

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,  
Hidrotehniška smer

Kandidat:

**Andraž Hladnik**

# **Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne**

**Diplomska naloga št.: 2985**

**Mentor:**  
prof. dr. Matjaž Četina

**Somentor:**  
dr. Andrej Širca

Ljubljana, 3. 12. 2007

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **ANDRAŽ HLADNIK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
**»MATEMATIČNO MODELIRANJE TOKA V RIBJEM PREHODU REČNE  
HIDROELEKTRARNE«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 12. 11. 2007

---

(podpis)

- II Hladnik, A. 2007. Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne.  
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer.

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 519.61/.64:627.133:627.88  
**Avtor:** Andraž Hladnik  
**Mentor:** izr. prof. dr. Matjaž Četina  
**Somentor:** dr. Andrej Širca, zn. sod.  
**Naslov:** Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne  
**Obseg in oprema:** 74 str. , 11 pregl., 34 sl., 23 en., 28 pril.  
**Ključne besede:** ribja populacija, migranti, ribji prehod, bazeni s prelevi, hitrost plavanja, vzdržljivost, ovira, hidravlični pogoji

### **Izvleček**

Diplomsko delo obravnava matematično modeliranje toka v ribjem prehodu preko rečne hidroelektrarne z 1D modelom HEC-RAS ter 2D modeloma MIKE 21 in PCFLOW2D.

V prvem delu naloge je potrebno zbrati podatke o različnih tipih ribjih prehodov in omejitvah hitrosti v njih. Sledi opis ribje populacije, ki prehod uporablja za gorvodno in dolvodno migracijo ter njihovi plavalni parametri. Selivke so razdeljene na tiste, ki se selijo na krajše in tiste na daljše razdalje. Rezultati analize so dolžina, starost in naseljenost ribje populacije, ki so izhodišča za določitev bioloških kriterijev za dimenzioniranje ribjega prehoda.

V drugem delu pa je potrebno simulirati tok v nekaj izbranih tipih ribjih prehodov z različno razporeditvijo ovir in podati njihovo primerjavo. V nadaljevanju sledi podroben opis in izdelava matematičnih modelov za 1D in 2D tok. Za vsak model posebej so podane osnovne enačbe in vhodni parametri, ki jih modeli uporabljajo pri izračunu. Osnova omenjenih modelov so rezultati, dobljeni v prvem delu naloge. Za zagotovitev ustreznih hidravličnih pogojev so v modele vstavljeni različni tipi ovir, ki so v nadaljevanju tudi podrobno predstavljeni. Upoštevanji so predvsem tipi, ki ugodno vplivajo na nastanek umirjevalnih con. Pri določanju ovir so upoštevanji različni primeri že zgrajenih ribjih prehodov.

Hidravlični izračun je narejen za 1D in 2D tok. Z uporabo računalniških programov HEC-RAS, MIKE 21 in PCFLOW2D je izdelan hidravlični model. Na podlagi rezultatov matematičnega modeliranja so prikazane možne oblike in dimenzije ovir v bazenih. Na koncu je podana še primerjava 1D in 2D modela ter kako so ustvarjene razmere v ribjih prehodih primerne za posamezne vrste rib.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 519.61/.64:627.133:627.88

**Author:** Andraž Hladnik

**Supervisor:** Matjaž Četina, Ph.D., Associate Professor

**Co-Supervisor:** Andrej Širca, Ph.D., Researcher

**Title:** Mathematical modelling of flow in fishway at river hydroelectric power plant

**Notes:** 74 p., 11 tab., 34 fig., 23 eq., 28 charts

**Key words:** fish facility, migratory fish, fishway, weir-type pool fishways, swimming speed, endurance, obstruction, hydraulic conditions

### **Abstract**

My graduation thesis deals with mathematical modelling of the flow in a fishway at a river hydroelectric power plant with 1D model HEC-RAS, and 2D models MIKE 21 and PCFLOW2D.

In the first part of the thesis, data on various types of fishways and speed limits are presented. Fish population using the fishway for upstream and downstream migration and their swimming parameters are described in continuation. Migratory fish are divided in those migrating at shorter and longer distances. The analysis results are length, age and density of fish population, which is the starting point for defining biological criteria for dimensioning a fishway.

In the second part, a flow is simulated in some selected types of fishways with different arrangement of obstructions, and their comparison is made. Then, a detailed description and elaboration of mathematical models for 1D and 2D flows are given. Basic equations and input parameters used for calculation are given for each model separately. The stated models are based on the results obtained in the first part of my thesis. To ensure corresponding hydraulic conditions, various types of obstructions are inserted in the models which are described in details. Types which favourably influence in the origin of static water zones have especially been considered. When determining the obstructions, different examples of existing fishways have been taken into account.

Hydraulic calculation is done for 1D and 2D flows. A hydraulic model is done by means of HEC-RAS, MIKE 21 and PCFLOW2D programs. Based on the results of mathematical modelling, possible shapes and dimensions of obstructions in pools are shown. Finally, comparison between the 1D and 2D models, and compliance of the conditions in fishways for different kinds of fish are stated.

- IV Hladnik, A. 2007. Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne.  
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se vsem, ki so mi pri izdelavi diplomske naloge pomagali na kakršenkoli način. Glavna zahvala gre mentorju izr. prof. dr. Matjažu Četini in somentorju dr. Andreju Širci, zn. sod., ki sta si vedno vzela čas in mi priskočila na pomoč. Na koncu še hvala moji družini za podporo, ki sem jo bil deležen med študijem in pisanjem diplome.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ANALIZA RIBJE POPULACIJE .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Vrste rib.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Naseljenost.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>Delež rib v izlovih .....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>DIMENZIONIRANJE RIBJEGA PREHODA .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Biološki kriteriji za dimenzioniranje .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Hitrost plavanja in vzdržljivost .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Maksimalna dosežena razdalja.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Dolžina in višina skoka .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Primeri različnih tipov ribjih prehodov .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Sinn (Nemčija).....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Unzmakt (Avstrija) .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Ruppoldingen (Švica) .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.4</b>	<b>St. Laurent des Eaux (Francija) .....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>MATEMATIČNO MODELIRANJE TOKA V RIBJEM PREHODU .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Opis matematičnih modelov HEC-RAS, MIKE 21 in PCFLOW2D .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.1</b>	<b>HEC-RAS .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.2</b>	<b>MIKE 21 .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1.3</b>	<b>PCFLOW2D .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2</b>	<b>Priprava podatkov za izračun .....</b>	<b>39</b>

4.2.1	Geometrija obravnavanih ribjih prehodov.....	40
4.2.2	Geometrijski podatki za 2D modela .....	46
4.2.3	Čas simulacije .....	48
4.2.4	Začetni pogoj.....	48
4.2.5	Robni pogoji.....	48
4.2.6	Koeficient hrapavosti .....	51
4.2.7	Izbira modula.....	52
5	REZULTATI MODELOV .....	53
5.1	Rezultati programa HEC-RAS .....	53
5.2	Rezultati programa MIKE 21 .....	55
5.3	Rezultati programa PCFLOW2D.....	58
5.4	Primerjava rezultatov programov MIKE 21 in PCFLOW2D.....	59
5.4.1	Maksimalne kote.....	59
5.4.2	Hitrosti.....	62
6	ZAKLJUČEK.....	66
	VIRI IN LITERATURA.....	68
	SLOVAR TUJK .....	72
	PRILOGE .....	74

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Naseljenost posameznih vrst rib v reki Savi od HE Vrhovo do tovarne Vipap ....	12
Preglednica 2: Naseljenost rib v reki Savi od HE Vrhovo do tovarne Vipap .....	14
Preglednica 3: Hitrosti plavanja in vzdržljivost selivk na daljše razdalje .....	20
Preglednica 4: Hitrosti plavanja in vzdržljivost osebkov v 1. letu spolne zrelosti.....	21
Preglednica 5: Največja dosežena razdalja.....	24
Preglednica 6: Karakteristike skoka .....	27
Preglednica 7: Kanal z bazeni .....	28
Preglednica 9: Mešani tip prehoda .....	29
Preglednica 10: Kamnita drča s kaskadami .....	29
Preglednica 11: Poenotenje stopenj (stanje na dan 15. februar 2006).....	49



## KAZALO SLIK

Slika 1: Kanal z bazeni.....	28
Slika 2: Bazeni s kaskadami.....	28
Slika 3: Mešani tip prehoda .....	29
Slika 4: Kamnita drča s kaskadami .....	29
Slika 5: Členi energijske enačbe .....	32
Slika 6: Geometrija 1D matematičnega modela HEC-RAS .....	41
Slika 7: Prečni prerez bazena .....	41
Slika 8: Vzdolžni prerez bazena.....	41
Slika 9: Prečni prerez kanala z oviro za 1. primer .....	42
Slika 10: Prečni prerez kanala z oviro za 2. primer .....	42
Slika 11: Prečni prerez kanala z oviro za 3. primer .....	43
Slika 12: Tloris kanala z oviro za 4. primer.....	44
Slika 13: Prečni prerez kanala s popravljeno oviro za 3. primer .....	44
Slika 14: Tloris kanala s popravljeno oviro za 3. primer .....	45
Slika 15: Tloris kanala s popravljeno oviro za 4. primer .....	45
Slika 16: Numerična mreža 1. računskega primera .....	46
Slika 17: Numerična mreža 2. računskega primera .....	46
Slika 18: Numerična mreža 3. računskega primera .....	47
Slika 19: Numerična mreža 4. računskega primera .....	47
Slika 20: Padeč gladine pri oviri za 1. primer.....	55
Slika 21: Padeč gladine pri oviri za 2. primer.....	55
Slika 22: Padeč gladine pri oviri za 3. primer.....	55
Slika 23: Padeč gladine pri oviri za 4. primer.....	55
Slika 24: Hitrostno polje za 1. računski primer (program MIKE 21).....	56
Slika 25: Hitrostno polje za 2. računski primer (program MIKE 21).....	57
Slika 26: Hitrostno polje za 3. računski primer (program MIKE 21).....	57
Slika 27: Hitrostno polje za 4. računski primer (program MIKE 21).....	58
Slika 28: Primerjava maksimalnih kot vode vzdolž odseka po simetrični osi kanala za 1. računski primer za programe HEC-RAS, MIKE 21 in PCFLOW2D .....	60

Slika 29: Primerjava maksimalnih kot vode vzdolž odseka po simetrični osi kanala za 2. računski primer za programe HEC-RAS, MIKE 21 in PCFLOW2D.....	60
Slika 30: Primerjava maksimalnih kot vode vzdolž odseka po simetrični osi kanala za 3. računski primer za programa MIKE 21 in PCFLOW2D.....	61
Slika 31: Primerjava maksimalnih kot vode vzdolž odseka po simetrični osi kanala za 4. računski primer za programe HEC-RAS, MIKE 21 in PCFLOW2D.....	61
Slika 32: Hitrostno polje za 1. računski primer (program PCFLOW2D).....	63
Slika 33: Hitrostno polje za 2. računski primer (program PCFLOW2D).....	63
Slika 33: Hitrostno polje za 3. računski primer (program PCFLOW2D).....	64
Slika 34: Hitrostno polje za 4. računski primer (program PCFLOW2D).....	64

- X Hladnik, A. 2007. Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne.  
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer.

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Dolžine osebkov v 1. letu spolne zrelosti.....	11
Grafikon 2: Delež rib <20 cm za celotno območje .....	15
Grafikon 3: Delež rib >20 cm za celotno območje .....	16
Grafikon 4: Prikaz povprečne starosti in dolžine za celotno populacijo.....	17
Grafikon 5: Hitrosti plavanja selivk na daljše razdalje .....	22
Grafikon 6: Hitrosti plavanja osebkov v 1. letu spolne zrelosti.....	23
Grafikon 7: Višina vodne gladine $z$ v odvisnosti od pretoka $Q$ v profilu P0 na iztoku 1D modela.....	50
Grafikon 8: Višina vodne gladine $z$ v odvisnosti od pretoka $Q$ v iztočnem profilu 2D modelov.	50
Grafikon 9: Primerjava hitrosti toka 1D modela HEC-RAS v interpoliranih profilih za vse računske primere .....	54

## KAZALO PRILOG

- Priloga 1: Preglednica rezultatov modela HEC-RAS v interpoliranih profilih za 1. primer  
Priloga 2: Preglednica rezultatov modela HEC-RAS v interpoliranih profilih za 2. primer  
Priloga 3: Preglednica rezultatov modela HEC-RASv interpoliranih profilih za 3. primer  
Priloga 4: Preglednica rezultatov modela HEC-RAS v interpoliranih profilih za 4. primer  
Priloga 5: Potek gladine 1D modela v vzdolžnem prerezu za 1. primer (HEC-RAS)  
Priloga 6: Potek gladine 1D modela v vzdolžnem prerezu za 2. primer (HEC-RAS)  
Priloga 7: Potek gladine 1D modela v vzdolžnem prerezu za 3. primer (HEC-RAS)  
Priloga 8: Potek gladine 1D modela v vzdolžnem prerezu za 4. primer (HEC-RAS)  
Priloga 9: Prikaz kanala z ovirami za 1. primer (HEC-RAS)  
Priloga 10: Prikaz kanala z ovirami za 2. primer (HEC-RAS)  
Priloga 11: Prikaz kanala z ovirami za 3. primer (HEC-RAS)  
Priloga 12: Prikaz kanala z ovirami za 4. primer (HEC-RAS)  
Priloga 13: Prikaz izolinij globin za 1. primer (MIKE 21)  
Priloga 14: Prikaz izolinij globin za 2. primer (MIKE 21)  
Priloga 15: Prikaz izolinij globin za 3. primer (MIKE 21)  
Priloga 16: Prikaz izolinij globin za 4. primer (MIKE 21)  
Priloga 17: Prikaz hitrostnega polja za 1. primer (MIKE 21)  
Priloga 18: Prikaz hitrostnega polja za 2. primer (MIKE 21)  
Priloga 19: Prikaz hitrostnega polja za 3. primer (MIKE 21)  
Priloga 20: Prikaz hitrostnega polja za 4. primer (MIKE 21)  
Priloga 21: Prikaz hitrostnega polja in globin za 1. primer (PCFLOW2D)  
Priloga 22: Prikaz hitrostnega polja in globin za 2. primer (PCFLOW2D)  
Priloga 23: Prikaz hitrostnega polja in globin za 3. primer (PCFLOW2D)  
Priloga 24: Prikaz hitrostnega polja in globin za 4. primer (PCFLOW2D)  
Priloga 25: Prikaz konfiguracije dna za 1. primer (PCFLOW2D)  
Priloga 26: Prikaz konfiguracije dna za 2. primer (PCFLOW2D)  
Priloga 27: Prikaz konfiguracije dna za 3. primer (PCFLOW2D)  
Priloga 28: Prikaz konfiguracije dna za 4. primer (PCFLOW2D)

- XII Hladnik, A. 2007. Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne.  
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer.

## 1 UVOD

Kaj je ribji prehod? To je prehod okoli ali preko ovire v rečni strugi. Oviro v rečni strugi lahko predstavlja jez ali hidroelektrarna, ki onemogoča nemoteno gorvodno in dolvodno selitev migrantov. Zasnovan mora biti tako, da omogoči ustrezne hidravlične pogoje brez stresa in poškodb migrantov (Clay, 1995).

Namen ribjih prehodov je privabiti migrante dolvodno od ovire in jih prepričati k njihovemu gorvodnemu prečkanju. Hitrost vodnega toka v prehodu se mora ujemati s plavalno sposobnostjo migrantov. Nekatere vrste so še posebej občutljive na: razliko gladin med bazeni, turbulentni tok, vrtinčasti tok in premajhno hitrost vodnega toka. Poleg teh hidravličnih faktorjev so ribe občutljive tudi na: vsebnost raztopljenega kisika, temperaturo, hrup in vonj. Posebno pozornost je potrebno nameniti jakosti svetlobe na vhodu in v samem kanalu, ker je ta precej drugačna od tiste pri oviri (Larinier in sod., 2002).

V diplomski nalogi bo v prvem delu obravnavana ribja populacija, ki bo prehod uporabljala. Na pregradi HE Blanca je predviden ribji prehod, ki naj bi ribam v času gor in dolvodne selitve po reki Savi po izgradnji jezua, omogočal nemoteno prečkanje jezovne zgradbe na poti na drst in nazaj. Med selivkami na daljše razdalje je 7 vrst: podust, mrena, klen, ogrica, jez, bolen in platnica, na krajše razdalje pa se seli vsaj 15 vrst. Selijo se tako mladostni stadiji, kot odrasle ribe. Ribji prehod naj bi bil zgrajen za 7 vrst, ki se selijo na daljše razdalje in za osebke v 1. letu spolne zrelosti. Zbrati je potrebno podatke o različnih tipih ribjih prehodov in omejitvah hitrosti v njih. Rezultati analize so dolžina osebkov, starost in naseljenost ribje populacije.

V drugem delu bo potekalo dimenzioniranje ribjega prehoda. Podrobno bosta predstavljena matematična modela za enodimenzijski (1D) in dvodimenzijski (2D) tok. Na podlagi zbranih podatkov o različnih tipih prehodov in omejitvah hitrosti v njih glede na različne ribje populacije bodo opisani biološki parametri za dimenzioniranje, ki se bodo upoštevali pri hidravličnem izračunu za 1D in 2D tok. Za hidravlični model 1D toka bo uporabljen program HEC-RAS, za 2D tok pa programa MIKE 21 in PCFLOW2D. Rezultat 2D modela je

- 2 Hladnik, A. 2007. Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne.  
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer.

hitrostno polje in potek gladine v bazenu. Prikazani bodo tudi različni tipi že zgrajenih ribjih prehodov. Sledi primerjava modelov za 1D in 2D tok ter izpolnjevanje pogojev posameznih vrst rib.

Na podlagi matematičnega modela je predvidena izdelava predlogov glede oblike in dimenzij ovir v kanalu. Sledi opis in prikaz izbranih tipov ovir.

## 2 ANALIZA RIBJE POPULACIJE

### 2.1 Vrste rib

Ribji prehod naj bi bil zgrajen za 7 vrst, ki se selijo na daljše razdalje in za osebke v 1. letu spolne zrelosti.

Selivke na daljše razdalje so: bolen, mrena, podust, klen, jez, platnica in ogrica

Selivke na krajše razdalje so: potočna postrv, lipan, ploščič, pisanka, zelenika, androga, navadni koreselj, krap, navadni globoček, rdečeoka, rdečeperka, linj, okun, navadni ostriž, smuč, sončni ostriž in šarenka

V nadaljevanju je podrobno predstavljena vsaka vrsta posebej. Opisane so samo tiste vrste, ki bodo uporabljale ribjo stezo za gorvodno in dolvodno selitev. Pri opisu sem se skliceval na podatke iz literature (Povž, 2003).

Prevladujejo reofilne ribe (potrebujejo hiter tok) in litofilne drstnice (drst na peščeni podlagi). Največ je krapovskih vrst, sledijo ji postrvi, ostriži, lipani in sončni ostriži. Za tuje vrste rib (šarenka, sončni ostriž) je značilno, da so tolerantne do sprememb v okolju in da naseljujejo tekoče in stoječe vode.

#### 1. DRUŽINA: POSTRVI - SALMONIDAE



Potočna postrv *Salmo trutta m. fario* je reofilna riba, ki za razmnoževanje zahteva čisto, s kisikom bogato vodo in prodnata tla (litofilna drstnica) z močnim pretokom. Občutljiva je na onesnaženost in degradacijo okolja. Seli se na krajše razdalje v času drsti, pogosto v pritoke, kjer so pogoji za razmnoževanje ugodnejši. V Savi je redka, njena drstišča niso znana, verjetno prihaja vanjo iz pritokov ali z vlaganjem rib. Prehranjuje se z



bentosom (globinsko favno in floro), žuželkami in nevretenčarji. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 2 - 4 leta in dolžine 25 – 40 cm. V povprečju dosega dolžino 60 cm in živi tudi do 18 let.



Šarenka *Onchorhynchus mykiss* (tuja vrsta) je reofilna in litofilna riba, ki za razmnoževanje prav tako zahteva čisto, s kisikom bogato vodo in prodnata tla. Tako, kot postrv je tudi šarenka občutljiva na onesnaženje. V času drsti se seli na krajše razdalje, pogosto v pritoke. V glavnem se prehranjuje z bentosom. Osebki so v 1. letu spolne zrelosti stari 2 – 5 let in dolžine 35 – 65 cm. V povprečju dosega dolžino 60 cm in starost 15 let.

## 2. DRUŽINA: KRAPOVCI – CYPRINIDAE



Ploščič *Abramis brama* je tipična riba evtrofnih nižinskih jezer in srednjih ter spodnjih počasi tekočih rek (indiferentna riba). Živi v jatah in je fitofilna drstnica. To pomeni, da se drsti med rastlinjem, ikre odlaga na rastline ali dele rastlin. Ta riba ima možnosti, da bo ostala in verjetno se bo njena populacija povečala, če bodo na razpolago predeli z bujno vegetacijo. Na spremembe v okolju je tolerantna. Prehranjuje se z mešanim bentosom. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 3 – 5 let in dolžine 20 – 40 cm. V povprečju dosega velikosti 30 - 50 cm in živi tudi do 17 let.



Pisanka *Alburnoides bipunctatus* je reofilna riba manjših vodotokov, tolmunov in rečnih rokavov, v glavnem toku pa je redka. Je litofilna drstnica in se seli na krajše razdalje. Pisanka ni riba velikih rek, zato po ojezeritvi nima možnosti preživetja, posebno v Savi, ker potrebuje za drst peščene plitvine. Občutljiva je na spremembe v vodnem okolju. Prehranjuje se z bentosom, žuželkami in nevretenčarji. Skupaj s klenom je najštevilčnejši predstavnik reke Save. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so starosti 2 – 3 leta in dolžine 6 – 10 cm. V povprečju dosega starost 5 – 6 let in dolžino 13 – 14 cm.



Zelenika *Alburnus alburnus* je manjša indiferentna riba jezer in srednjih tokov rek. Drsti se na peščeni podlagi (litofilna drstnica) in seli na krajše razdalje. Prehranjuje se z mešanim bentosom. Do onesnaženja in degradacije okolja je tolerantna. Dosega povprečne dolžine 12 – 15 cm, maksimalne 25 cm in živi 6 let. Osebk v 1. letu spolne zrelosti so stari 2 – 3 leta in dolžine 10 – 20 cm.



Bolen *Aspius aspius* je eden redkih ribojedih predstavnikov krapovcev in indiferentna riba srednjih tokov rek, izjemoma tudi velikih jezer. Drsti se na peščeni podlagi (litofilna drstnica) in seli na krajše razdalje. Mlade ribe žive v jatah, odrasle pa so samotarske. Po ojezeritvi bo bolen verjetno izginil, ker ne bo imel možnosti za drst in razvoj zaroda. Prehranjuje se z bentosom in ribami. Osebk v 1. letu spolne zrelosti so stari 4 – 5 let in dolžine 30 – 55 cm. Dosega povprečne dolžine 50 – 75 cm, maksimalne 120 cm ter starost 10 – 15 let.



Mrena *Barbus barbus* živi v hitro tekoči, hladni, čisti in s kisikom obogateni vodi (reofilna talna riba) srednjih rečnih tokov velikih rek. Drsti se običajno na stalnih mestih od maja do junija in se pri tem seli gorvodno. Je litofilna drstnica, ki potrebuje pretok. V reki Savi je zelo pogosta. Seli se na daljše razdalje. Če bo imela primerna drstišča bo ostala. Prehranjuje se z bentosom. Mrena dosega v povprečju dolžino 20 – 50 cm in starost 15 let. Redko pa dolžino 90 – 100 cm in starost 25 let. Osebk v 1. letu spolne zrelosti so stari 3 – 5 let in dolžine 20 – 40 cm.



Androga *Blicca bjoerkna* je indiferentna riba nižinskih jezer, ribnikov in spodnjih rečnih tokov, kjer pa ni prav pogosta. Drsti se med rastlinjem (fitofilna drstnica) in seli na krajše razdalje. Ima možnosti za obstoj, če bo na razpolago dovolj predelov z bujno vegetacijo, primernih za drst. Do onesnaženja je tolerantna. Prehranjuje se z mešanim bentosom. Osebk v 1. letu

spolne zrelosti so stari 3 – 4 leta in dolžine 15 – 25 cm. Dosega dolžino do 40 cm in starost 10 let.



Navadni koreselj *Carassius carassius* je riba stoječih in počasi tekočih voda (limnofilna riba), ki se lahko razmnožuje v mirni oz. stoječi vodi. Potreba po kisiku je manjša kot pri ostalih vrstah rib. Prenaša višje temperature in je na organsko obremenjevanje vode manj občutljiva. Je toleranten do sprememb v okolju. Za drst potrebuje rastlinje in se seli na krajše razdalje. Prehranjuje se z mešanim bentosom. V povprečju dosega velikosti 20 – 35 cm in maksimalne 50 cm ter živi tudi 10 let. Osebk v 1. letu spolne zrelosti so stari 2 leti in dolžine 25 – 40 cm.



Podust *Chondrostoma nasus* je jatna riba, ki potrebuje hitro tekočo, hladno, čisto in s kisikom obogateno vodo (reofilna riba). Živi le v srednjem toku hitro tekočih plitvejših rek. Drsti se na peščeni podlagi (litofilna drstnica). Na drst prihaja iz spodnjih in zgornjih rečnih tokov in prepotuje tudi do 100 km razdalje. Brez migracijskih možnosti ali umetnih drstišč bo izginila. Prehranjuje se z bentosom. Do sprememb v okolju je občutljiva. Osebk v 1. letu spolne zrelosti so stari 1 – 2 leti in dolžine 15 – 30 cm. Podust dosega povprečno dolžino 25 – 40 cm, maksimalno dolžino 55 – 60 cm in starost 10 – 12 let.



Krap *Cyprinus carpio* je riba stoječih in počasi tekočih voda (limnofilna riba) zelo zaraščenih ribnikov in spodnjih rečnih tokov s počasnim tokom. Drsti se med rastlinjem (fitofilna drstnica) in se seli na krajše razdalje. Populacija se bo povečala, če bo imel možnosti za drst na zaraščenih plitvinah. Do onesnaženja iz okolja je toleranten. Prehranjuje se z mešanim bentosom. Je edini tuji predstavnik, ki ga ribiči vlagajo za namene športnega ribolova. Osebk v 1. letu spolne zrelosti so stari 1 – 3 leta in dolžine 30 – 50 cm. Dosega velikosti tudi do 120 cm in starost 20 let.



Navadni globoček *Gobio gobio* naseljuje hitro tekoče hladne vode (reofilna riba) srednjih tokov rek, prodnatih brežin, obrežnih pasov ter čistih in s kisikom obogatenih jezer. Drsti se na peščeni podlagi in seli na krajše razdalje.

Verjetno bo v reki Savi še prisoten, če bo imel možnosti za drst in če bo kvaliteta vode ustrezna. Je pa že sedaj redek. Na onesnaženje iz okolja je občutljiv. Prehranjuje se z bentosom. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 3 leta in dolžine 10 – 15 cm. Dosega velikosti do 20 cm in starost 8 let.



Klen *Leuciscus cephalus* je sicer indiferentna riba, ki pa za razmnoževanje potrebuje pretočni režim. Odrasle ribe živijo tudi v hladnejših jezerih. Drsti se med rastlinjem (fitofilna drstnica) in seli na krajše razdalje. Ob možnosti drsti v pritokih bo klen v reki Savi ostal. Prehranjuje se z

mešanim bentosom. Klen dosega povprečno dolžino 20 – 40 cm, maksimalno 60 cm in starost 15 let. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 3 – 7 let in dolžine 15 – 30 cm.



Jez *Leuciscus idus* naseljuje hitro tekoče, hladne vode (reofilna riba) srednje globokih predelov, poraslih z rastlinjem, zahaja pa tudi v velika jezera. Drsti se na peščeni podlagi in med rastlinjem (lito - fitofilna drstnica).

V času drsti se seli po toku navzgor na pretočne peščene plitvine in vodno rastlinje. Poleti se seli na pasišča v poplavne predele, jeseni pa na zimovanje po toku navzdol v globlje predele rek, rokave ali jezera. V času selitve od marca do maja živi v jatah, na pasiščih pa posamezno. Seli se na daljše razdalje. Obstoj jeza je odvisen od možnosti migracije na drstišča in na pasišča. Prehranjuje se z mešanim bentosom. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 5 – 9 let in dolžine 25 – 45 cm. Jez dosega velikosti do 75 cm in starost 18 let.



Platnica *Rutilus pigus* naseljuje hitro tekoče, hladne vode (reofilna riba) glavnih tokov večjih, vodnatih rek. V času drsti zahaja v pritoke in rečne rokave, porasle z rastlinjem. Drsti se na peščeni podlagi in med rastlinjem (lito- fitofilna drstnica). Seli se na krajše razdalje. Ker je rečna riba, v novih pogojih ne bo ostala, če bo imela možnosti za drst v pritokih. Prehranjuje se z bentosom. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 3 – 4 leta in dolžine 15 – 30 cm. V Savi se pojavlja do starosti 13 let in dolžine 47 cm. Maksimalna starost, ki jo ta vrsta lahko dosega je 15 let.



Rdečeoka *Rutilus rutilus* je indiferentna riba, ki živi tako v jezerih kot v rekah, kjer se lahko tudi razmnožuje. V evtrofnih jezerih je pogosta ali celo prevladujoča vrsta. Drsti se med rastlinjem (fitofilna drstnica) in seli na krajše razdalje. Prehranjuje se z mešanim bentosom. Na spremembe v okolju je tolerantna. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 2 – 3 leta in dolžine 15 – 30 cm. Rdečeoka dosega povprečno dolžino 20 – 35 cm, maksimalno 45 cm in živi do 18 let.



Rdečeperka *Scardinius erythrophthalmus* naseljuje stoječe in počasi tekoče vode (limnofilna riba). Drsti se med rastlinjem (fitofilna drstnica) in seli na krajše razdalje. Živi v jatah. Njena populacija se bo povečala, če bo na razpolago dovolj z rastlinjem poraslih področij. Prehranjuje se z mešanim bentosom. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 3 – 4 leta in dolžine 20 – 35 cm. Rdečeperka doseže velikosti do 51 cm in starost 19 let.



Linj *Tinca tinca* naseljuje stoječe in počasi tekoče vode (limnofilna riba) porasle z rastlinjem. Drsti se med rastlinjem (fitofilna drstnica) in seli na krajše razdalje. Populacija se bo povečala, če bo imela z rastlinjem porasle

predele in če se kakovost vode ne bo poslabšala. Prehranjuje se z mešanim bentosom. Na spremembe v okolju je občutljiv. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 2 leti in dolžine 25 – 40 cm. Linj doseže velikosti do 70 cm.



Ogrica *Vimba vimba* je oligoreofilna riba srednje tekočih rek in rokavov. V času drsti se seli na zelo dolge razdalje (tudi do 560 km). Za drst med rastlinjem (fitofilna drstnica) potrebuje pretok. Nima pogojev za preživetje, ker bodo njene migracijske poti prekinjene. Drstila bi se lahko le v pritokih, v Savi ustreznih mest skoraj zagotovo ne bo. Prehranjuje se z bentosom. Osebki v 1.

letu spolne zrelosti so stari 3 – 4 leta in dolžine 20 – 40 cm. Ogrica dosega velikosti do 50 cm.

### 3. DRUŽINA: OSTRIŽI – PERCIDAE



Navadni ostriž *Perca fluviatilis* je indiferentna riba ribnikov, evtrofnih jezer ter srednjih in spodnjih tokov počasi tekočih rek. V dolgih sluzastih tokovih odlaga ikre na vodno rastlinje, ostanke vejic ali na drugo podlago, lahko tudi med kamenje (fitofilna drstnica). Seli se na

krajše razdalje. Ni zastopan v velikem številu, vendar se bo njegova populacija verjetno povečevala. Prehranjuje se z bentosom. Na onesnaženje iz okolja je toleranten. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 2 – 3 leta in dolžine 15 – 30 cm. Navadni ostriž dosega velikosti do 50 cm in starost 22 let.



Smuč *Sander lucioperca* je tudi indiferentna riba večjih jezer, kanalov in počasi tekočih rek. Samec pripravi gnezdo in varuje ikre. Drsti se med rastlinjem (fitofilna drstnica) in seli na krajše razdalje. Ker se da smučeva gnezda nastaviti v vodo, ima možnosti za obstanek. Prehranjuje se z

bentosom in ribami. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 3 – 5 let in dolžine 35 – 65 cm. Smuč dosega dolžine do 130 cm in starost 16 let.

#### 4. DRUŽINA: LIPANI – THYMALLIDAE

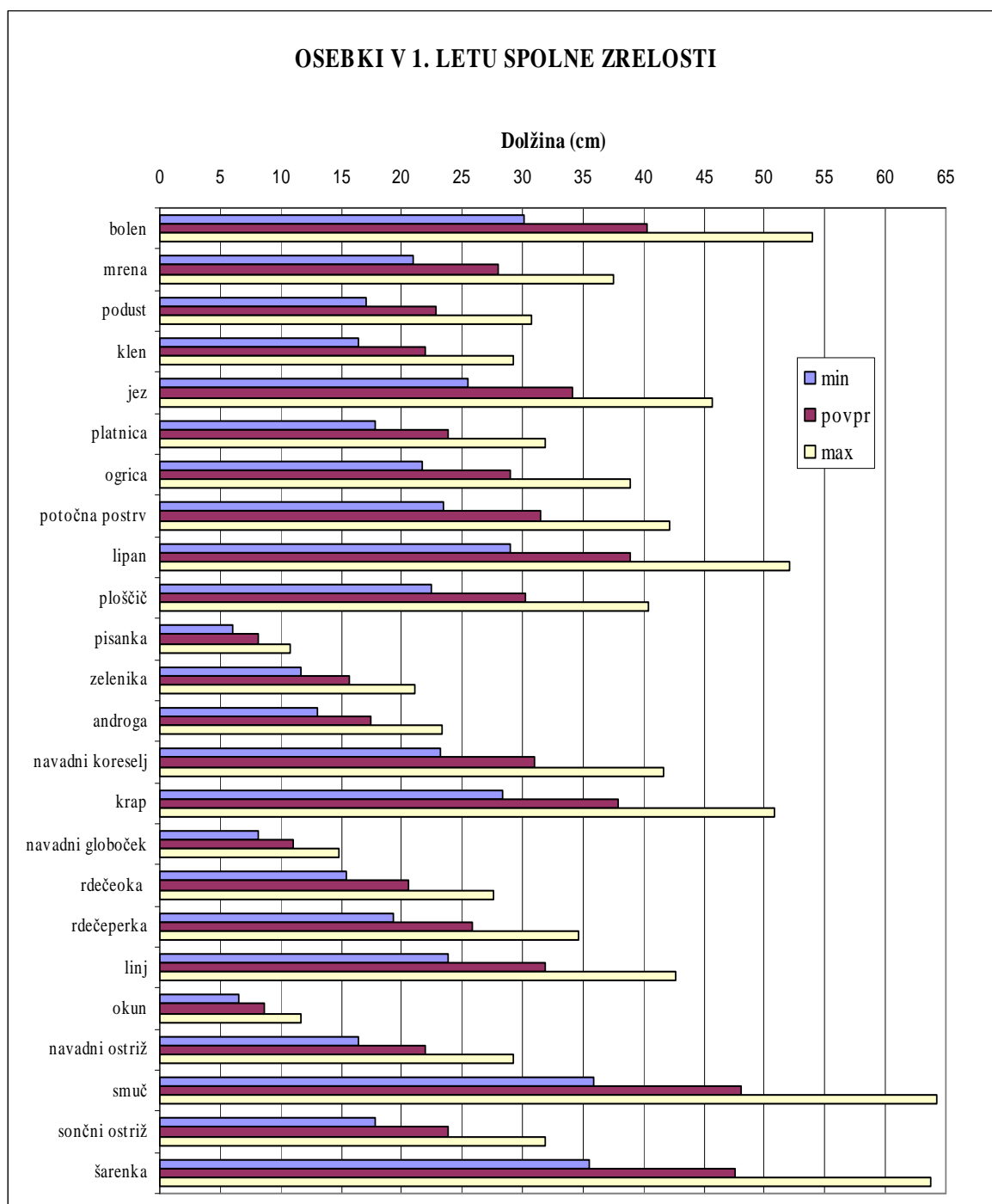


Lipan *Thymallus thymallus* naseljuje hitro tekoče, hladne vode z visoko vsebnostjo kisika (reofilna riba). Drsti se na peščeni podlagi (litofilna drstnica) in seli na krajše razdalje. Prehranjuje se z bentosom, žuželkami in nevretenčarji. Na onesnaženje je občutljiva. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 2 – 6 let in dolžine 30 – 50 cm. Lipan dosega dolžine do 60 cm in starost 14 let.

#### 5. DRUŽINA: SONČNI OSTRIZI – CENTRARCHIDAE



Sončni ostriž *Lepomis gibbosus* (tuja vrsta) naseljuje praktično vse vode Slovenije od stoječih do tekočih. Po zaježitvi lahko pričakujemo povečanje populacije, saj bodo novi pogoji ugodnejši od sedanjih. Prehranjuje se z bentosom, žuželkami, nevretenčarji, ribami in raki. Osebki v 1. letu spolne zrelosti so stari 2 leti in dolžine 20 – 30 cm. Sončni ostriž dosega dolžine do 40 cm in starost 10 let.



Grafikon 1: Dolžine osebkov v 1. letu spolne zrelosti

Grafikon 1 prikazuje minimalno, povprečno in maksimalno dolžino osebkov v 1. letu spolne zrelosti. Med daljše spadata smuč in šarenka. Njuna povprečna velikost znaša 48 cm. Sledijo jima bolen, lipan in krap s 40 cm povprečne dolžine. Med krajše osebke pa spadajo pisanka in



okun z 9 cm, navadni globoček z 11 cm, zelenika s 16 cm in androga z 18 cm povprečne dolžine.

## 2.2 Naseljenost

V preglednici 1 je prikazana naseljenost posamezne vrste rib. Naseljenost je bila merjena na prodiščih, obrežjih, sredini struge in izlivih. Razdeljena je v pet razredov: izjemno visoka (>20.000 rib/ha), zelo visoka (>4.200 rib/ha), visoka (2.100 – 4.200 rib/ha), zmerna (1.200 – 2.100 rib/ha), nizka (350 – 1.200 rib/ha) in zelo nizka (<350 rib/ha) (Šumer in Povž, 2004).

Preglednica 1: Naseljenost posameznih vrst rib v reki Savi od HE Vrhovo do tovarne Vipap

VRSTA RIBE	Naseljenost			
	Prodišča	Obrežje	Sredina	Izlivi
<b>SALMONIDE - POSTRVI</b>				
Salmo trutta fario - potočna postrv			Zelo nizka	Zelo nizka
Oncorhynchus mykiss - šarenka				Zelo nizka
<b>THYMALLIDAE - LIPANI</b>				
Thymallus thymallus - lipan				Zelo nizka
<b>CYPRINIDAE - KRAPOVCI</b>				
Abramis brama - ploščič	Zelo nizka	Zelo nizka	Zelo nizka	
Alburnoides bipunctatus - pisanka	Izjemno visoka	Zelo visoka	Zelo visoka	Izjemno visoka
Alburnus alburnus - zelenika	Nizka	Zelo nizka	Nizka	Zelo nizka
Aspius aspius - bolen			Zelo nizka	
Barbus barbus - mrena	Nizka	Nizka	Zmerna	Visoka
Carassius carassius - navadni koreselj	Zelo visoka	Zelo nizka		
Chondrostoma nasus - podust	Zelo visoka	Zmerna	Zmerna	Zmerna

VRSTA RIBE	Naseljenost			
	Prodišča	Obrežje	Sredina	Izlivi
Cyprinus carpio - krap	Zmerna	Zelo nizka	Zelo nizka	
Gobio gobio - navadni globoček	Izjemno visoka	Visoka	Nizka	Zelo visoka
Leuciscus cephalus - klen	Izjemno visoka	Visoka	Nizka	Zelo visoka
Rutilus pigus - platnica	Zelo visoka	Zelo nizka	Nizka	Visoka
Rutilus rutilus - rdečeoka (črnovka)	Zelo nizka	Zelo nizka	Zelo nizka	
Vimba vimba - ogrica	Nizka		Zelo nizka	
<b>PERCIDAE - OSTRIZI</b>				
Perca fluviatilis - navadni ostriž	Zelo nizka			
<b>CENTRICHIDAE - SONČNI OSTRIZI</b>				
Lepomis gibbosus - sončni ostriž	Zelo nizka	Zelo nizka	Zelo nizka	

Izjemno visoko naseljenost na prodiščih so dosegali pisanka, navadni globoček in klen, zelo visoko pa navadni koreselj, podust in platnica. Vsi ti so predstavniki družine krapovcev. Na obrežjih je bila zelo visoka naseljenost pri pisanki, na sredini struge pri pisanki ter na izlivih pri navadnem globočku in klenu. Pisanka ima na vseh štirih območjih zelo visoko gostoto naseljenosti. Zelo nizko gostoto naseljenosti pa imajo družine postrvi, lipanov, ostrižev in navadnih ostrižev ter ploščič, zelenika, bolen, rdečeoka in ogrica, ki so predstavniki družine krapovcev.

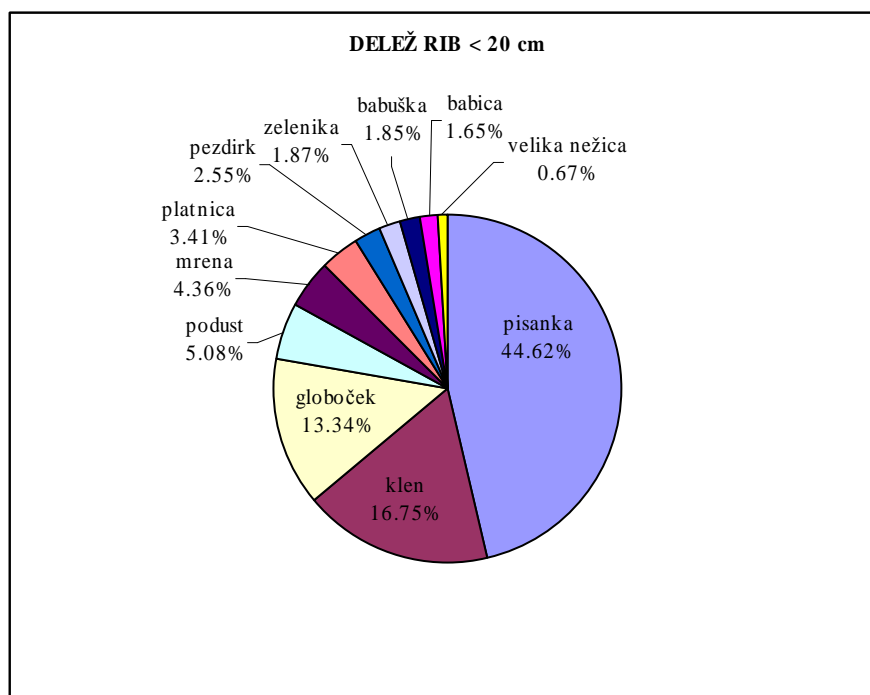
V preglednici 2 je prikazana naseljenost rib dolžin do 20 cm in nad 20 cm na posameznih tipih bivališč za celotno območje. Prevladujejo ribe dolžine do 20 cm. Izjemno visoka naseljenost je bila na prodiščih in izlivnih območjih z velikostjo rib do 20 cm. Gostota rib v obrežnem pasu in v osrednjem delu struge pa je bila približno enaka.

Preglednica 2: Naseljenost rib v reki Savi od HE Vrhovo do tovarne Vipap

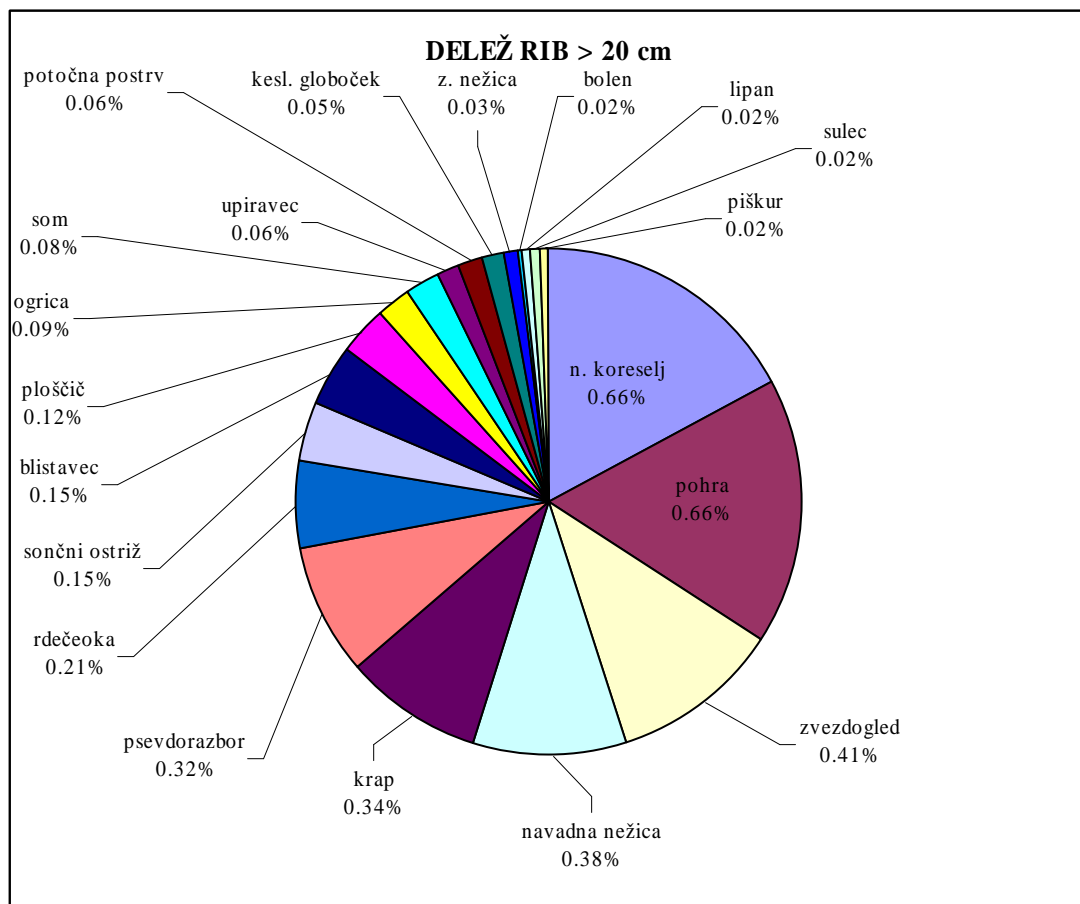
<b>SKUPNO HE Vrhovo - tovarna Vipap</b>	Naseljenost
Ribe < 20 cm	Izjemno visoka
Ribe > 20 cm	Nizka
<b>Prodišča</b>	
Ribe < 20 cm	Izjemno visoka
Ribe > 20 cm	Zelo nizka
<b>Obrežni pas</b>	
Ribe < 20 cm	Zelo visoka
Ribe > 20 cm	Nizka
<b>Osrednji del struge</b>	
Ribe < 20 cm	Zelo visoka
Ribe > 20 cm	Nizka
<b>Izlivna območja</b>	
Ribe < 20 cm	Izjemno visoka
Ribe > 20 cm	Zelo nizka

### 2.3 Delež rib v izlovih

Na celotnem območju od HE Vrhovo do tovarne Vipap je bilo 93 % rib <20 cm. Najbolj množični predstavniki so bili pisanka (45 %), klen (17 %), globoček (13 %), podust (5 %), mrena (4 %) in platnica (3 %) (Šumer in Povž, 2004). Deleži rib v izlovih so prikazani na grafikonih 2 in 3.

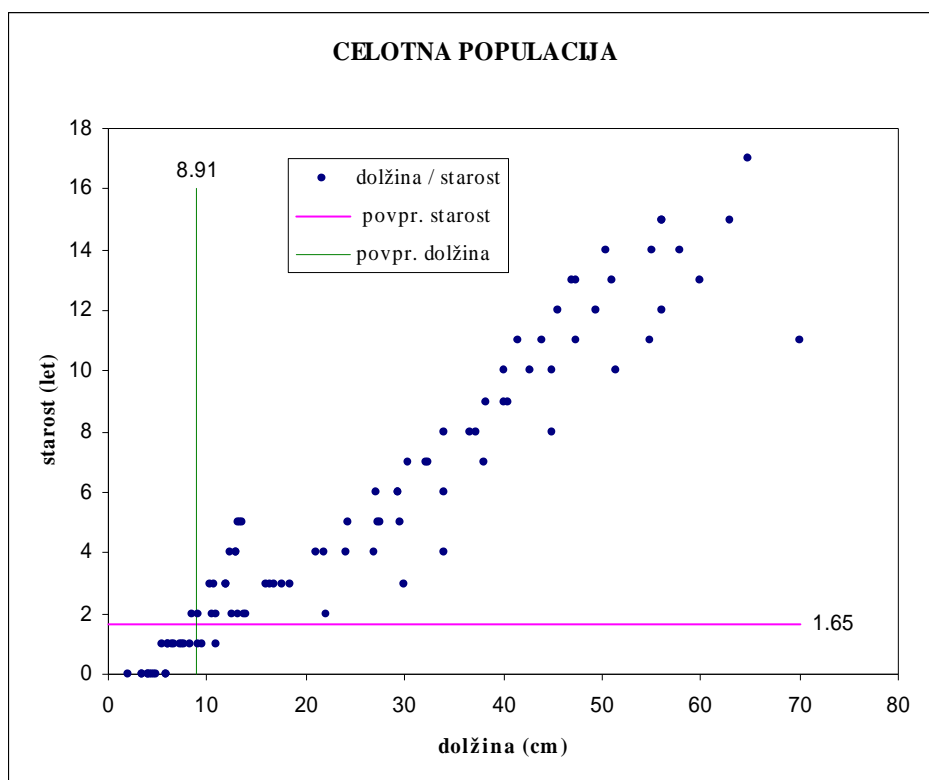


Grafikon 2: Delež rib <20 cm za celotno območje (vir: Šumer, S., Povž M. 2004. Ihtiološke raziskave Save od HE Vrhovo do JE Krško. Ljubljana, Zavod za ribištvo Slovenije: str. 23)



Grafikon 3: Delež rib >20 cm za celotno območje (vir: Šumer, S., Povž M. 2004. Ihtiološke raziskave Save od HE Vrhovo do JE Krško. Ljubljana, Zavod za ribištvo Slovenije: str. 23)

Grafikon 4 prikazuje porazdelitev dolžine in starosti celotne populacije na 32 km dolgem odseku od HE Vrhovo do tovarne Vipap. Prevladujejo mladostni stadiji. Povprečna dolžina rib znaša 9 cm in starost od leta in pol do dve leti. Iz opisanega se da sklepati, da bodo ribji prehod v povprečju uporabljale mlade ribe.



Grafikon 4: Prikaz povprečne starosti in dolžine za celotno populacijo

### 3 DIMENZIONIRANJE RIBJEGA PREHODA

Ribji prehodi ribam omogočajo premagovanje neprehodne ovire (v mojem primeru visoke pregrade). Oblika in velikost prehoda je odvisna od ribjih vrst, ki ga uporabljajo, od razpoložljivega prostora in od hidroloških in geoloških pogojev okolja. Po prehodih potujejo ribe različnih starosti in velikosti. Ribe, ki ribji prehod uporabljajo za gorvodno in dolvodno migracijo, so razdeljene na selivke na daljše razdalje in osebke v 1. letu spolne zrelosti. V nadaljevanju je podrobno opisana hitrost plavanja in vzdržljivost, maksimalna dosežena razdalja ter dolžina in višina skoka migrantov iz vode.

#### 3.1 Biološki kriteriji za dimenzioniranje

##### 3.1.1 *Hitrost plavanja in vzdržljivost*

Eden najpomembnejši kriterijev pri dimenzioniranju ribjih prehodov je plavalna sposobnost migrantov, ki je odvisna od hitrosti plavanja in vzdržljivosti (čas za vzdrževanje določene hitrosti plavanja).

Pri sladkovodnih ribah ločimo 3 hitrosti plavanja: normalno hitrost, pospešeno hitrost in maksimalno hitrost plavanja. Normalna hitrost plavanja je hitrost pri dolgotrajnem, do 24 ur trajajočem plavanju brez utrujanja. Pospešena hitrost plavanja je večja od normalne, to hitrost ribe dosežejo pri povečanih pretokih in v iskanju ugodnejših pretokov. Traja lahko le nekaj minut, preden se riba utruje. Maksimalna hitrost plavanja pa je pri kratkotrajnem sunkovitem plavanju, običajno pri plavanju za plenom ali v begu pred plenilcem (Povž, 2004).

Ribe lahko prečkajo prehode samo ob ustreznih pretokih, ki ne smejo biti močnejši od njihovih plavalnih sposobnosti oziroma morajo biti manjši kot je njihova sposobnost za normalno vzdrževano plavanje. Podatkov o pretokih, ki ustrezajo posameznim vrstam rib, ni. Plavalne sposobnosti rib so različne od vrste do vrste in odvisne od mišičnega tkiva, števila udarcev z repom ter od temperature vode (Povž, 2004).

Normalna hitrost plavanja je izražena z dolžino ribjega telesa na sekundo. V ribjih prehodih morajo biti pretoki taki, da ribe lahko plavajo z normalno hitrostjo, torej mora biti hitrost vodnega toka manjša od normalne hitrosti plavanja ribe. V primeru obhodnega kanala pa naj bi bili pretoki podobni tistim v strugi (Povž, 2004). V grobem lahko rečemo, da je hitrost plavanja premo sorazmerna z dolžino ribjega telesa.

Pospešena hitrost je odvisna od velikosti ribe. Po Videlerju (Larinier in sod., 2002) se jo izračuna po dveh enačbah:

$$v_{pos} = 0,15 + 2,4 \cdot L \text{ ali} \quad (1)$$

$$v_{pos} = 2,3 \cdot L^{0,8} \quad (2)$$

Pomen oznak:

$v_{pos}$  ... pospešena hitrost plavanja

$L$  ... dolžina ribjega telesa

Maksimalna hitrost plavanja je odvisna od temperature in dolžine ribjega telesa. Po Videlerju se jo izračuna po enačbi:

$$v_{max} = 0,4 + 7,4 \cdot L \quad (3)$$

Pomen oznak:

$v_{max}$  ... maksimalna hitrost plavanja

$L$  ... dolžina ribjega telesa

Po Beachu (Larinier in sod., 2002) pa se jo odčita iz diagramov glede na dolžino ribe in temperaturo vode. Maksimalna hitrost plavanja je določena pri temperaturi vode 15 °C.

Vse tri enačbe (1), (2) in (3) so določene eksperimentalno.

Vzdržljivost je odvisna od shranjenih rezerv glikogena v mišičnem tkivu, ki se pri prekoračenju normalne hitrosti plavanja sprostijo. Pove, koliko časa lahko riba plava s



pospešeno hitrostjo. Odvisna je tudi od dolžine ribjega telesa, od razmerja med dolžino in težo ribe, od mišične mase in od temperature vode (Larinier in sod., 2002). Po Beachu se jo odčita iz diagramov, kjer je podana v odvisnosti od dolžine ribjega telesa in temperature vode. Vzdržljivost je določena pri temperaturi vode 15 °C.

Preglednica 3: Hitrosti plavanja in vzdržljivost selivk na daljše razdalje

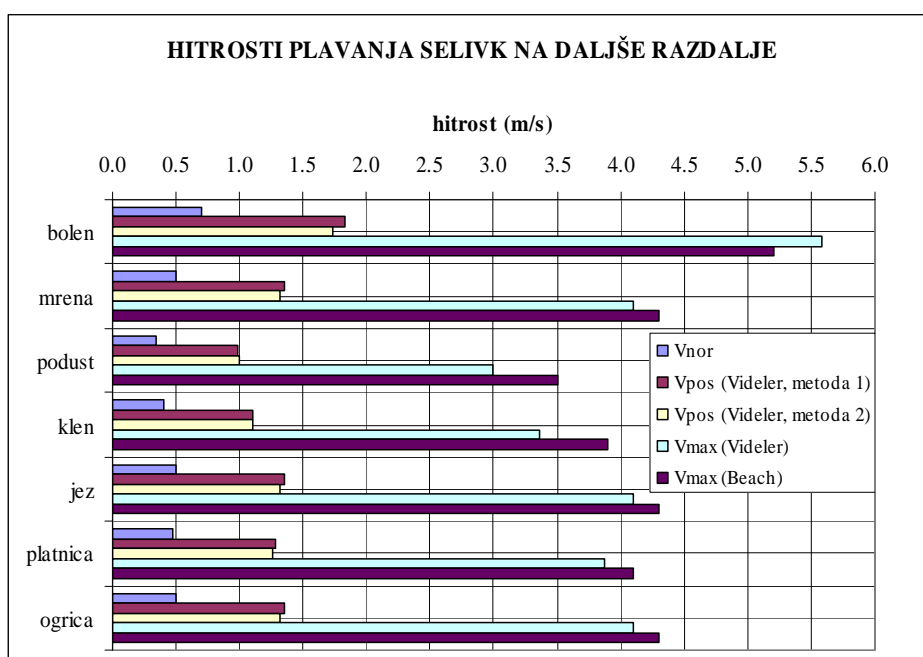
			Videler			Beach	
			Metoda 1	Metoda 2			
Vrsta ribe	Dolžina	Norm. hitrost plavanja	Posp. hitrost plavanja		Maksimalna hitrost plavanja		Vzdržljivost
	$L$	$v_{nor}$	$v_{pos}$		$v_{max}$	$v_{max}$ ( $T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	$t$
	(cm)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(s)
Bolen	70	0,7	1,83	1,73	5,58	5,20	85
Mrena	50	0,5	1,35	1,32	4,10	4,30	35
Podust	35	0,4	0,99	0,99	2,99	3,50	15
Klen	40	0,4	1,11	1,11	3,36	3,90	20
Jez	50	0,5	1,35	1,32	4,10	4,30	35
Platnica	47	0,5	1,28	1,26	3,88	4,10	35
Ogrica	50	0,5	1,35	1,32	4,10	4,30	35

Preglednica 4: Hitrosti plavanja in vzdržljivost osebkov v 1. letu spolne zrelosti

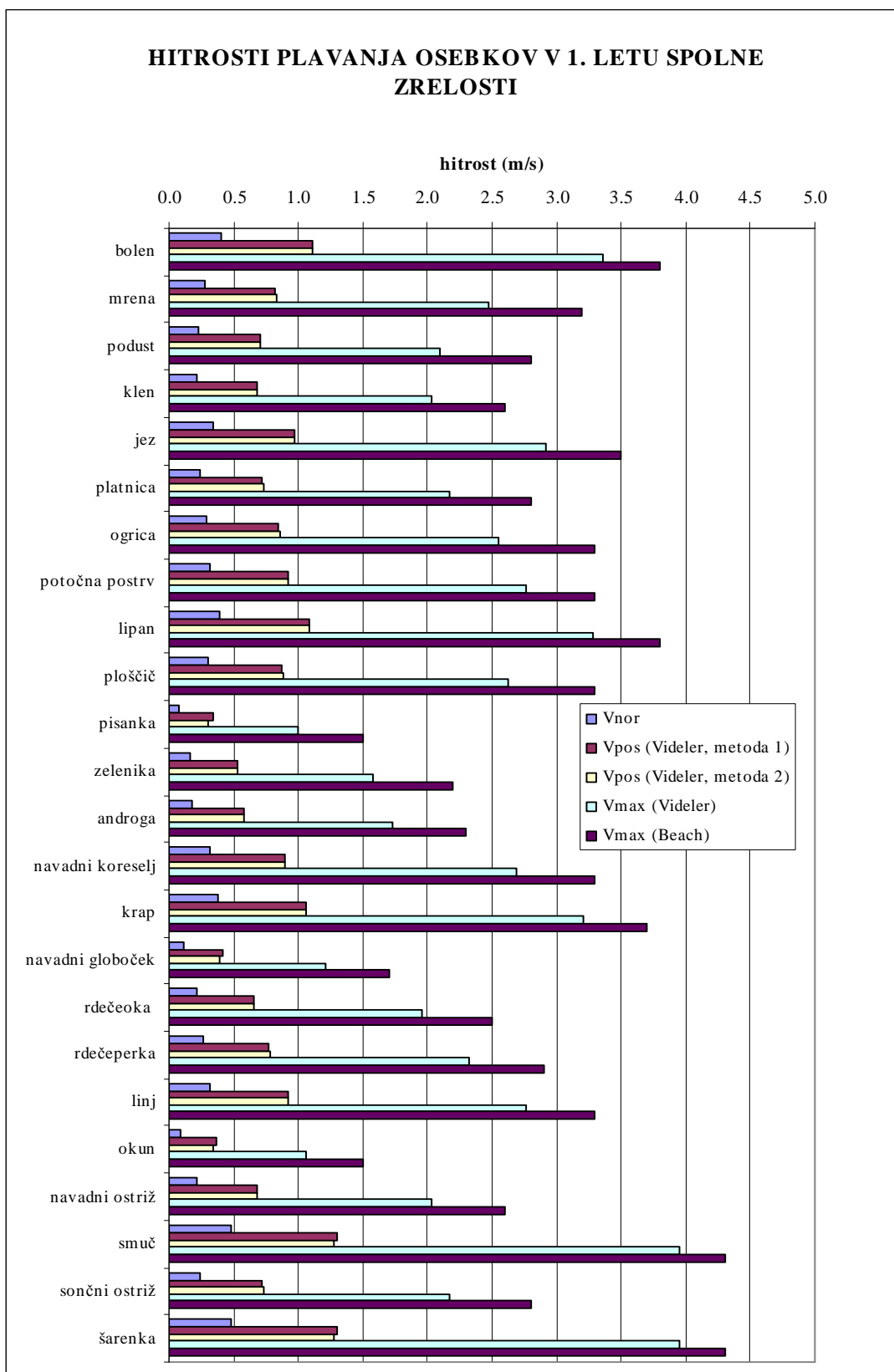
Vrsta ribe	Dolžina	Norm. hitrost plavanja	Videler		Beach		
			Metoda 1	Metoda 2	Maksimalna hitrost plavanja		Vzdržljivost
			$L$	$v_{norm}$	$v_{pos}$		$v_{max}$
(cm)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(s)	
Bolen	40	0,4	1,11	1,11	3,36	3,80	11
Mrena	28	0,3	0,82	0,83	2,47	3,20	9
Podust	23	0,2	0,70	0,71	2,10	2,80	5
Klen	22	0,2	0,68	0,68	2,03	2,60	3
Jez	34	0,3	0,97	0,97	2,92	3,50	10
Platnica	24	0,2	0,73	0,73	2,18	2,80	5
Ogrica	29	0,3	0,85	0,85	2,55	3,30	9
Potočna postrv	32	0,3	0,92	0,92	2,77	3,30	9
Lipan	39	0,4	1,09	1,08	3,29	3,80	11
Ploščič	30	0,3	0,87	0,88	2,62	3,30	9
Pisanka	8	0,1	0,34	0,30	0,99	1,50	1
Zelenika	16	0,2	0,53	0,53	1,58	2,20	2
Androga	18	0,2	0,58	0,58	1,73	2,30	3
Navadni koreselj	31	0,3	0,89	0,90	2,69	3,30	9
Krap	38	0,4	1,06	1,06	3,21	3,70	11
Navadni globoček	11	0,1	0,41	0,39	1,21	1,70	1
Rdečeoka	21	0,2	0,65	0,66	1,95	2,50	3
Rdečeperka	26	0,3	0,77	0,78	2,32	2,90	6
Linj	32	0,3	0,92	0,92	2,77	3,30	10

Vrsta ribe	Dolžina	Norm. hitrost plavanja	Videler		Beach		
			Metoda 1	Metoda 2	Maksimalna hitrost plavanja		Vzdržljivost
			Posp. hitrost plavanja		$v_{max}$	$v_{max}$ ( $T=15^{\circ}\text{C}$ )	
$L$	$v_{norm}$	$v_{pos}$		$v_{max}$	$v_{max}$ ( $T=15^{\circ}\text{C}$ )	$t$	
	(cm)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(s)
Okun	9	0,1	0,37	0,34	1,07	1,50	1
Navadni ostriž	22	0,2	0,68	0,68	2,03	2,60	4
Smuč	48	0,5	1,30	1,28	3,95	4,30	13
Sončni ostriž	24	0,2	0,73	0,73	2,18	2,80	6
Šarenka	48	0,5	1,30	1,28	3,95	4,30	12

Za boljši pregled rezultatov so hitrosti plavanja podane na grafikonih 5 in 6.



Grafikon 5: Hitrosti plavanja selivk na daljše razdalje



Grafikon 6: Hitrosti plavanja osebkov v 1. letu spolne zrelosti

Na grafikonih 5 in 6 so prikazane hitrosti plavanja za 7 ribjih vrst, ki se selijo na daljše razdalje in za osebkke v 1. letu spolne zrelosti. V ribjih prehodih morajo biti pretoki taki, da ribe lahko plavajo z normalno hitrostjo. Hitrost vodnega toka naj bo manjša od normalne hitrosti plavanja ribe. Normalna hitrost plavanja je najmanjša pri pisanki in navadnem globočku v 1. letu spolne zrelosti, zato hitrost vodnega toka ne sme biti večja od 10 cm/s. Pri taki hitrosti vodnega toka bodo ribe uspešno uporabljale ribji prehod za gorvodno in dolvodno migracijo. Pospešena hitrost, ki je izračunana po enačbah (1) in (2), je na preglednicah 3 in 4 ter grafikonih 5 in 6 označena z metodo 1 in metodo 2. Izračunane vrednosti se med eno in drugo metodo zelo malo razlikujejo. Maksimalne hitrosti plavanja pa so izračunane po Videlerju in Beachu. Vendar tudi tu odstopanje ni veliko. V povprečju znaša 0,5 m/s.

### 3.1.2 Maksimalna dosežena razdalja

Maksimalna razdalja, ki jo migranti lahko dosežejo, je po Beachu določena z enačbo:

$$D = (v - u) \cdot t \quad (4)$$

Pomen oznak:

$D$  ... maksimalna dosežena razdalja

$v$  ... pospešena hitrost plavanja

$u$  ... hitrost vodnega toka

$t$  ... vzdržljivost

Hitrost vodnega toka ne sme biti večja od 0,1 m/s (10 cm/s).

Preglednica 5: Največja dosežena razdalja

Selivke na daljše razdalje	
Vrsta ribe	$D$
	(m)
Bolen	147,05
Mrena	43,75

Osebkki v 1. letu spolne zrelosti	
Vrsta ribe	$D$
	(m)
Bolen	20,20
Mrena	6,50

Selivke na daljše razdalje	
Vrsta ribe	<i>D</i>
	(m)
Podust	13,35
Klen	20,20
Jez	43,75
Platnica	41,23
Ogrica	43,75

Osebk v 1. letu spolne zrelosti	
Vrsta ribe	<i>D</i>
	(m)
Podust	3,01
Klen	1,73
Jez	12,99
Platnica	3,13
Ogrica	6,71
Potočna postrv	7,36
Lipan	19,72
Ploščič	6,93
Pisanka	0,24
Zelenika	0,87
Androga	1,45
Navadni koreselj	7,15
Krap	19,24
Navadni globoček	0,31
Rdečeoka	1,66
Rdečeperka	4,04
Linj	8,18
Okun	0,27
Navadni ostriž	2,31
Smuč	42,07
Sončni ostriž	3,76
Šarenka	42,07

Med selivkami na daljše razdalje je bolen s 147 m daleč pred vsemi, sledijo ji mrena, jez in ogrica s 44 m prepotovane razdalje. Med osebk v 1. letu spolne zrelosti pa je največja prepotovana razdalja pri smuču in šarenki, 42 m, sledijo jima bolen, lipan in krap z 20 m.

### 3.1.3 Dolžina in višina skoka

Karakteristiki skoka se računata po naslednjih dveh enačbah:

$$X_{\max} = \frac{(v_0 \cdot \cos(\alpha))^2}{2 \cdot g} \quad (5)$$

$$Y_{\max} = \frac{v_0^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}{g} \quad (6)$$

Pomen oznak:

$X_{\max}$  ... dolžina skoka

$Y_{\max}$  ... višina skoka

$v_0$  ... začetna hitrost

$\alpha$  ... naklon tangente tirnice glede na horizontalno ravnino

$g$  ... težnostni pospešek

Med selivkami na daljše razdalje ima bolen najvišji skok iz vode. Njegova višina znaša 115 cm. Sledijo ji jez z 31 cm ter mrena in ogrica s 23 cm. Med osebki v 1. letu spolne zrelosti sta na prvem mestu po višini skoka smuč in šarenka s 57 cm sledijo jima bolen, lipan in krap s 40 cm.

Preglednica 6: Karakteristike skoka

Selivke na daljše razdalje		
Vrsta ribe	$X_{max}$	$Y_{max}$
	(cm)	(cm)
Bolen	46,94	114,72
Mrena	24,85	21,49
Podust	17,70	15,31
Klen	16,42	14,20
Jez	35,02	30,29
Platnica	19,03	16,46
Ogrica	26,42	22,86

Osebk v 1. letu spolne zrelosti		
Vrsta ribe	$X_{max}$	$Y_{max}$
	(cm)	(cm)
Bolen	46,94	40,60
Mrena	24,85	21,49
Podust	17,70	15,31
Klen	16,42	14,20
Jez	35,02	30,29
Platnica	19,03	16,46
Ogrica	26,42	22,86
Potočna postrv	31,44	27,19
Lipan	44,83	38,78
Ploščič	28,05	24,26
Pisanka	3,51	3,04
Zelenika	9,73	8,41
Androga	11,76	10,18
Navadni koreselj	29,72	25,71
Krap	42,77	37,00
Navadni globoček	5,48	4,74
Rdečeoka	15,18	13,13
Rdečeperka	21,85	18,90
Linj	31,44	27,19
Okun	4,12	3,56
Navadni ostrž	16,42	14,20
Smuč	65,53	56,69
Sončni ostrž	19,03	16,46
Šarenka	65,53	56,69



### 3.2 Primeri različnih tipov ribjih prehodov

V nadaljevanju so prikazani primeri uporabe različnih tipov naravnih ribjih prehodov v Nemčiji, Avstriji, Švici in Franciji. Za vsak primer posebej so podane osnovne karakteristike (naklon, pretok, višinska razlika,...).

#### 3.2.1 Sinn (Nemčija)



Slika 1: Kanal z bazeni

Preglednica 7: Kanal z bazeni

Reka	Dill
Tip	Kanal z bazeni
Naklon	1:20
Višinska razlika	2,80 m
Širina	3,5 m
Pretok	0,35 m <sup>3</sup> /s

#### 3.2.2 Unzmakt (Avstrija)

Preglednica 8: Bazeni s kaskadami



Slika 2: Bazeni s kaskadami

Reka	Mur
Tip	Bazeni s kaskadami
Naklon	1:24
Višinska razlika med bazenoma	0,10-0,40 m
Širina	4,6 m
Dolžina	198 m
Pretok	0,2 m <sup>3</sup> /s

### 3.2.3 Ruppoldingen (Švica)



Slika 3: Mešani tip prehoda

Preglednica 9: Mešani tip prehoda

Reka	Aare
Tip	Mešani tip prehoda
Naklon	1:333
Višinska razlika	6,5 m
Širina	9,1-18,3 m
Dolžina	1207 m
Pretok	5 m <sup>3</sup> /s

### 3.2.4 St. Laurent des Eaux (Francija)



Slika 4: Kamnita drča s kaskadami

Preglednica 10: Kamnita drča s kaskadami

Reka	Loire
Tip	Kamnita drča s kaskadami
Naklon	1:50
Višinska razlika	6,5 m
Širina	16,9
Dolžina	80,4 m
Pretok	1,8-2,4 m <sup>3</sup> /s

## 4 MATEMATIČNO MODELIRANJE TOKA V RIBJEM PREHODU

### 4.1 Opis matematičnih modelov HEC-RAS, MIKE 21 in PCFLOW2D

#### 4.1.1 HEC-RAS

Za izdelavo enodimenzijskega matematičnega modela je bil uporabljen računalniški program HEC-RAS River Analysis System verzije 3.1.3, ki so ga razvili pri U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (Brunner, 2002). Program je brezplačen in dostopen na spletni strani [www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil). Program HEC-RAS omogoča enodimenzijski hidravlični račun stalnega neenakomernega in nestalnega toka.

##### 4.1.1.1 Osnovne enačbe

Program HEC-RAS je narejen za enodimenzijski hidravlični račun vodotokov.

Energijska enačba za enodimenzijski tok:

$$Z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + h_e = E \quad (7)$$

Pomen oznak:

$Z$  ... višina od dna kanala do primerjalne ravnine

$p$  ... tlak

$\rho$  ... gostota vode

$g$  ... gravitacijski pospešek

$v$  ... hitrost v vzdolžni smeri

$h_e$  ... energijske izgube

$E$  ... energijska višina

Manningova enačba:

$$I = \frac{Q^2 \cdot n^2}{S^2 \cdot R^{4/3}} \quad (8)$$

Pomen oznak:

$I$  ... naklon energijske črte

$R$  ... hidravlični radij

$S$  ... prečni presek

$Q$  ... pretok

$n$  ... Manningov koeficient hrapavosti

Gladine vode v profilih so izračunane z iteracijskim reševanjem energijske enačbe:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} + h_e \quad (9)$$

Pomen oznak:

$Y_1, Y_2$  ... višini vode v prerezu

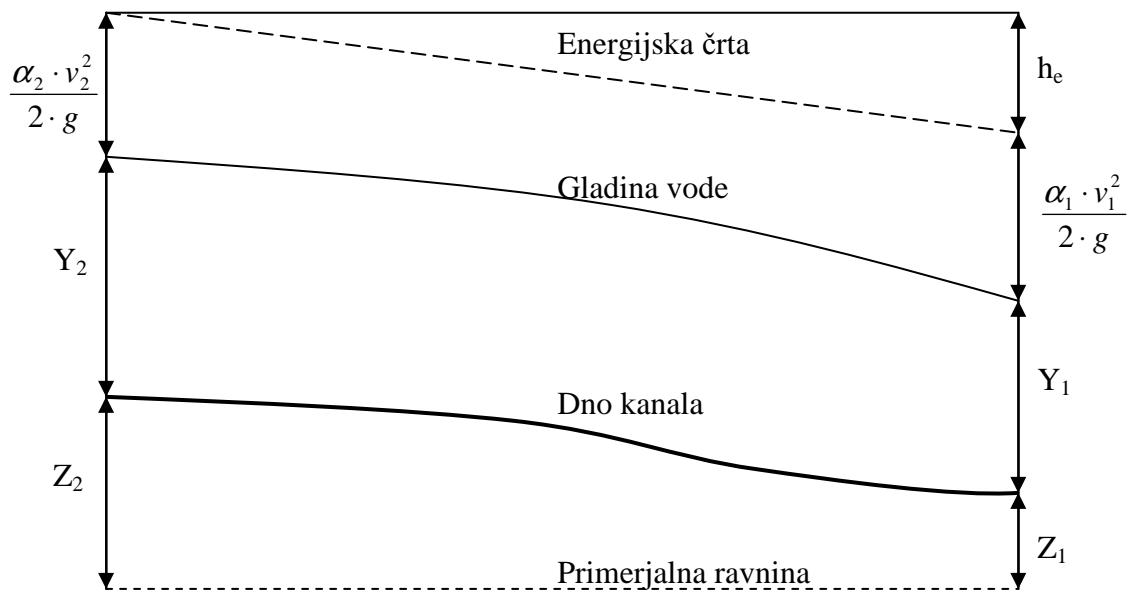
$Z_1, Z_2$  ... višini vode od dna kanala do primerjalne ravnine

$v_1, v_2$  ... hitrost toka

$\alpha_1, \alpha_2$  ... utežni koeficient hitrosti

$g$  ... gravitacijski pospešek

$h_e$  ... energijske izgube



Slika 5: Členi energijske enačbe

#### 4.1.1.2 Princip računanja

V program je vgrajen poseben postopek za izračun gladine vode v profilih pri stalnem neenakomernem toku. S to komponento je možno modelirati mirni, deroči ali mešani režim toka vode v profilih.

Račun sloni na rešitvi enodimenzijske energijske enačbe. Energijske izgube so določene s trenjem (Manningova enačba) in koeficientom zožitve in razširitve.

V izračunih je možno zajeti vplive različnih ovir kot so: mostovi, prelivi, prepusti,...

#### 4.1.1.3 Robni pogoji

Za začetek hidravličnega računa je potrebno določiti robne pogoje, ki programu nakažejo začetno stanje na gorvodnem ali dolvodnem odseku. Pri računanju mirnega toka je potrebno podati spodnji robni pogoj, pri računanju mešanega režima pa je potrebno podati spodnji in zgornji robni pogoj.

Robne pogoje je možno določiti po enem od naslednjih načinov: znana vodna gladina, kritična globina, normalna pretočna globina ali pretočna krivulja.

#### 4.1.2 MIKE 21

Računalniški program MIKE 21 je bil razvit na danskem hidravličnem inštitutu (DHI, 2005). Je obširen program, ki se uporablja za simuliranje toka v rekah, jezerih, morskih rokavih in obalnih območjih. Najbolj pogosta uporaba je pri plimovanju, tokovih, povzročenih zaradi vetra, valovih pri nevihti, poružitvi pregrade in poplavnih valovih.

Program računa s Saint Venantovimi enačbami.

##### 4.1.2.1 Osnovne enačbe

Kontinuitetna enačba:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Q_y)}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

Dinamična enačba v  $x$  smeri v konservativni obliki:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial \left( Q_x^2 + g \frac{h^2}{2} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( \frac{Q_x Q_y}{h} \right)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_0}{\partial x} - g \frac{Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{C^2 h^2} + \\ + \nu \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial \left( \frac{Q_x}{h} \right)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial \left( \frac{Q_y}{h} \right)}{\partial y} \right) \right] + \Omega Q_x + F_x(w) \end{aligned} \quad (11)$$

Dinamična enačba v  $y$  smeri v konservativni obliki:

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial \left( Q_y^2 + g \frac{h^2}{2} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( \frac{Q_x Q_y}{h} \right)}{\partial x} = -gh \frac{\partial z_0}{\partial y} - g \frac{Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{C^2 h^2} +$$

$$+ \nu \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial \left( \frac{Q_y}{h} \right)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial \left( \frac{Q_x}{h} \right)}{\partial y} \right) \right] - \Omega Q_y + F_y(w)$$

(12)

Pomen oznak:

$h$  ... globina vode [m]

$z_0$  ... kota dna [m n. m.]

$Q_x, Q_y$  ... gostota toka v  $x$  in  $y$  smeri [ $m^3/s/m$ ]

$C$  ... koeficient hrapavosti po Chezy-ju [ $m^{1/2}/s$ ]

$g$  ... težnostni pospešek [ $m/s^2$ ]

$F_x(w), F_y(w)$  ... strižni napetosti zaradi delovanja vetra na gladini

$\Omega$  ... Coriolisov koeficient (odvisen od zemljepisne širine)

$t$  ... čas [s]

#### 4.1.2.2 Princip računanja

Sistem parcialnih diferencialnih enačb se rešuje numerično po metodi končnih volumnov na mreži pravokotnih elementov z uporabo ADI implicitne metode končnih razlik, ki je drugega reda točnosti po prostoru in času. Program računa globinsko povprečni hitrosti in globino vode v središču vsake celice. Rezultata simulacije sta torej potek gladine vode in hitrostno polje.

Program simulira spremembo vodne gladine in tok za določen primer. Podati je potrebno numerično mrežo, kote dna in robne pogoje.

### 4.1.2.3 Robni pogoji

Pri uporabljenem sistemu parcialnih diferencialnih enačb so odvisne spremenljivke globina vode ter gostoti toka v  $x$  in  $y$  smeri. Običajno poznamo globino vode in smer toka ali pa pretok in smer toka. Upoštevati je možno naslednje kombinacije robnih pogojev: globina vode in smer toka ter pretok in smer toka. Globina vode in pretok sta lahko konstantni ali časovno spremenljivi. Časovna spremenljivost je lahko sinusoidna, možen pa je tudi vnos tabelaričnih vrednosti v obliki že pripravljene datoteke v program.

### 4.1.3 PCFLOW2D

Računalniški program PCFLOW2D, ki smo ga v diplomski nalogi uporabili za simulacijo toka v ribjem prehodu, je namenjen za računanje dvodimenzijskih tokov toka vode in tudi nenevtonskih tekočin (drobirski tokovi). Razvili so ga na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo (Četina, 1998).

Predpostavke, uporabljene v izračunu:

- a) Tok je dvodimenzionalen, hitrosti  $u$  in  $v$  so povprečne po globini.
- b) Porazdelitev tlakov je hidrostatična.
- c) Napetosti zaradi trenja ob dno izrazimo z Manningovo empirično enačbo.
- d) Napetosti zaradi vetra so zanemarjene.
- e) Pri modeliranju globinsko povprečnih turbulentnih napetosti je uporabljen princip efektivne viskoznosti  $\nu_{ef}$ , ki jo določimo z globinsko povprečnim  $k - \varepsilon$  modelom turbulence.
- f) V primeru toka v ribji stezi smo upoštevali stalni tok pri različnih konfiguracijah ribje steze.

#### 4.1.3.1 Osnovne enačbe

Dvodimenzijski model temelji na reševanju kontinuitetne enačbe in dveh dinamičnih enačb v  $x$  in  $y$  smereh v konservativni obliki. Ker sicer model omogoča tudi račun nestalnega toka, so



enačbe napisane v polni obliki, čeprav pri konkretnih računih stalnega toka členi nestalnosti (prvi členi na levi strani enačb) niso bili upoštevani.

Kontinuitetna enačba:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

Dinamična enačba v  $x$  smeri:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - ghS_{fx} + \frac{\partial}{\partial x} \left( h v_{ef} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h v_{ef} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (14)$$

Dinamična enačba v  $y$  smeri:

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - ghS_{fy} + \frac{\partial}{\partial x} \left( h v_{ef} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h v_{ef} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (15)$$

Zadnja dva člena na desnih straneh dinamičnih enačb izražata vpliv turbulentne viskoznosti, ki jo določimo s pomočjo znanega globinsko povprečnega  $k - \varepsilon$  modela turbulence. Zato sta potrebni dve dodatni transportni enačbi za turbulentno kinetično energijo na enoto mase  $k$  ter stopnjo njene disipacije  $\varepsilon$  (enačbi 16 in 17).

$$\frac{\partial(hk)}{\partial t} + \frac{\partial(huk)}{\partial x} + \frac{\partial(hvk)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{v_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{v_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + hG - c_D h \varepsilon + hP_{kv} \quad (16)$$

$$\frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(hu\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(hv\varepsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{v_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{v_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} hG - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} h + hP_{\varepsilon v} \quad (17)$$

Pomen oznak:

$h$  ... globina vode [m]

$u, v$  ... globinsko povprečni komponenti hitrosti v  $x$  in  $y$  smereh [m/s]

$t$  ... čas [s]

$z_b$  ... kota dna [m n.v.]

$g$  ... težnostni pospešek [m/s<sup>2</sup>]

$\nu_{ef}$  ... koeficient efektivne viskoznosti [m<sup>2</sup>/s]

$n$  ... Manningov koeficient hrapavosti

$S_{fx}, S_{fy}$  ... naklona energijske črte v  $x$  in  $y$  smeri

Naklona energijske črte v  $x$  in  $y$  smeri:

$$S_{fx} = \frac{n^2 u (u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{4/3}} \quad (18)$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 v (u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{4/3}} \quad (19)$$

Izraze za  $G$  (produkcija  $k$  zaradi horizontalnih gradientov hitrosti),  $P_{kv}$  in  $P_{ev}$  (izvorna člena zaradi trenja ob dno) kakor tudi vrednosti standardnih turbulentnih konstant ( $c_D, c_\mu, c_1, c_2, \sigma_k$  in  $\sigma_\epsilon$ ) je možno najti v literaturi (Rodi, 1993).

#### 4.1.3.2 Princip računanja

Povezan sistem nelinearnih parcialnih diferencialnih enačb (13) – (17) se rešuje numerično s pomočjo Pantakar-Spaldingove metode končnih volumnov, ki je skupaj z uporabljenim računalniškim programom PCFLOW2D opisana v ustrezni literaturi (Četina, 1998). Osnovne značilnosti metode so premaknjena numerična mreža, hibridna shema (kombinacija centralnodiferenčne in sheme gorvodnih razlik) ter iterativni postopek popravkov globin, znan kot SIMPLE. V primeru nestalnega toka se za integracijo po času uporablja polna implicitna shema, ki je stabilna in dovolj točna tudi pri daljših časovnih korakih in relativno visokih Courantovih številih. V primeru stalnega toka pa je program PCFLOW2D za doseg konvergentne rešitve potreboval povprečno okrog 10.000 iteracij pri podani maksimalni

dopustni relativni napaki 1% (SOPMAX = 0,01, lit. Četina (1998)). Ker smo simulacije izvršili na razmeroma hitrem osebem računalniku z dvojednim procesorjem Intel Core2 Duo E6600, so posamezni računi kljub dvodimenzijski obravnavi trajali le ca. 20 minut.

#### 4.1.3.3 Robni pogoji

Pri reševanju enačb (13) – (17) potrebujemo robne pogoje na vseh štirih straneh računskega področja, saj gre zaradi vključenih difuzijskih členov s turbulentno viskoznostjo za eliptičen tip problema. Za konkreten primer toka v ribjem prehodu smo upoštevali spodaj navedene robne pogoje, pri čemer je hitrost  $v$  usmerjena v  $y$  smeri vzdolž toka, hitrost  $u$  pa v smeri  $x$  prečno na tok.

Na gorvodnem robu modela se ob pogoju  $\partial h' / \partial y = 0$  ( $h'$  – popravek globin, lit. Četina, 1998) vtočna hitrost  $v$  vsaki iteraciji izračuna tako, da vtok v model ustreza obravnavanemu stalnemu pretoku  $Q_0 = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Smer hitrosti (velikost komponentne hitrosti v prečni smeri  $u$ ) se določi iz pogoja  $\partial u / \partial y = 0$ .

Na dolvodnem robu smo podali koto gladine  $z$  ter upoštevali, da so vzdolžni gradienti hitrosti enaki 0, torej  $\partial v / \partial y = 0$  in  $\partial u / \partial y = 0$ . Ustrezne kote  $z$  za spodnji rob dvodimenzijskega modela smo privzeli iz 1D računov na osnovi modela HEC-RAS.

Na vseh trdnih robovih so prečne hitrosti enake 0, za vzdolžne pa smo upoštevali veljavnost logaritemskega stenskega zakona (Četina, 1998).

Tudi za  $k$  in  $\varepsilon$  potrebujemo robne pogoje na vseh štirih robovih računskega področja. Podrobneje so navedeni v ustrezni literaturi (Rodi, 1993).

## 4.2 Priprava podatkov za izračun

Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu je bilo opravljeno z računalniškimi programi za računanje enodimenzijskega in dvodimenzijskega toka. Po dogovoru s projektanti ribjih prehodov z IBE je bilo v model vstavljenih pet bazenov, ker je dogajanje v ostalih bazenih zaradi kompleksne narave toka podobno.

Na podlagi preliminarnih rezultatov enodimenzijskega matematičnega modela HEC-RAS sta bila nato opravljena še izračuna z računalniškima programoma MIKE 21 in PCFLOW2D za dvodimenzijski tok.

Tok v ribjem prehodu je zapleten, ker je potrebno zagotoviti primerno hitrost toka in globino vode ter lokacijo umirjevalnih con za gorvodno in dolvodno migracijo selivk in osebkov v 1. letu spolne zrelosti. Pri dolvodnem prehajanju ni večjih težav, problem nastopi pri gorvodnem prehajanju, ki se ga odpravi z ustrezno postavitvijo ovir v kanalu. Ovire morajo biti oblikovane tako, da omogočajo prehajanje ne samo rib, temveč tudi vodnih nevretenčarjev (raki, polži,...). Te živali so pomembne, ker so nenadomestljiv in glavni vir hrane rib.

Hidravlični izračun je bil narejen za načrtovani ribji prehod preko HE Blanca. Izbrani so bili 4 primeri, ki se med seboj razlikujejo glede na vrsto in obliko vstavljene ovire. V vseh primerih je možno prelivanje vode preko ovire.

Račun za 1D tok je bil narejen s programom HEC-RAS. Uporabljen je bil modul za izračun gladin pri stalnem neenakomernem toku. Robni pogoji so podani v prvem in zadnjem profilu, koeficient hrapavosti pa je podan v vsakem interpoliranem profilu. Izračun je potekal za pretok  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  in Manningov koeficient hrapavosti 0,03.

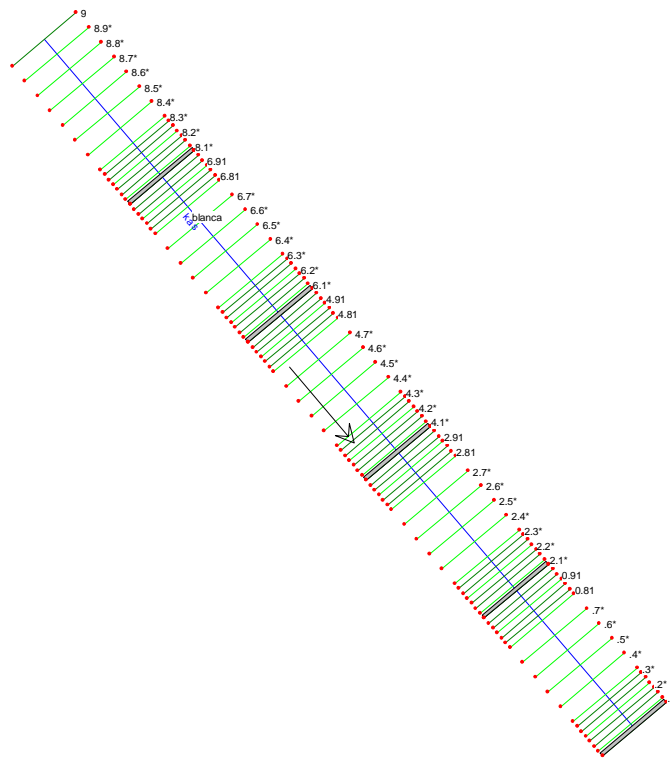
V drugem delu je bil z računalniškim programom MIKE 21 opravljen hidravlični izračun za dvodimenzijski tok. Izračun, ki je potekal na prenosnem računalniku HPnx9420 z dvojednim procesorjem, je bil narejen v nekaj urah.

Hidravlični model programa MIKE 21 je sestavljen iz izbranega hidrodinamičnega modula za katerega potrebujemo naslednje osnovne parametre: geometrijske podatke (lahko jih vnesemo tudi s pomočjo geografskega informacijskega sistema GIS), časovni korak, maksimalni čas računanja in še nekatere druge podatke, ki so opisani v nadaljevanju.

Za račun 2D toka s programom PCFLOW2D je potrebno podati kote dna kanala, koeficient hrapavosti in sodelujoče celice v matrikah, ki jih podamo v obliki ASCII zapisa v vhodnih datotekah.

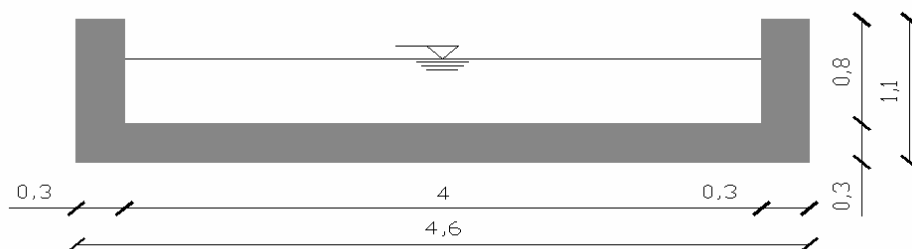
#### ***4.2.1 Geometrija obravnavanih ribjih prehodov***

V programu HEC-RAS za račun enodimenzijskega toka so prečni prerezi razvrščeni od najvišje do najnižje stacionaže za posamezni obravnavani primer. Zaradi nenadnih sprememb v vodotoku je potrebno izvesti pravilno interpolacijo profilov. Medsebojna oddaljenost profilov znaša 0,93 m. Zaradi naglih sprememb v bližini ovir (padec gladine in povišanje hitrosti) so tam profili izbrani bolj na gosto. Med 2 profila gorvodno in dolvodno od ovire so vstavljeni profili z medsebojno oddaljenostjo 0,31 m. Skupno število vseh interpoliranih profilov v petih bazenih tako znaša 86. Višinska razlika dna struge med začetkom in koncem 265,44 m dolgega odseka je 9,19 m, kar pomeni, da je povprečni vzdolžni padec obravnavanega odseka 4,4 %. To višinsko razliko morajo ribe premagovati pri gorvodni in dolvodni migraciji.

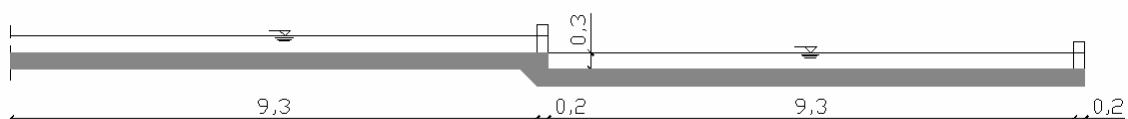


Slika 6: Geometrija 1D matematičnega modela HEC-RAS

Bazeni so dimenzij 4 m x 9,30 m. Za izgradnjo prehoda je predvidenih 28 bazenov. Višinska razlika med posameznimi bazeni znaša 0,30 m. Zaradi zahtev ribičev mora biti izvedba prehoda čimbolj naravna. Na predvideni lokaciji je dovolj prostora za izgradnjo le - tega. Na spodnjih dveh slikah sta prikazana prečni in vzdolžni prerez kanala.



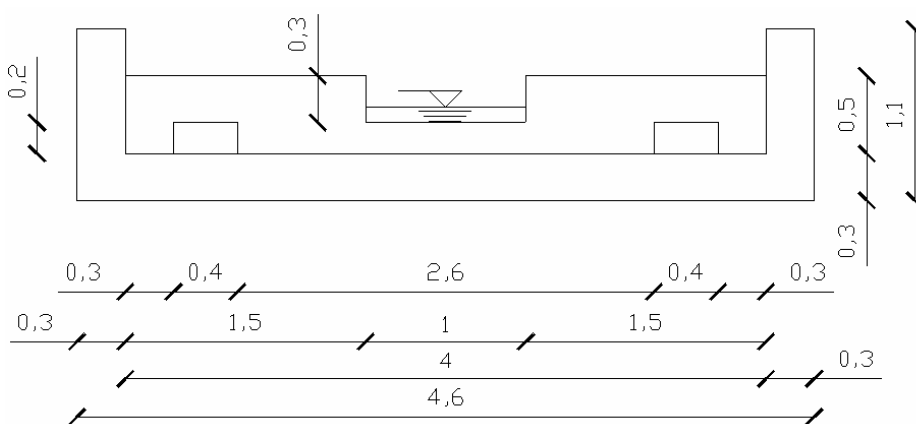
Slika 7: Prečni prerez bazena



Slika 8: Vzdolžni prerez bazena

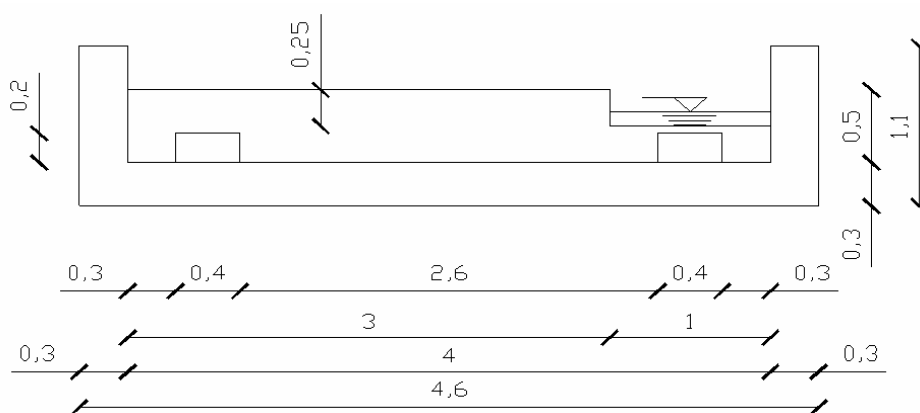
V nadaljevanju so prikazane dimenzije ovir, ki so bile vstavljene v bazene pri hidravličnem izračunu enodimenzijskega toka. Odprtine v ovirah v hidravličnih izračunih niso upoštevane.

V prvem primeru je bila v bazen dimenzij 4 m x 9,3 m vstavljena ovira višine 0,5 m. Širina preliva je 1 m in višina 0,3 m. Pri večjih pretokih je možno prelivanje vode preko preliva. Ovira ima 2 odprtini dimenzij 0,2 m x 0,4 m, ki omogočata gorvodno in dolvodno migracijo rib in nevretenčarjev. Odprtini sta za 0,3 m oddaljeni od stene kanala. Na sliki 9 je prikazan prečni prerez kanala z oviro.



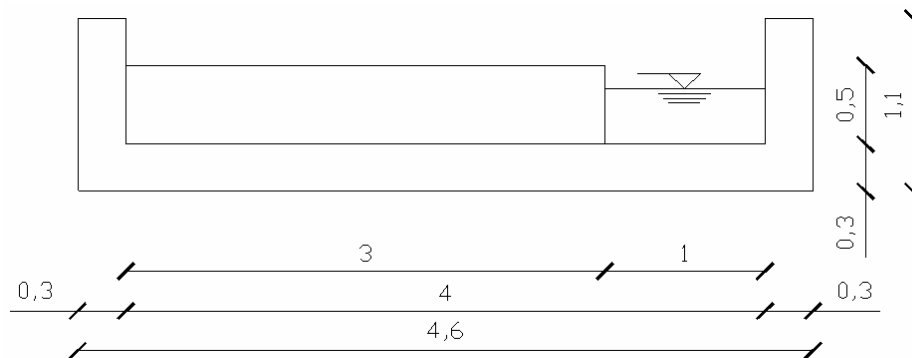
Slika 9: Prečni prerez kanala z oviro za 1. primer

Širina in višina preliva za 2. primer znašata 1 m in 0,25 m. Višina ovire je 0,5 m, dimenzije odprtini pa so 0,2 m x 0,4 m. Odprtini sta za 0,3 m oddaljeni od stene kanala. Dimenzije ovire so prikazane na sliki 10.



Slika 10: Prečni prerez kanala z oviro za 2. primer

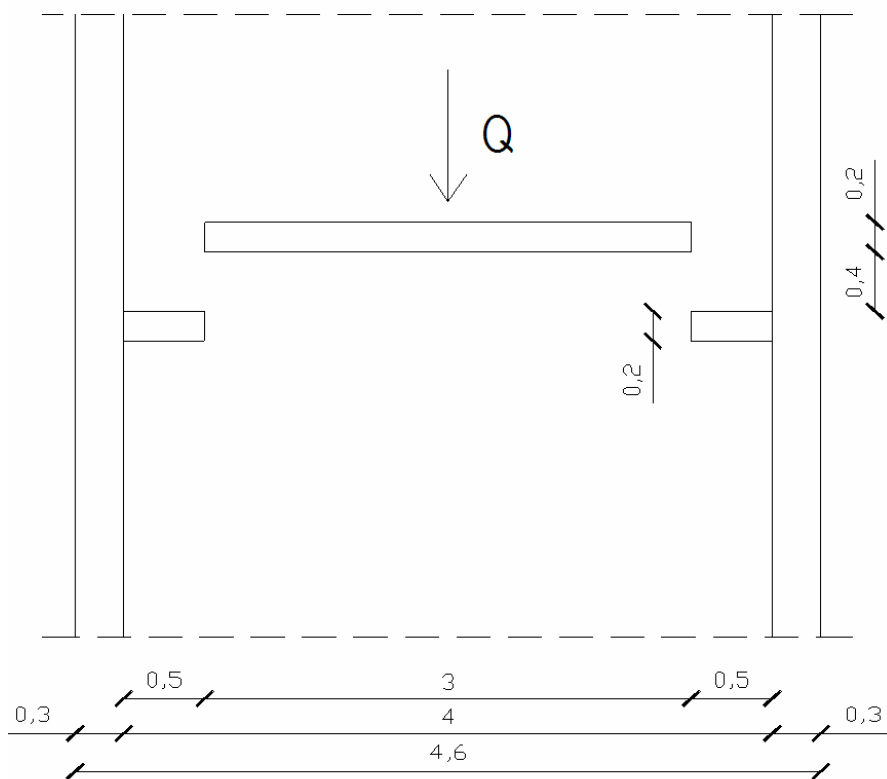
V tretjem primeru hidravličnega izračuna je v bazen vstavljena ovira z dimenzijami 3 m x 0,5 m. Višina ovire v bazenu znaša tako kot v prejšnjih primerih 0,5 m. Pri tem tipu ovire odprtine za gorvodno in dolvodno migracijo niso potrebne. Dimenzije ovire so prikazane na sliki 11.



Slika 11: Prečni prerez kanala z oviro za 3. primer

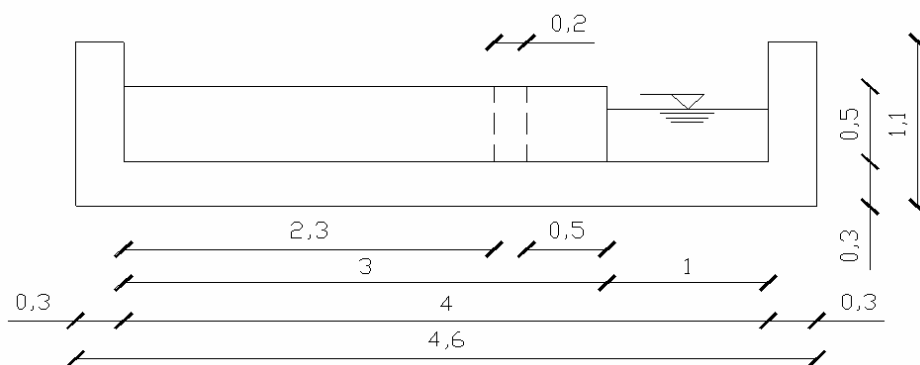
Dimenzije ovir v bazenu za četrti hidravlični izračun enodimenzionalnega toka so prikazane na sliki 12. Oviri sta postavljeni ena za drugo na medsebojni razdalji 0,40 m. Pri nižjih pretokih voda teče mimo njiju, pri večjih pa je možno prelivanje vode preko ovir.



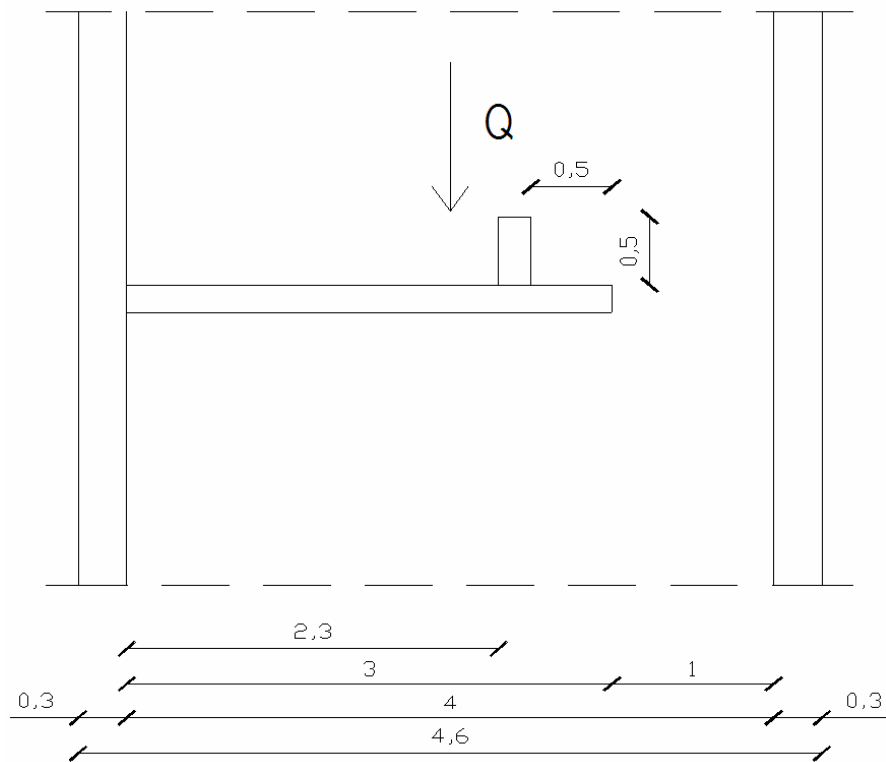


Slika 12: Tloris kanala z oviro za 4. primer

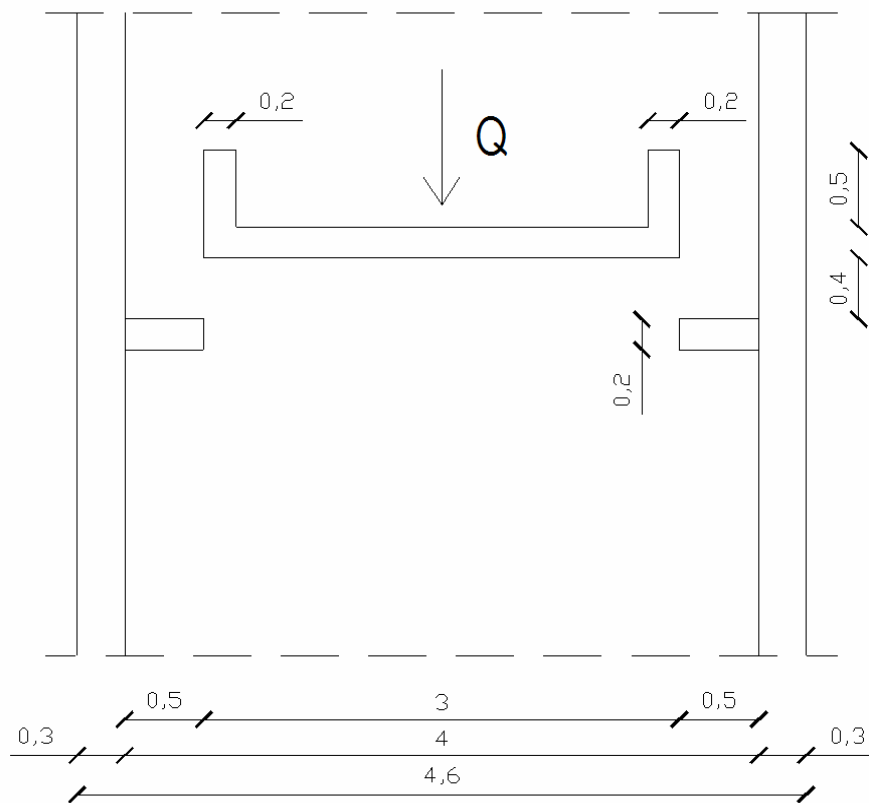
Na slikah spodaj so prikazane dimenzije popravljenih oviro za 3. in 4. primer. Oba primera se izkažeta za ugodna zaradi nastanka umirjevalnih con, ki so pomembne pri gorvodni migraciji.



Slika 13: Prečni prerez kanala s popravljenjo oviro za 3. primer



Slika 14: Tloris kanala s popravljeno oviro za 3. primer



Slika 15: Tloris kanala s popravljeno oviro za 4. primer

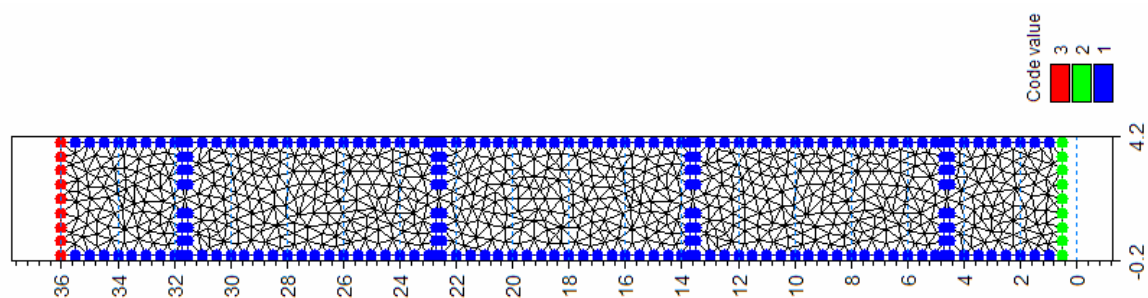
#### 4.2.2 Geometrijski podatki za 2D modela

Za 2D račun z računalniškima programoma MIKE 21 in PCFLOW2D je potrebno pripraviti kote dna kanala za vsako točko numerične mreže. Mreže sestavljajo celice. V središču celic so računske točke, v katerih poteka račun globin in hitrost vodnega toka. Kote dna kanala so podane v obliki matrik.

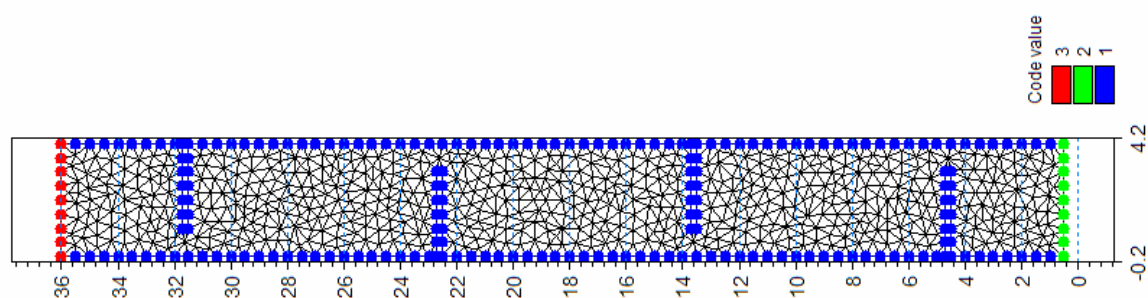
V 1D modelu HEC-RAS prvi in zadnji profil predstavljata gorvodni (zgornji) in dolvodni (spodnji) robni pogoj.

V program MIKE 21 se za robne pogoje vstavi: zgornji in spodnji robni pogoj ter rob kanala.

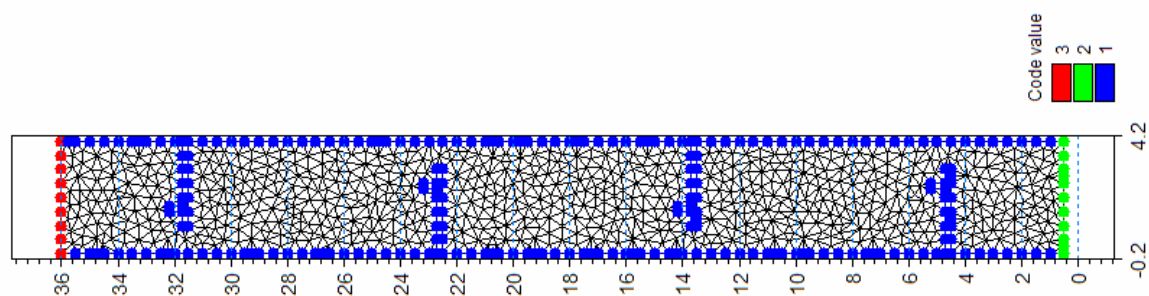
Numerična mreža je v programu MIKE 21 narejena z uporabo trikotnih elementov (slike 16-19).



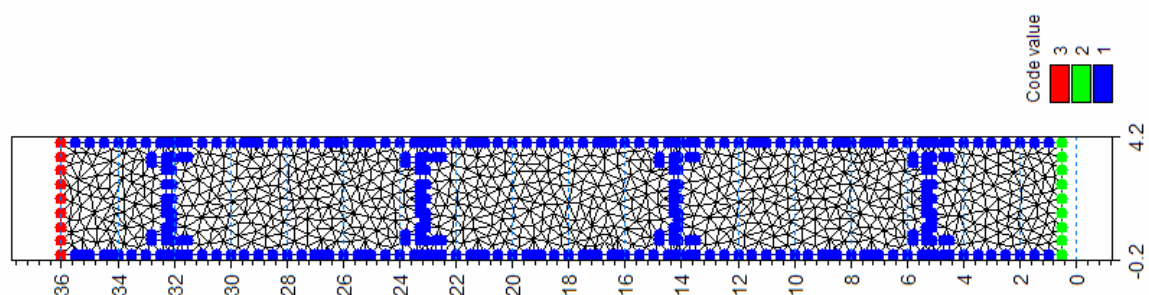
Slika 16: Numerična mreža 1. računskega primera



Slika 17: Numerična mreža 2. računskega primera



Slika 18: Numerična mreža 3. računskega primera



Slika 19: Numerična mreža 4. računskega primera

Za doseg natančnih rezultatov je ključnega pomena pravilna izbira mreže v hidravličnem modulu programa MIKE 21. Model obsega mrežo, kote dna in robne pogoje. Kote dna so pripravljene v datoteki s končnico xyz. Mreža se naredi s programom MIKE Zero Mesh Generator. Vsaka točka mreže vsebuje podatke o lokaciji (koordinati  $x$  in  $y$ ) in kote dna.

Topografija vseh štirih računskih primerov je v programu PCFLOW2D podana s povprečnimi kotami dna v 15.982 celicah (v 44 celicah v smeri  $x$  in v 362 celicah v  $y$  smeri).

V programu PCFLOW2D je uporabljena gosta numerična mreža. Število celic v  $x$  smeri je 44, v  $y$  smeri pa 362. Celice so velikosti  $\Delta x = \Delta y = 0,1$  m. Numerične mreže so orientirane tako, da je  $x$  prečna os,  $y$  pa vzdolžna os. Matrike so v programu PCFLOW2D zaradi lažjega podajanja robnih pogojev na vsaki strani razširjene za 2 stolpca. V teh stolpcih so neaktivne celice, v katerih račun ne poteka.

### **4.2.3 Čas simulacije**

Tu so zbrani podatki o številu časovnih intervalov in velikosti časovnega intervala. V programu MIKE 21 je bilo število časovnih korakov 750 in velikost časovnega koraka 30 s, tako da je bil celotni čas simulacije je tako bil 6,25 ur. Rezultati so bili izpisani na 1025 s, tako da je bilo skupno 20 izpisov.

### **4.2.4 Začetni pogoj**

V programu MIKE 21 je začetni pogoj za hidrodinamične spremenljivke lahko podan na tri načine: kot konstantna gladina, kot spremenljiva gladina ali kot spremenljiva globina in spremenljiva hitrost vodnega toka. Za začetni pogoj je izbrana konstantna gladina.

S programom PCFLOW2D pa so bili primeri izračunani kot stalni tok, zato začetnega pogoja ne potrebujemo.

### **4.2.5 Robni pogoji**

Za hidravlični izračun s programom HEC-RAS je potrebno določiti robne pogoje, ki podajo stanje na gorvodnem ali dolvodnem odseku vodotoka. Ker imamo v obravnavanem primeru mirni tok, je potrebno podati samo spodnji robni pogoj. Robni pogoj predstavlja znana vodna gladina spodnje vode, ki je načrtovana pri HE Blanca (preglednica 11). Po dogovoru s projektanti ribjih prehodov z IBE je bilo potrebno upoštevati poenotenje stopenj prikazano na preglednici 11.

Preglednica 11: Poenotenje stopenj (stanje na dan 15. februar 2006)

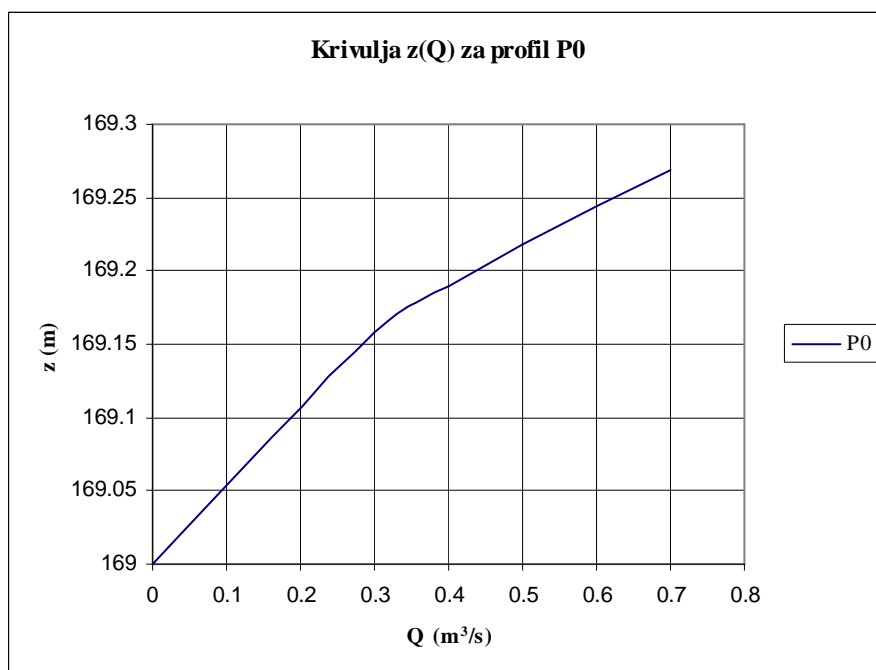
<u>Kote gladin:</u>				
<b>Blanca</b>			KRSne	KRSja
174,2	166,7	m <sup>3</sup> /s	162,21	164,17
	333,3	m <sup>3</sup> /s	163,2	164,54
	500	m <sup>3</sup> /s	164,1	165,01
<u>Padci:</u>				
<b>Blanca</b>			KRSne	KRSja
	166,7	m <sup>3</sup> /s	11,99	10,03
	333,3	m <sup>3</sup> /s	11	9,66
	500	m <sup>3</sup> /s	10,1	9,19

Kote gladin in padci so podani za lokacijo Blanca z upoštevanjem (KRSja) in brez upoštevanja (KRSne) HE Krško. Za spodnji robni pogoj je upoštevana kota gladine vode 165,01 m. To je kota gladine vode po izgradnji HE Krško pri pretoku reke Save 500 m<sup>3</sup>/s. Kota vode na vtoku v ribjo stezo pa je 174,2 m.

V programu HEC-RAS predstavljata prvi (P0) in zadnji profil (P9) zgornji in spodnji robni pogoj. Pri tem sta bila profila P9 in P0 zgornja in spodnja meja petih bazenov osrednjega dela ribjega prehoda, ki je bil obravnavan v računu.

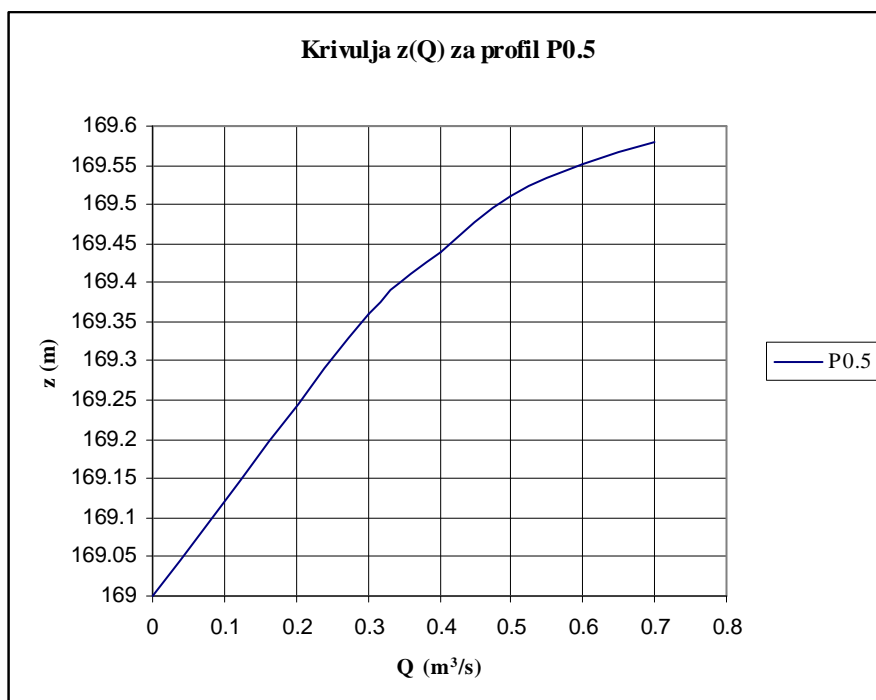
V 2D model MIKE 21 so vstavljeni naslednji robni pogoji: zgornji in spodnji robni pogoj ter robni pogoj ob bregovih kanala. Pri robnem pogojju ob bregovih je bilo upoštevano, da so hitrosti v prečni smeri enake 0.

Na iztoku iz kanala je bila upoštevana konsumpcijska krivulja  $z = z(Q)$ , ki je bila določna s programom HEC-RAS za enodimenzijski tok v profilu P0 (grafikon 7).



Grafikon 7: Višina vodne gladine  $z$  v odvisnosti od pretoka  $Q$  v profilu P0 na iztoku 1D modela

Ker spodnji rob 2D modela ni v profilu P0, temveč na polovici spodnjega bazena v profilu P0.5, je konsumpcijska krivulja podana tudi za ta profil (grafikon 8).



Grafikon 8: Višina vodne gladine  $z$  v odvisnosti od pretoka  $Q$  v iztočnem profilu 2D modelov

Ker je v 1D model HEC-RAS v profil P0 na iztoku iz kanala vstavljena ovira, program javi globino vode 169,2 m. Prvi in zadnji bazen sta izrisana v celoti.

#### 4.2.6 Koeficient hrapavosti

Manningov koeficient hrapavosti je pri računu 1D toka s programom HEC-RAS podan v vsakem interpoliranem profilu. Posebej je določen za dno kanala in obe brežini.

V 1D modelu je bil upoštevan Manningov koeficient hrapavosti  $n = 0,03 \text{ sm}^{-1/3}$ . Vrednost je nekoliko večja, ker se nekatere geometrijske nepravilnosti deloma zajame s povečanim koeficientom hrapavosti. V 2D modelu pa je bil upoštevan Manningov koeficient hrapavosti  $n = 0,02 \text{ sm}^{-1/3}$ , ki ustreza betonskemu dnu in stenam ribjega prehoda.

Pri računu 2D toka s programom MIKE 21 je koeficient hrapavosti možno podati z recipročno vrednostjo Manningovega koeficienta hrapavosti  $M$  ( $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ) ali s Chezyjevim koeficientom hrapavosti  $C$  ( $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ). Vrednost koeficienta  $M$  se izračuna po enačbi (20), Chezyjev koeficient hrapavosti  $C$  pa po enačbah (21) in (22).

$$M = \frac{1}{n} \quad (20)$$

$$c_f = \frac{g}{C^2} \quad (21)$$

$$c_f = \frac{g}{\left(M \cdot h^{\frac{1}{6}}\right)^2} \quad (22)$$

Pomen oznak:

$n$  ... Manningov koeficient hrapavosti

$M$  ... recipročna vrednost Manningovega koeficienta hrapavosti

$C$  ... Chezyjev koeficient hrapavosti

$g$  ... težnostni pospešek



$h$  ... višina vode

Pri računu 2D toka s programom PCFLOW2D je potrebno podati Manningov koeficient hrapavosti  $n$  v vsaki celici numerične mreže. Vnesemo ga v ASCII zapisu v obliki matrike.

#### **4.2.7 Izbira modula**

V hidravlični model programa MIKE 21 je možno vključiti različne module (blatni in murasti tok, tok nasičen s prodrom, ...). Za naš konkretni izračun smo izbrali hidrodinamični modul za čisto vodo.

## 5 REZULTATI MODELOV

V tem poglavju so prikazani rezultati modeliranja 1D toka s programom HEC-RAS ter 2D toka s programoma MIKE 21 in PCFLOW2D. Ključnega pomena pri dimenzioniranju ribjega prehoda sta hitrostno polje in globina vode v bazenih. To se zagotovi z ustrežno obliko prelivov, postavitvijo ovir in koeficientom hrapavosti dna. Pri manjši hrapavosti se pojavijo višje hitrosti toka. Sledi primerjava modelov za 1D in 2D tok ter ugotavljanje izpolnjevanja pogojev za posamezne vrste rib.

### 5.1 Rezultati programa HEC-RAS

Kot rezultat računa 1D toka z računalniškim programom HEC-RAS dobimo hitrost vodnega toka in globino vode v interpoliranih profilih.

Rezultati so za vse računske primere v vseh interpoliranih profilih podani v preglednicah na prilogah 1 - 4. Globina vode v profilu P0 na iztoku iz kanala je 0,22 m, merjena do ovire, ki je vstavljena na tem mestu. Spremenljivke, ki nastopajo v preglednicah, so:  $I_E$  – naklon energijske črte,  $v$  – hitrost toka,  $h$  – globina vode in  $Fr$  – Froudovo število.

Vrednost Froudovega števila se izračuna po enačbi (23):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (23)$$

Pomen oznak:

$v$  ... hitrost toka

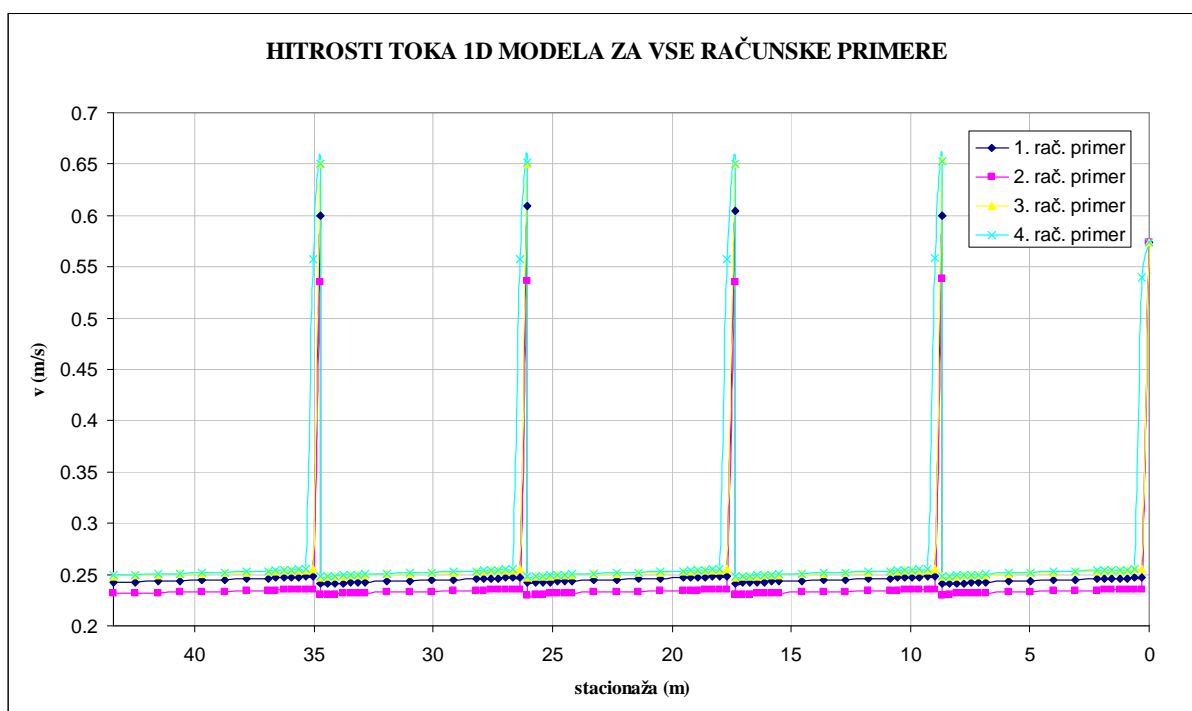
$g$  ... težnostni pospešek

$h$  ... globina vode

Froudovo število je pokazatelj mirnega, kritičnega ali deročega toka. Če:

- $Fr < 1$  ... mirni tok
- $Fr = 1$  ... kritični tok
- $Fr > 1$  ... deroči tok

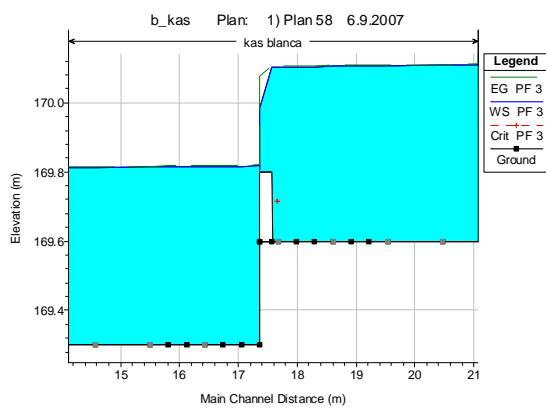
V bazenih je vrednost Froudovega števila 0,10 - 0,12, na mestu ovir pa 0,35 - 0,43. Torej je v vseh računskih primerih mirni tok tako v bazenih kot pri ovirah.



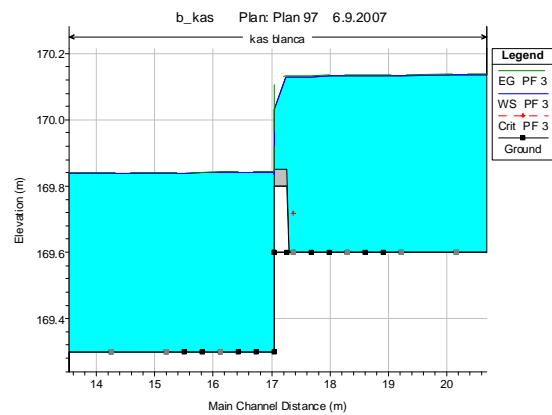
Grafikon 9: Primerjava hitrosti toka 1D modela HEC-RAS v interpoliranih profilih za vse računske primere

Primerjava hitrosti 1D modela za različne računske primere je prikazana na grafikonu 8. Stacionaža gorvodno narašča. Do povečanja hitrosti pride na mestu ovir, v bazenih pa se hitrost praktično ne spreminja. Največja hitrost toka pri oviri se pojavi pri 3. in 4. primeru, kjer znaša 0,65 m/s, najmanjša 0,53 m/s pa pri 2. primeru. V 1. primeru hitrost pri oviri znaša 0,60 m/s. V bazenih so hitrosti toka od 0,23 – 0,25 m/s za vse računske primere.

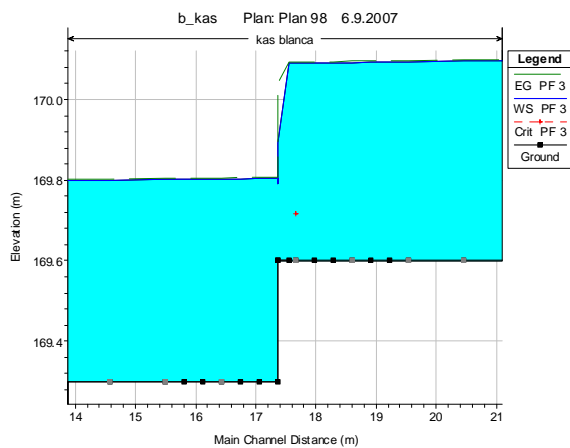
Vzdolžni profil s potekom gladine je prikazan na prilogah 5 – 8. Padec gladine pri oviri za posamezni računski primer znaša 0,30 m (slike 20 – 23).



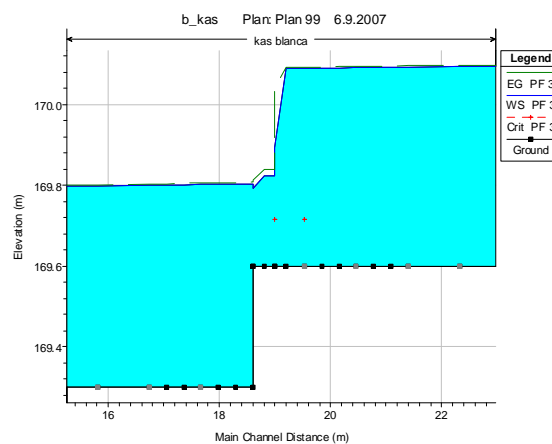
Slika 20: Padec gladine pri oviri za 1. primer



Slika 21: Padec gladine pri oviri za 2. primer



Slika 22: Padec gladine pri oviri za 3. primer



Slika 23: Padec gladine pri oviri za 4. primer

Za lažjo predstavo bazenov z ovirami je v program vgrajena komponenta za 3D prikaz (priloge 9 – 12).

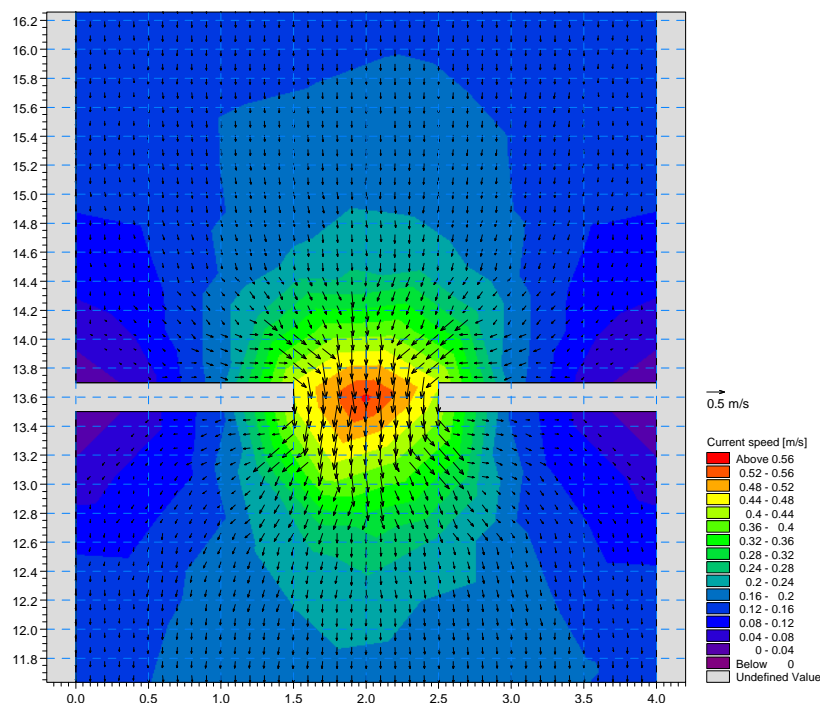
## 5.2 Rezultati programa MIKE 21

Za prikaz rezultatov hidravličnega izračuna 2D toka s programom MIKE 21 je uporabljena vgrajena komponenta Data Viewer. Komponenta omogoča izris kontur in vektorjev hitrosti na karti ter predstavitev izhodnih podatkov v posameznih časovnih korakih. Uporablja se predvsem za analizo in predstavitev rezultatov 2D modela.

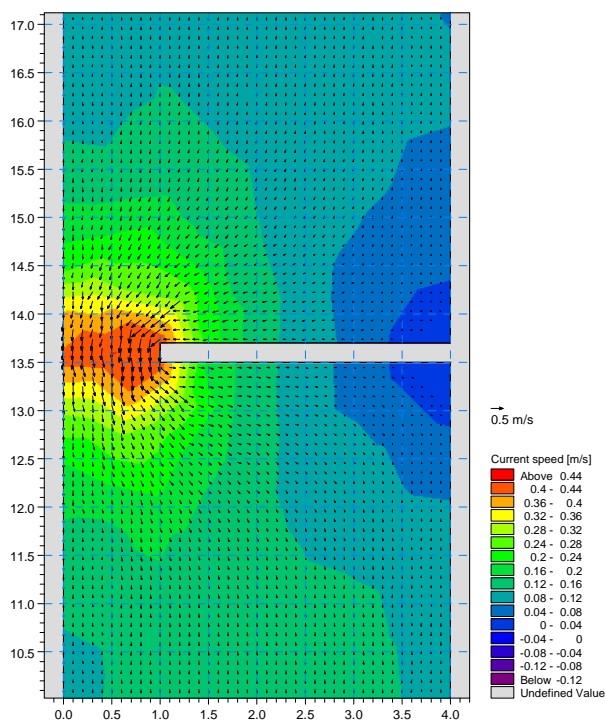
V računskih točkah so izrisani vektorji hitrosti, ki tvorijo hitrostno polje. Prikažejo hitrost in smer toka. Za lepšo preglednost rezultatov sta hitrostnemu polju priložena legenda in merilo hitrosti.

Največje razlike v velikosti vektorjev so pri oviri, medtem ko so druge manjše. Na teh mestih pride do povečanja hitrosti vodnega toka. Gladina vode in hitrostno polje je prikazano na slikah 24 – 27 in prilogah 13 – 20.

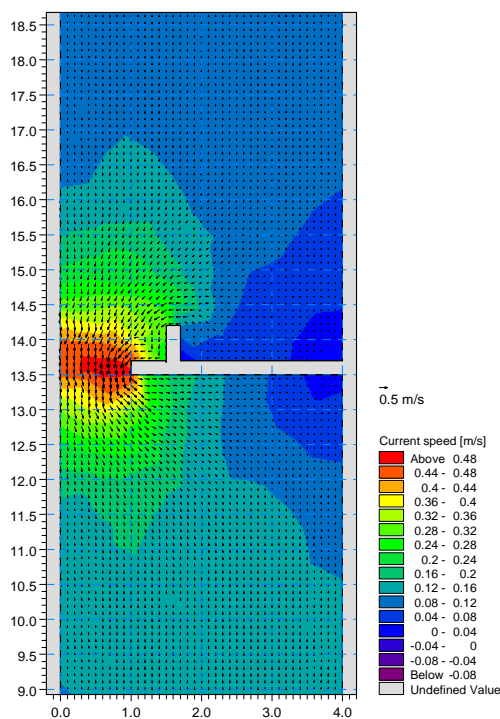
Pri računu dvodimenzijskega toka s programom MIKE 21 tok ni tako vrtničast kot v primeru računanja s programom PCFLOW2D. Vzrok za to je, da je v hidrodinamičnem modulu programa MIKE 21 izbrana konstantna vrednost efektivne viskoznosti  $\nu_{ef} = 0,002 \text{ m}^2 / \text{s}$ , pri modelu PCFLOW2D pa točnejši  $h - \varepsilon$  modul turbulence. Do razširitve toka na celoten prerez pride pri modelu MIKE 21 na relativno kratki razdalji za oviro gledano dolvodno, dočim je pri modelu PCFLOW2D ta razdalja večja in odvisna od posameznega računskega primera.



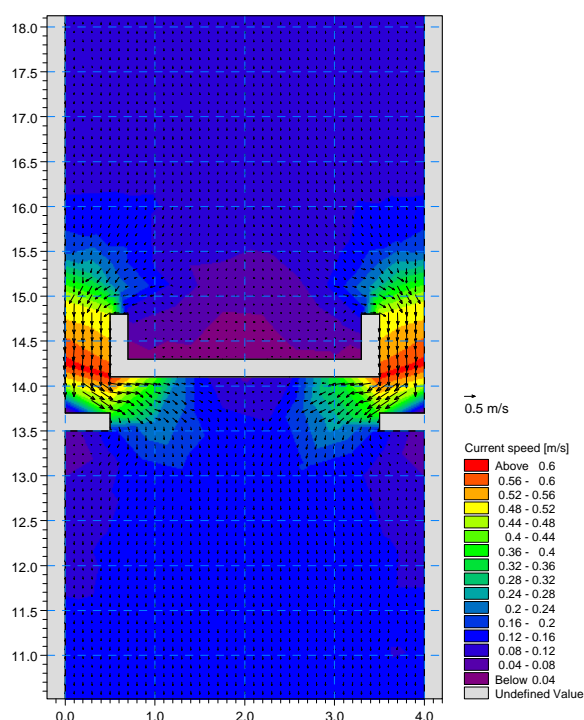
Slika 24: Hitrostno polje za 1. računski primer (program MIKE 21)



Slika 25: Hitrostno polje za 2. računski primer (program MIKE 21)



Slika 26: Hitrostno polje za 3. računski primer (program MIKE 21)



Slika 27: Hitrostno polje za 4. računski primer (program MIKE 21)

### 5.3 Rezultati programa PCFLOW2D

Rezultati programa PCFLOW2D so prikazani na prilogah 21 – 28.

Po celotnem kanalu so izrisani vektorji hitrosti. Hitrostnemu polju je priloženo merilo dolžin in hitrosti ter legenda globin  $h$ . Hitrostno polje in izolinijske globine so izrisane na skupni sliki. Pri 1. in 4. računskem primeru smo v programu PCFLOW2D upoštevali simetrijo (simetrija glede na vzdolžno os), pri 2. in 3. primeru pa je program računal s celotno numerično mrežo. Simetrijo smo pri simetričnih primerih morali upoštevati, sicer bi zaradi že najmanjših numeričnih nesimetrij prišlo do spremembe smeri toka pri posamezni oviri v kanalu. Hitrosti  $u$  in  $v$  program PCFLOW2D računa v premaknjenih pozicijah. Rezultati numeričnega reševanja so izračunane matrike hitrosti  $u$ , hitrosti  $v$ , kote gladine (kote  $z$ ), turbulentne kinetične energije na enoto mase  $k$ , stopnje njene disipacije  $\varepsilon$ , efektivne turbulentne viskoznosti  $\nu_{ef}$ , napake mase in globine vode.

Na prilogah 21 – 24 lahko poleg hitrostnega polja določimo tudi, kakšne so maksimalne globine in kje se pojavijo. Razberemo lahko tudi lokacijo umirjevalnih con ter nastanek vrtinčastega toka. Zaradi različnih tipov ovir v kanalu se cirkulacija pojavi na različnih dolžinah dolvodno od ovir. V prvem primeru ta dolžina znaša 5,55 m, v drugem primeru 8,15 m, v tretjem primeru 7,36 m in v četrtem primeru kanala z ovirami 6,06 m. Razdalja je merjena od ovire do mesta, kjer ni več povratnega toka, gledano dolvodno.

Program omogoča tudi prikaz konfiguracije dna (priloge 25 – 28). Prilogam je dodano tudi merilo višin. Razmerje horizontalnega in vertikalnega merila je v našem primeru 1:1.

#### **5.4 Primerjava rezultatov programov MIKE 21 in PCFLOW2D**

Ko primerjamo rezultate dveh različnih programov za isti računski primer, je potrebno zagotoviti čimbolj enake vhodne podatke. Nastale razlike med rezultati so posledica matematičnega modela, ki ga posamezni program uporablja.

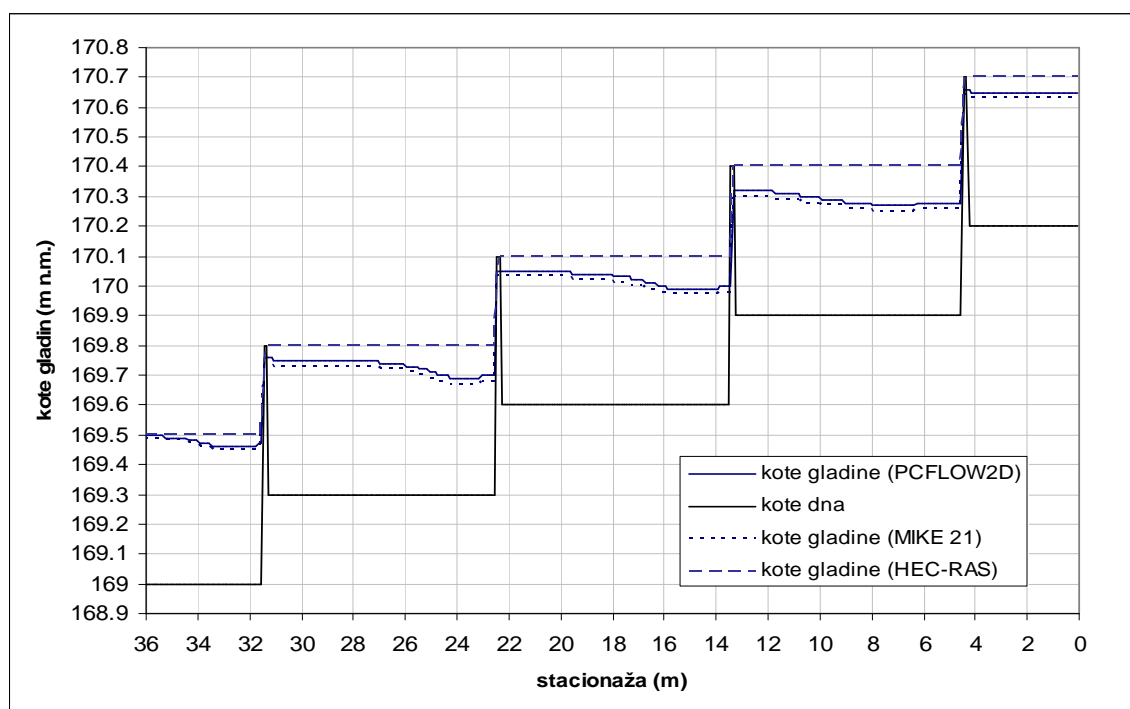
Pri primerjavi rezultatov programov MIKE 21 in PCFLOW2D smo pri računu uporabili enake vhodne podatke, in sicer: kote terena, koeficiente, ki jih programa potrebujeta za računanje in gostoto numerične mreže ( $\Delta x = \Delta y = 0,1$  m). Izračunali smo 4 primere, ki se razlikujejo po konfiguraciji terena oz. tlorisnem položaju ovir. V vseh primerih smo uporabili pretok  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  in pripadajočo globino vode 0,5 m na iztočnem robu sredi dolvodnega bazena.

Narejena je primerjava maksimalnih kot in hitrosti.

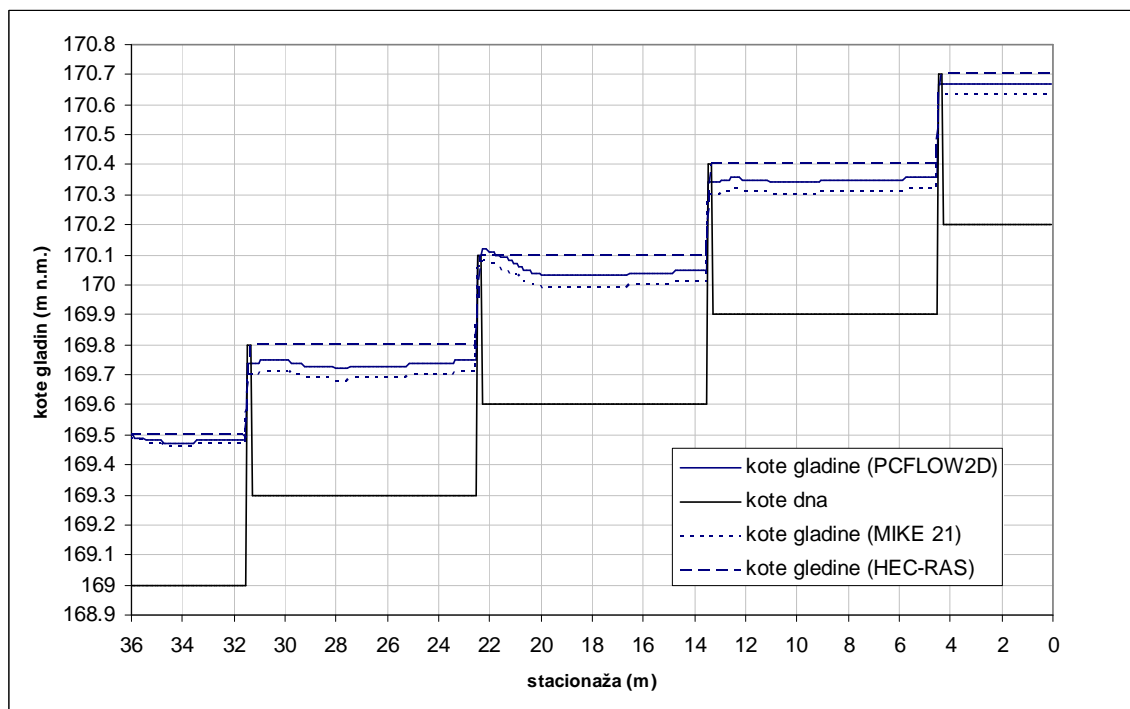
##### **5.4.1 Maksimalne kote**

Maksimalne kote je možno prikazati prečno in vzdolžno za posamezni računski primer. Iz primerjave maksimalnih kot vode vzdolž odseka po simetrični osi kanala se vidi, kako posamezni tip ovire vpliva na spremembo gladine vode. Maksimalne kote v vzdolžnih prerezih so prikazane na slikah 28 – 31.

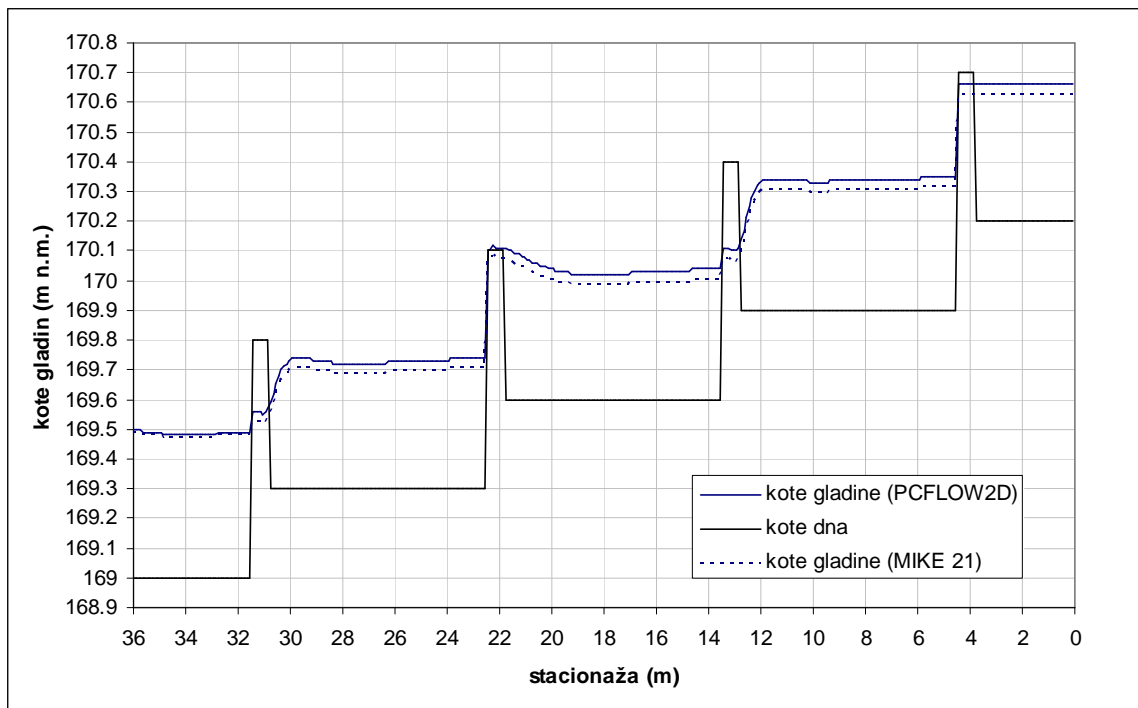




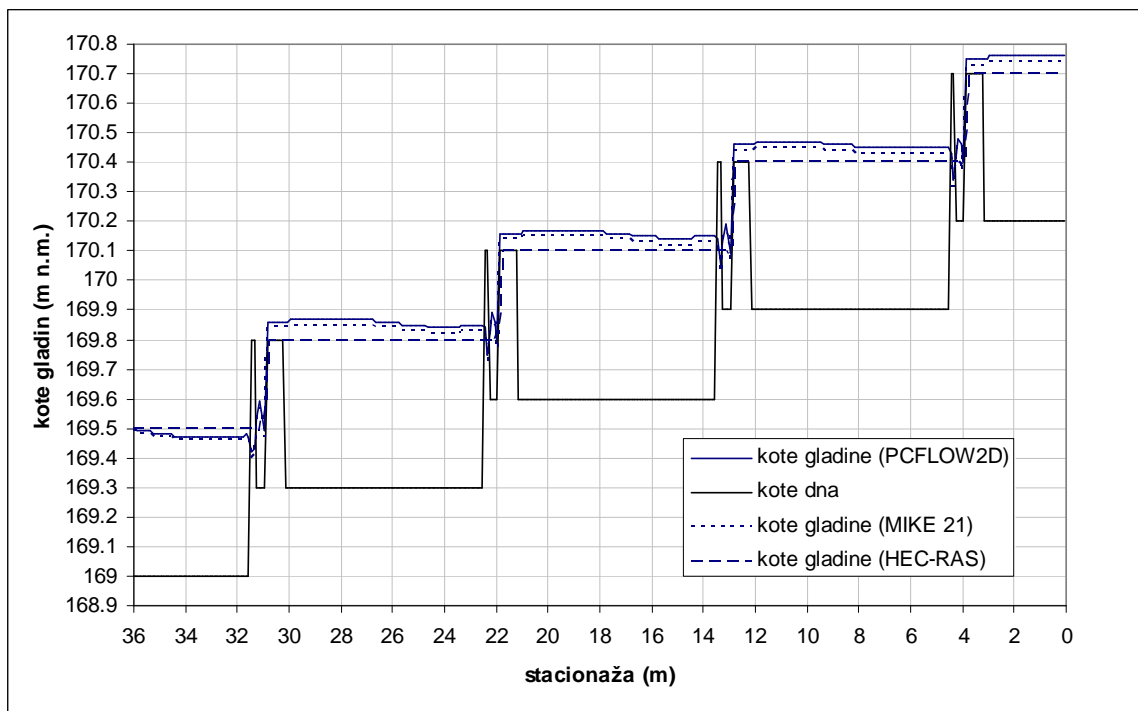
Slika 28: Primerjava maksimalnih kot vode vzdolž odseka po simetrični osi kanala za 1. računski primer za programe HEC-RAS, MIKE 21 in PCFLOW2D



Slika 29: Primerjava maksimalnih kot vode vzdolž odseka po simetrični osi kanala za 2. računski primer za programe HEC-RAS, MIKE 21 in PCFLOW2D



Slika 30: Primerjava maksimalnih kot vode vzdolž odseka po simetrični osi kanala za 3. računski primer za programa MIKE 21 in PCFLOW2D



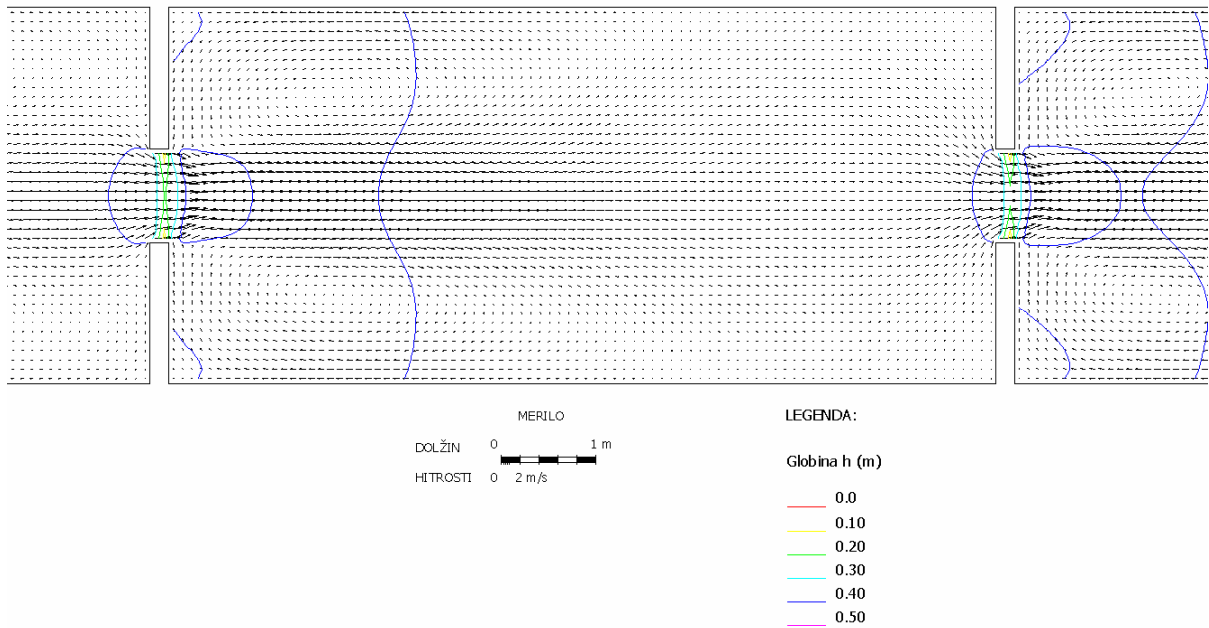
Slika 31: Primerjava maksimalnih kot vode vzdolž odseka po simetrični osi kanala za 4. računski primer za programe HEC-RAS, MIKE 21 in PCFLOW2D

Maksimalne kote modela HEC-RAS so v povprečju višje od modelov MIKE 21 in PCFLOW2D, kar je razvidno iz vzdolžnih prerezov (slike 28 – 31) in preglednic rezultatov (priloge 1 – 4).

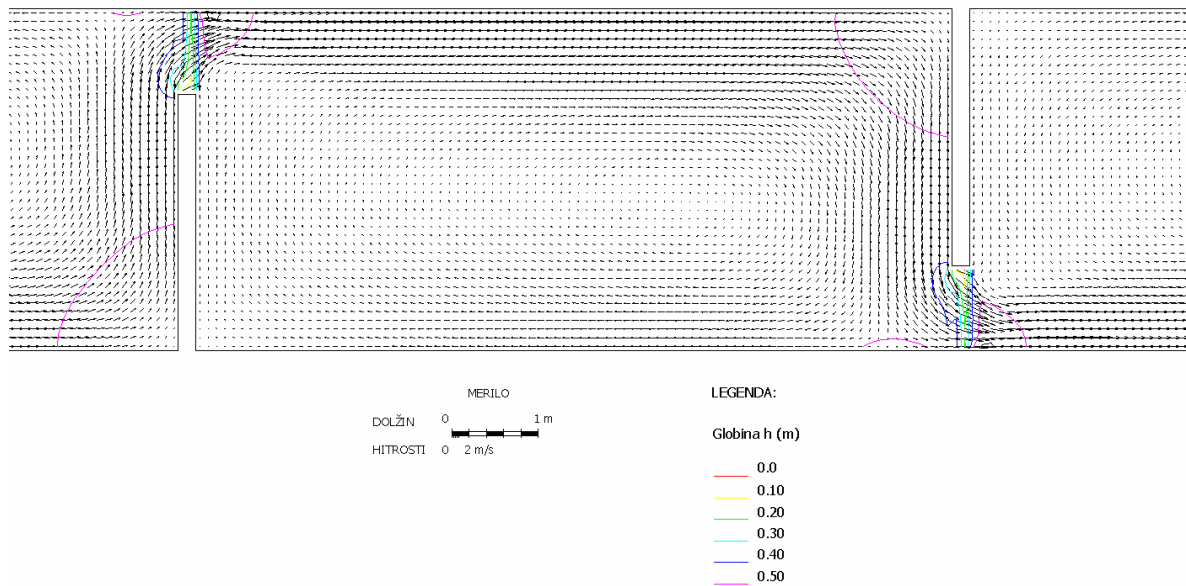
Primerjava maksimalnih kot vode vzdolž 1., 2. in 4. računskega primera za računalniške programe HEC-RAS, MIKE 21 in PCFLOW2D je prikazana na slikah 28, 30 in 31. Na sliki 30 maksimalne kote vode za program HEC-RAS niso izrisane, ker z njim ni bilo mogoče opisati ustreznega tipa ovire za 3. računski primer. Omenjeni primer je prikazan v poglavju 4.2.1 Geometrija obravnavanih ribjih prehodov. Iz primerjave maksimalnih kot vzdolž 1. računskega primera se vidi, da so največja odstopanja na vtočnem delu posameznega bazena. Največje odstopanje med 1D in 2D modeloma znaša ca. 13%, medtem ko so na večjem delu območja ca. 7%. Največje odstopanje vzdolž 2. računskega primera na vtočnem delu je bilo 20%, medtem ko so na računskem območju razlike povprečno okrog 5%. Za 4. računski primer pa je največje odstopanje znašalo 34%, povprečno pa ca. 5%. Iz slik je razvidno, da se na mestih, kjer imamo stopnico v dnu, spremenijo tudi maksimalne kote (slike 28 - 31). Pri programih PCFLOW2D in MIKE 21 pa se maksimalne kote na mestu stopnice spremenijo zvezno, saj oba programa lahko simulirata tok v dveh dimenzijah, kar je vsekakor bližje realnosti kot poenostavljen model 1D toka. Sicer dajeta oba 2D programa pri gladinah podobne rezultate.

#### **5.4.2 Hitrosti**

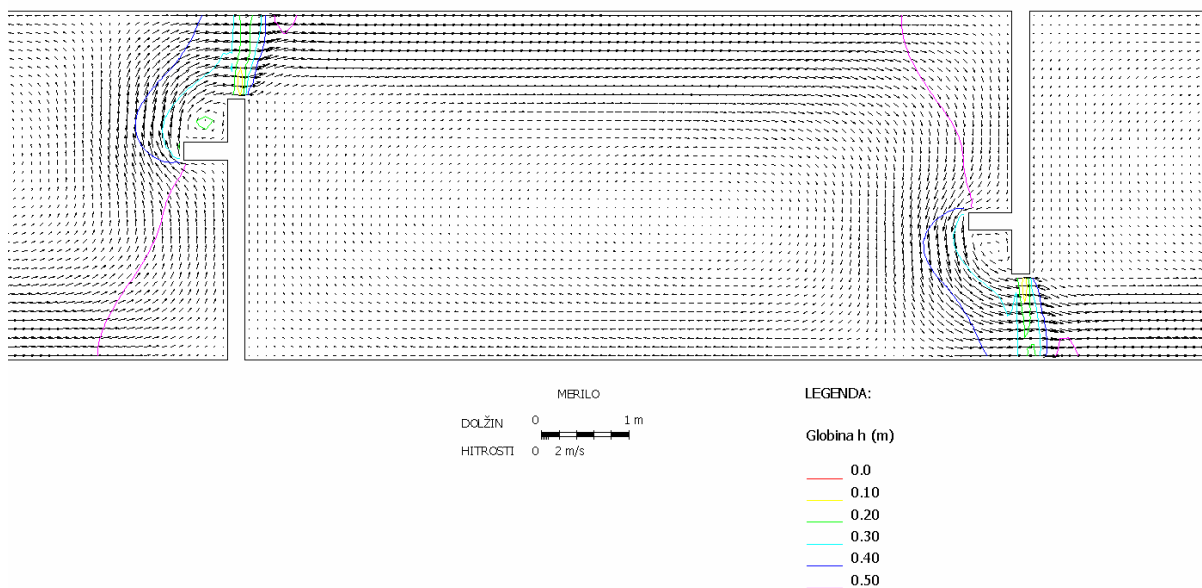
V točkah numerične mreže je možno za programa MIKE 21 in PCFLOW2D izrisati vektorje hitrosti, ki skupaj tvorijo hitrostno polje za obravnavani računski primer. Prilogi je priloženo merilo dolžin in hitrosti ter legenda globin  $h$ .



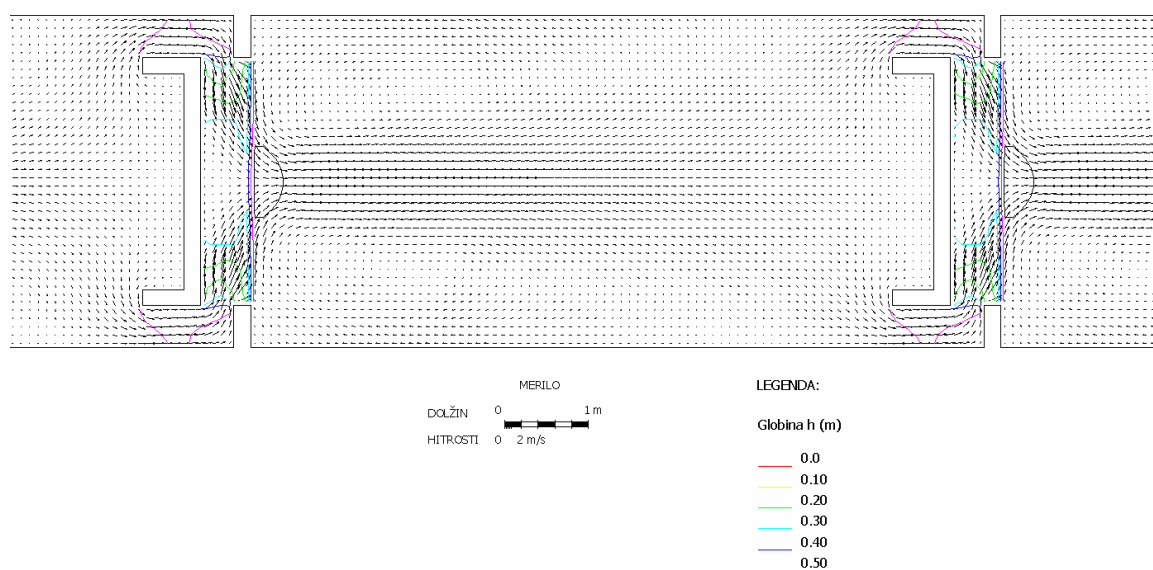
Slika 32: Hitrostno polje za 1. računski primer (program PCFLOW2D)



Slika 33: Hitrostno polje za 2. računski primer (program PCFLOW2D)



Slika 33: Hitrostno polje za 3. računski primer (program PCFLOW2D)



Slika 34: Hitrostno polje za 4. računski primer (program PCFLOW2D)

Kot je bilo povedano že v uvodnem delu diplomske naloge, naj bi bil ribji prehod zgrajen za selivke, ki se selijo na daljše razdalje (7 vrst) in osebke v 1. letu spolne zrelosti (15 vrst). V posameznih bazenčkih riba plava z normalno hitrostjo, pri prečkanju ovir pa s pospešeno

hitrostjo. Selivkam na daljše razdalje hitrosti toka ne povzročajo težav, saj so njihove hitrosti plavanja večje od tistih v kanalu in pri oviri. Osebkom v 1. letu spolne zrelosti pri pisanki, navadnem globočku in okunu hitrosti toka v kanalu ne omogočajo prehoda. Nemoten prehod teh treh vrst bi lahko zagotovili s spremenjeno konfiguracijo dna ali pa z drugačnim tipom ovir.

## 6 ZAKLJUČEK

Pri načrtovanju izgradnje HE na reki Savi so bile v letih 82/83 in 85/87 opravljene raziskave, ki so zajemale: popis in razširjenost ribjih vrst, največjih drstišč do izliva Savinje in selitve rib. Rezultati raziskav so pokazali, kje bi bilo smiselno graditi steze in kje nadomestiti izpad ribjih vrst. Ribiči ga nadomeščajo z umetno vzrejo, umetnimi drstišči ali naseljevanjem. Zaradi postopne gradnje elektrarn na reki Savi se je pojavila potreba po ponovni oceni varovanja in ohranjanja ribjih vrst v novo nastalih pogojih.

Gradnja ribjih prehodov je svojevrstna. V tujini je opravljenih ogromno meritev. Tudi člankov na to temo je veliko. Enačbe za hitrost vodnega toka v kanalu so večinoma empirične in so določene iz laboratorijskih preskusov. V Sloveniji jih je malo, ki bi pravilno delovale in zagotavljale migracijo rib.

Glavni vzroki slabega delovanja ribjih prehodov (Larinier in sod., 2002):

- pomanjkanje privlačnosti (zanimanja): nepravilna izbira mesta lokacije, nezadosten pretok na mestu vhoda
- nepravilna oblika prehoda: zaradi spreminjanja višine vode v bazenih je otežena migracija rib gorvodno in dolvodno
- nepravilna izbira dimenzij: bazeni z napačnimi dimenzijami povzročajo nastanek turbulence in pomanjkanje kisika, neustrezen preliv med bazenoma, neustrezna globina, vrtinčenje (tokovnice ne usmerjajo rib skozi odprtine)
- ovire: slaba zaščita pred naplavinami zaradi nepravilne izbire lokacije, slabo vzdrževanje, neustrezni pretoki zaradi plavja
- slabo obratovanje naprav za regulacijo pretokov in prelivov med bazeni

Če pri sami gradnji ribjega prehoda načrtujemo mesto za zapornico, s tem preprečimo turbulenco in izboljšamo pretočno sposobnost na samem vhodu.

Izkušnje, pridobljene v Franciji kažejo, da sta pomanjkanje zanimanja in slabo vzdrževanje glavna vzroka slabega delovanja ribjih prehodov.

Lokacija ribjega prehoda naj bo čim bližje pregradi, kjer tok pritegne ribe do pregrade. Za usmerjanje rib v stezo ali prehod se pogosto uporablja dodatni curek vode. Dodatne količine vode zagotovimo s prepustom, speljanim mimo pregrade. Obratovanje ribje steze je potrebno redno preverjati in kontrolirati, če jo ribe sploh uporabljajo in v kakšni meri (merilni instrumenti, posebno oblikovane pasti za prestrezanje). Monitoring je potrebno izvajati takoj po končani gradnji steze ter neustrezne dele sanirati.

Pri načrtovanju ribjih prehodov je za ugotavljanje hitrostnih polj pri različni razporeditvi ovir potrebno uporabiti dvodimenzijske matematične modele. Le-ti lahko v primerjavi z enostavnejšimi 1D modeli bolj korektno prikažejo kompleksne tokovne razmere. Te morajo biti takšne, da ob upoštevanju plavalnih sposobnosti posameznih ribjih vrst zagotavljajo njihovo uspešno migracijo brez stresa in morebitnih poškodb. Temu cilju se izmed raziskanih konfiguracij, še najbolj približa varianta 3, ki jo priporočamo za dejansko izvedbo v primeru ribjega prehoda načrtovane HE Blanca.



## VIRI IN LITERATURA

### Literatura

Clay, C. H. (1961). Design of Fishways and Other Fish Facilities. Ottawa, The Department of Fisheries of Canada: 301 str.

Clay, C. H. (1995). Design of Fishways and Other Fish Facilities. Second Edition, Boca Raton, Lewis: 249 str.

Četina, M. (1998). Dvodimenzijski program PCFLOW2D za račun toka s prosto gladino. Gradivo za podiplomski študij, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 66 str.

Danish Hydraulic Institute-DHI (2005). MIKE 21 Flow Model, Hydrodynamic Module: Step-by-step training guide. Denmark: 66. str.

French, R. H. (1986). Open – channel hydraulics. New York, McGraw – Hill.

Giesecke, J., Mosonyi, E. (1997). Wasserkraft – Anlagen: str. 639-659.

Lah, A. (2002). Okoljski pojavi in pojmi: okoljsko izrazje v slovenskem in tujih jezikih z vsebinskimi pojasnili. Ljubljana, Svet za varstvo okolja republike Slovenije: 208 str.

Larinier, M., Travade, F., Porcher J. P. (2002). Fishways: Biological basis, design criteria and monitoring. Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture:208 str.

Povž, M. (2003). Smernice za upravljanje z ribjim življem v Savi od Savinje do jezu za JE Krško: ribji prehodi preko HE Vrhovo, HE Boštanj, JE Krško in jezu na Mirni v Boštanju. Poročilo, Ljubljana, Zavod za ribištvo Slovenije: 38 str.

Powers, P. D., Orsborn, J. F., Bumstead, T. W., Klinger – Kingsley, S., Mih, W. C. (1985). Fishways – An assessment of their development and design. Part 3 of 4: Final project report, Washington State University, Department of Civil and Environmental Engineering: 161 str.

Rajar, R. (1980). Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 279 str.

Report of the tenth session of the Sub – Committee on Fish Trade, FAO Fisheries Reports, (2006). Santiago de Compostela, Committee on Fisheries.

Rodi, W. (1993). Turbulence Models and Their Application in Hydraulics; A state-of-the-art review. IAHR Monograph Series, A. A. Balbema, Rotterdam: 104 str.

Steinman, F. (1999). Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 295 str.

Šumer, S., Povž, M. (2004). Ihtiološke raziskave Save od HE Vrhovo do JE Krško. Poročilo, Ljubljana, Zavod za ribištvo Slovenije: 121 str.

- 70 Hladnik, A. 2007. Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne.  
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer.

#### Elektronski viri

Brunner, Gary, W. (2002). HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, version 3.1.3 U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.  
<http://www.hec.usace.army.mil> (16. 7. 07)

Brunner, Gary, W. (2002). HEC-RAS, River Analysis System User's Manual, version 3.1.3 U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.  
<http://www.hec.usace.army.mil> (16. 7. 07)

## Zakoni in predpisi

Zakon o varstvu okolja (ZVO-1). Uradni list RS št. 39/06: 801-01/90-3/141.

## SLOVAR TUJK

ADI metoda	Alternirajoča implicitna metoda končnih razlik drugega reda točnosti po prostoru in času.
Bentos	Združba organizmov, ki živijo na morskem ali jezerskem dnu (globinska flora in favna).
Degradacija okolja	Proces, v katerem je okolje vedno bolj onesnaženo, izrabljeno in uničeno (ZVO-1, 2004).
Evtrofizacija	Je naravni proces pospešene rasti vodne vegetacije v stoječih vodah (Lah, 2002).
Fitofilne drstnice	Se drstijo med rastlinjem, ikre odlagajo na rastlinske dele ali dele rastlin (Povž, 2003).
Indiferentne vrste	Ribe tekočih in stoječih voda. Med njimi ločimo ribe, ki se razmnožujejo samo v pretočnih delih, tako v pretočnih kot v mirnih delih in take, ki se razmnožujejo samo v mirnih delih (Povž, 2003).
Limnofilne vrste	Ribe stoječih in počasi tekočih voda, ki se lahko razmnožujejo samo v mirni oz. stoječi vodi. Potrebe po kisiku so pri teh vrstah manjše, prenašajo višje temperature in so manj občutljive na organsko obremenjevanje vode (Povž, 2003).
Litofilne drstnice	Se drstijo na peščeni podlagi (pesek, prod) (Povž, 2003).
Lito-fitofilne drstnice	Se drstijo tako na peščeni podlagi kot na/med rastlinjem (Povž, 2003).

- Oligoreofilne vrste                      Ribe srednje tekočih voda. Med njimi ločimo ribe, ki se razmnožujejo samo v pretočnih delih in take, ki se razmnožujejo tako v pretočnih kot v mirnih delih (Povž, 2003).
- Reofilne vrste                              Potrebujemo hitro tekočo, hladno, čisto in s kisikom obogateno vodo (Povž, 2003).

- 74 Hladnik, A. 2007. Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne.  
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer.

## **PRILOGE**

PRILOGA 1: PREGLEDNICA REZULTATOV MODELA HEC-RAS V  
INTERPOLIRANIH PREREZIH ZA 1. RAČ. PRIMER

Profili	Kote dna (m)	Kote gladine (m)	$I_E$ (m/m)	$v$ (m/s)	$h$ (m)	$Fr$ (-)
9	170.2	170.7	0.0012	0.24	0.52	0.11
8.9*	170.2	170.7	0.0012	0.24	0.51	0.11
8.8*	170.2	170.7	0.0013	0.24	0.51	0.11
8.7*	170.2	170.7	0.0013	0.24	0.51	0.11
8.6*	170.2	170.7	0.0013	0.24	0.51	0.11
8.5*	170.2	170.7	0.0013	0.25	0.51	0.11
8.4*	170.2	170.7	0.0013	0.25	0.51	0.11
8.3*	170.2	170.7	0.0013	0.25	0.51	0.11
8.22	170.2	170.7	0.0020	0.25	0.51	0.11
8.21	170.2	170.7	0.0020	0.25	0.51	0.11
8.2*	170.2	170.7	0.0021	0.25	0.51	0.11
8.12	170.2	170.7	0.0021	0.25	0.5	0.11
8.11	170.2	170.7	0.0021	0.25	0.5	0.11
8.1*	170.2	170.7	0.0021	0.25	0.5	0.11
8.05	Ovira					
8	170.2	170.4	0.0332	0.6	0.21	0.42
7	169.9	170.4	0.0019	0.24	0.52	0.11
6.92	169.9	170.4	0.0019	0.24	0.52	0.11
6.91	169.9	170.4	0.0019	0.24	0.52	0.11
6.9*	169.9	170.4	0.0019	0.24	0.52	0.11
6.82	169.9	170.4	0.0019	0.24	0.52	0.11
6.81	169.9	170.4	0.0019	0.24	0.52	0.11
6.8*	169.9	170.4	0.0019	0.24	0.52	0.11
6.7*	169.9	170.4	0.0012	0.24	0.51	0.11
6.6*	169.9	170.4	0.0013	0.24	0.51	0.11
6.5*	169.9	170.4	0.0013	0.24	0.51	0.11
6.4*	169.9	170.4	0.0013	0.24	0.51	0.11
6.3*	169.9	170.4	0.0013	0.25	0.51	0.11
6.22	169.9	170.4	0.0020	0.25	0.51	0.11
6.21	169.9	170.4	0.0020	0.25	0.51	0.11
6.2*	169.9	170.4	0.0020	0.25	0.51	0.11
6.12	169.9	170.4	0.0020	0.25	0.51	0.11
6.11	169.9	170.4	0.0020	0.25	0.51	0.11
6.1*	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.51	0.11
6.05	Ovira					
6	169.9	170.1	0.0349	0.61	0.21	0.43
5	169.6	170.1	0.0019	0.24	0.52	0.11
4.92	169.6	170.1	0.0019	0.24	0.52	0.11
4.91	169.6	170.1	0.0019	0.24	0.52	0.11
4.9*	169.6	170.1	0.0019	0.24	0.51	0.11
4.82	169.6	170.1	0.0019	0.24	0.51	0.11
4.81	169.6	170.1	0.0020	0.24	0.51	0.11
4.8*	169.6	170.1	0.0020	0.24	0.51	0.11
4.7*	169.6	170.1	0.0013	0.24	0.51	0.11
4.6*	169.6	170.1	0.0013	0.25	0.51	0.11
4.5*	169.6	170.1	0.0013	0.25	0.51	0.11
4.4*	169.6	170.1	0.0013	0.25	0.51	0.11
4.3*	169.6	170.1	0.0013	0.25	0.51	0.11
4.22	169.6	170.1	0.0020	0.25	0.51	0.11
4.21	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.51	0.11

Profili	Kote dna (m)	Kote gladine (m)	$I_E$ (m/m)	$v$ (m/s)	$h$ (m)	$Fr$ (-)
4.2*	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.12	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.11	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.1*	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.05	Ovira					
4	169.6	169.8	0.0342	0.61	0.21	0.42
3	169.3	169.8	0.0019	0.24	0.52	0.11
2.92	169.3	169.8	0.0019	0.24	0.52	0.11
2.91	169.3	169.8	0.0019	0.24	0.52	0.11
2.9*	169.3	169.8	0.0019	0.24	0.52	0.11
2.82	169.3	169.8	0.0019	0.24	0.51	0.11
2.81	169.3	169.8	0.0019	0.24	0.51	0.11
2.8*	169.3	169.8	0.0020	0.24	0.51	0.11
2.7*	169.3	169.8	0.0013	0.24	0.51	0.11
2.6*	169.3	169.8	0.0013	0.24	0.51	0.11
2.5*	169.3	169.8	0.0013	0.25	0.51	0.11
2.4*	169.3	169.8	0.0013	0.25	0.51	0.11
2.3*	169.3	169.8	0.0013	0.25	0.51	0.11
2.22	169.3	169.8	0.0020	0.25	0.51	0.11
2.21	169.3	169.8	0.0020	0.25	0.51	0.11
2.2*	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.51	0.11
2.12	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.11	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.1*	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.05	Ovira					
2	169.3	169.5	0.0331	0.6	0.21	0.42
1	169	169.5	0.0019	0.24	0.52	0.11
0.92	169	169.5	0.0019	0.24	0.52	0.11
0.91	169	169.5	0.0019	0.24	0.52	0.11
.9*	169	169.5	0.0019	0.24	0.52	0.11
0.82	169	169.5	0.0019	0.24	0.52	0.11
0.81	169	169.5	0.0019	0.24	0.52	0.11
.8*	169	169.5	0.0019	0.24	0.52	0.11
.7*	169	169.5	0.0012	0.24	0.51	0.11
.6*	169	169.5	0.0013	0.24	0.51	0.11
.5*	169	169.5	0.0013	0.24	0.51	0.11
.4*	169	169.5	0.0013	0.24	0.51	0.11
.3*	169	169.5	0.0013	0.25	0.51	0.11
0.22	169	169.5	0.0013	0.25	0.51	0.11
0.21	169	169.5	0.0013	0.25	0.51	0.11
.2*	169	169.5	0.0013	0.25	0.51	0.11
0.12	169	169.5	0.0020	0.25	0.51	0.11
0.11	169	169.5	0.0020	0.25	0.51	0.11
.1*	169	169.5	0.0020	0.25	0.51	0.11
0.05	Ovira					
0	169	169.2	0.0289	0.57	0.22	0.39



**PRILOGA 2: PREGLEDNICA REZULTATOV MODELA HEC-RAS V  
INTERPOLIRANIH PREREZIH ZA 2. RAČ. PRIMER**

Profili	Kote dna (m)	Kote gladine (m)	$I_E$ (m/m)	$v$ (m/s)	$h$ (m)	$Fr$ (-)
9	170.2	170.7	0.0011	0.23	0.54	0.1
8.9*	170.2	170.7	0.0011	0.23	0.54	0.1
8.8*	170.2	170.7	0.0011	0.23	0.54	0.1
8.7*	170.2	170.7	0.0011	0.23	0.54	0.1
8.6*	170.2	170.7	0.0011	0.23	0.54	0.1
8.5*	170.2	170.7	0.0011	0.23	0.54	0.1
8.4*	170.2	170.7	0.0011	0.23	0.53	0.1
8.3*	170.2	170.7	0.0011	0.23	0.53	0.1
8.22	170.2	170.7	0.0017	0.23	0.53	0.1
8.21	170.2	170.7	0.0018	0.23	0.53	0.1
8.2*	170.2	170.7	0.0018	0.24	0.53	0.1
8.12	170.2	170.7	0.0018	0.24	0.53	0.1
8.11	170.2	170.7	0.0018	0.24	0.53	0.1
8.1*	170.2	170.7	0.0018	0.24	0.53	0.1
8.05	Ovira					
8	170.2	170.4	0.0231	0.54	0.23	0.35
7	169.9	170.4	0.0017	0.23	0.54	0.1
6.92	169.9	170.4	0.0017	0.23	0.54	0.1
6.91	169.9	170.4	0.0017	0.23	0.54	0.1
6.9*	169.9	170.4	0.0017	0.23	0.54	0.1
6.82	169.9	170.4	0.0017	0.23	0.54	0.1
6.81	169.9	170.4	0.0017	0.23	0.54	0.1
6.8*	169.9	170.4	0.0017	0.23	0.54	0.1
6.7*	169.9	170.4	0.0011	0.23	0.54	0.1
6.6*	169.9	170.4	0.0011	0.23	0.54	0.1
6.5*	169.9	170.4	0.0011	0.23	0.54	0.1
6.4*	169.9	170.4	0.0011	0.23	0.53	0.1
6.3*	169.9	170.4	0.0011	0.23	0.53	0.1
6.22	169.9	170.4	0.0017	0.23	0.53	0.1
6.21	169.9	170.4	0.0018	0.23	0.53	0.1
6.2*	169.9	170.4	0.0018	0.24	0.53	0.1
6.12	169.9	170.4	0.0018	0.24	0.53	0.1
6.11	169.9	170.4	0.0018	0.24	0.53	0.1
6.1*	169.9	170.4	0.0018	0.24	0.53	0.1
6.05	Ovira					
6	169.9	170.1	0.0233	0.54	0.23	0.35
5	169.6	170.1	0.0017	0.23	0.54	0.1
4.92	169.6	170.1	0.0017	0.23	0.54	0.1
4.91	169.6	170.1	0.0017	0.23	0.54	0.1
4.9*	169.6	170.1	0.0017	0.23	0.54	0.1
4.81	169.6	170.1	0.0017	0.23	0.54	0.1
4.8*	169.6	170.1	0.0017	0.23	0.54	0.1
4.7*	169.6	170.1	0.0011	0.23	0.54	0.1
4.6*	169.6	170.1	0.0011	0.23	0.54	0.1
4.5*	169.6	170.1	0.0011	0.23	0.54	0.1
4.4*	169.6	170.1	0.0011	0.23	0.53	0.1
4.3*	169.6	170.1	0.0011	0.23	0.53	0.1
4.22	169.6	170.1	0.0017	0.23	0.53	0.1
4.21	169.6	170.1	0.0017	0.23	0.53	0.1

Profili	Kote dna (m)	Kote gladine (m)	$I_E$ (m/m)	$v$ (m/s)	$h$ (m)	$Fr$ (-)
4.2*	169.6	170.1	0.0018	0.23	0.53	0.1
4.12	169.6	170.1	0.0018	0.24	0.53	0.1
4.11	169.6	170.1	0.0018	0.24	0.53	0.1
4.1*	169.6	170.1	0.0018	0.24	0.53	0.1
4.05	Ovira					
4	169.6	169.8	0.0230	0.53	0.23	0.35
3	169.3	169.8	0.0017	0.23	0.54	0.1
2.92	169.3	169.8	0.0017	0.23	0.54	0.1
2.91	169.3	169.8	0.0017	0.23	0.54	0.1
2.9*	169.3	169.8	0.0017	0.23	0.54	0.1
2.82	169.3	169.8	0.0017	0.23	0.54	0.1
2.81	169.3	169.8	0.0017	0.23	0.54	0.1
2.8*	169.3	169.8	0.0017	0.23	0.54	0.1
2.7*	169.3	169.8	0.0011	0.23	0.54	0.1
2.6*	169.3	169.8	0.0011	0.23	0.54	0.1
2.5*	169.3	169.8	0.0011	0.23	0.54	0.1
2.4*	169.3	169.8	0.0011	0.23	0.53	0.1
2.3*	169.3	169.8	0.0011	0.23	0.53	0.1
2.22	169.3	169.8	0.0017	0.23	0.53	0.1
2.21	169.3	169.8	0.0018	0.23	0.53	0.1
2.2*	169.3	169.8	0.0018	0.24	0.53	0.1
2.12	169.3	169.8	0.0018	0.24	0.53	0.1
2.11	169.3	169.8	0.0018	0.24	0.53	0.1
2.1*	169.3	169.8	0.0018	0.24	0.53	0.1
2.05	Ovira					
2	169.3	169.5	0.0234	0.54	0.23	0.36
1	169	169.5	0.0017	0.23	0.54	0.1
0.92	169	169.5	0.0017	0.23	0.54	0.1
0.91	169	169.5	0.0017	0.23	0.54	0.1
.9*	169	169.5	0.0017	0.23	0.54	0.1
0.81	169	169.5	0.0017	0.23	0.54	0.1
.8*	169	169.5	0.0017	0.23	0.54	0.1
.7*	169	169.5	0.0011	0.23	0.54	0.1
.6*	169	169.5	0.0011	0.23	0.54	0.1
.5*	169	169.5	0.0011	0.23	0.53	0.1
.4*	169	169.5	0.0011	0.23	0.53	0.1
.3*	169	169.5	0.0011	0.23	0.53	0.1
0.22	169	169.5	0.0011	0.23	0.53	0.1
0.21	169	169.5	0.0011	0.24	0.53	0.1
.2*	169	169.5	0.0011	0.24	0.53	0.1
0.12	169	169.5	0.0018	0.24	0.53	0.1
0.11	169	169.5	0.0018	0.24	0.53	0.1
.1*	169	169.5	0.0018	0.24	0.53	0.1
0.05	Ovira					
0	169	169.2	0.0289	0.57	0.22	0.39

**PRILOGA 3: PREGLEDNICA REZULTATOV MODELA HEC-RAS V  
INTERPOLIRANIH PREREZIH ZA 3. RAČ. PRIMER**

Profili	Kote dna (m)	Kote gladine (m)	$I_E$ (m/m)	$v$ (m/s)	$h$ (m)	$Fr$ (-)
9	170.2	170.7	0.0013	0.25	0.5	0.11
8.9*	170.2	170.7	0.0013	0.25	0.5	0.11
8.8*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.5	0.11
8.7*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.5	0.11
8.6*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.5	0.11
8.5*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.5	0.11
8.4*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.5	0.11
8.3*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.49	0.11
8.22	170.2	170.7	0.0022	0.25	0.49	0.12
8.21	170.2	170.7	0.0022	0.25	0.49	0.12
8.2*	170.2	170.7	0.0022	0.25	0.49	0.12
8.12	170.2	170.7	0.0022	0.25	0.49	0.12
8.11	170.2	170.7	0.0022	0.25	0.49	0.12
8.1*	170.2	170.7	0.0023	0.26	0.49	0.12
8.05	Ovira					
8	170.2	170.4	0.0430	0.65	0.19	0.47
7	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.92	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.91	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.9*	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.82	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.81	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.8*	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.7*	169.9	170.4	0.0014	0.25	0.5	0.11
6.6*	169.9	170.4	0.0014	0.25	0.5	0.11
6.5*	169.9	170.4	0.0014	0.25	0.5	0.11
6.4*	169.9	170.4	0.0014	0.25	0.5	0.11
6.3*	169.9	170.4	0.0014	0.25	0.49	0.11
6.22	169.9	170.4	0.0022	0.25	0.49	0.12
6.21	169.9	170.4	0.0022	0.25	0.49	0.12
6.2*	169.9	170.4	0.0022	0.25	0.49	0.12
6.12	169.9	170.4	0.0022	0.25	0.49	0.12
6.11	169.9	170.4	0.0022	0.25	0.49	0.12
6.1*	169.9	170.4	0.0023	0.26	0.49	0.12
6.05	Ovira					
6	169.9	170.1	0.0432	0.65	0.19	0.47
5	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.92	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.91	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.9*	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.82	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.81	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.8*	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.7*	169.6	170.1	0.0014	0.25	0.5	0.11
4.6*	169.6	170.1	0.0014	0.25	0.5	0.11
4.5*	169.6	170.1	0.0014	0.25	0.5	0.11
4.4*	169.6	170.1	0.0014	0.25	0.5	0.11
4.3*	169.6	170.1	0.0014	0.25	0.49	0.11
4.22	169.6	170.1	0.0022	0.25	0.49	0.12
4.21	169.6	170.1	0.0022	0.25	0.49	0.12

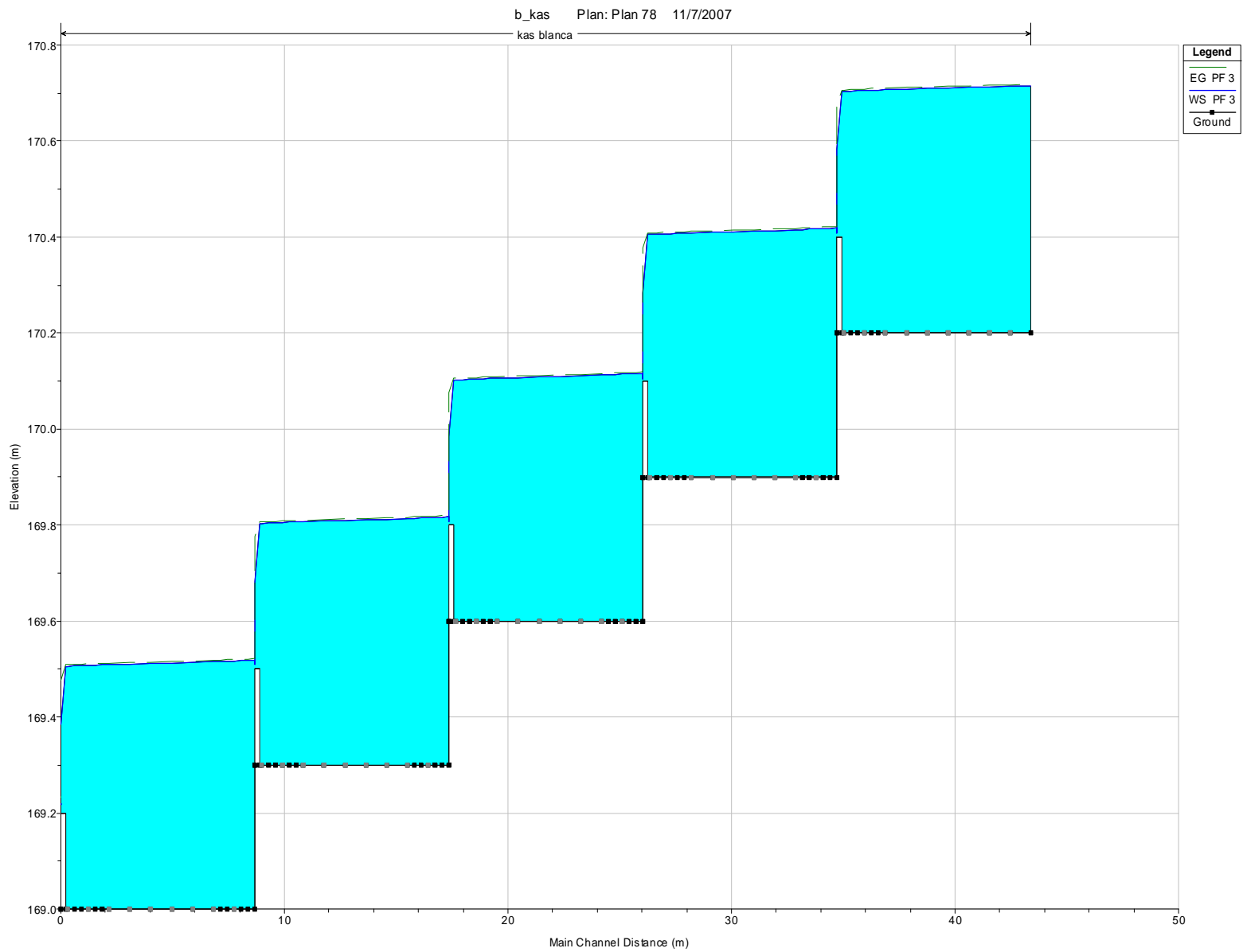
Profili	Kote dna (m)	Kote gladine (m)	$I_E$ (m/m)	$v$ (m/s)	$h$ (m)	$Fr$ (-)
4.2*	169.6	170.1	0.0022	0.25	0.49	0.12
4.12	169.6	170.1	0.0022	0.25	0.49	0.12
4.11	169.6	170.1	0.0022	0.25	0.49	0.12
4.1*	169.6	170.1	0.0023	0.26	0.49	0.12
4.05	Ovira					
4	169.6	169.8	0.0430	0.65	0.19	0.47
3	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.92	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.91	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.9*	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.82	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.81	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.8*	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.7*	169.3	169.8	0.0014	0.25	0.5	0.11
2.6*	169.3	169.8	0.0014	0.25	0.5	0.11
2.5*	169.3	169.8	0.0014	0.25	0.5	0.11
2.4*	169.3	169.8	0.0014	0.25	0.5	0.11
2.3*	169.3	169.8	0.0014	0.25	0.49	0.11
2.22	169.3	169.8	0.0022	0.25	0.49	0.12
2.21	169.3	169.8	0.0022	0.25	0.49	0.12
2.2*	169.3	169.8	0.0022	0.25	0.49	0.12
2.12	169.3	169.8	0.0022	0.25	0.49	0.12
2.11	169.3	169.8	0.0022	0.25	0.49	0.12
2.1*	169.3	169.8	0.0023	0.26	0.49	0.12
2.05	Ovira					
2	169.3	169.5	0.0438	0.65	0.19	0.48
1	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
0.92	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
0.91	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
.9*	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
0.82	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
0.81	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
.8*	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
.7*	169	169.5	0.0014	0.25	0.5	0.11
.6*	169	169.5	0.0014	0.25	0.5	0.11
.5*	169	169.5	0.0014	0.25	0.5	0.11
.4*	169	169.5	0.0014	0.25	0.49	0.11
.3*	169	169.5	0.0014	0.25	0.49	0.12
0.22	169	169.5	0.0014	0.25	0.49	0.12
0.21	169	169.5	0.0014	0.25	0.49	0.12
.2*	169	169.5	0.0014	0.25	0.49	0.12
0.12	169	169.5	0.0022	0.25	0.49	0.12
0.11	169	169.5	0.0023	0.25	0.49	0.12
.1*	169	169.5	0.0023	0.26	0.49	0.12
0.05	Ovira					
0	169	169.2	0.0289	0.57	0.22	0.39

**PRILOGA 4: PREGLEDNICA REZULTATOV MODELA HEC-RAS V  
INTERPOLIRANIH PREREZIH ZA 4. RAČ. PRIMER**

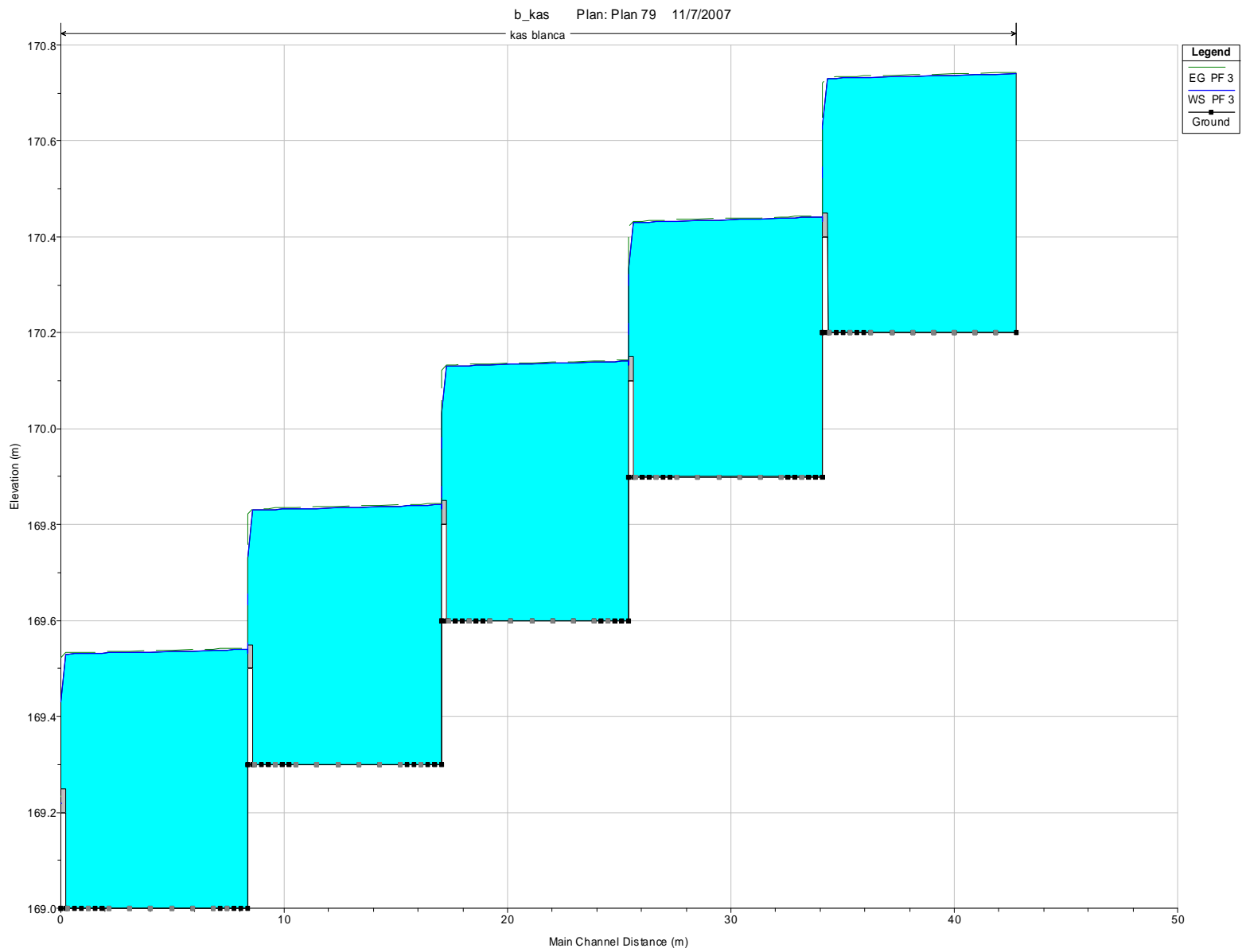
Profili	Kote dna (m)	Kote gladine (m)	IE (m/m)	$v$ (m/s)	$h$ (m)	$Fr$ (-)
9	170.2	170.7	0.0013	0.25	0.5	0.11
8.9*	170.2	170.7	0.0013	0.25	0.5	0.11
8.8*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.5	0.11
8.7*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.5	0.11
8.6*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.5	0.11
8.5*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.5	0.11
8.4*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.5	0.11
8.3*	170.2	170.7	0.0014	0.25	0.49	0.11
8.22	170.2	170.7	0.0022	0.25	0.49	0.12
8.21	170.2	170.7	0.0022	0.25	0.49	0.12
8.2*	170.2	170.7	0.0022	0.25	0.49	0.12
8.12	170.2	170.7	0.0022	0.25	0.49	0.12
8.11	170.2	170.7	0.0023	0.25	0.49	0.12
8.1*	170.2	170.7	0.0023	0.26	0.49	0.12
8.06	Ovira					
8.05	170.2	170.4	0.0263	0.56	0.22	0.38
8.01	Ovira					
8	170.2	170.4	0.0431	0.65	0.19	0.47
7	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.92	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.91	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.9*	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.82	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.81	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.8*	169.9	170.4	0.0021	0.25	0.5	0.11
6.7*	169.9	170.4	0.0014	0.25	0.5	0.11
6.6*	169.9	170.4	0.0014	0.25	0.5	0.11
6.5*	169.9	170.4	0.0014	0.25	0.5	0.11
6.4*	169.9	170.4	0.0014	0.25	0.5	0.11
6.3*	169.9	170.4	0.0014	0.25	0.49	0.11
6.22	169.9	170.4	0.0022	0.25	0.49	0.12
6.21	169.9	170.4	0.0022	0.25	0.49	0.12
6.2*	169.9	170.4	0.0022	0.25	0.49	0.12
6.12	169.9	170.4	0.0022	0.25	0.49	0.12
6.11	169.9	170.4	0.0023	0.25	0.49	0.12
6.1*	169.9	170.4	0.0023	0.26	0.49	0.12
6.06	Ovira					
6.05	169.9	170.1	0.0263	0.56	0.22	0.38
6.01	Ovira					
6	169.9	170.1	0.0434	0.65	0.19	0.47
5	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.92	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.91	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.9*	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.82	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.81	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.8*	169.6	170.1	0.0021	0.25	0.5	0.11
4.7*	169.6	170.1	0.0014	0.25	0.5	0.11
4.6*	169.6	170.1	0.0014	0.25	0.5	0.11
4.5*	169.6	170.1	0.0014	0.25	0.5	0.11
4.4*	169.6	170.1	0.0014	0.25	0.5	0.11
4.3*	169.6	170.1	0.0014	0.25	0.49	0.11
4.22	169.6	170.1	0.0022	0.25	0.49	0.12

Profili	Kote dna (m)	Kote gladine (m)	IE (m/m)	$v$ (m/s)	$h$ (m)	$Fr$ (-)
4.21	169.6	170.1	0.0022	0.25	0.49	0.12
4.2*	169.6	170.1	0.0022	0.25	0.49	0.12
4.12	169.6	170.1	0.0022	0.25	0.49	0.12
4.11	169.6	170.1	0.0023	0.25	0.49	0.12
4.1*	169.6	170.1	0.0023	0.26	0.49	0.12
4.06	Ovira					
4.05	169.6	169.8	0.0263	0.56	0.22	0.38
4.01	Ovira					
4	169.6	169.8	0.0431	0.65	0.19	0.47
3	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.92	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.91	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.9*	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.82	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.81	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.8*	169.3	169.8	0.0021	0.25	0.5	0.11
2.7*	169.3	169.8	0.0014	0.25	0.5	0.11
2.6*	169.3	169.8	0.0014	0.25	0.5	0.11
2.5*	169.3	169.8	0.0014	0.25	0.5	0.11
2.4*	169.3	169.8	0.0014	0.25	0.5	0.11
2.3*	169.3	169.8	0.0014	0.25	0.49	0.11
2.22	169.3	169.8	0.0022	0.25	0.49	0.12
2.21	169.3	169.8	0.0022	0.25	0.49	0.12
2.2*	169.3	169.8	0.0022	0.25	0.49	0.12
2.12	169.3	169.8	0.0022	0.25	0.49	0.12
2.11	169.3	169.8	0.0023	0.25	0.49	0.12
2.1*	169.3	169.8	0.0023	0.26	0.49	0.12
2.06	Ovira					
2.05	169.3	169.5	0.0264	0.56	0.22	0.38
2.01	Ovira					
2	169.3	169.5	0.0436	0.65	0.19	0.48
1	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
0.92	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
0.91	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
.9*	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
0.82	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
0.81	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
.8*	169	169.5	0.0021	0.25	0.5	0.11
.7*	169	169.5	0.0014	0.25	0.5	0.11
.6*	169	169.5	0.0014	0.25	0.5	0.11
.5*	169	169.5	0.0014	0.25	0.5	0.11
.4*	169	169.5	0.0014	0.25	0.49	0.11
.3*	169	169.5	0.0014	0.25	0.49	0.12
0.22	169	169.5	0.0014	0.25	0.49	0.12
0.21	169	169.5	0.0014	0.25	0.49	0.12
.2*	169	169.5	0.0014	0.25	0.49	0.12
0.12	169	169.5	0.0022	0.25	0.49	0.12
0.11	169	169.5	0.0022	0.25	0.49	0.12
.1*	169	169.5	0.0023	0.26	0.49	0.12
0.06	Ovira					
0.05	169	169.2	0.0236	0.54	0.23	0.36
0.01	Ovira					
0	169	169.2	0.0289	0.57	0.22	0.39

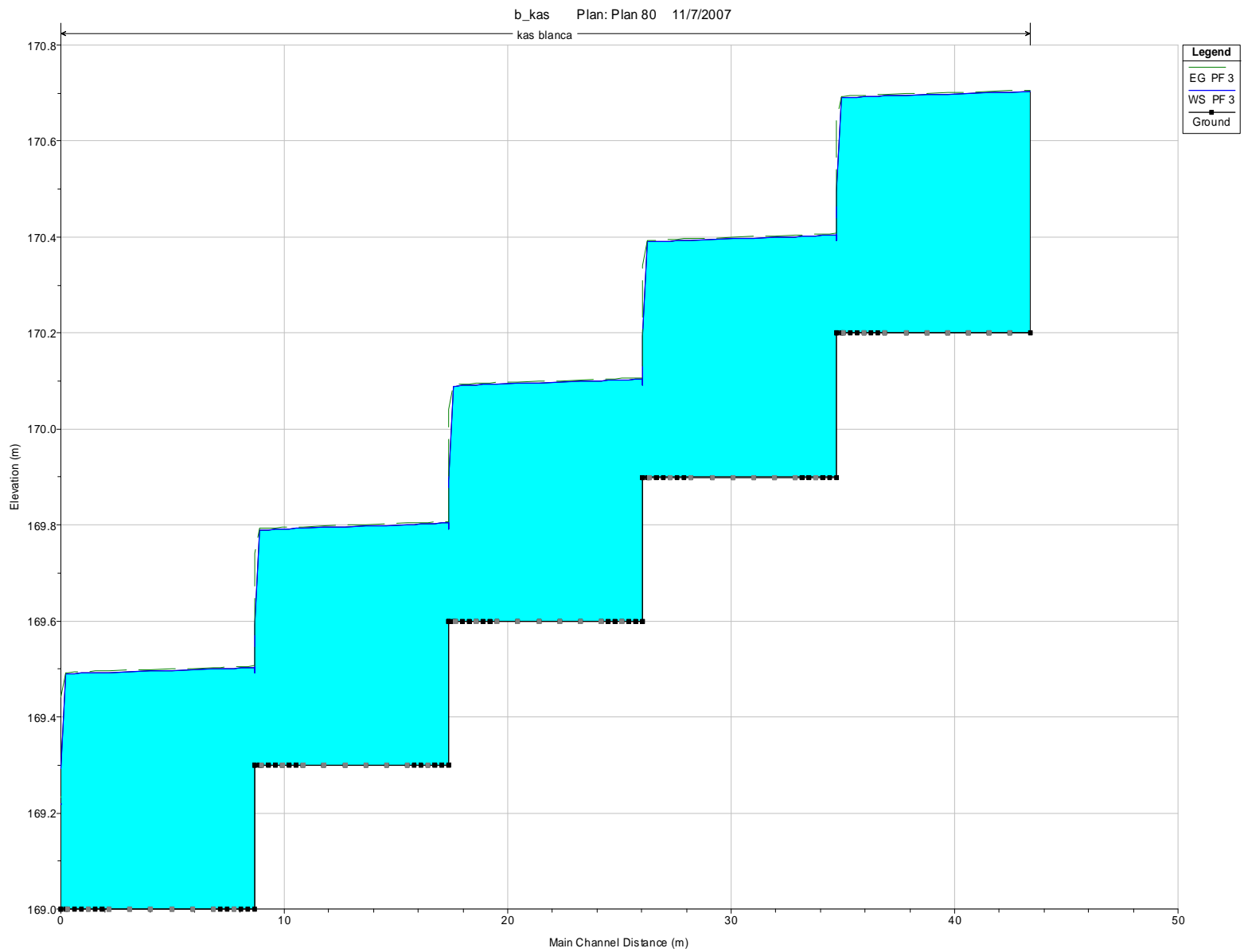
PRÍLOGA 5: POTEK GLADINE ID MODELA V VZDOLŽNEM PREREZU ZA 1.  
PRIMER (HEC-RAS)



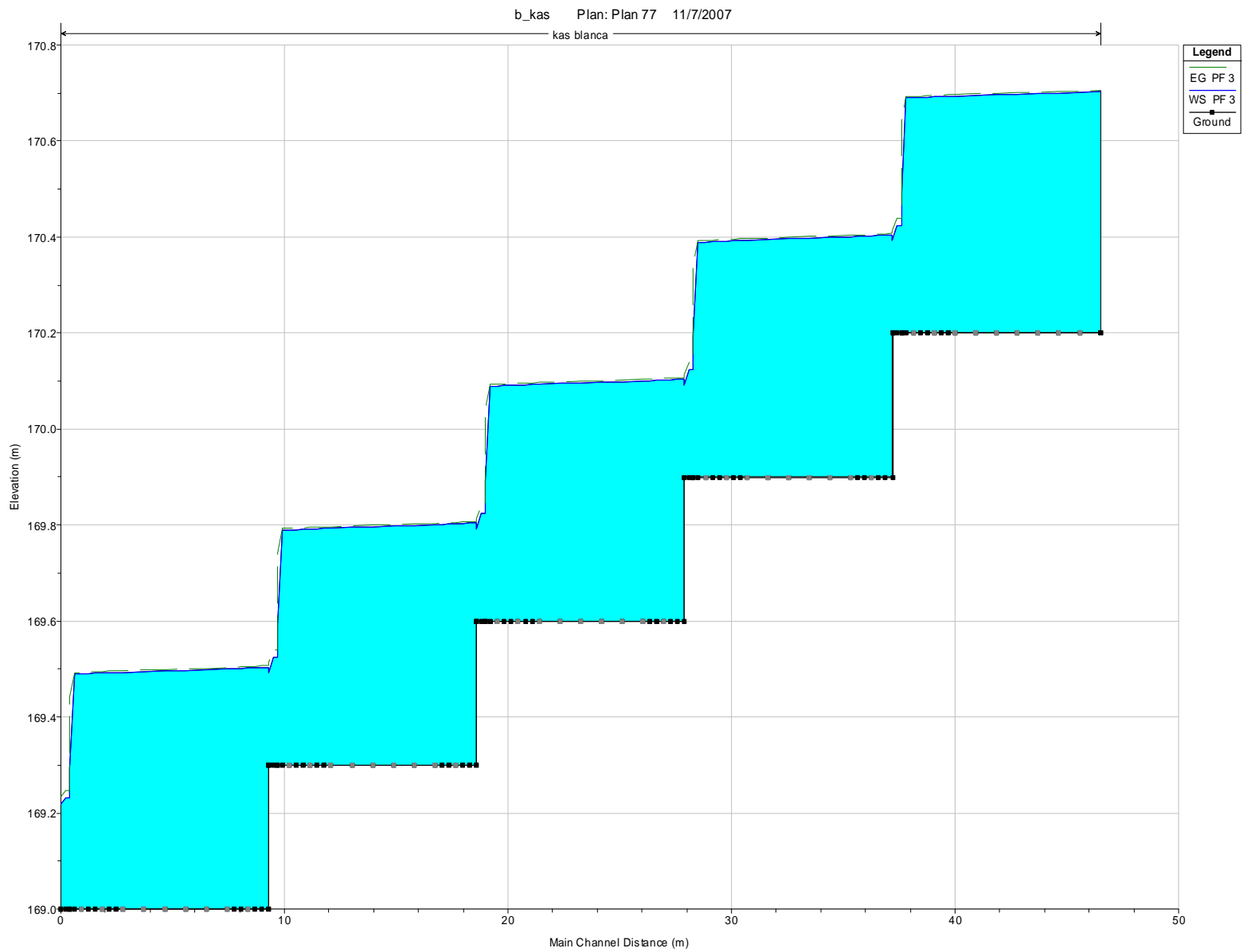
PRÍLOGA 6: POTEK GLADINE ID MODELA V VZDOLŽNEM PREREZU ZA 2.  
PRIMER (HEC-RAS)



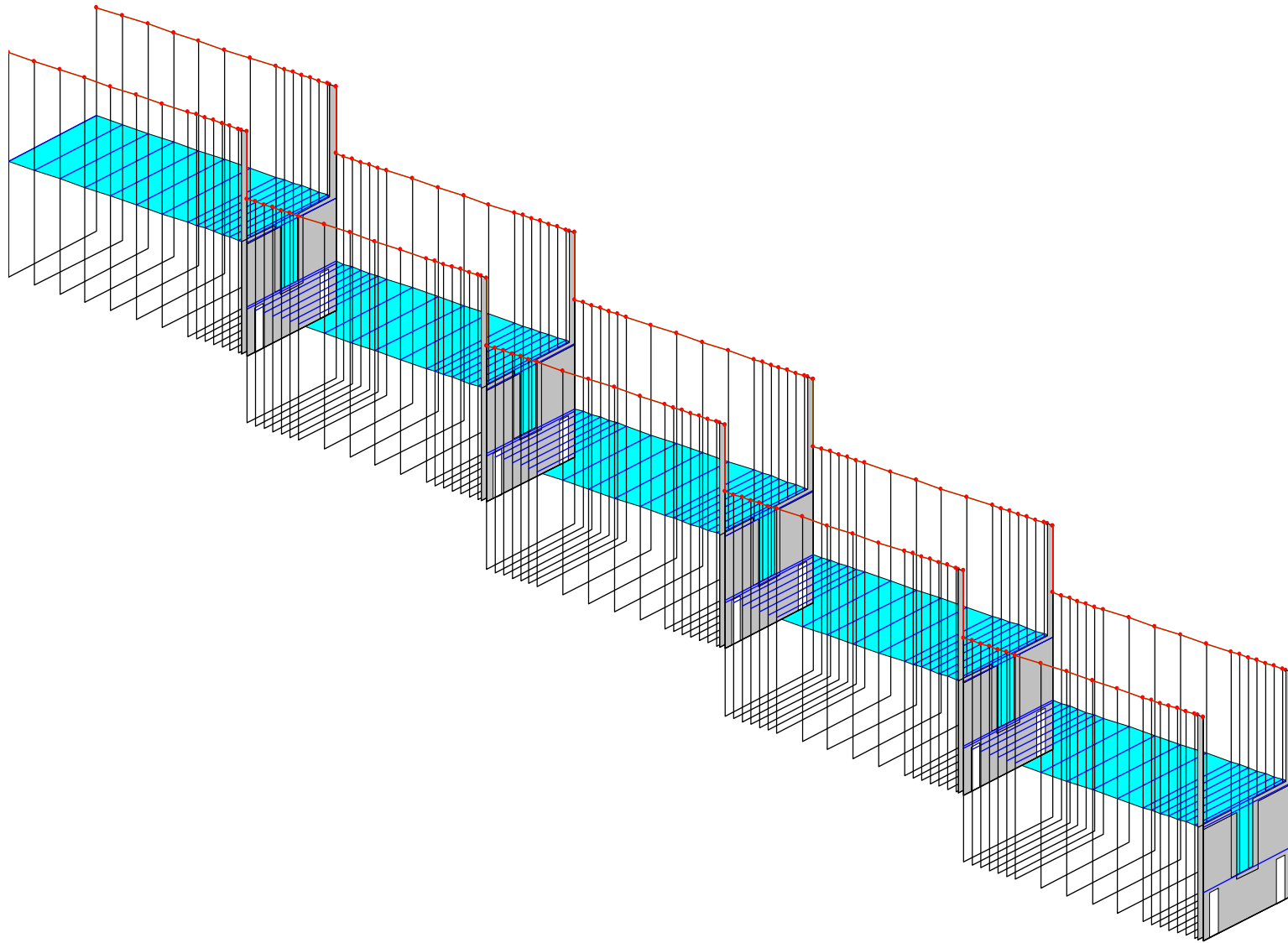
PRILOGA 7: POTEK GLADINE ID MODELA V VZDOLŽNEM PREREZU ZA 3.  
PRIMER (HEC-RAS)







PRÍLOGA 8: POTEK GLADINE ID MODELA V VZDOLŽNEM PREREZU ZA 4.  
PRIMER (HEC-RAS)



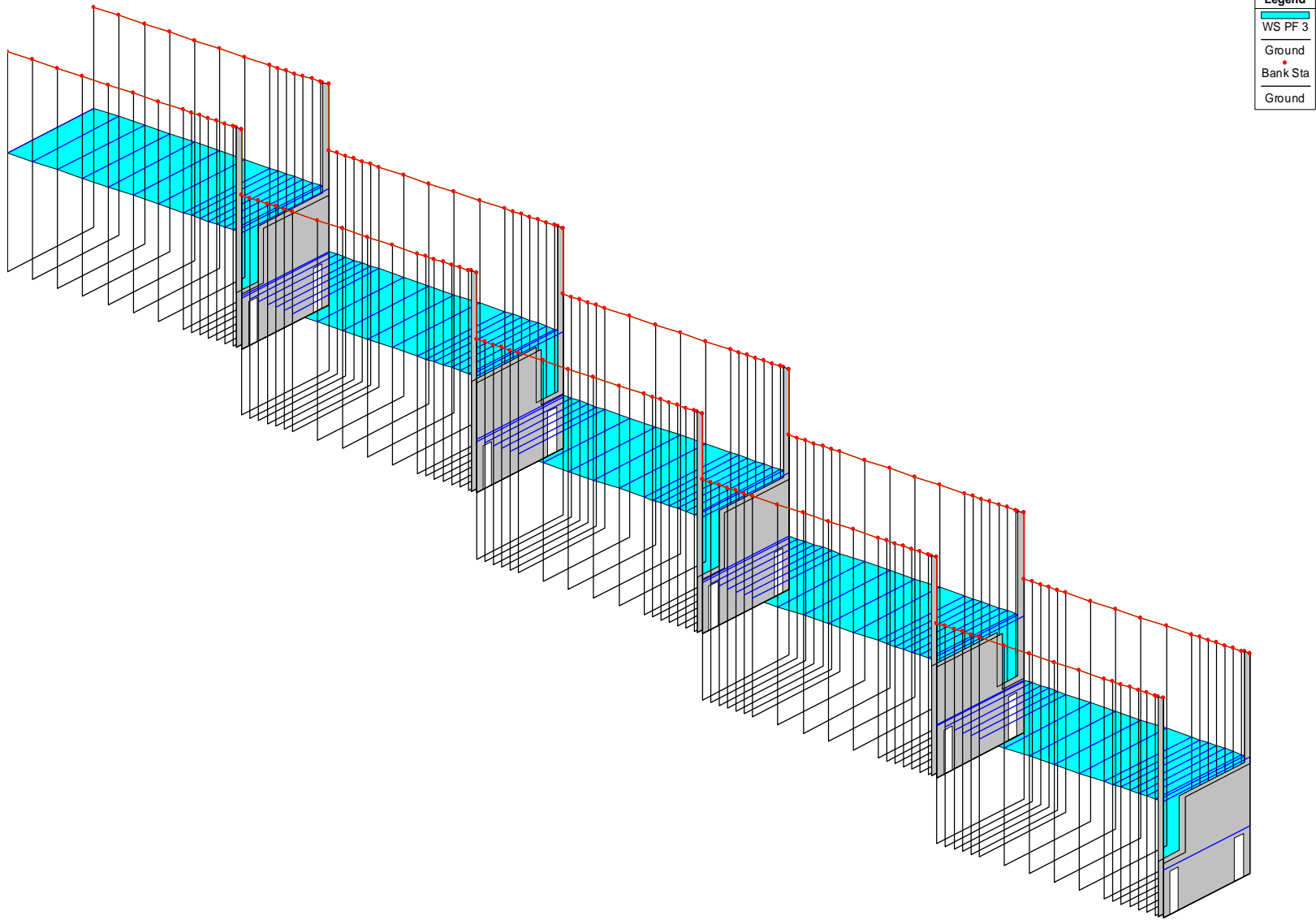
b\_kas Plan: Plan 74 11/7/2007



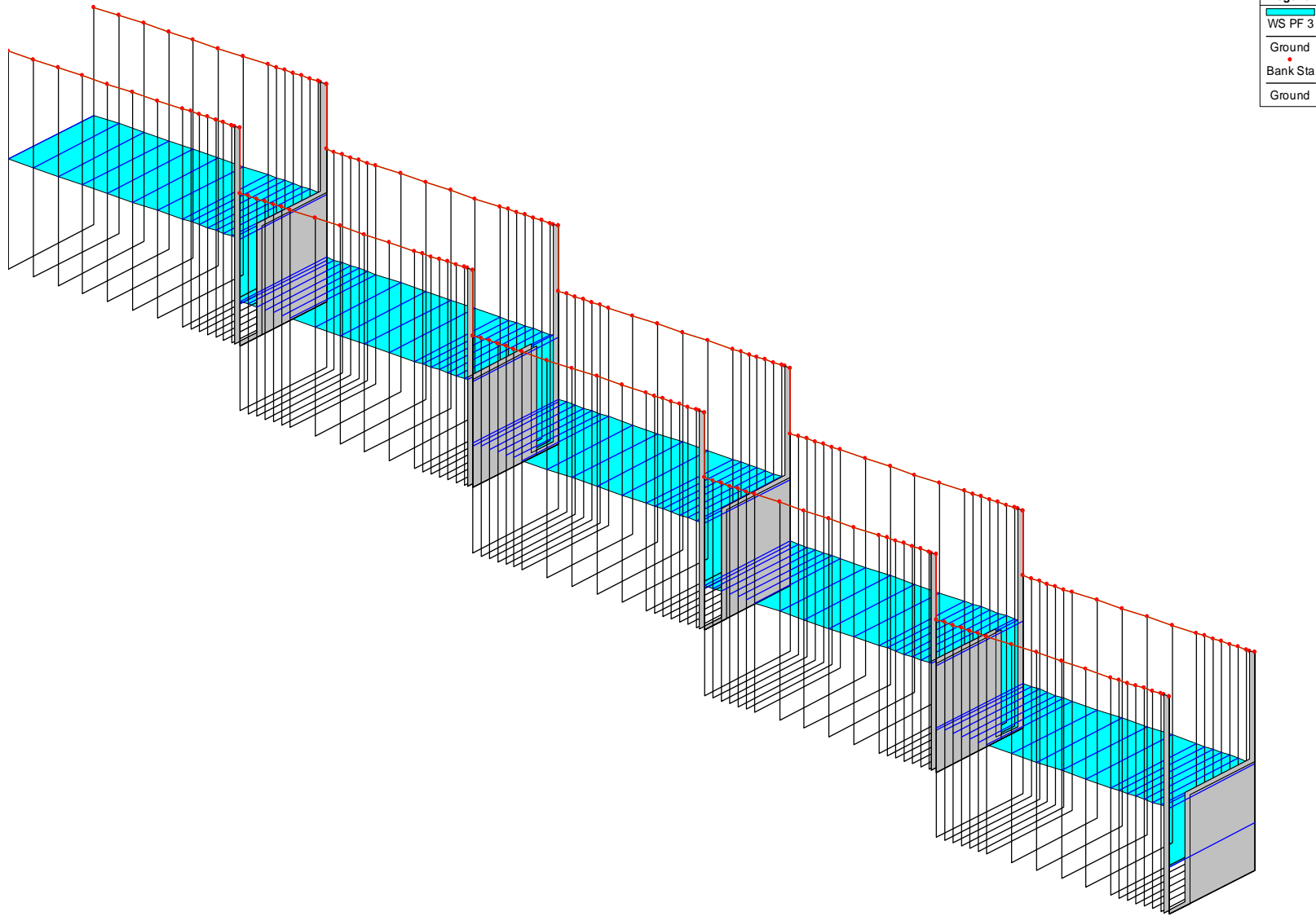
Legend	
	WS PF 3
	Ground
	Bank Sta
	Ground



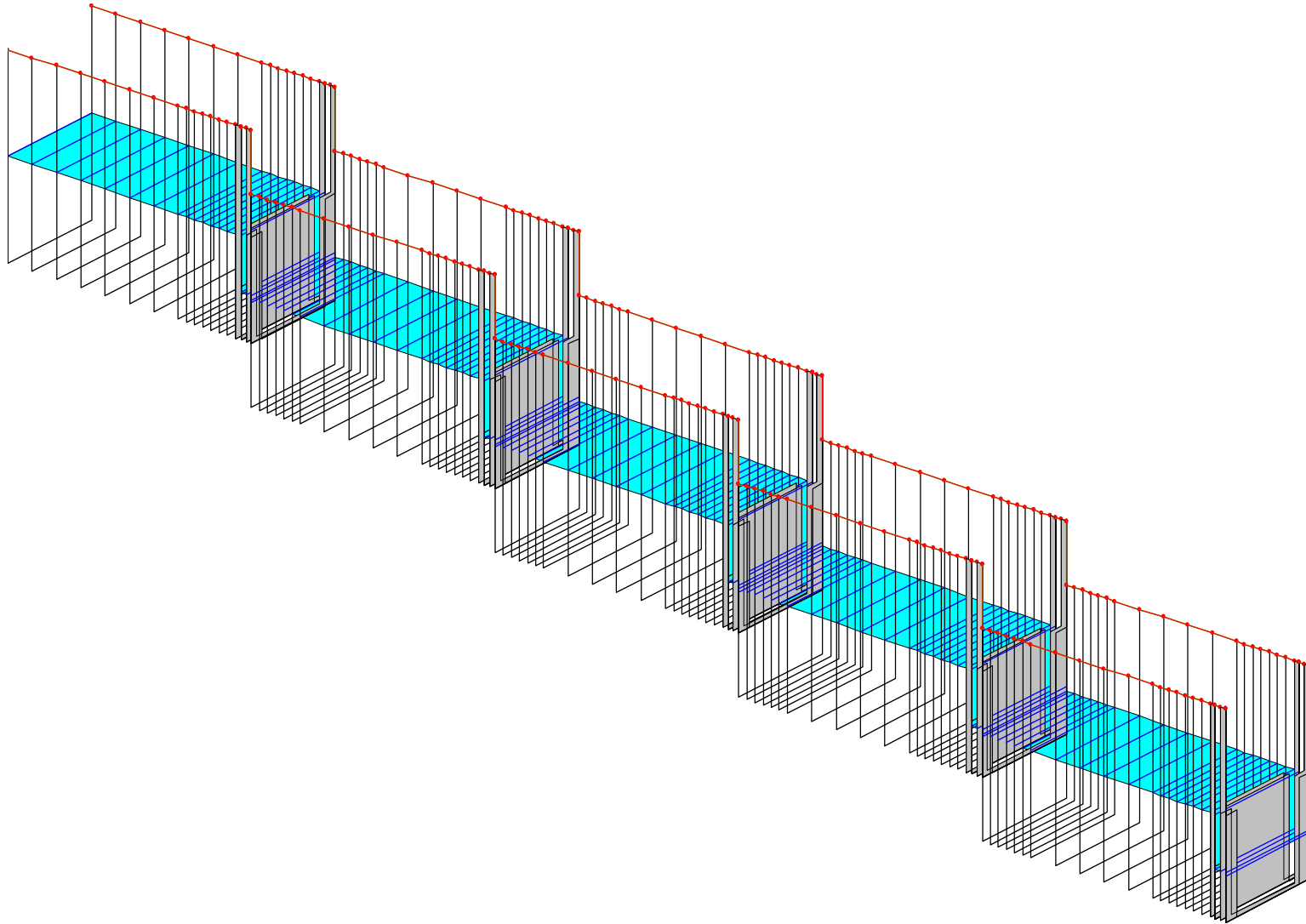
b\_kas Plan: Plan 75 11/7/2007







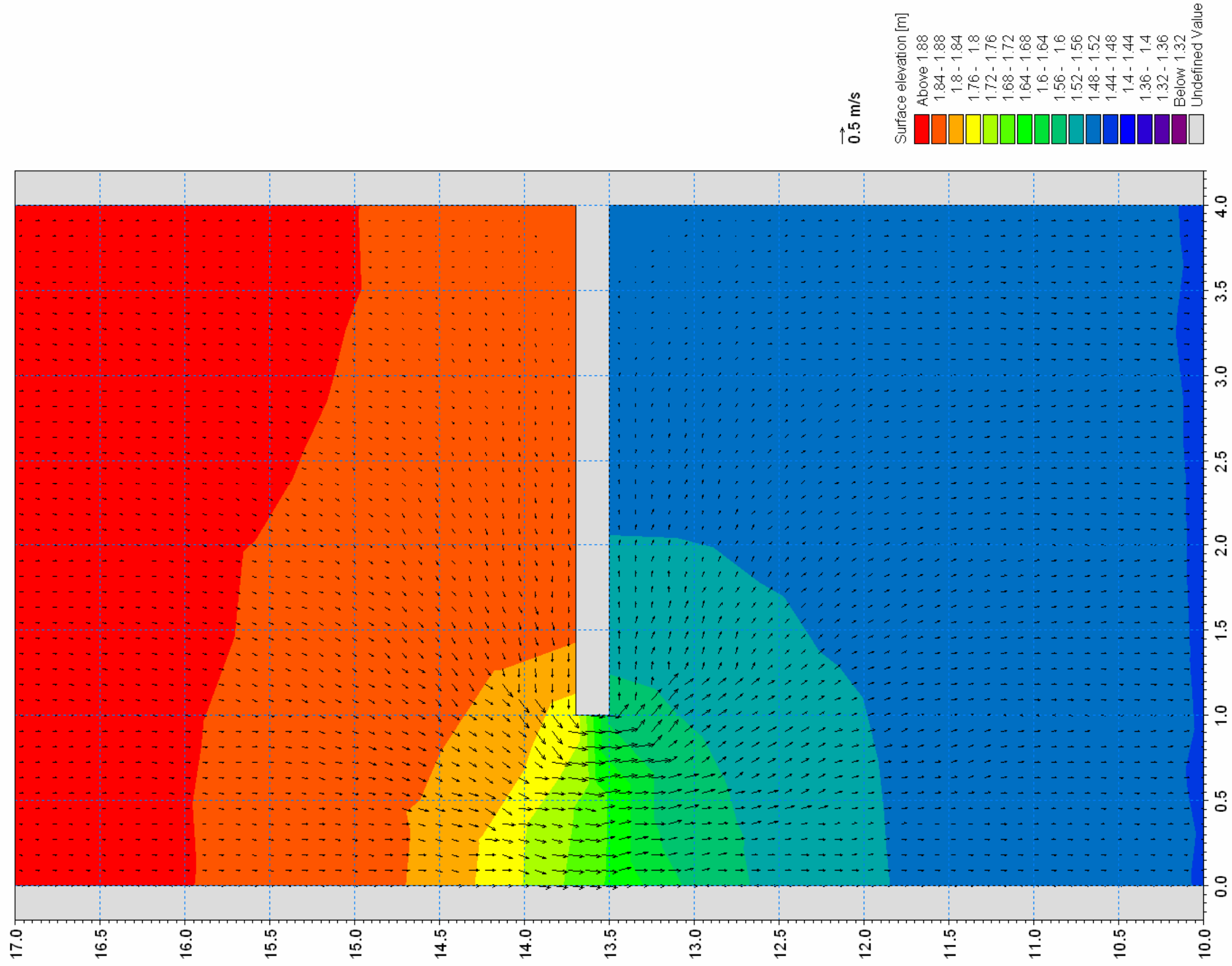
b\_kas Plan: Plan 76 11/7/2007

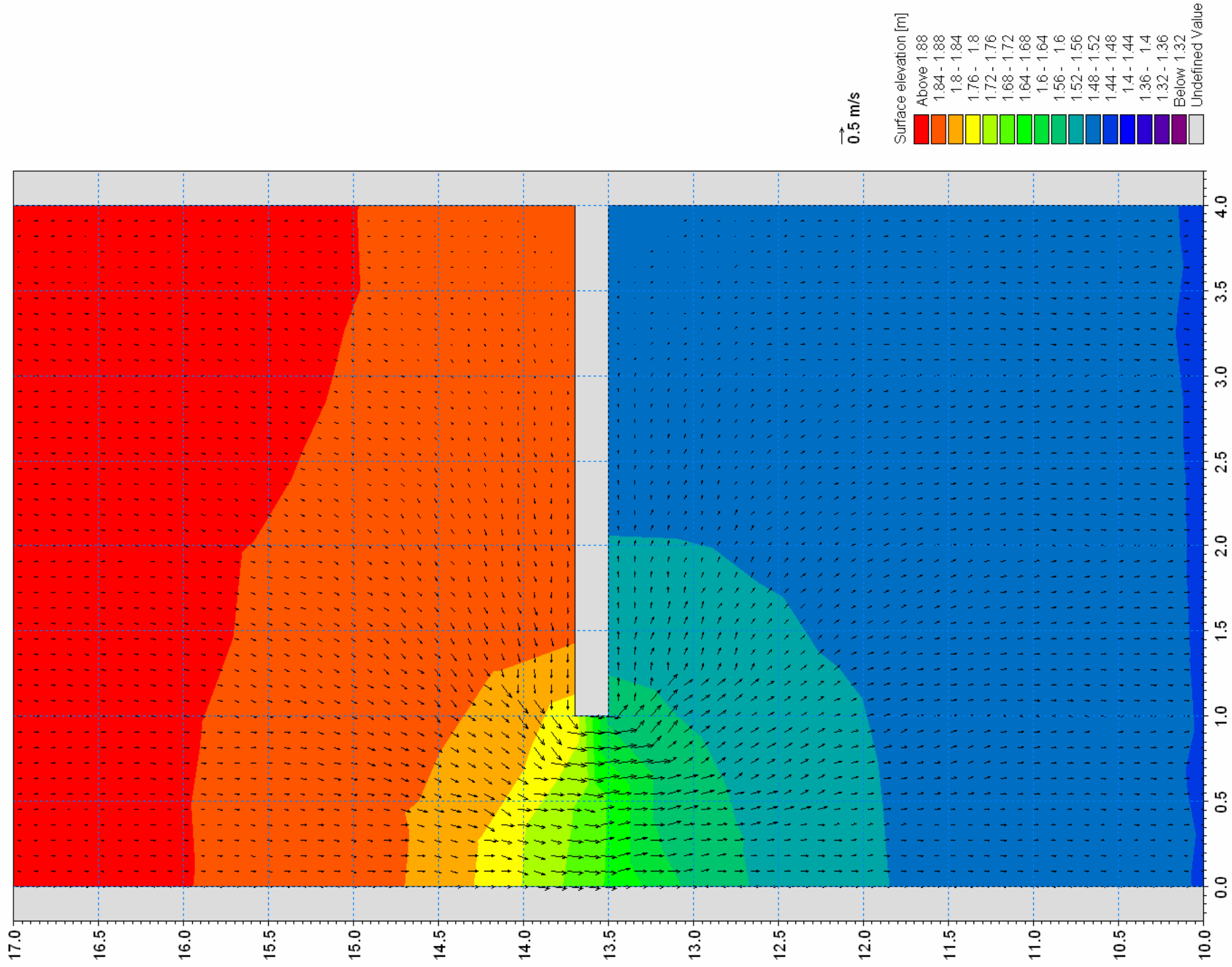


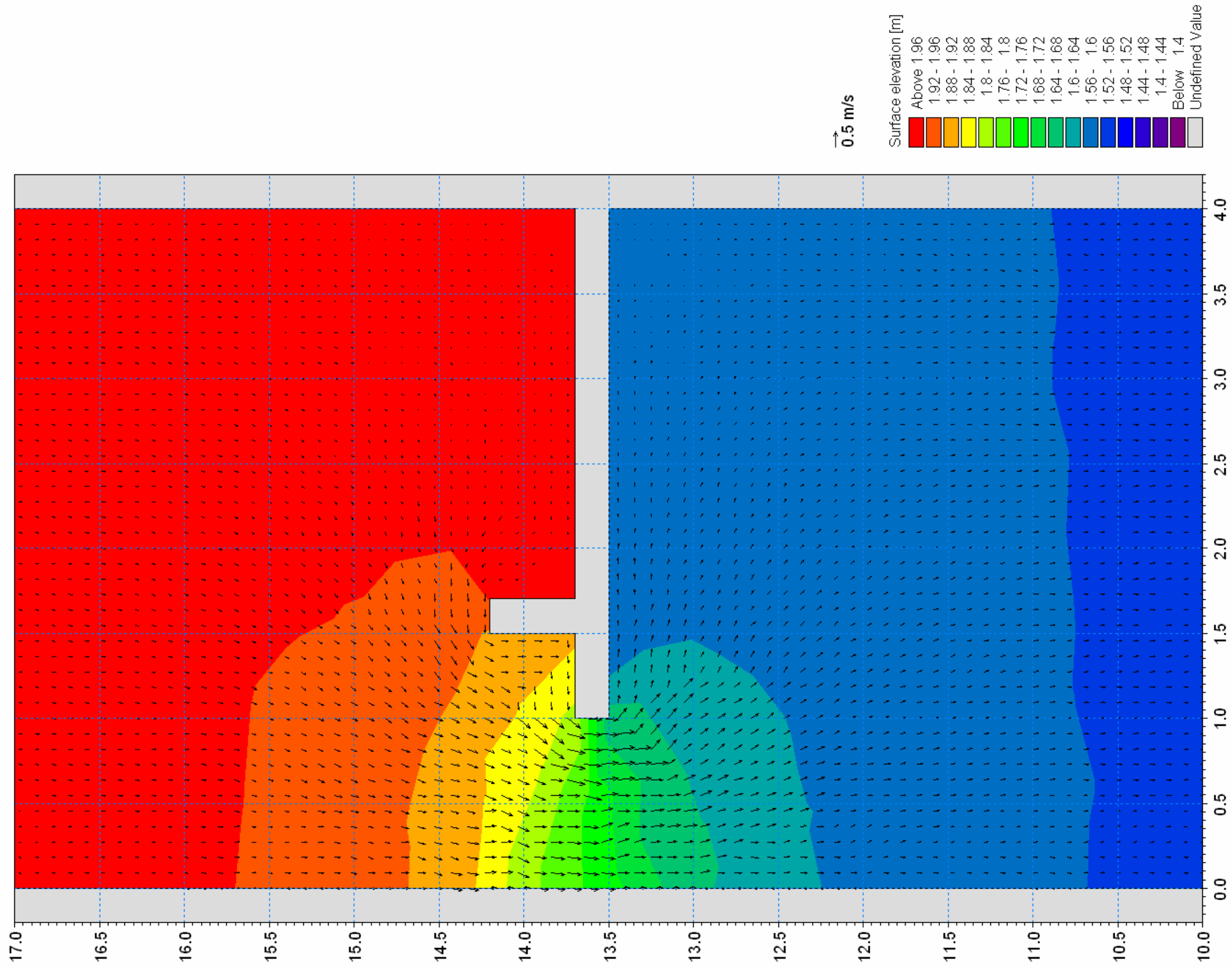
b\_kas Plan: Plan 77 11/7/2007

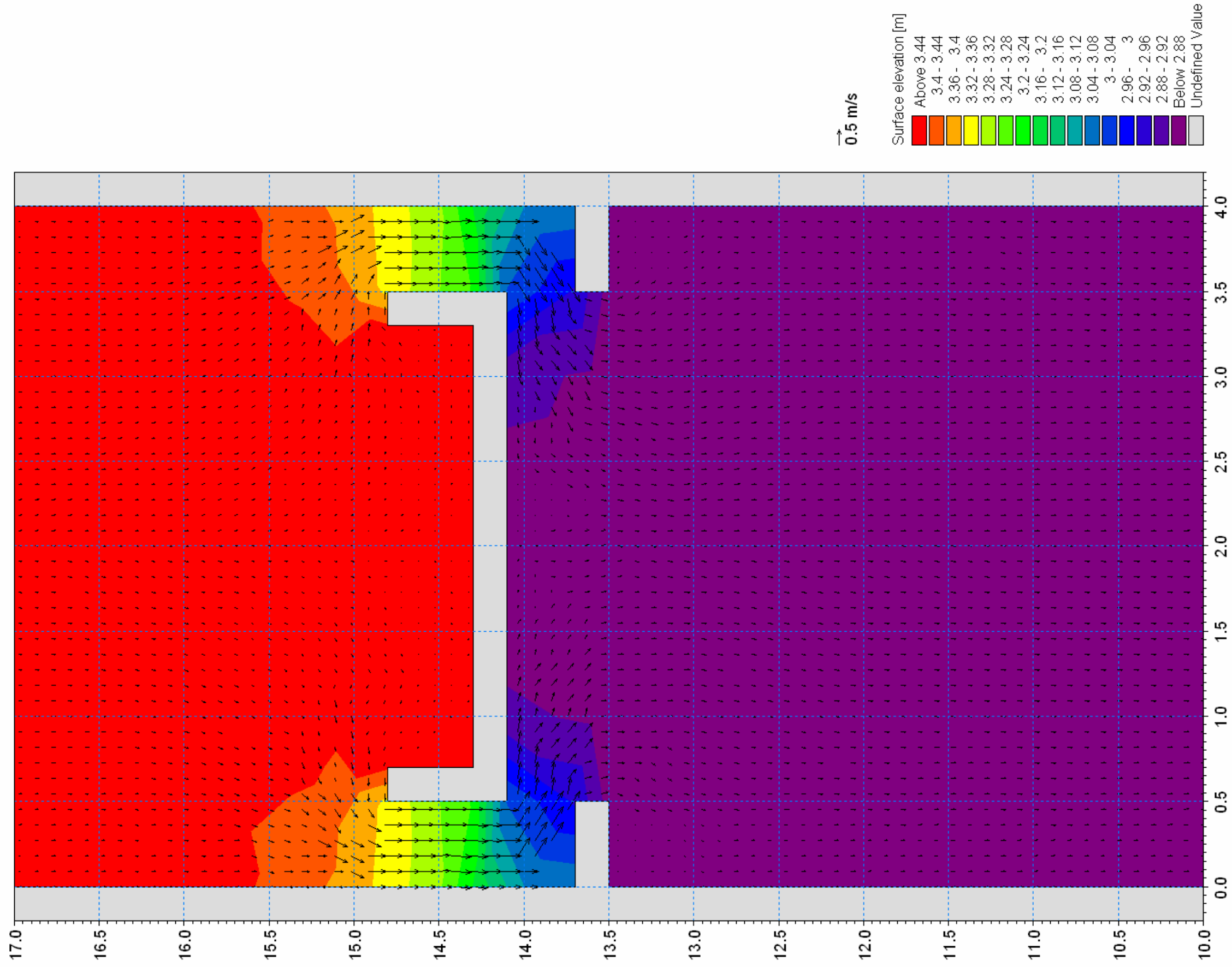


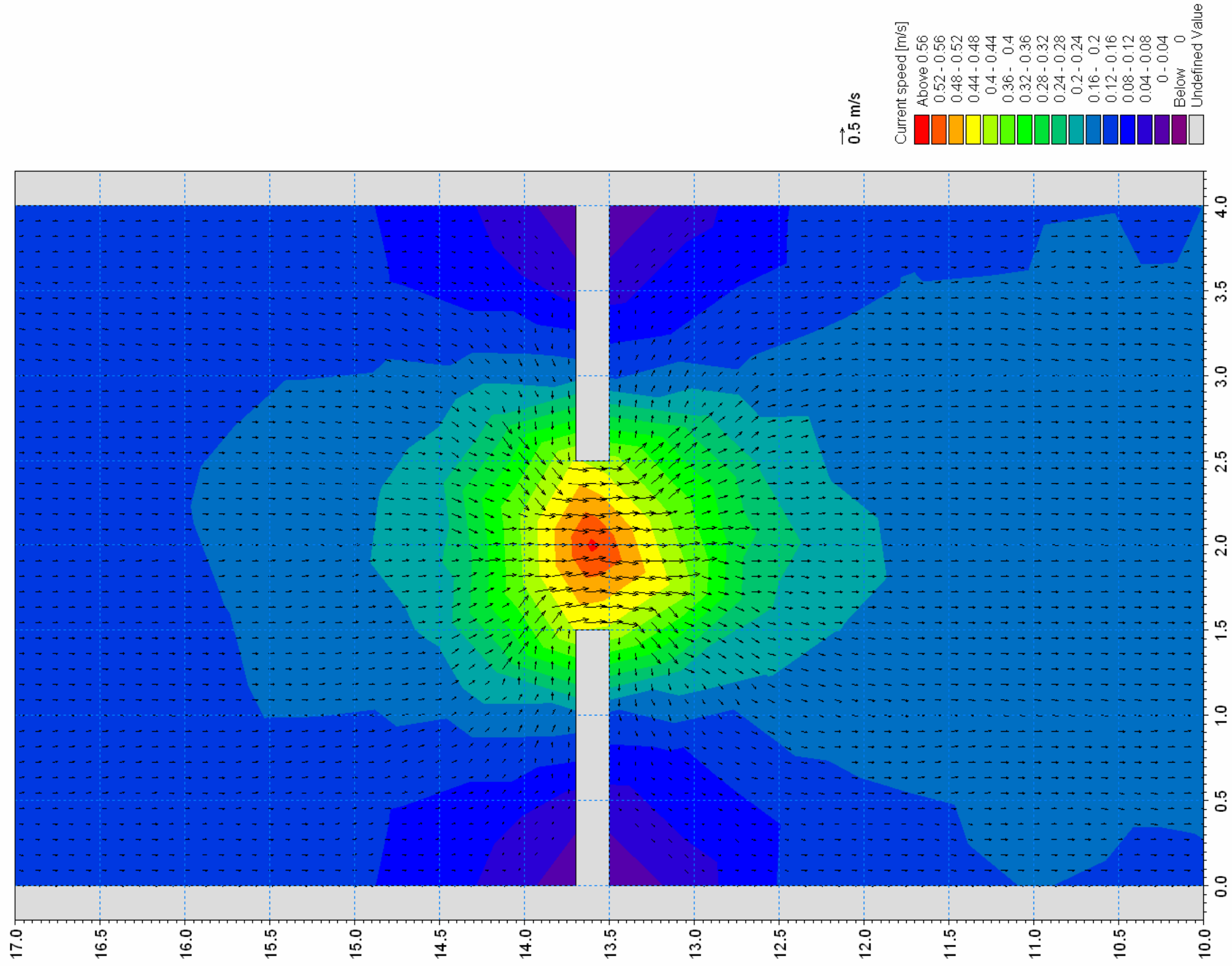
Legend	
	WS PF 3
	Ground
	Bank Sta
	Ground



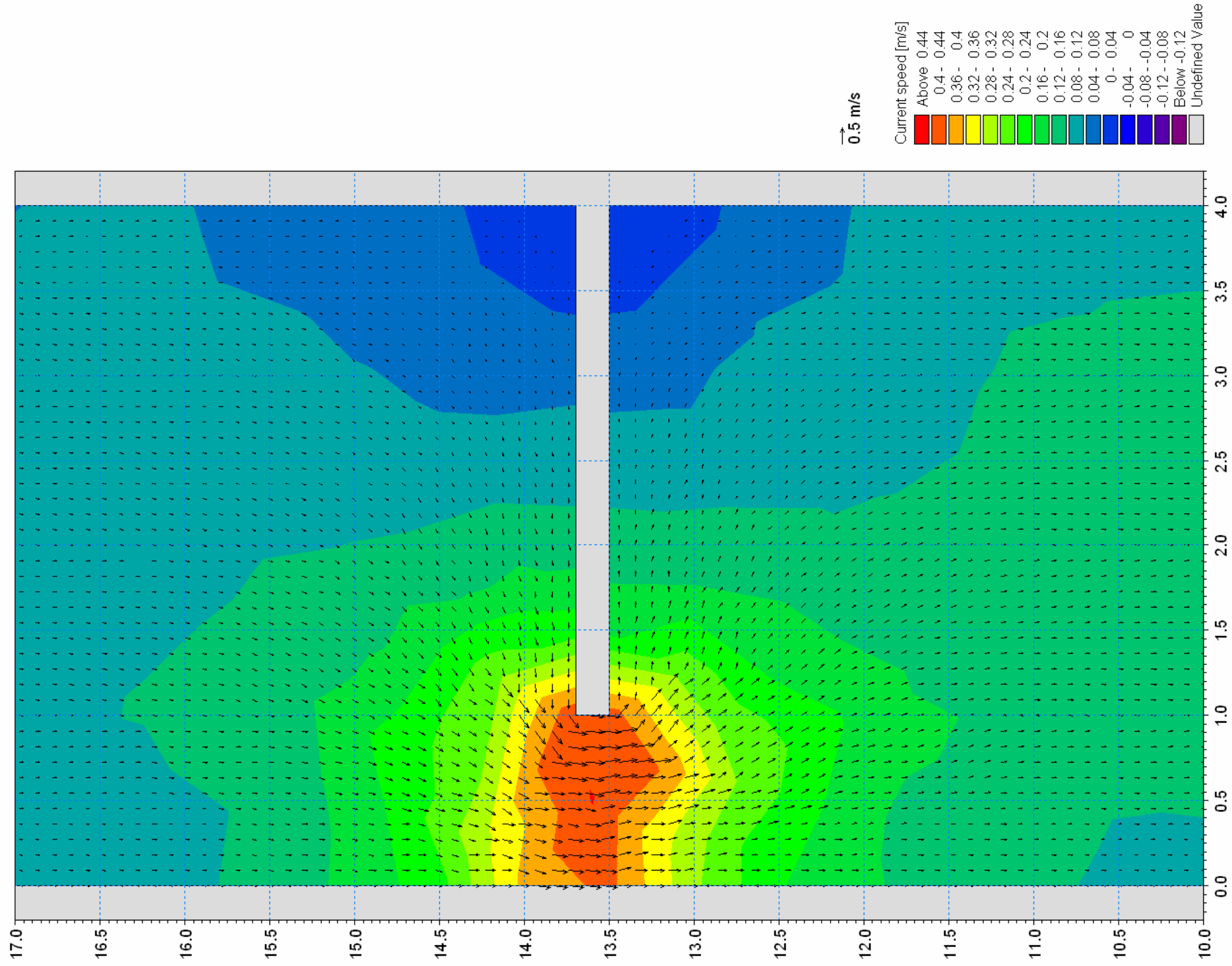


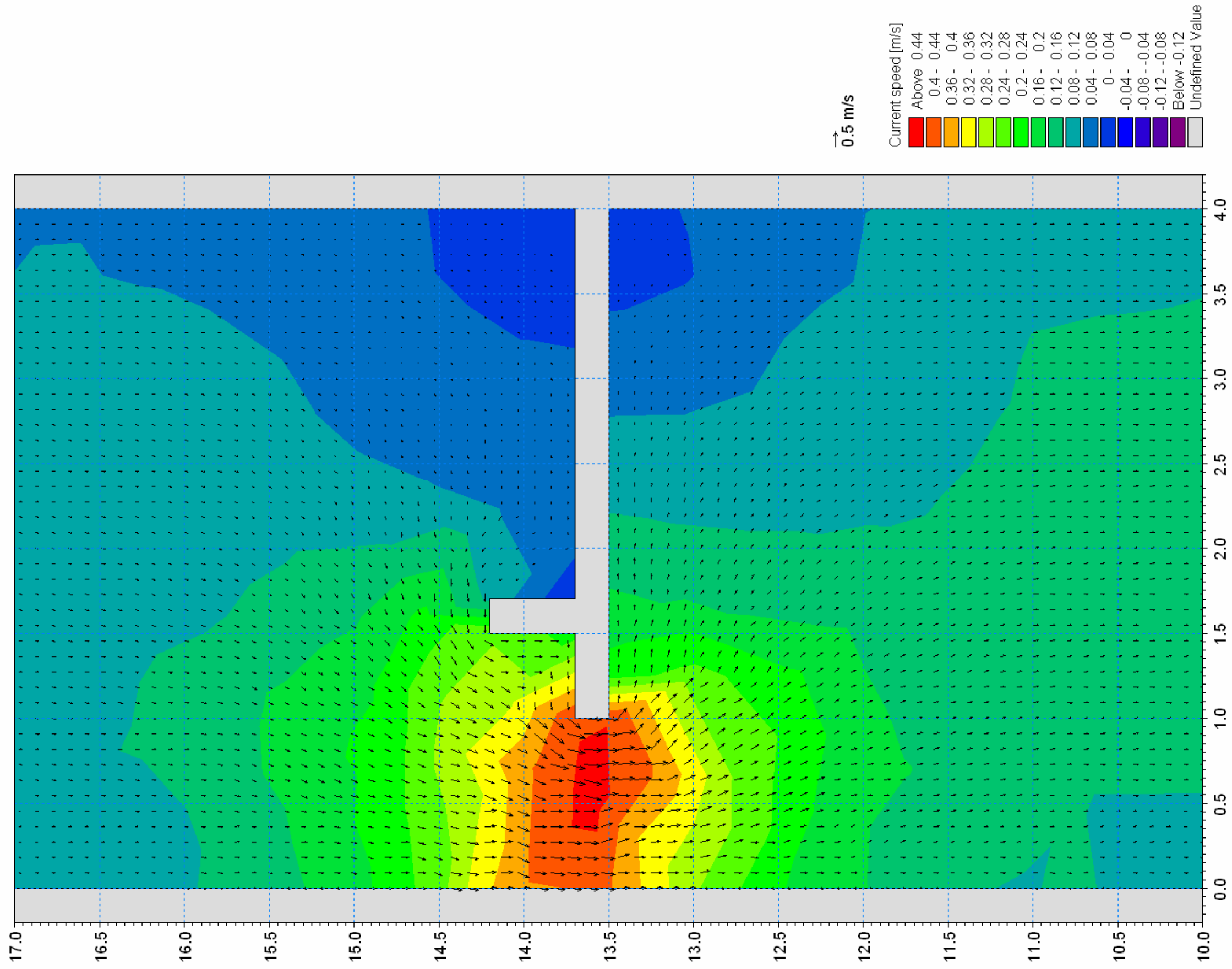


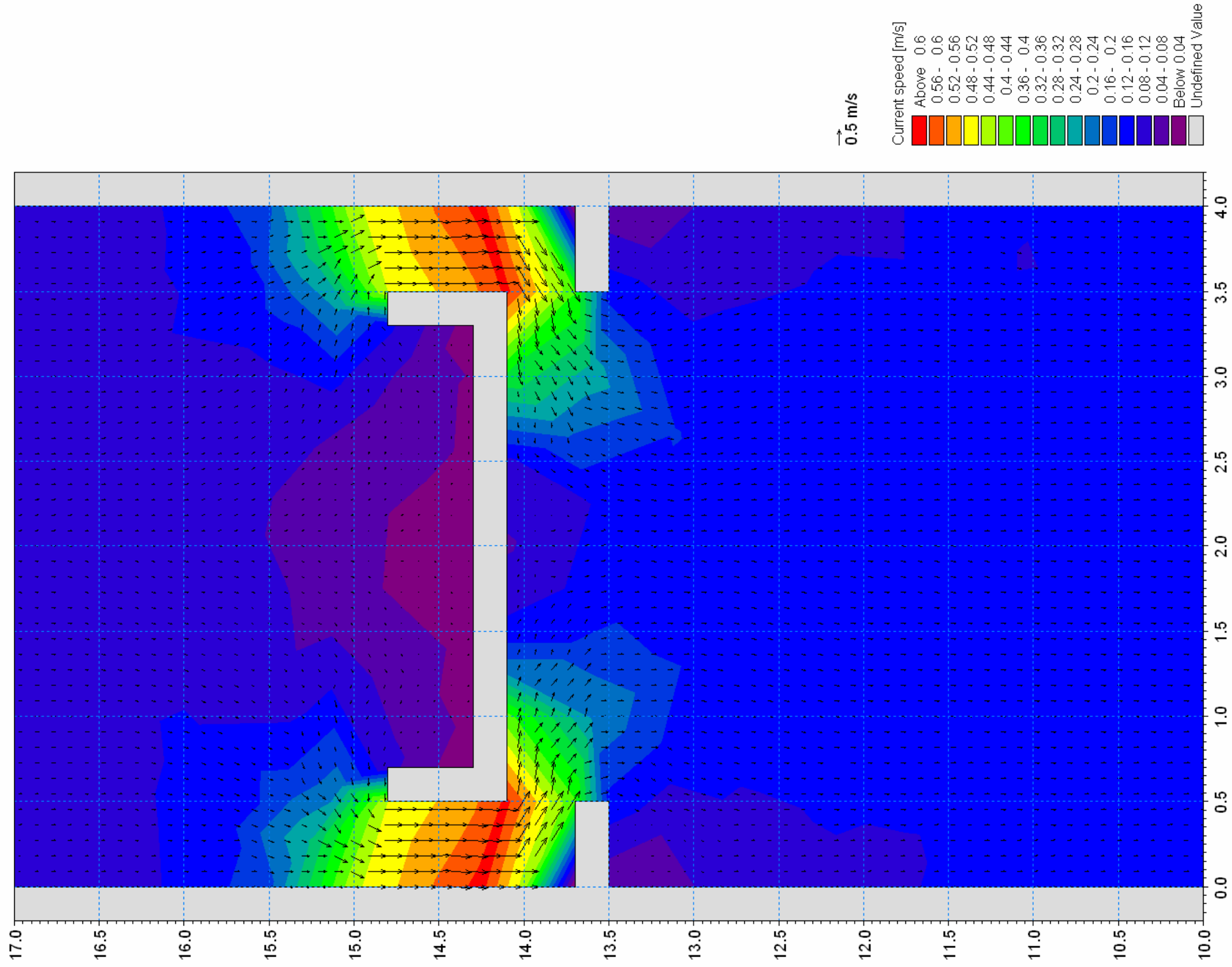


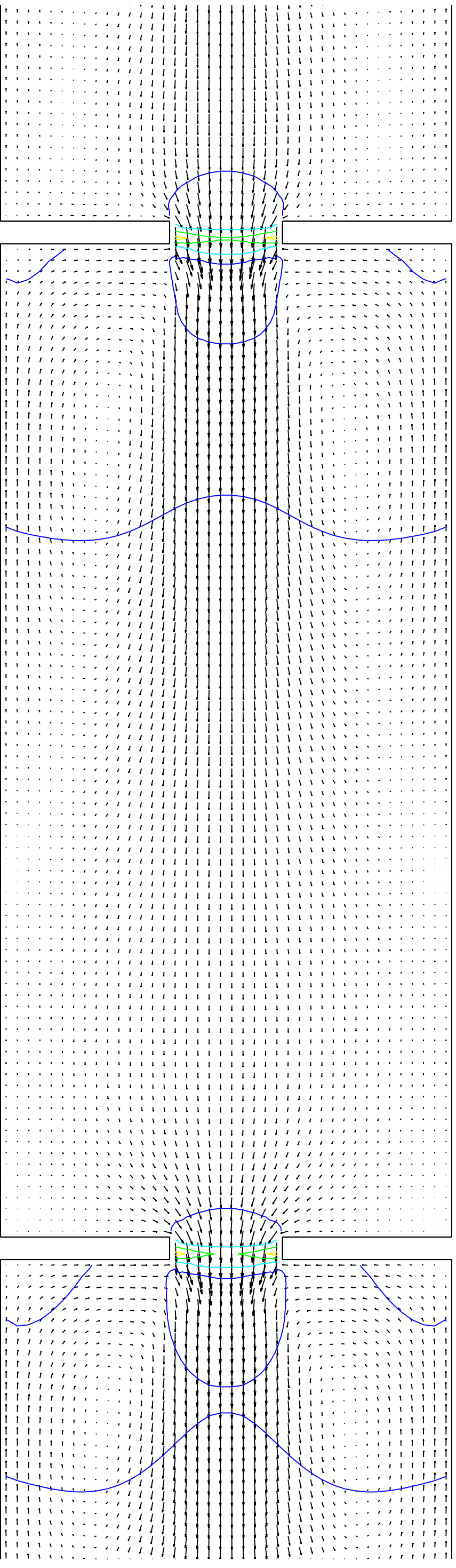




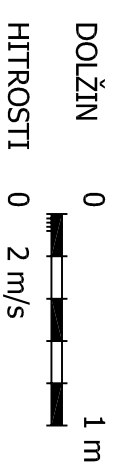




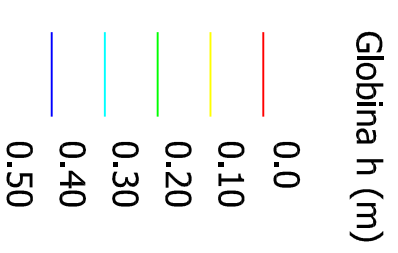


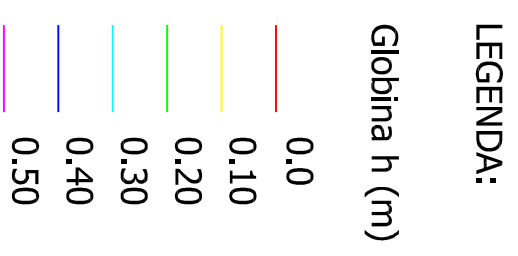
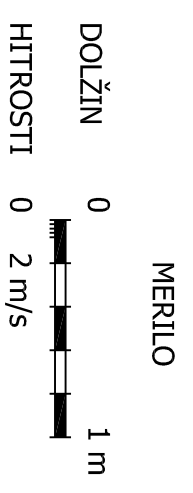
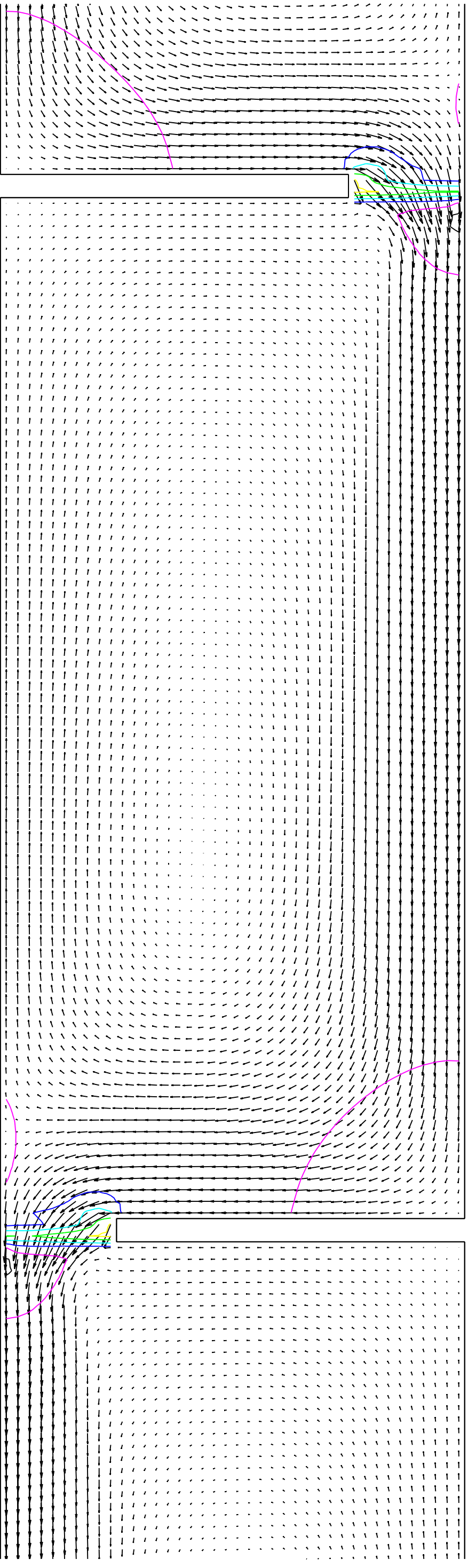


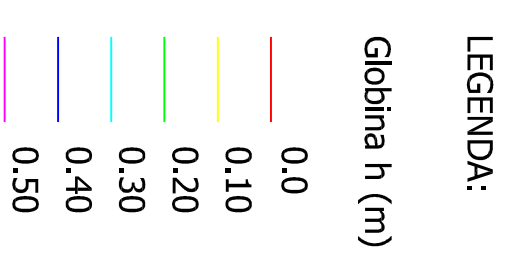
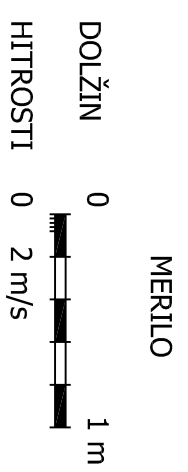
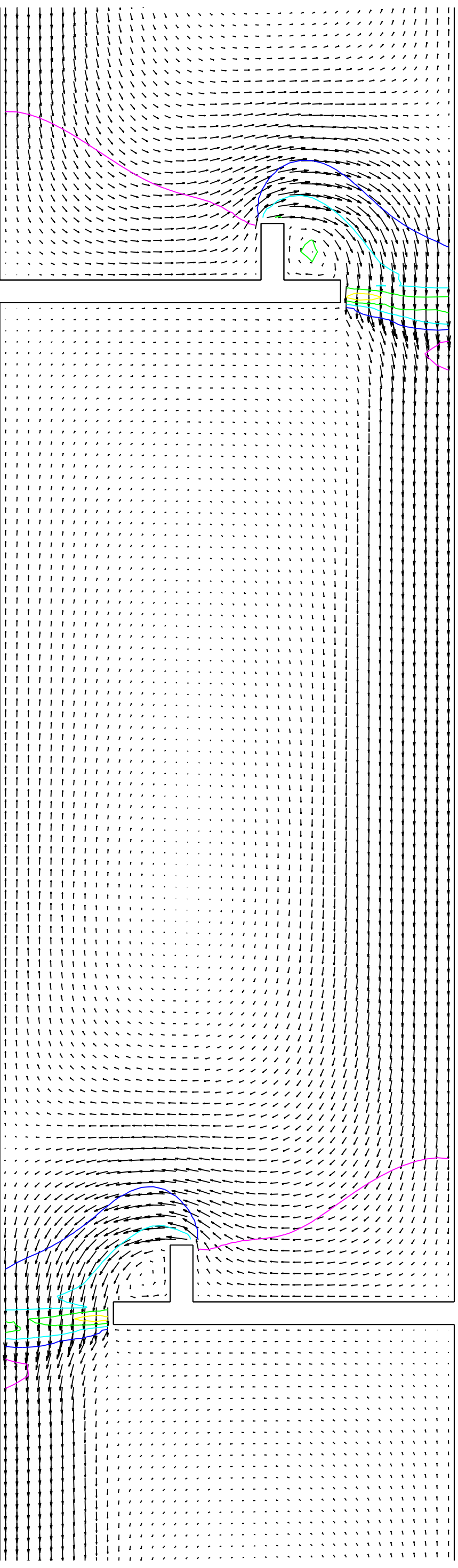
MERILO

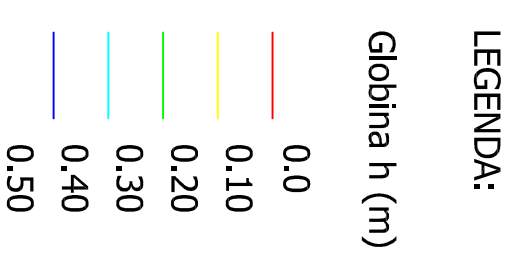
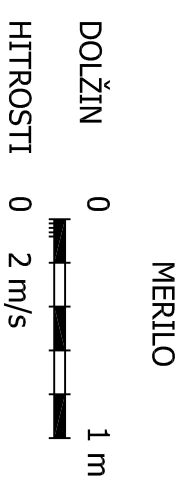
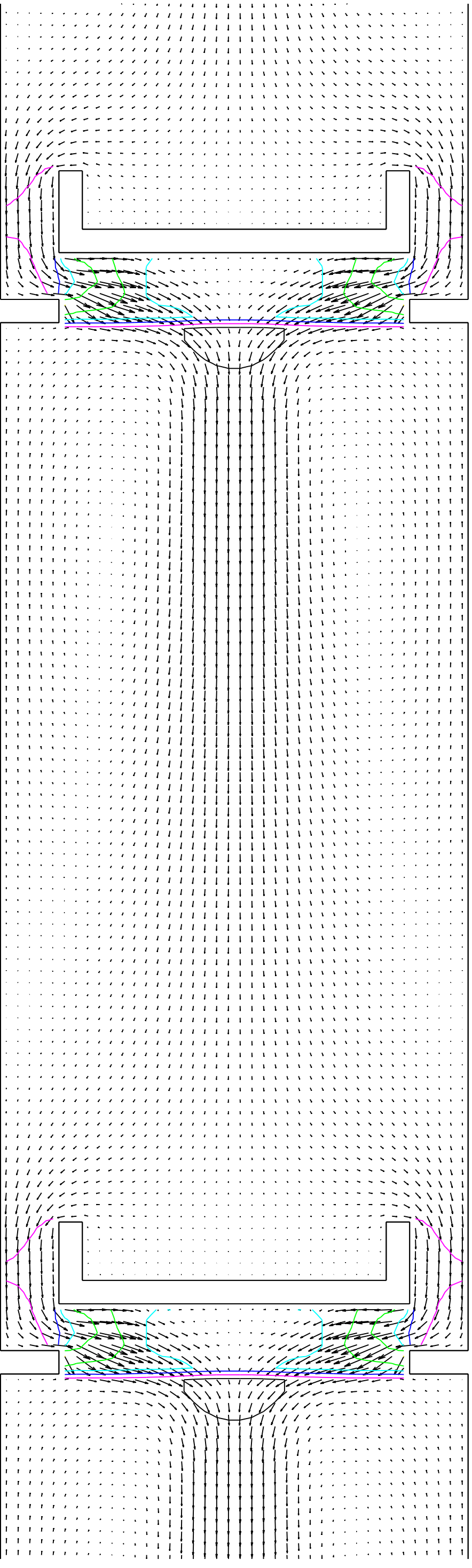


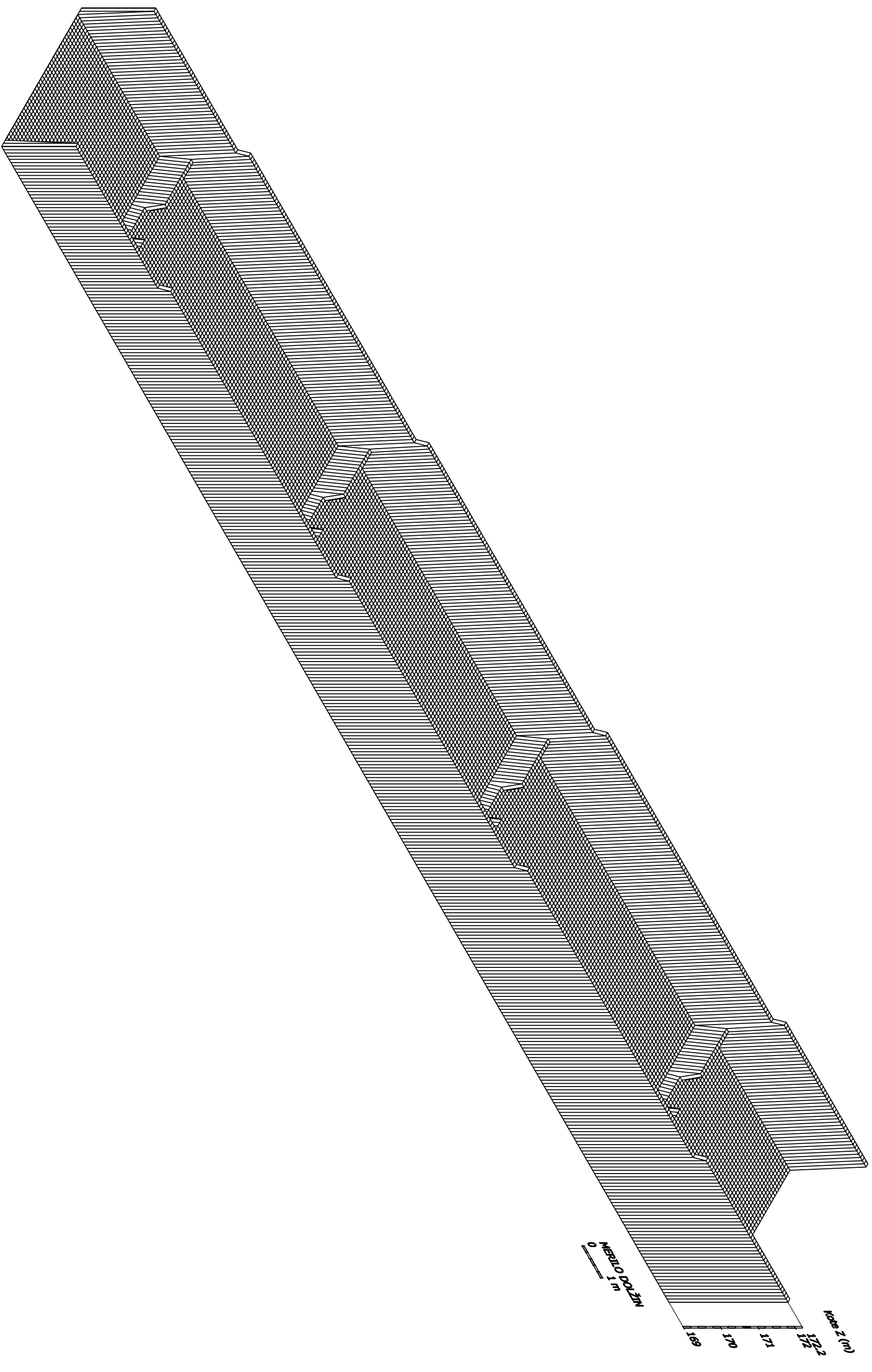
LEGENDA:





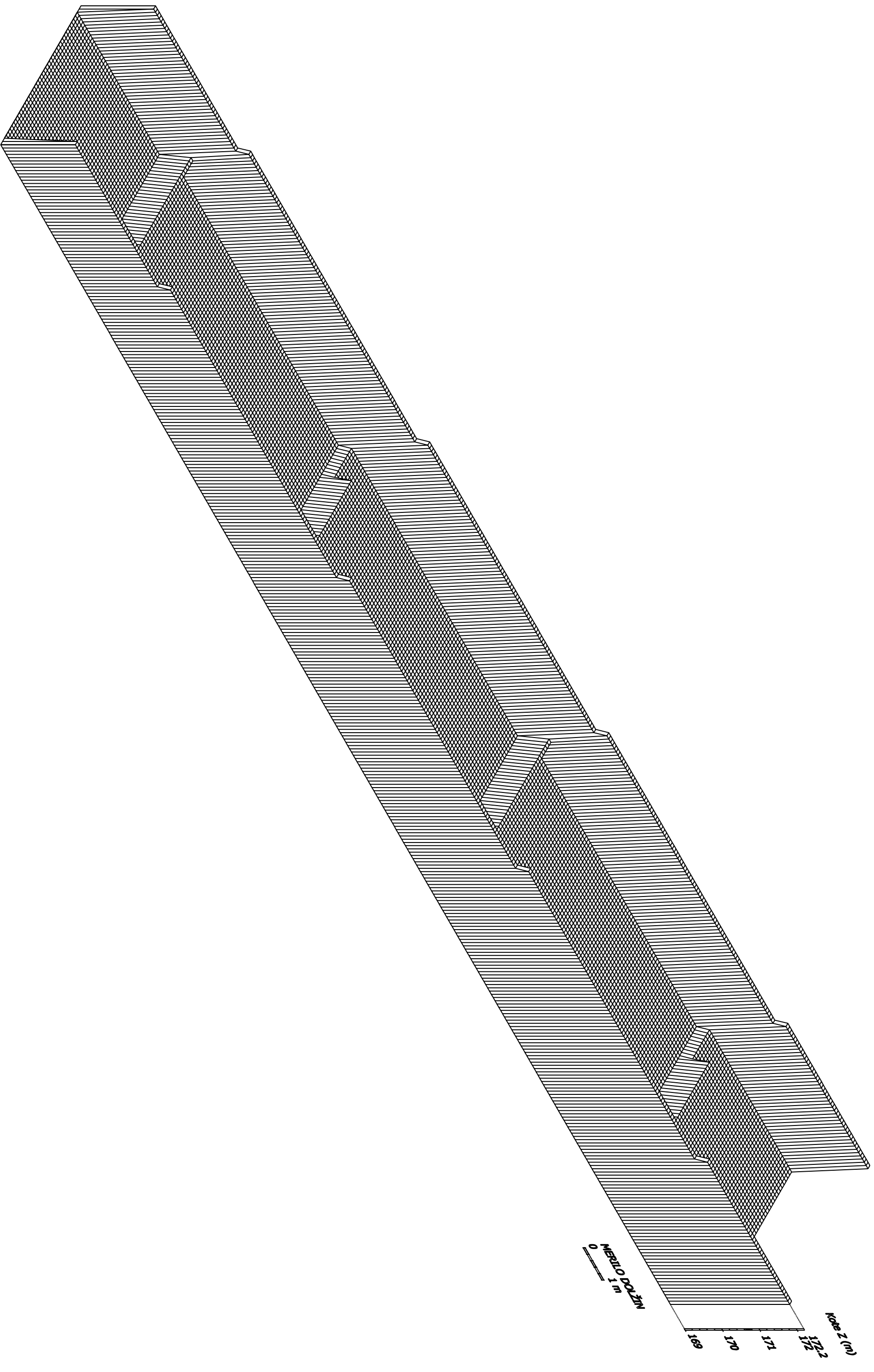




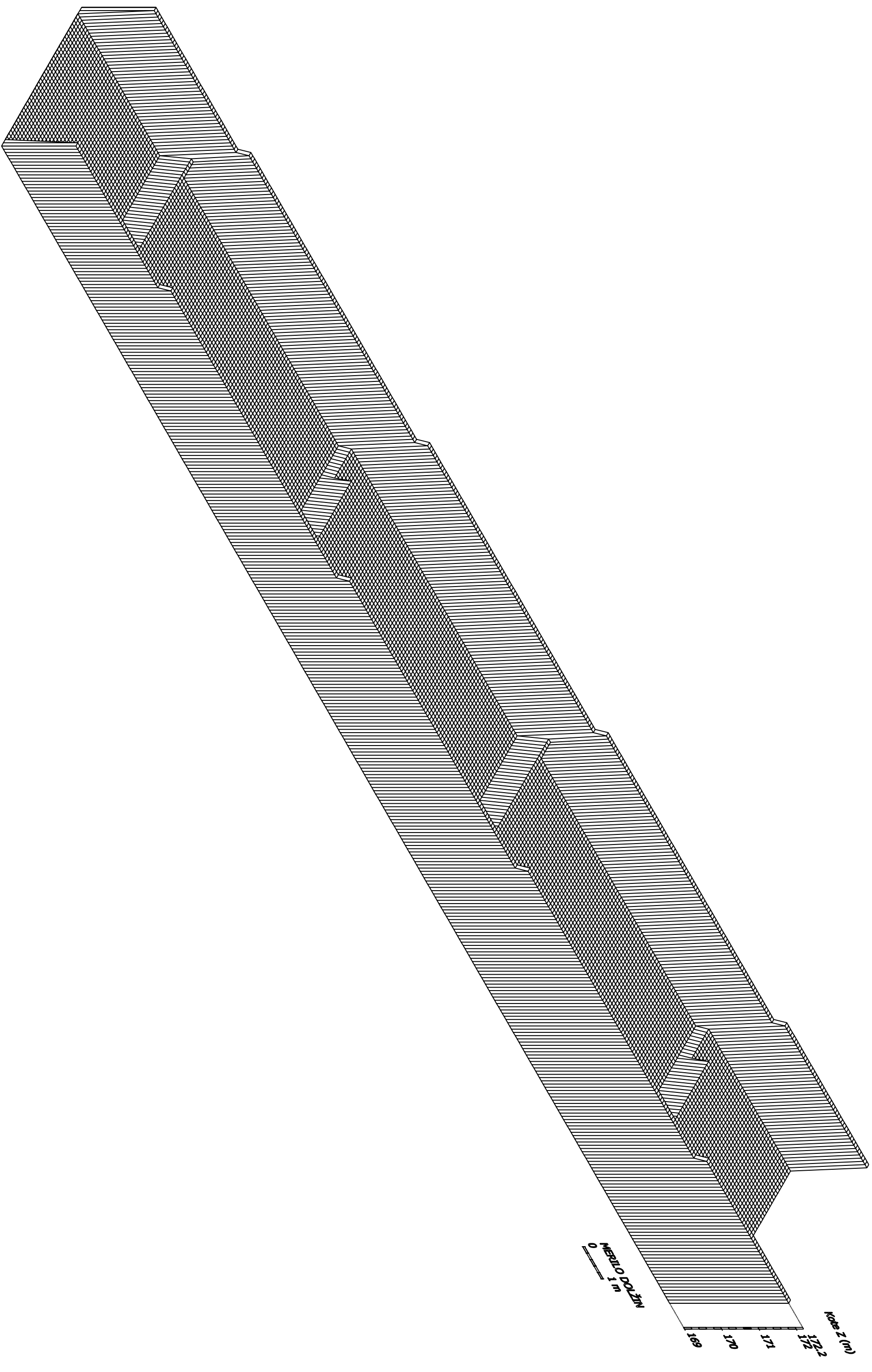




PRILOGA 26: PRIKAZ KONFIGURACIJE DNA ZA 2. PRIMER (PCFLOW2D)



PRILOGA 27: PRIKAZ KONFIGURACIJE DNA ZA 3. PRIMER (PCFLOW2D)



PRILOGA 28: PRIKAZ KONFIGURACIJE DNA ZA 4. PRIMER (PCFLOW2D)

