad pragom odprtina 0,52- 0,55 m		25. III. 2010
<b>V matem. modelu</b>	192,60	9,66	182,94	150,20	- " -	0,60 m		

### 3. Rezultati in diskusija

#### 3.1 Hitrosti toka

Na slikah 5 do 10 so prikazane primerjave merjenih in simuliranih vektorjev hitrosti, ki so povsod povprečeni iz 10 ponovljenih meritev. Vidno je, da je bilo v področjih pretežno regularnega toka gorvodno od objektov NEK ujemanje zelo dobro. To dokazujeta sliki 5 in 6, ki kažeta primerjavo vzdolž linije P2 in linije P4. Razlike med merjenimi in simuliranimi dolžinami hitrostnih vektorjev so bile večinoma do 10 %, le mestoma do 20 %, enako velja za primerjavo smeri hitrosti. Slika 7 prikazuje primerjavo vektorjev hitrosti v tlorisu (MER II). Prikazana je tudi lokacija prerezov, v katerih je podana primerjava meritev in simulacij na slikah 8 do 10. V zelo kompleksnem toku med podvodno steno in vtočnim profilom v kanal je bilo ujemanje slabo. Slika 8 kaže primerjavo simuliranih in merjenih hitrosti v profilu YZ113 - v prečni smeri toka; viden je tudi presek podvodne usmerjevalne stene in vtok v dovodni kanal NEK. Primerjava kaže, da model ne more zadovoljivo simulirati vrtnica v tem področju. Rezultati na sliki 9 (vzdolžni prerez, desno je iztok izpod zapornice na jezua NEK) so še zadovoljivi. Slika 10 pa prikazuje primerjavo v profilu XZ135, torej vzdolžni

preseki, desno je iztok izpod zapornice. Ta vzdolžni profil leži paralelno s podvodno usmerjevalno steno, med njo in začetnim prerezom vtoka v dovodni kanal.

Na osnovi vseh prikazanih primerjav izračunov z modelom PCFLOW3D in meritev lahko sklepamo, da je model v večjem delu področja pokazal zadostno zanesljivost za simulacije pojavov, ki bodo simulirani v tem projektu. V področju med usmerjevalno steno in vtokom v dovodni kanal NEK pa model ne more dovolj natančno simulirati pojava.

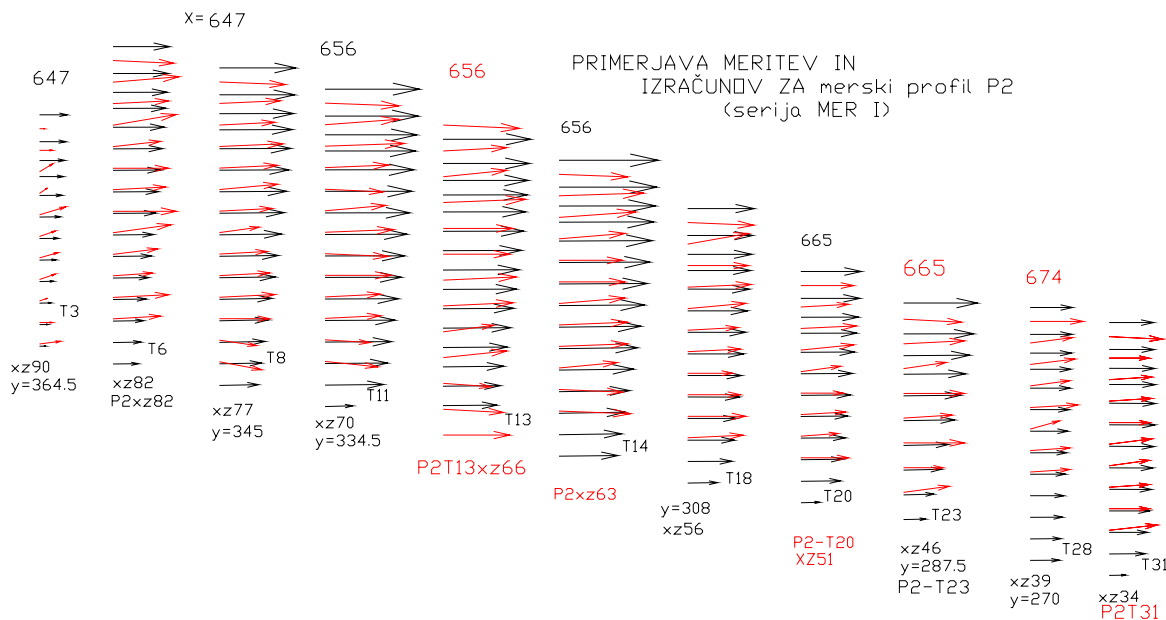
Vzrokov za razlike med meritvami in izračuni je več:

- Za tok v izredno turbulentnem področju (glej sliko 4), kjer 10 ponovljenih meritev pokaže izredno velik raztros rezultatov, je skoraj nemogoče pričakovati dobro ujemanje, saj model lahko izračuna le časovno povprečne vrednosti. Pri tem uporabljen model turbulence, shema Smagorinsky, očitno ne more dovolj natančno simulirati pojava izrazito turbulentnega toka.
- Pri pojavih, kjer so vertikalne komponente hitrosti istega reda velikosti kot horizontalne komponente (npr. reda nad 25 %), model ne more dovolj natančno simulirati hitrostnega

polja. »Polno-3D« verzija modela je že v pripravi za točnejšo simulacijo tokov v takih področjih.

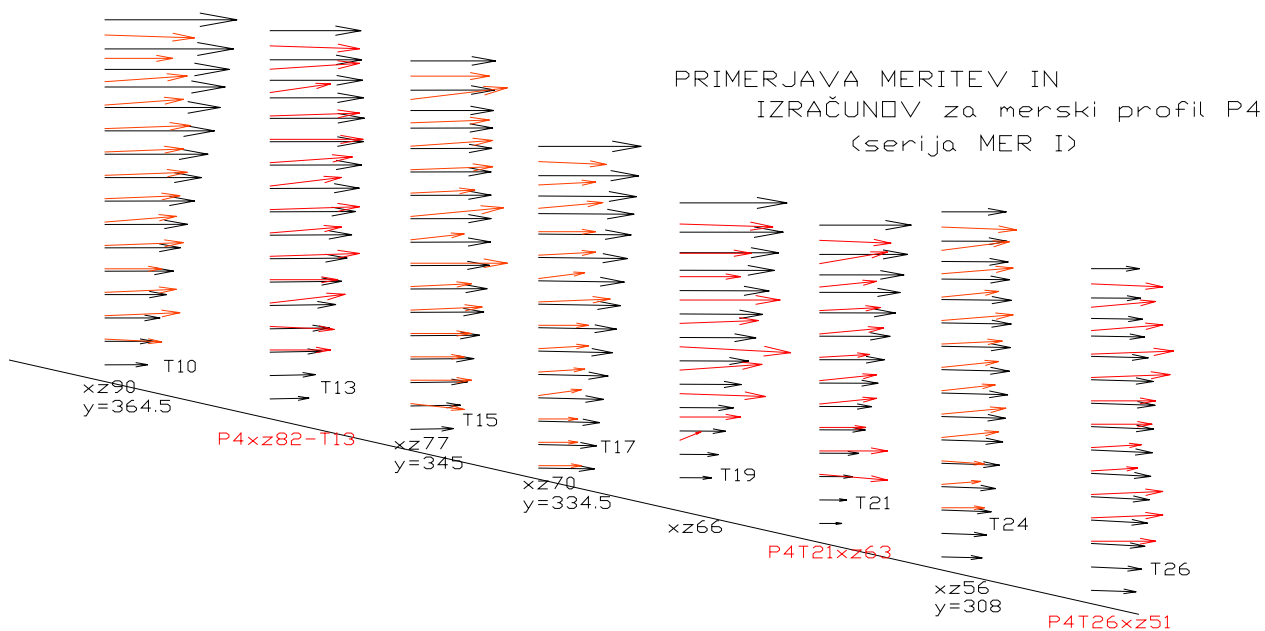
c) Topografija področja na nekaterih mestih ni bila detajlno izmerjena. Razen tega vseh

najmanjših detajlov topografije v matematičnem modelu ni bilo mogoče zajeti, kljub temu da smo pri simulacijah serije MER II uporabljali zelo gosto numerično mrežo (DXmin = 1,0 m, DYmin = 0,5 m).



**Slika 5:** Serija meritev MER I: Prikaz merjenih (rdeče) in računanih (črno) vektorjev hitrosti (v smeri osi X) v merskem profilu P2.

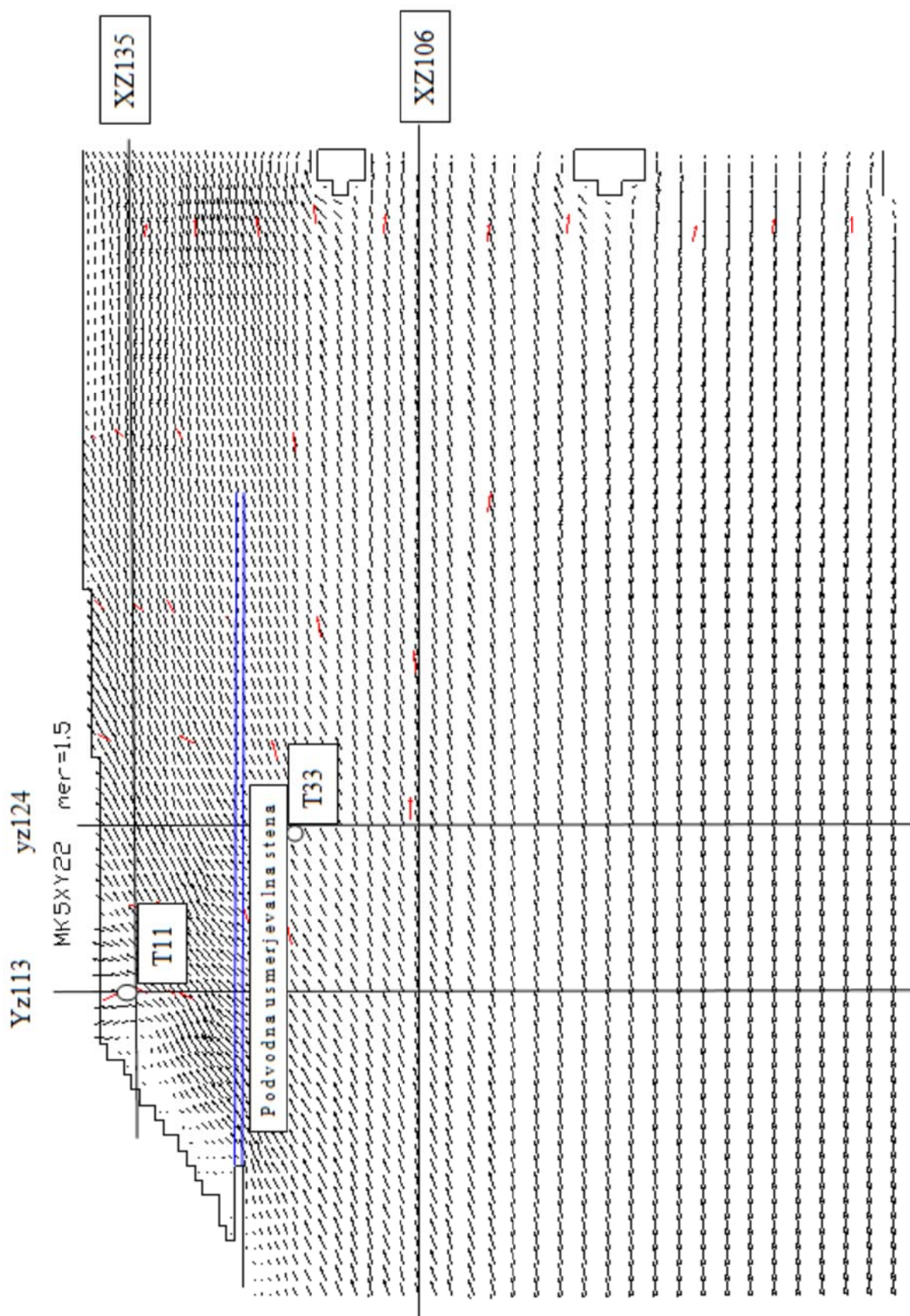
**Figure 5:** Measured (red) and calculated (black) velocity components (in the X-direction) in the cross-section P2 (measurement MER I).



**Slika 6:** Serija meritev MER I: Prikaz merjenih (rdeče) in računanih (črno) vektorjev hitrosti (v smeri osi X) v merskem profilu P4.

**Figure 6:** Measured (red) and calculated (black) velocity components (in the X-direction) in the cross-section P4 (measurement MER I).

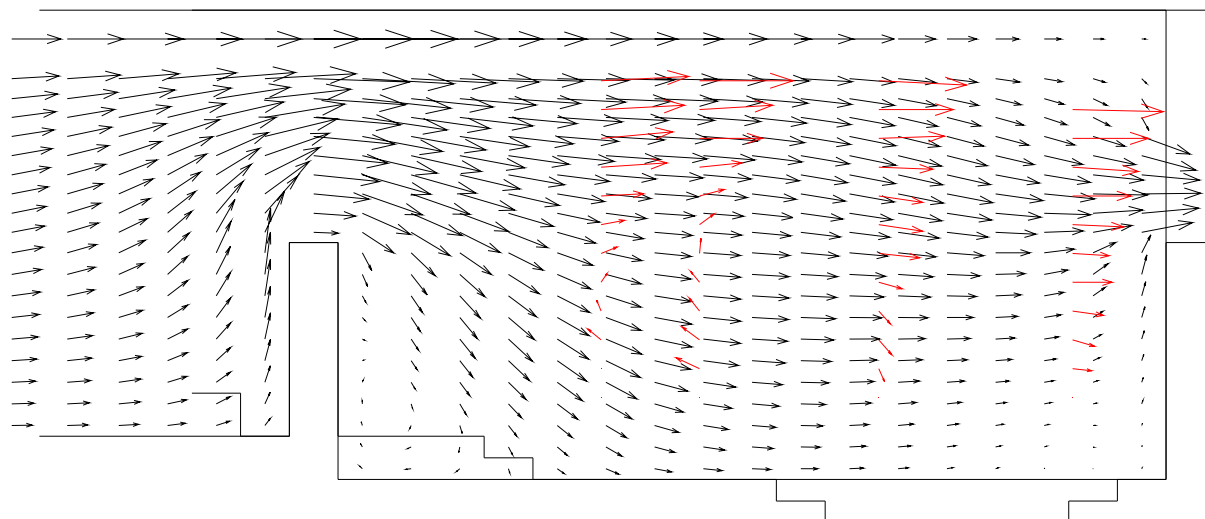




**Slika 7:** MER II: Prikaz merjenih (rdeče) in računanih (črno) komponent hitrosti (v ravnini X-Y) v sloju 22 (izračun za globino 1.0677-1.20).

**Figure 7:** Measured (red) and calculated (black) velocity components (in the X-Y plane) in layer 22 (depth 1.0677-1.20) (Measurement MER II).

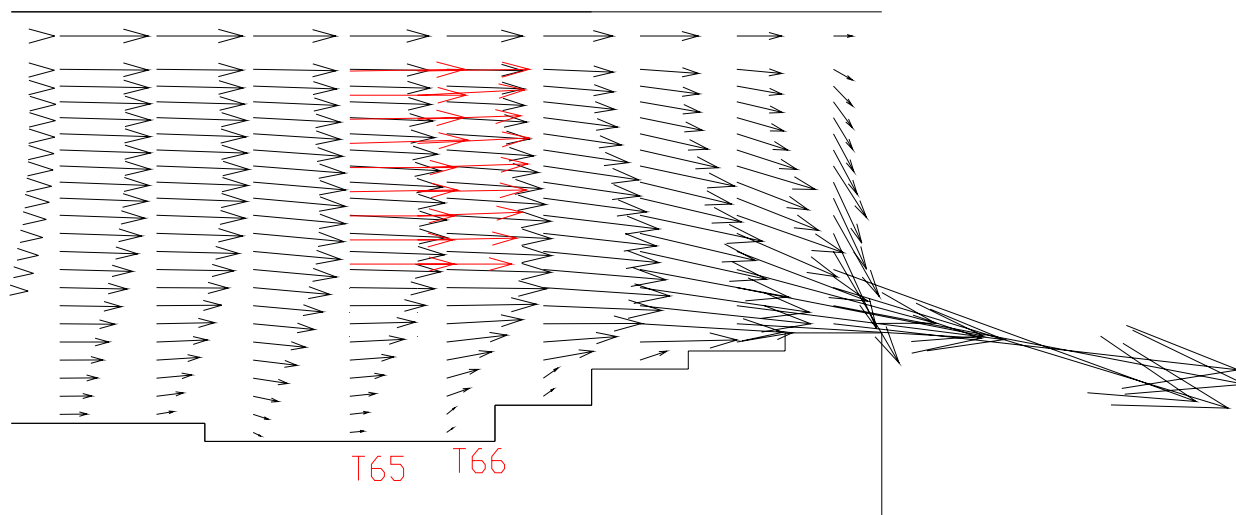
MK5yz113 mer=1.5



**Slika 8:** MER II: Prikaz merjenih (rdeče) in računanih (črno) vektorjev hitrosti v prečnem prerezu YZ113 (lego prikazuje slika. 7). Vidi se presek vzdolžne usmerjevalne stene, desno je vtok v dovodni kanal.

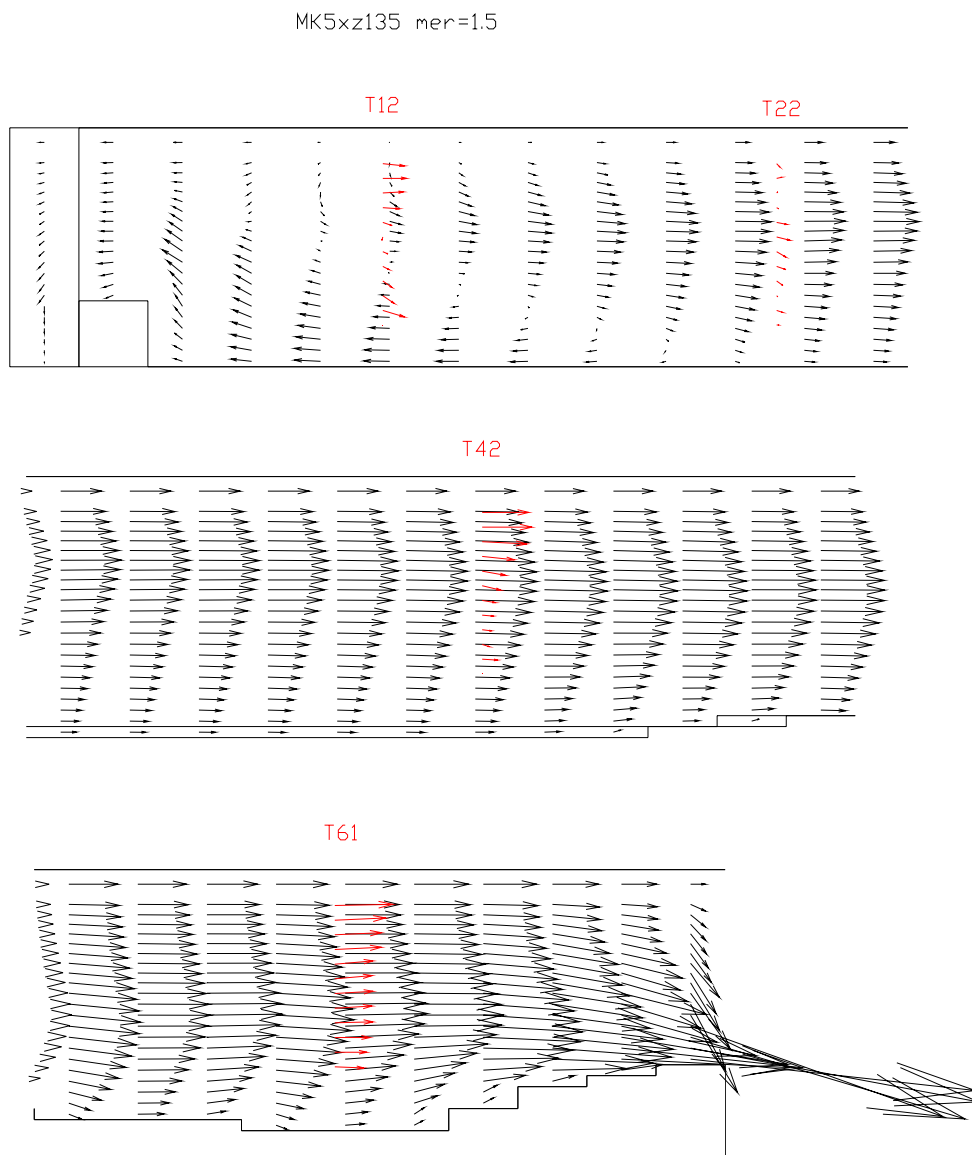
**Figure 8:** Measured (red) and calculated (black) velocity components (in the Y-Z plane) in the section YZ113 (Measurement MER II). Location of the section is shown in Figure 7. The along-flow underwater wall is shown at the left, and the inflow to the inflow channel of NPPK is shown on the right.

MK5xz106



**Slika 9:** MER II: Prikaz merjenih (rdeče) in računanih (črno) vektorjev hitrosti v vzdolžnem prerezu XZ106 (lego prikazuje slika. 7). Desno je iztok izpod zapornice na jezcu NEK.

**Figure 9:** Measured (red) and calculated (black) velocity components (in the X-Z plane) in the section XZ106 (Measurement MER II). Location of the section is shown in Figure 7. The outflow under the weir of NPPK is shown on the right-hand side.



**Slika 10:** MER II: Prikaz merjenih (rdeče) in računanih (črno) vektorjev hitrosti v vzdolžnem prerezu XZ135 (lego prikazuje slika. 7). Zaradi preglednosti je prerez razdeljen na tri dele. Na koncu je viden iztok izpod zapornice NEK.

**Figure 10:** Measured (red) and calculated (black) velocity components (in the X-Z plane) in the section XZ135 (MER II). Location of the section is shown in Figure 7. (The section is divided into 3 parts). The outflow under the weir of NPPK is shown on the right.

Poudarimo lahko še sledeče dejstvo: prikazana umerjanja so bila izvršena v *sedanjih razmerah*, ko še ni zajezbe zaradi HE Brežice. V *bodočih razmerah* bo Sava zajezena na koti 153,00 m, zato so predvidene globine v tem področju za tri metre višje, hitrosti toka pa bistveno manjše, tako da bo tudi turbulenca manjša. Zato upravičeno pričakujemo, da model PCFLOW3D v takih razmerah daje bolj točne in zanesljive rezultate, kot so jih pokazala umerjanja pri sedanjem stanju.

### 3.2 Transport lebdečih plavin

Vhodne podatke za simulacije transporta plavin smo dobili v *profilu Save pod HE Krško* na osnovi poročila (DHD, 2010; 2011)

Podatki so nezanesljivi, kar priznava tudi avtor, kajti na razpolago je bilo le nekaj zelo skopih meritev, pa še te le v bazenu Vrholo.

S podanimi vhodnimi podatki o lastnostih sedimentov smo pri simulacijah transporta in

usedanja izračunali, da se na odseku med HE Krško in vtočnimi objekti NEK koncentracije lebdečih plavin (SD) praktično ne spremenijo niti pri najmanjših pretokih, ker ni skoraj nobenega usedanja. Tako smo pri simulacijah kot vhodne podatke za vtok v model upoštevali koncentracije lebdečih plavin, ki so za profil Save pod HE Krško podani v preglednici 2.

**Preglednica 2:** *Koncentracija suspenzij pri različnih pretokih (podatki DHD).*

**Table 2:** *Suspended sediment concentrations as a function of water discharge.*

$Q$ [ $m^3/s$ ]	$SD$ [ $kg/m^3$ ]
31,4	0,00366
50	0,00369
100	0,00433
200	0,00796
500	0,03768
1000	0,150
4700	3,42067
7081	7,79825

Kot je prikazano v preglednici 2, je koncentracija plavin odvisna od pretoka. Pri simulacijah transporta plavin na odseku A gorvodno od jezua NEK smo s 3D modelom računali le pri treh pretokih  $Q_s = 31,4, 50,0$  in  $100,0 m^3/s$ , pri večjih pretokih so bile simulacije izvršene z 2D modelom (IBE in FGG, 2011). Premeri zrn presevkov pa naj bi bili po podatkih DHD za vse tri obravnavane pretoke  $d(99\%) = 0,1$  mm, medtem ko je za  $Q = 31,4$  in  $Q = 50 m^3/s$   $d(96\%) = 0,05$  mm ter za  $Q = 100 m^3/s$   $d(98\%) = 0,05$  mm.

Ker je bilo na osnovi več simulacij razvidno, da je pri sedanjem stanju turbulenca prevelika, da bi se lebdeče plavine sploh usedale tudi pri najnižjih pretokih, prikazujemo le nekaj rezultatov za bodoče stanje. Izbrali smo Primer O99, kjer je pretok Save  $Q = 50 m^3/s$ .

Pojav za primer O99 je prikazan na slikah 11 do 13. Slika 11 prikazuje razpored koncentracije plavin v tlorisnem (XY) pogledu v podpovršinskem sloju. Vidi se, da je na prvi četrtini odseka turbulenca prevelika in začetna koncentracija plavin (SD), ki je za pretok  $Q_s = 50 m^3/s$  enaka  $SD = 0,00369 kg/m^3$ , ostane enaka. Nato se začne poznati vpliv zajeze skupaj z vplivom nižjih globin ob obeh bregovih, ki upočasnijo tok in povzročijo delno usedanje plavin. Slika kaže tudi vpliv čiste vode, ki doteka iz ESW, ki je po predpostavki brez plavin. Iz slike 12, ki kaže potek hitrosti in SD v prečnem preseku YZ124 (skozi iztok CW), je razvidno, da je v zadnjem desnem delu, ob vtoku v CW kanal, vrtinec v vertikalni ravnini delno transportiral plavine proti gladini. Na vtoku v dovodni kanal je koncentracija  $SD \approx 0,0034 kg/m^3$ .

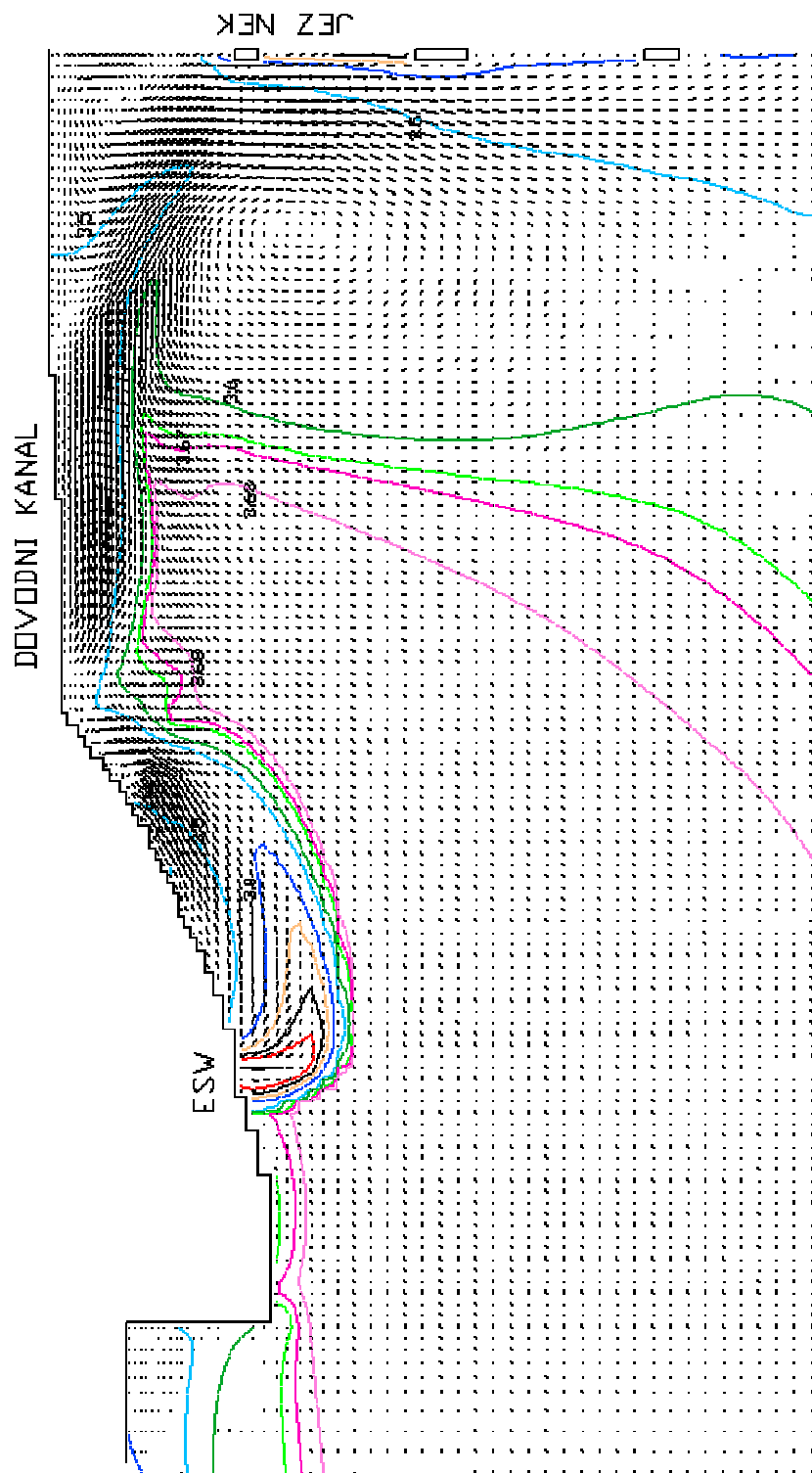
Primerjava rezultatov transporta lebdečih plavin v sedanjem in bodočem stanju je pokazala, da so pri zgoraj podanih lastnostih plavin v Savi razlike zelo majhne. Le pri najmanjšem pretoku  $31,4 m^3/s$  se vnos plavin v dovodni kanal v bodočem stanju opazno zmanjša (dobrih 30%), medtem ko je že pri pretoku  $50 m^3/s$  razlika le dober odstotek.

S simulacijami smo raziskovali tudi, če lahko z nekaterimi konstrukcijskimi spremembami v bodočem stanju zmanjšamo vnos plavin v dovodni kanal. Med drugim smo pri O99 ( $Q = 50 m^3/s$ ) simulirali povišanje usmerjevalne stene. V sedanjem stanju je zgornji rob stene na koti 148,60 m, torej 1,4 m pod osnovno koto 150,00 m. Simulirali smo primer, da je stena povišana za 3 m na koto 151,60 m (1,4 m pod bodočo gladino 153,00).

Rezultate in vpliv povišanja stene vidimo na slikah 12 in 13 (povišana stena je na sliki 13). Simulacije so pokazale, da povišanje stene celo nekoliko poveča vnos plavin v kanal CW, vendar so razlike le nekaj odstotkov. Glede na dejstvo, da tako majhnih razlik model ne more zanesljivo prikazati, lahko le zaključimo, da povišanje usmerjevalne stene ne bi prineslo bistvenega izboljšanja razmer. Podobne rezultate smo dobili v primeru, da iztok v dovodni kanal postavimo za 3 metre višje. Ob tem je potrebno omeniti, da je šlo v obeh primerih le za teoretične eksperimente,

ki bi pokazali morebitne vplive bistvenih sprememb geometrije vtočnih objektov. Dejansko sprememb v takšni obliki zaradi varnostnih zahtev

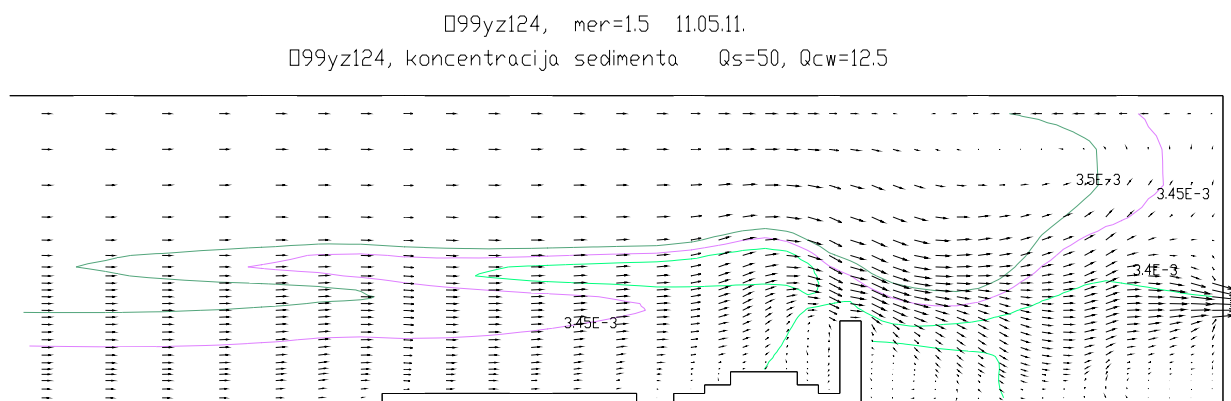
NEK ne bi mogli izvesti, bi pa lahko bili rezultati takšnih eksperimentov osnova za nadaljnji razmislek in obdelave.



**Slika 11:** Izračunane koncentracije sedimenta v  $\text{kg/m}^3$  (pomnožene z  $10^{**3}$ ). Primer O99, pretok Save je  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , Pretok hladilne vode =  $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tlorisni prerez v podpovršinskem sloju XY31.

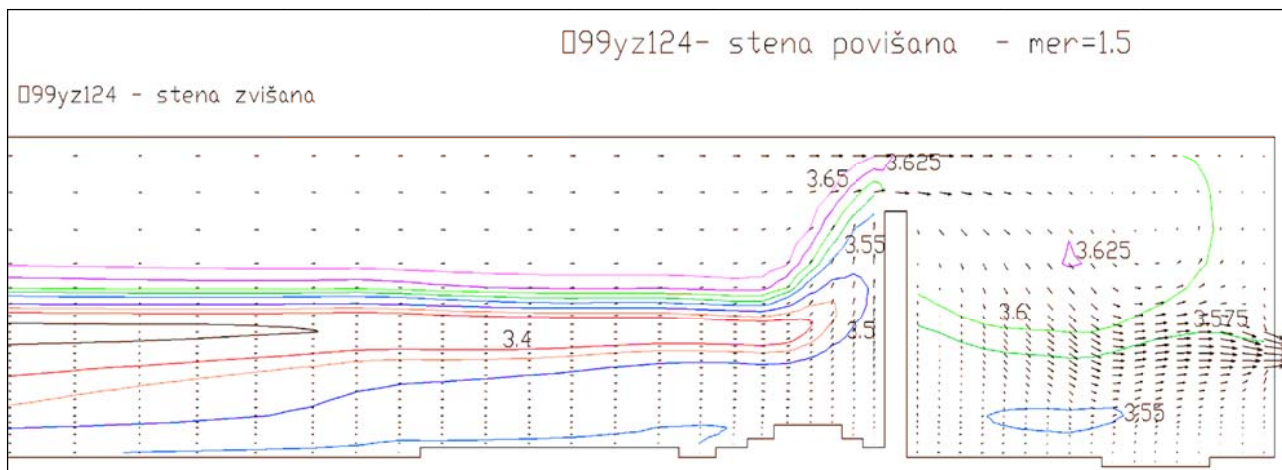
**Figure 11:** Calculated sediment concentrations  $\text{kg/m}^3$  (multiplied by  $10^{**3}$ ), shown in the second X-Y plane below surface XY31. Case O99, the discharge of the Sava River is  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ , Discharge of cooling water =  $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .





**Slika 12:** Izračunane koncentracije sedimenta ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Primer O99, pretok Save je  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Prečni prerez YZ124. Desno se vidi vtok v dovodni kanal NEK.

**Figure 12:** Calculated sediment concentration ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), shown in the longitudinal section YZ124. Case O99, discharge of the Sava River is  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ . On the right-hand side is the entrance to the inflow channel of NPPK.



**Slika 13:** Izračunane koncentracije sedimenta ( $\text{kg}/\text{m}^3$  pomnožene z  $10^{**3}$ ). Primer O99, pretok Save je  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Prečni prerez YZ124. Vzдолžna usmerjevalna stena je povišana za 3 m. Desno se vidi vtok v dovodni kanal NEK.

**Figure 13:** Calculated sediment concentrations ( $\text{kg}/\text{m}^3$ , multiplied by  $10^{**3}$ ), shown in the longitudinal section YZ124. Case O99, discharge of the Sava River is  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ . The longitudinal underwater wall is raised by 3 m. The entrance to the inflow channel of NPPK can be seen on the right.

#### 4. Zaključki

Sedanji model PCFLOW3D je uporaben za simulacije pretežnega dela področja toka, manj natančen je v neposredni bližini vtoka CW. V pripravi je "Polno-3D model" za točnejše simulacije v takih področjih.

1. Zaradi manjših hitrosti toka in posledično manjše turbulence po dvigu gladine zaradi zaježitve s HE Brežice je upravičena predpostavka, da so rezultati 3D izračunov za

bodoče stanje v neposredni bližini CW in ESW vtokov bolj zanesljivi od tistih za obstoječe stanje.

2. Vnos plavin v dovodni kanal CW bo za doslej znano sestavo in koncentracije sedimentov po izgradnji HE Brežice in dvigu gladine Save ostal praktično enak (rahlo zmanjšanje samo pri  $Q_{\text{save}}$  pod  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

3. Nekatere predlagane konstrukcijske spremembe pri vtoku v kanal ne morejo zmanjšati vnosa plavin.



## Viri

Četina, M., Rajar, R., Povinec, P. (2000). Modelling of Circulation and Dispersion of Radioactive Pollutants in the Japan Sea. *Oceanologica Acta*, **23**(7), 819–836.

Četina, M., Rajar, R., Yano, S., Tada, A., Nakamura, T., Akagi, H. (2003). Hydrodynamic simulations of the Yatsushiro sea, Japan. V: Liu, P. L., Krestenitis, Y. N. (Eds.). XXX IAHR Congress Proceedings, Thessaloniki, Greece, August 2003, 1–8.

DHD (2010, 2011). 2D model transporta plavin v akumulacijskih bazenih NEK in HE Brežice, november 2010, Poročilo DHD, Maribor, dopolnila maj 2011. (in Slovenian).

IBE in FGG (2011). Hidrodinamični in transportni model detajla vtoka in iztoka NEK – 3D računi transporta plavin in dodatni scenarij obratovanja NEK. Poročilo IBE in FGG Avgust 2011. (in Slovenian).

IHR in FGG (2010). Hidrodinamični in transportni model detajla vtoka in iztoka NEK, Inštitut za hidravlične raziskave, poročilo, julij 2010. (in Slovenian).

Kovšca, J. (2007). Dopolnitve modela PCFLOW3D za simulacijo tokov in širjenja polutantov (Completion of PCFLOW3D Model for Simulation of Flow and Dispersion of Pollutants). Unpublished Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 135 p. (in Slovenian)

Rajar, R., Četina, M. (1997). Hydrodynamic and Water Quality Modelling: An Experience. *Ecological Modelling*, **101**, 195–207.

Rajar, R., Četina, M., Širca, A. (1997). Hydrodynamic and Water Quality Modelling: Case Studies. *Ecological Modelling*, **101**, 209–228.

Rajar, R., Žagar, D., Četina, M., Akagi, H., Yano, S., Tomiyasu, T., Horvat, M. (2004). Application of three-dimensional mercury cycling model to coastal seas. *Ecological Modelling*, **171**, 139–155.

Rajar, R., Žagar, D., Četina, M., Horvat, M., and Petkovšek, G. (2007). Mass balance of mercury in the Mediterranean sea. *Marine Chemistry*, **107**, 89–102.

Tomiyasu, T., Matsuyama, A., Eguchi, T., Fuchigami, Y., Oki, K., Horvat, M., Rajar, R., Akagi, H. (2006). Spatial variation of mercury in sediment of Minamata Bay. *Japan. Sci. Total Environ*, **368**, 283–290.