

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Škrk, J., 2015. Matematično modeliranje toka v ribji stezi ob HE Arto Blanca. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Četina, M., somentor Krzyk, M.): 49 str.

Datum arhiviranja: 08-10-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Škrk, J., 2015. Matematično modeliranje toka v ribji stezi ob HE Arto Blanca. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Četina, M., co-supervisor Krzyk, M.): 49 pp.

Archiving Date: 08-10-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

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



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

JAN ŠKRK

**MATEMATIČNO MODELIRANJE TOKA V RIBJI
STEZI OB HE ARTO BLANCA**

Diplomska naloga št.: 234/B-GR

**MATHEMATICAL MODELLING OF FLOW IN THE
FISHWAY AT HPP ARTO BLANCA**

Graduation thesis No.: 234/B-GR

Mentor:

prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:

asist. dr. Mario Krzyk

Ljubljana, 24. 09. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVE

Podpisani Jan Škrk izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Matematično modeliranje toka v ribji stezi ob HE Arto Blanca«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 18. 9. 2015

Jan Škrk

ZAHVALA

Za pomoč in podporo pri pisanju diplomske naloge se zahvaljujem svojemu mentorju prof. Matjažu Četini. Hvaležen sem tudi somentorju prof. Mariu Krzyku.

Zahvaljujem se raziskovalcu na Inštitutu za hidravlične raziskave dr. Martinu Bombaču za pomoč pri vpeljavi v hidravlično modeliranje.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	626.882(043.2)
Avtor:	Jan Škrk
Mentor:	prof. dr. Matjaž Četina
Somentor:	asist. dr. Mario Krzyk
Naslov:	Matematično modeliranje toka v ribji stezi ob HE Arto Blanca
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	49 str., 8 pregl., 11 graf., 26 sl., 5 pril.
Ključne besede:	ribja steza, PCFLOW2D, k-ϵ model turbulence, ribje migracije, ovire, ribja steza z vertikalnimi režami

Izvleček

V diplomskem delu so prikazani razlogi za gradnjo ribjih stez, vrste ribjih stez, ribja steza ob HE Arto Blanca, možnost njene optimizacije in analiza ihtiološkega pregleda s pomočjo hidravličnih vrednosti v ribji stezi.

Ribje steze se gradijo za ohranjanje biološke povezanosti vodotoka pod in nad pregrado, ker je z gradnjo pregrade ta povezava prekinjena. To prizadene zlasti migratorne vrste rib in druge vrste organizmov, ki za svoje dolgoročno preživetje potrebujejo različne življenjske prostore.

Predstavljen je problem ribje migracije na spodnji Savi v Sloveniji. Seznanimo se z ribami, ki tam živijo, in s plavalnimi sposobnostmi nekaterih najpogostejših rib v tem delu reke.

V nadaljevanju so predstavljeni najpogosteje uporabljeni ribji prehodi. Določeni tipi ribjih prehodov so ustrezni le za določene vrste rib in vrste ovir.

Leta 2009 je bila zgrajena ribja steza ob HE Arto Blanca, ki je ena redkih dobro delujočih ribjih stez na velikih pregradah v Sloveniji. Predstavljeni so njeni deli in način obratovanja njenega vtočnega odseka.

Sledi prikaz optimizacije ribje steze s programom PCFLOW2D, ki ima možnost upoštevanja k- ϵ modela turbulence za nestalni tok. Kot osnovna geometrija je bila vzeta geometrija dela vtočnega odseka (ki je izveden kot bazenski tip z vertikalnimi režami) obstoječe ribje steze ob HE Arto Blanca. Ugotovljeno je bilo, da se s premikanjem reže med prekati proti sredini prekata zmanjšujejo maksimalne hitrosti in območja z izrazito veliko disipacijo turbulentne kinetične energije ϵ , zato pa se manjšajo območja z izrazito majhnimi hitrostmi in ϵ . Prav tako je bilo ugotovljeno, da v ribji stezi z vertikalnimi režami ni velikih sprememb parametrov ob spremembi pretoka, spreminja se le gladina vode.

Na koncu so rezultati ihtiološkega pregleda ribje steze ob HE Arto Blanca ovrednoteni z rezultati optimiziranih hidravličnih vrednosti v ribji stezi. Ugotovljeno je dobro delovanje obstoječe ribje steze.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 626.882(043.2)
Author: Jan Škrk
Supervisor: prof. Matjaž Četina, Ph.D.
Cosupervisor: teaching assist. Mario Krzyk, Ph.D.
Title: Mathematical modelling of flow in the fishway at HPP Arto Blanca
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: 49 p., 8 tab., 11 graph., 26 fig., 5 ann.
Keywords: fishway, PCFLOW2D, k- ϵ turbulence model, fish migration, obstacle, vertical slot fishway

Abstract

This thesis deals with types of fishways and reasons for building them. It focuses on the fishway at HPP Arto Blanca, the possibilities for its optimization and the analysis of the ichthyological review based on the hydraulic data found in the fishway.

Fishways are built in order to prevent interruptions of a watercourse which may occur when an obstacle is constructed. Especially migratory species of fish, but also some other organisms that depend on different habitats for their long-term survival, can be affected by such interruptions.

The problem of fish migration in the lower section of the Sava River in Slovenia is presented. Species of fish living there and their swimming abilities are also described.

This is followed by the description of the most frequently used types of fish passes. Certain types of fish passes are suitable only for certain types of fish and specific types of obstacles.

The fishway at HPP Arto Blanca was built in 2009 and is one of the few well-functioning fishways on large dams in Slovenia. Its structure and the operation mode of its inlet section are discussed.

The optimization of the fishway is then analyzed using the program PCFLOW2D and the k- ϵ turbulence model for unsteady flow. The geometry of a part of the inlet section of the existing fish pass at HPP Arto Blanca (implemented as a swimming pool type with vertical slots) served as a basic geometry. It was determined that, by moving the slots between the pools toward the center section, the maximum speed and areas with markedly high dissipation of turbulent kinetic energy ϵ are reduced. Consequently, areas with markedly low values of velocity and ϵ decrease. It was also found that a change in discharge causes no major parameter changes in the fishway with vertical slots. The only change observed is in the water level.

Finally, an evaluation was performed, comparing the results of the ichthyological review of the fishway at HPP Arto Blanca with the results of the optimized hydraulic values in the fishway. The existing fishway was found to be well functioning.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE	II
ZAHVALA	III
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	IV
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
1 UVOD	1
2 RIBJE STEZE	2
2.1 Vloga in pomen ribjih stez	2
2.2 Stanje v Sloveniji	2
2.3 Primer ribje steze ob HE Arto Blanca	3
3 VRSTE IN DELI RIBJIH STEZ	8
3.1 Vrste ribjih stez	8
3.1.1 Bazenski tip ribje steze, predzajezitev in sonaravno urejeni obtočni kanal	8
3.1.1.1 <i>Bazenski tip</i>	8
3.1.1.2 <i>Sonaravno urejeni obtočni kanali</i>	11
3.1.1.3 <i>Predzajezitve</i>	12
3.1.2 Denil ribji prehod	12
3.1.3 Ribje splavnice in ribja dvigala	13
3.1.3.1 <i>Ribje splavnice</i>	13
3.1.3.2 <i>Splavnice za ladje</i>	14
3.1.3.3 <i>Ribja dvigala</i>	14
3.1.4 Ribji prehodi skozi prepuste, skalne ovire in ovire v ustjih rek	15
3.1.4.1 <i>Ribji prehod skozi prepuste</i>	15
3.1.4.2 <i>Ribji prehod skozi skalne ovire</i>	16
3.1.4.3 <i>Ribji prehod v ustjih rek</i>	18
3.1.5 Prehodi za čepe (alosa)	19
3.1.6 Prehodi za jegulje	20
3.2 Deli ribjih stez	20
3.2.1 Vhod v ribjo stezo	20
3.2.2 Glavni kanal ribje steze	21
3.2.3 Izhod iz ribje steze	22
3.3 Opis ribje steze ob HE Arto Blanca	22

3.3.1 Vtočni odsek	24
3.3.2 Sonaravni odsek	24
3.3.3 Iztočni odsek.....	26
4 OSNOVNI NAČINI OPTIMIZACIJE RIBJE STEZE.....	27
4.1 Optimizacija ribje steze z matematičnim modelom PCFLOW2D	27
4.1.1 Osnovne enačbe.....	27
4.1.3 Globinsko povprečni tok.....	28
4.1.3.1 Osnovne enačbe pri globinsko povprečenem nestalnem toku	28
4.1.3.2 Transportni enačbi pri globinsko povprečenem $k-\varepsilon$ modelu turbulence	29
5 PRIMER OPTIMIZACIJE RIBJE STEZE OB HE ARTO BLANCA	31
5.1 Računski model.....	31
5.1.1 Geometrija	31
5.1.2 Numerična mreža.....	32
5.1.3 Čas računa	32
5.1.4 Začetni in robni pogoji.....	32
5.1.5 Umerjenost modela.....	33
5.2 Rezultati in hidravlična analiza.....	33
5.2.1 Globine	33
5.2.2 Tokovnice	34
5.2.3 Hitrosti	36
5.2.4 Turbulentna kinetična energija na enoto mase (k) in njena disipacija (ε)	36
5.1.5 Primerjava geometrij ribjih stez glede na vpliv na ribe	38
5.3 Analiza rezultatov v kontekstu že zgrajene ribje steze ob HE Arto Blanca	39
5.3.1 Rezultati ihtiološkega pregleda ribje steze	39
5.3.2 Hidravlična analiza rezultatov.....	44
6 ZAKLJUČEK.....	46
7 NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO.....	47
VIRI	48

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Razvrstitev rib glede na njihove hidrološke (H) in razmnoževalne (R) potrebe, način prehranjevanja (mlade – odrasle ribe) in selitve (Zabrc, 2008)	4
Preglednica 2: Hitrosti plavanja in vzdržljivost selivk na daljše razdalje (Hladnik, 2007).....	6
Preglednica 3: Hitrosti plavanja in vzdržljivost osebkov v 1. letu spolne zrelosti (Hladnik, 2007).....	6
Preglednica 4: Empirične konstante pri globinsko povprečenem k-ε modelu turbulence	30
Preglednica 5: Primerjava maksimalnih hitrosti v_{MAX} in stopnje disipacije kinetične energije na enoto volumna E za različne velikosti pretoka in položaja reže med prekati	39
Preglednica 6: Razporeditev posameznih vrst rib po posameznih odsekih ribje steze in ocena njihove številčnosti (št. rib/100 m ²), dne 24. 5. 2012 (Zabrc, 2012)	40
Preglednica 7: Razporeditev posameznih vrst rib po posameznih odsekih ribje steze in ocena njihove številčnosti (št. rib/100 m ²), dne 11. 9. 2012 (Zabrc, 2012).....	40
Preglednica 8: Število osebkov posameznih vrst rib, ki so bili ulovljeni v vršo v letu 2012 pri gorvodni migraciji (Zabrc, 2012)	41

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Globine vode na sredini reže med prekati vzdolžno na ribjo stezo pri različnih variantah pri pretoku 600 l/s	34
Grafikon 2: Globine vode v reži med prekati prečno na ribjo stezo (na sredini daljšega rebra v srednjem prekatu) pri pretoku 600 l/s	34
Grafikon 3: Delež površin z določenim E za 600 l/s.....	38
Grafikon 4: Delež površin z določenim E za 1000 l/s.....	38
Grafikon 5: Število ulovljenih podusti v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabric, 2012)	42
Grafikon 6: Število ulovljenih klenov v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabric, 2012)	42
Grafikon 7: Število ulovljenih ogric v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabric, 2012)..	43
Grafikon 8: Število ulovljenih platnic v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabric, 2012)	43
Grafikon 9: Število ulovljenih mren v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabric, 2012) .	43
Grafikon 10: Število ulovljenih globočkov v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabric, 2012).....	44
Grafikon 11: Deleži posameznih vrst rib, ki so bile v letu 2012 ulovljene v vrše pri gorvodni migraciji (Zabric, 2012).....	44

KAZALO SLIK

Slika 1: Situacija verige HE na spodnji Savi (Jašič, 2010)	3
Slika 2: Primera možnega toka skozi bazenski tip ribje steze (a) prelivajoč in (b) strujajoč (Baudoin in sod., 2014)	9
Slika 3: Primeri ribjih prehodov bazenskega tipa: 1. s potopljeno odprtino, 2. z vertikalno režo, 3. s prelivom, 4. z zarezo (Larinier in sod., 2002)	10
Slika 4: Primer ureditve dna sonaravnega obtočnega kanala (Baudoin in sod., 2014)	11
Slika 5: Primer predzajezitve (Larinier in sod., 2002)	12
Slika 6: Primer Denil ribjega prehoda (Baudoin in sod., 2014)	13
Slika 7: Splavnica za ribe (Baudoin in sod., 2014)	14
Slika 8: Primer ribjega dvigala (Baudoin in sod., 2014)	15
Slika 9: Primer prepusta z značilnim tolmunom, ki nastane zaradi erozije (Baudoin in sod., 2014).....	16
Slika 10: Primer prilagoditve skalne ovire (Larinier in sod., 2002)	17
Slika 11: Primer kamnite drče (FAO/DVWK, 2002)	18
Slika 12: Primer ribjega prehoda v ustju reke (Larinier in sod., 2002).....	19
Slika 13: Primer prehoda za čepe (Larinier in sod., 2002).....	19
Slika 14: Primer prehoda za jegulje (Larinier in sod., 2002)	20
Slika 15: Celotna ribja steza ob HE Arto Blanca (Jašič, 2010)	23
Slika 16: Prečni prerez sonaravnega dela (Jašič, 2010).....	25
Slika 17: Vzдолžni prerez sonaravnega dela (Jašič, 2010)	25
Slika 18: Tloris praga sonaravnega dela (Jašič, 2010).....	26
Slika 19: Tloris detajlov v posameznem prekatu osnovne geometrije ribje steze (Bombač, 2014).....	31
Slika 20: Celotni računski model ribje steze (osnovna geometrija)	31
Slika 21: Variante ribje steze.....	32
Slika 22: Vektorji hitrosti in tokovnice za pretok 600 l/s	35
Slika 23: Vektorji hitrosti in tokovnice za pretok 1000 l/s	35
Slika 24: Hitrosti v srednjem prekatu	36
Slika 25: Turbulentna kinetična energija na enoto mase k (m^2/s^2)	37
Slika 26: Disipacija turbulentne kinetične energije na enoto mase ε (m^2/s^3)	37

1 UVOD

Vsaka sprememba prinese poleg pričakovanih in zaželenih tudi nezaželene posledice. Tako je tudi z gradnjo jezov in pregrad. Z gradnjo teh objektov smo dobili vodno moč, ki jo lahko v zadnjem času izkoriščamo največ za proizvodnjo električne energije. Poleg tega smo dobili širna ojezerjena področja, ki jih lahko izkoriščamo za rekreativne namene, dobili smo možnost namakanja, akumulacije pa so uporabne še za druge namene. Vendar smo s tem, ko smo pregradili določen del vodotoka, prekinili naravni tok plavin, potovalne poti rib ter tako spremenili njihov življenjski prostor. Mnoge vrste rib se selijo na dolge razdalje, da dosežejo področja voda, ki jim nudijo optimalne razmere za drstenje in nadaljevanje rodu. S pregradami smo jim prekinili te poti in spremenili njihove končne lokacije.

Zavedati se je potrebno, da problema ribjih migracij ni mogoče povsem rešiti, lahko pa ga poskušamo popraviti, kolikor nam trenutno znanje in finančne zmožnosti to omogočajo. Eden izmed osnovnih popravkov so ribje steze. Te omogočajo, da lahko nekatere ribe in ostali vodni organizmi potujejo gorvodno in tudi dolvodno mimo pregrade. Poleg ribjih stez se pogosto uporabljajo še ribja dvigala ter fizično prenašanje rib.

Ribje steze niso nekaj novega, saj segajo prvi zapisi o njih v 17. stoletje (Kolman in sod., 2010). Na Slovenskem so kmalu ugotovili negativen vpliv pregrad na ribji živelj. Tako je bil že leta 1911 v Lovcu objavljen članek, ki je na kratko predstavil problem, ki so ga povzročile pregrade, in predlagal možne rešitve. Leta 1938 je slovenske ribiče na to opozoril Šulgaj (1938). V svojem članku je pisal o problemu prekinitve ribjih poti. Ribe je razdelil na dve skupini: na tiste, ki se selijo na daljše razdalje, in tiste, ki se selijo na krajše razdalje.

V nalogi bom torej predstavil najpogosteje uporabljene primere ribjih stez v današnji praksi. Optimalne ribje steze za vse vrste rib ni, saj so ovire, preko katerih ribe ne morejo, zelo različne, poleg tega so tudi ribe različne: enim odgovarjajo taki pogoji, drugim drugačni. Zato je pomembno, da pri projektiranju ribje steze poznamo plavalne sposobnosti ciljnih vrst rib, lastnosti ovire, ki jo premoščamo (tip pregrade, višina in dolžina pregrade), lastnosti vodotoka, na katerem je postavljena ovira, pred in po izgradnji ovire. Ko se odločimo, kateri tip ribje steze bomo postavili, pa moramo dobro poznati tudi hidravlične razmere v ribji stezi.

Na kratko bom predstavil dele ribje steze, zgrajene ob HE Arto Blanca. Nato bom na primeru ribje steze, zgrajene ob HE Arto Blanca, prikazal možnost izračuna toka v ribji stezi in njeno optimizacijo. Izračuni bodo izvedeni z matematičnim modelom PCFLOW2D, ki za izračun turbulence uporablja $k-\epsilon$ model.

Ko je ribja steza zgrajena, je potrebno tudi spremljanje učinkovitosti ribje steze, zato se izvajajo ihtiološki pregledi. Tako bom dobljene ugotovitve iz optimizacije ovrednotil z rezultati ihtioloških pregledov, ki jih je na že zgrajeni ribji stezi ob HE Arto Blanca opravil Zavod za ribištvo Slovenije (Zabrc, 2009, 2010 in 2011).

2 RIBJE STEZE

2.1 Vloga in pomen ribjih stez

Ribje steze rešujejo problem tisočletnih ribjih poti, ki so bile prekinjene z različnimi pregradami, od manjših pragov pri mostovih do velikih hidrotehničnih pregrad in prepustov. Nekatere ovire so za vse ribe neprehodne, nekatere pa dovoljujejo prehod le določenim ribam, in to le v določenih časovnih obdobjih, ko je pretok ustrezen. Z ribjimi stezami torej rešujemo dva problema, ki smo ju ustvarili: prvi je ta, da nekatere ribe ne morejo do svojih drstišč in tako hitro postajajo ogrožene, saj ima že skoraj vsak vodotok vsaj eno pregrado; z ribjimi stezami pa želimo tudi preprečiti gensko siromašenje rečnih rib, saj so te zaradi pregrad razdeljene na majhne skupnosti, ki ne morejo komunicirati med sabo in so lahko na dolgi rok obsojene na propad. Vendar z ribjimi stezami ne moremo rešiti problema spreminjanja rek v velika akumulacijska jezera, ki ne nudijo čistih prodatih drstišč in so na splošno za potrebe rečnih rib drugačna kot reke. V primeru, da je na reki veliko pregrad, je smiselno razmisliti tudi o gradnji umetnih drstišč in drugih ukrepih. Gledano s tega zornega kota je ribja steza nujen ukrep, ne pa nujno tudi zadosten. Pojavlja se tudi problem migracij rib dolvodno, kjer se ribe soočijo s problemom prehajanja čez prelivna polja ali turbine, saj ne smemo pozabiti, da nekatere ribe drstijo v morju (zelo znan primer so jegulje). Pri migraciji rib čez prelivna polja je lahko usoden padec v vodo z velike višine, kar še posebej velja za velike ribe, ki težko padejo v curku vode. Če padejo izven njega, močno udarijo ob vodno površino. Pri prečkanju rib skozi turbine je smrtnost različna glede na tip turbine, hitrost vodnega toka skozi turbino in dolžino ribe. Največja, 100-odstotna, je pri Peltonovi turbini, najmanjša pa pri Kaplanovi – pri ugodnih razmerah nekje do 5 % (ob zelo neugodnih razmerah pa tja do 50 %). Francisova je povprečno nekoliko bolj smrtonosna od Kaplanove. Zato se izvajajo tudi ukrepi, ki bi zmanjšali smrtnost rib pri migraciji dolvodno: od ribam prijaznih turbin do različnih ukrepov, ki ribam preprečujejo vhod v dovodni kanal do turbin in jih vodijo do ribjih stez ali drugih naprav, ki jim omogočajo dolvodno migracijo. Pri teh napravah običajno niso problematični hidravlični pogoji, ampak pogoji obratovanja, ki zahtevajo nenehno vzdrževanje.

2.2 Stanje v Sloveniji

v Sloveniji je malo ribjih stez na velikih pregradah (Kolman in sod., 2006). Na manjših pregradah jih je nekoliko več, vendar so v večini primerov slabo vzdrževane ali pa napačno projektirane. To nazorno kaže primer ribjih stez na reki Vipavi (Koruza, 2012). Vendar se stanje v Sloveniji nekoliko izboljšuje, saj nam evropska vodna direktiva med drugim nalaga, da ekološko optimiziramo uporabo rek s sprejemljivimi stroški, kar bo pripomoglo k obnovitvi količine rib in migracij (Water Framework Directive, 2000/60/EC, cit. po Jašić, 2010). Poleg tega Jašić navaja, da evropska direktiva nalaga tudi konkretne časovne okvire. Tako je moral biti program ekološkega monitoringa zasnovan do leta 2006, do leta 2009 pa je moral biti zasnovan plan gospodarjenja s celotnimi povodji. Do 22. decembra 2015 morajo biti znani ukrepi za vsako povodje, ki bodo nastali s primerjavo ekološkega monitoringa in zastavljenih ciljev. Ta vodna direktiva je bila vnesena v slovenski pravni red leta 2002 z Zakonom o vodah (Kolman, 2014). Poleg tega zakona to področje ureja še Zakon o sladkovodnem ribištvu (2006), v katerem je med drugim določeno, da mora biti vsak poseg v ribiški okoliš načrtovan in izveden na način, ki v največji meri zagotavlja ohranjanje rib, njihove vrstne pestrosti, starostne strukture in številčnosti. Zaradi prehajanja rib čez grajene objekte v vodah mora investitor zagotoviti ustrezen prehod za ribe.

2.3 Primer ribje steze ob HE Arto Blanca

HE Arto Blanca je del verige HE na spodnji Savi. Poleg nje so že zgrajene HE Vrhovo, HE Boštanj, HE Krško, v gradnji je HE Brežice, v letu 2016 pa je predviden začetek gradnje HE Mokrice. Poleg omenjenih HE se na tem delu reke Save nahaja še pregrada za potrebe NEK. Shematski prikaz HE na spodnji Savi je na sliki 1.



Slika 1: Situacija verige HE na spodnji Savi (Jašič, 2010)

Na območju HE Arto Blanca je bilo pred gradnjo opravljenih več popisov ribje raznolikosti, a so navajali različne vrste rib. V recenziji ribje steze ob HE Arto Blanca (Zabrc, 2008) je bil objavljen popis rib na področju med HE Boštanj in jezom, ki služi za potrebe NEK (preglednica 1). V njej so navedene vrste rib, ki so bile najdene na tem območju, njihov življenjski prostor, prehranjevalne navade, tip selitve in relativna dolžina selitve (glede na ribe po celem svetu).

Preglednica 1: Razvrstitev rib glede na njihove hidrološke (H) in razmnoževalne (R) potrebe, način prehranjevanja (mlade – odrasle ribe) in selitve (Zabric, 2008)

Vrsta/družina	H	R	Prehrana	Selitev-tip	Selitev-razdalja
Petromyzontidae					
ukrajinski potočni piškur- <i>Eudontomyzon vladkovi</i> Oliva&Zanan 1959	reofilna	litofilna	filtrator		kratka - srednja
Salmonidae					
potočna postrv- <i>Salmo t. fario</i> Linnaeus, 1758	reofilna	litofilna	inverti-piscivor	potamodromna	kratka
šarenka- <i>Oncorhynchus mykiss</i> (Walbaum, 1792)	indiferentna	litofilna	inverti-piscivor	potamodromna	kratka
potočna zlatovčica- <i>Salvelinus fontinalis</i> (Mitchill, 1814)	reofilna	litofilna	inverti-piscivor		kratka
sulec- <i>Hucho hucho</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	litofilna	piscivor	potamodromna	srednja - dolga
Thymallidae					
lipan - <i>Thymallus thymallus</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	litofilna	invertivor		kratka
Cyprinidae					
rdečeočka- <i>Rutilus rutilus</i> (Linnaeus, 1758)	indiferentna	fito-litofilna	omnivor		kratka
platinica- <i>Rutilus virgo</i> (Heckel, 1852)	reofilna	fito-litofilna	invertivor	potamodromna	kratka
klenič- <i>Leuciscus leuciscus</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	fito-litofilna	omnivor		kratka
klen- <i>Squalius cephalus</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	litofilna	omnivor	potamodromna	kratka
jež- <i>Leuciscus idus</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	fito-litofilna	omnivor	potamodromna	kratka
blistavec- <i>Telestes souffia</i> (Risso, 1827)	reofilna	litofilna	invertivor		kratka
pisaneč- <i>Phoxinus phoxinus</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	litofilna	invertivor		kratka
rdečeperka- <i>Scardinius erythrophthalmus</i> (Linnaeus, 1758)	stagnofilna	fitofilna	omnivor		kratka
beli amur- <i>Ctenopharyngodon idella</i> (Valencien. 1844)	stagnofilna		herbivor		
bolen- <i>Aspius aspius</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	litofilna	piscivor	potamodromna	srednja
linj- <i>Tinca tinca</i> (Linnaeus, 1758)	stagnofilna	fitofilna	omnivor		kratka
podust- <i>Chondrostoma nasus</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	litofilna	herbivor	potamodromna	srednja
navadni globoček- <i>Gobio obtusirostris</i> Valenciennes, 1842	reofilna	psamofilna	invertivor		kratka
zvezdogled- <i>Romanogobio uranoscopus</i> (Agassiz, 1828)	reofilna	litofilna	invertivor		kratka
keslerjev globoček- <i>Romanogobio kesslerii</i> (Dybowsky, 1862)	reofilna	fito-litofilna	invertivor		kratka
beloplavuti globoček- <i>Romanogobio vladkovi</i> (Fang, 1943)	reofilna	psamofilna	invertivor		kratka
mrena- <i>Barbus barbus</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	litofilna	invertivor	potamodromna	srednja
pohra- <i>Barbus balcanicus</i> Kot., Ts., Rab&Ber., 2002	reofilna	litofilna	invertivor		kratka
zelenika- <i>Alburnus alburnus</i> (Linnaeus, 1758)	indiferentna	fito-litofilna	omnivor		kratka
pisanka- <i>Alburnoides bipunctatus</i> (Bloch, 1782)	reofilna	litofilna	invertivor		kratka
androga- <i>Blicca bjoerkna</i> (Linnaeus, 1758)	stagnofilna	fito-litofilna	invertivor		kratka
ploščič- <i>Abramis brama</i> (Linnaeus, 1758)	indiferentna	fito-litofilna	omnivor	potamodromna	kratka
ogrica- <i>Vimba vimba</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	litofilna	invertivor	potamodromna	kratka
pezdirk- <i>Rhodeus amarus</i> (Bloch, 1782)	indiferentna	ostrakofilna	omnivor		kratka
srebrni koreselj- <i>Carassius gibelio</i> (Bloch, 1782)	Indiferentna	fito-litofilna	omnivor		kratka
krap- <i>Cyprinus carpio</i> Linnaeus, 1758	Indiferentna	fitofilna	omnivor		kratka
pseudorazbora- <i>Pseudorasbora parva</i> (T em. & S chlegel, 1846)	ndiferentna	fito-litofilna	omnivor		kratka
Percidae					
navadni okun - <i>Gymnocephalus cernua</i> (Linnaeus, 1758)	indiferentna	fito-litofilna	invertivor	potamodromna	kratka
navadni ostrž- <i>Perca fluviatilis</i> Linnaeus, 1758	indiferentna	fito-litofilna	Inverti-piscivor		kratka
upiravec- <i>Zingel streber</i> (Siebold, 1863)	reofilna	litofilna	invertivor		kratka
smuč- <i>Sander lucioperca</i> (Linnaeus, 1758)	indiferentna	fito-litofilna	piscivor		kratka
Siluridae					
som- <i>Silurus glanis</i> Linnaeus, 1758	indiferentna	fitofilna	piscivor		kratka

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1

Vrsta/družina	H	R	Prehrana	Selitev-tip	Selitev-razdalja
Esocidae					
ščuka- <i>ox lucius</i> Linnaeus, 1758	indiferentna	fitofilna	piscivor	potamodromna	kratka
Nemachillidae					
babica- <i>Barbatulla barbatulla</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	psamofilna	invertivor		kratka
Cobitidae					
navadna nežica- <i>Cobitis elongatoides</i> Bacescu & Maier, 1969	reofilna	fitofilna	invertivor		kratka
velika nežica- <i>Cobitis elongata</i> Heckel & Kner 1858	reofilna	fitofilna	invertivor		kratka
zlata nežica- <i>Sabanejewia balcanica</i> (Karaman, 1922)	reofilna	fito-litofilna	invertivor		kratka
Cottidae	reofilna				
kapelj- <i>Cottus gobio</i> Linnaeus, 1758	reofilna	speleofilna	invertivor.		kratka
Lotidae	reofilna				
menek- <i>Lota lota</i> (Linnaeus, 1758)	reofilna	lito- pelagofilna	inverti-piscivor	potamodromna	srednja
Centrarchidae					
sončni ostriž- <i>Lepomis gibbosus</i> (Linnaeus, 1758)	indiferentna	ikre odlaga v gnezdo fito-litofilna	invertivor	potamodromna	kratka

Legenda: Hidrologija: reofilna - hitro tekoče, s kisikom bogate in čiste vode; stagnofilna - počasi tekoče ali stoječe vode; indiferentna - vrsta s široko toleranco hidroloških pogojev, vendar ne reofilna. Razmnoževanje: litofilna - ribe odlagajo ikre na ali v prod/kamenje; fitofilna - ikre odlagajo na rastlinje ali dele rastlin; fitolitofilna - ikre odlagajo na rastlinje ali na prod/kamenje če rastlinja ni; psamofilna - ikre odlagajo na ali v pesek in drug drobnozrnat substrat; ostrakofilna - ikre odlaga v školjke družine Unionidae; speleofilna - ikre odlaga na strop votlinice in jih varuje; litopelagofilna - ikre odloži na pesek/kamenje, ličinke pa se razvijejo med plavljenjem v pelagiku. Prehrana: invertivor - hrana so pretežno vodni nevretenčarji; piscivor - hrana so pretežno ribe; invertipiscivor - del populacije se hrani pretežno z vodnimi nevretenčarji, del pa pretežno z ribami; herbivor - hrani se z algami in makrofiti; omnivor - vrste, ki so glede hrane brez jasnih preferenc (oportunisti); filtrator - organske delce prefiltrira iz sedimenta. Selitev - razdalja: kratka - znotraj enega rečnega odseka (v plitvejših vodah na drst, iz enega habitata v drugega zaradi pobega pred nevarnostjo, za hrano itd.); srednja - v oddaljene odseke reke in pritoke za hrano in zaradi reprodukcije. Potamodromna - se seli na krajše ali daljše razdalje znotraj rečnega ekosistema na drstišča in pasišča.

Za ribe, za katere je bilo pričakovano, da bodo uporabile ribjo stezo, je Hladnik (2007) podal hitrosti plavanja (preglednici 2 in 3). Prikazane so hitrosti pri normalnem (do 24-urno plavanje brez utrujanja), pospešenem (traja lahko nekaj minut) in maksimalnem (kratkotrajno sunkovito) plavanju.

Preglednica 2: Hitrosti plavanja in vzdržljivost selivk na daljše razdalje (Hladnik, 2007)

Vrsta ribe	Dolžina	Norm. hitrost plavanja	Videler		Beach		
			Metoda 1	Metoda 2	Maksimalna hitrost plavanja		Vzdržljivost
			v_{pos}	v_{pos}	v_{max}	v_{max} ($T=15^{\circ}\text{C}$)	
(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 3: Hitrosti plavanja in vzdržljivost osebkov v 1. letu spolne zrelosti (Hladnik, 2007)

Vrsta ribe	Dolžina	Norm. hitrost plavanja	Videler		Beach		
			Metoda 1	Metoda 2	Maksimalna hitrost plavanja		Vzdržljivost
			v_{pos}	v_{pos}	v_{max}	v_{max} ($T=15^{\circ}\text{C}$)	
(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

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice 3

Vrsta ribe	Dolžina	Norm. hitrost plavanja	Videler		Beach		
			Metoda 1	Metoda 2	Maksimalna hitrost plavanja		Vzdržljivost
			Posp. hitrost plavanja		v_{max} ($T=15^{\circ}C$)	t	
			L	v_{norm}			v_{pos}
(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
Sarenka	48	0,5	1,30	1,28	3,95	4,30	12

3 VRSTE IN DELI RIBJIH STEZ

3.1 Vrste ribjih stez

Ribje steze lahko razdelimo glede na hidravlične razmere, ki vladajo v sami ribji stezi, glede na vrsto vodnih organizmov, ki so jim ribje steze namenjene, glede na njihovo vključenost v naravno okolje, seveda pa bi jih lahko razdelili tudi kako drugače. Uporabil bom Larinierjevo razdelitev (Larinier in sod., 2002), po njem bomo tudi na kratko povzeli lastnosti ribjih stez. Larinier je namesto izraza ribje steze uporabljal izraz ribji prehodi. Ta izraz vključuje še druge možne načine, kako ribam pomagati čez določeno oviro v strugi. Iz te razdelitve se najhitreje vidi, kakšne hidravlične razmere vladajo na objektu za premeščanje rib, tako da bom v nadaljevanju povzel osnovne značilnosti ribjih prehodov po Larinierju (Larinier in sod., 2002).

3.1.1 Bazenski tip ribje steze, predzajezitev in sonaravno urejeni obtočni kanal

Pri vseh treh tipih ribjih stez razdelimo višino, ki jo morajo ribe premagati, na serijo majhnih padcev, ki tvorijo serijo bazenov.

3.1.1.1 Bazenski tip

Bazenski tip ribje steze je relativno star koncept ribjih prehodov in zelo razširjen, med drugim je tudi že veliko časa prisoten v Sloveniji (Kolman in sod., 2010).

Pri tem prehodu se voda preliva iz bazena v bazen na več načinov: s površinskim prelivanjem čez ločilno steno prekata, skozi eno ali več potopljenih odprtih v ločilni steni, skozi režo (lahko jih je tudi več) ob ločilni steni in razne kombinacije prej naštetih načinov. Oblike prelivov, potopljenih odprtih in rež so običajno pravokotne. Bazeni imajo dvojno vlogo, služijo za disipacijo energije in za počitek rib pri napredovanju po ribjem prehodu, torej po kratkotrajnem naporu, ko gredo mimo (ali čez) ločilne stene (Kolman in sod., 2006).

Glavni parametri teh ribjih stez so dimenzije bazenov in geometrijske lastnosti ločilnih sten. Te geometrijske karakteristike skupaj z gorvodnimi in dolvodnimi robnimi pogoji (nivo vode in hitrost vode) določajo hidravlične lastnosti ribjega prehoda, torej pretok, razlike globin med bazeni in tokovno sliko v bazenu.

Manjša kot je razlika gladin med bazeni (DH), lažje je ribam napredovati, saj so pri manjših DH nižje hitrosti med posameznimi bazeni (prekati). Če pa jo preveč zmanjšamo, postane ribji prehod predolg in s tem neekonomičen.

Larinier (Larinier in sod., 2002) podaja tudi približno enačbo za izračun maksimalne hitrosti med ribjimi prekati:

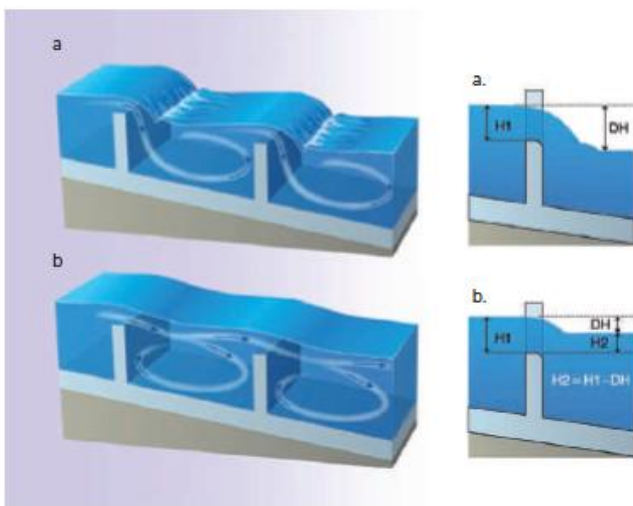
(1)

V nadaljevanju diplomske naloge bomo izračunali veliko bolj točne vrednosti hitrosti in njihovo prostorsko porazdelitev. Ta enačba nam lahko služi kot neka začetna ocena, ko se

odločamo, približno koliko prekatov bomo potrebovali glede na višino, ki jo moramo premagati, in glede na plavalne sposobnosti rib, za katere projektiramo ribjo stezo. Ker daje ta enačba prenizke vrednosti, kar v nadaljevanju potrjujejo tudi naši izračuni (prikazani so v nadaljevanju naloge), je za dobro dimenzioniranje nujno potrebno dobro hidravlično modeliranje.

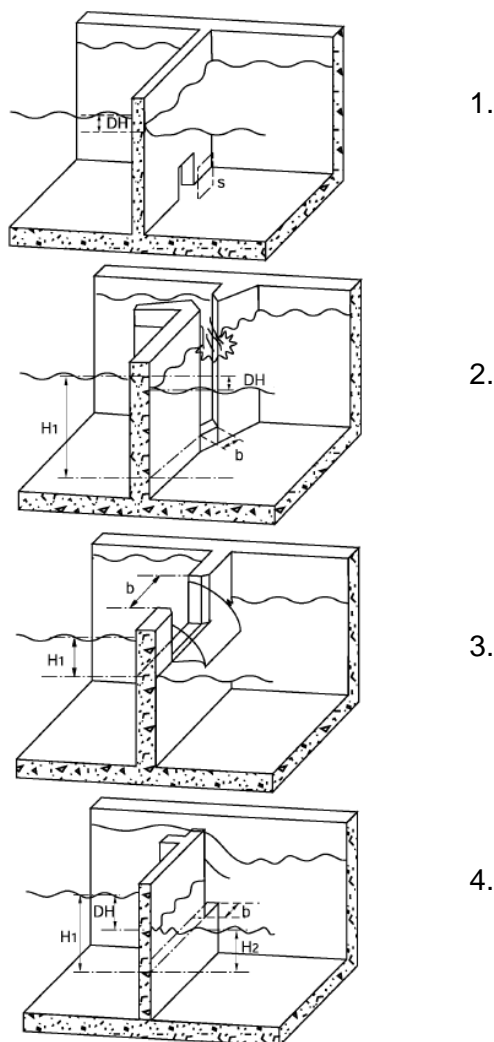
Vodni tok skozi bazenski tip ribjega prehoda je lahko bodisi prelivajoč bodisi strujajoč.

Pri prelivajočem toku se voda preliva čez (ali skozi, če je nižji pretok) ločilne stene na dno bazenov, tam pa pride do vodnega skoka, kjer se disipira kinetična energija. Razmere so take kot pri običajnih prelivih. Relativno velike razlike vodnih gladin glede na pretok so pri prehodih, ki vsebujejo tak tip toka, ki je primeren za ribe, ki skačejo, kot so npr. postrvi. Vsekakor pa je neprimeren za npr. čepe.



Slika 2: Primera možnega toka skozi bazenski tip ribje steze (a) prelivajoč in (b) strujajoč (Baudoin in sod., 2014)

Pri strujajočem toku pa curek, ki se formira ob rebrih (zarezi, reži), ostane na površini: energija se disipira v bazenih v velikih vrtincih. Ta tip toka se pojavi, ko spodnji vodni nivo čez greben (torej če gledamo le višino vode od ovire v vodnem toku do gladine) doseže 0,5–0,6-kratno višino vode gorvodno čez greben. Prehod med tem in prelivajočim tokom je nestabilen. Ribji prehodi, ki vsebujejo to vrsto toka (to so prehodi z zarezi, režami in s potopljenimi odprtini), so primerni za širšo množico vrst rib. Spet pa je uporabnost ribjega prehoda odvisna od maksimalnih hitrosti, ki so, kot smo že omenili, odvisne od spremembe višine. Tako Larinier (Larinier in sod., 2002) da približne ocene, da je pri taki vrsti toka in višinski razliki – DH je 0,30–0,40 – prehod primeren le za postrvi, pri DH 0,30–0,25 je primeren za srednje dobre plavalke, kot je čepa, od $DH = 0,25$ navzdol pa za ribe s slabšimi plavalnimi sposobnostmi, to so običajno manjše ribe.



Slika 3: Primeri ribjih prehodov bazenskega tipa: 1. s potopljeno odprtino, 2. z vertikalno režo, 3. s prelivom, 4. z zarezo (Larinier in sod., 2002)

Poleg maksimalnih hitrosti v ribjem prehodu je zelo pomemben nivo turbulentnosti in razburkanosti. Večji kot sta turbulentnost in razburkanost (na primer pri prelivanju (veliki zračni žepi)), težje je ribam napredovati po ribjem prehodu. Za splošno oceno takega stanja (razburkanosti in turbulentnosti) podaja Larinier (Larinier in sod., 2002) približno enačbo. Naj to enačbo na kratko povzamem, kakor jo je Bombač (2014):

$$\text{---} , \quad (2)$$

kjer je

-povprečna vrednost disipacije kinetične energije na enoto volumna
-gostota (vode)
-gravitacijski pospešek
-pretok
-višinska razlika med sosednjima prekatoma (DH)
-volumen vode v prekatu (bazenu)

Kot ugotavlja Bombač (2014), so številni preučevalci ribjih stez ugotovili uporabnost te enačbe in predlagali, da ne sme preseči 200 W/m^3 za postrvi (salmonidne vrste). Za manjše ribje steze in za povprečne rečne ribe pa ne sme preseči 150 W/m^3 (Larinier in sod., 2002). Iz te enačbe se določi približni volumen posameznega prekata, pri čemer je minimalni volumen fiksiran s pretokom in z razliko med bazeni DH.

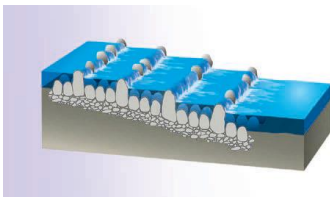
Pojav hitrega direktnega toka iz enega bazena v drugega mora biti preprečen. Prav tako ne sme tok s preveliko hitrostjo zadeti v stene (rebri ali steno prekata), ker se lahko pojavi lokalno velika vrednost disipacije kinetične energije na enoto volumna (E), kar lahko zmede ribe, da ne znajo več najti poti navzgor. Nekateri lahko celo spodbudi k skoku, zato se lahko poškodujejo ali celo padejo iz ribjega prehoda. Poškodujejo se tudi, če jih tok odnese v prekatne stene ali robove.

Poleg splošnih napotkov glede turbulence Larinier (Larinier in sod., 2002) podaja tudi napotke, ki se tičejo geometrije, ki omogočajo varno uporabo ribjega prehoda čim večjemu številu rib. Pri prelivajočem toku mora biti minimalna globina pod ločilno steno vsaj dvakrat DH. Globina vode na splošno je odvisna od ribje vrste – večja kot je riba, večja mora biti globina.

Pri tej vrsti ribje steze, ki je kar občutljiva na nihanje gladin, so potrebne prilagoditve, da lahko zajame večji razpon pretokov brez prevelikega poslabšanja razmer (preprečene morajo biti prevelika hitrost, turbulentost in razburkanost). To lahko dosežemo z več ukrepi, eden izmed njih je izgradnja več izhodov iz ribjega prehoda, nekaterih za večje pretoke, nekaterih za manjše. Ti izhodi so lahko izvedeni v obliki zapornic. Najenostavnejša rešitev je, da uporabimo vertikalne reže ali in podvodne odprtine. Tok vode skozi podvodne odprtine zaradi višjega nivoja vode bolj izteka (opravka imamo z nizko potopljenim iztokom iz posode, kjer se količina iztoka zelo poveča ob majhni spremembi gladine vode). Ta rešitev je primerna, če ne projektiramo ribjega prehoda na to, da bodo ribe prehajale skozi te odprtine.

3.1.1.2 Sonaravno urejeni obtočni kanali

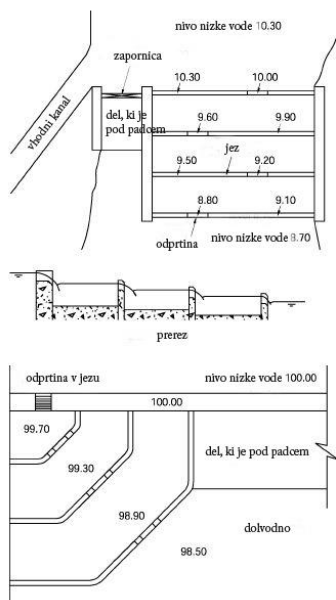
Mnogi avtorji ta tip ribjega prehoda uvrščajo povsem v svojo kategorijo, saj se na pogled zelo razlikuje od drugih ribjih prehodov in je najnaravnejšega videza (FAO/DVWK, 2002). Kljub vsemu jih Larinier (Larinier in sod., 2002) uvršča med bazenske tipe, saj je njihovo delovanje zelo podobno zaporedju bazenov. Vseeno jih deli na dva tipa: na tiste, kjer se energija disipira lokalno v vsakem bazenu in še posebej na koncu posameznega bazena, in na tiste, kjer se energija disipira po vsej dolžini, kar je že bolj podobno hrapavi klančini ali drči. Oba tipa, še posebej drugi, sta občutljivejša na nihanje gladine na vtoku v ribjo stezo kot bazenski tip, poleg tega sta oba omejena na nizek naklon.



Slika 4: Primer ureditve dna sonaravnega obtočnega kanala (Baudoin in sod., 2014)

3.1.1.3 Predzajezitve

S tem tipom prehoda namesto ene pregrade ustvarimo serijo pregrad, med katerimi se formirajo bazeni. To je še zlasti primerno za manjše pregrade. Prednost takega tipa prehoda je, da lahko uporabimo kar celoten pretok ali velik del pretoka, ki teče čez pregrado, in na ta način privabimo veliko število rib. V posameznih pregradah, ki sestavljajo sistem predzajezitev, so manjše zarezje, ki služijo zlasti, ko je pretok manjši. Ko je pretok večji, pa se voda preliva čez cel profil predzajezitev.



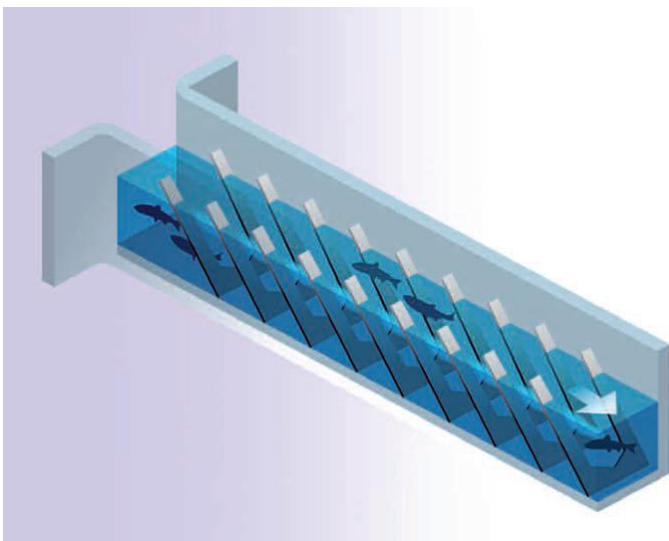
Slika 5: Primer predzajezitve (Larinier in sod., 2002)

3.1.2 Denil ribji prehod

Princip delovanja takega ribjega prehoda je, da se čim bolj zmanjša srednja hitrost vodnega toka z namestitvijo serije odbijačev. Odbijači so običajno nameščeni na dnu ali ob straneh ali ob straneh in na dnu. Korito je praviloma pravokotne oblike in ima praviloma strm naklon. Odbijači, ki so lahko različnih oblik, povzročijo sekundarne spiralne tokove, kar privede do zelo učinkovite disipacije energije. Tak tip ribjega prehoda je primeren le za omejeno število vrst rib (za tiste, ki niso tako občutljive na velike vrednosti E). Prav tako so pri takem prehodu omejene velikosti rib navzgor (večje ribe nimajo dovolj prostora za plavanje) in navzdol (manjše ribe se težko orientirajo vodnem toku). Torej je za vsako velikost rib optimalno določena velikost takega ribjega prehoda.

Poleg velikosti rib omejuje ta tip ribjega prehoda tudi nihanje pretoka. Tip prehoda, kjer so odbijači samo na dnu, je še posebno občutljiv, saj pri majhnem pretoku dobimo bazenski tip s prelivi, pri velikem pa so hitrosti prevelike. Njegova slabost je, da se pri večini izvedb hitro zapolni s plavjem in plavinami, kar zveča obratovalne stroške. Glede na povedano se je potrebno velikokrat odločiti, ali uporabiti katero izmed variant bazenskega tipa, kjer je manjši maksimalni naklon in s tem tudi višja začetna cena, ali Denil ribji prehod, ki ima velike

omejitve glede rib, ki ga lahko uporabljajo, večji pa so tudi stroški obratovanja, če je v vodi veliko plavja in plavin. Vendar pa so stroški za izgradnjo Denil ribjega prehoda veliko nižji.



Slika 6: Primer Denil ribjega prehoda (Baudoin in sod., 2014)

3.1.3 Ribje splavnice in ribja dvigala

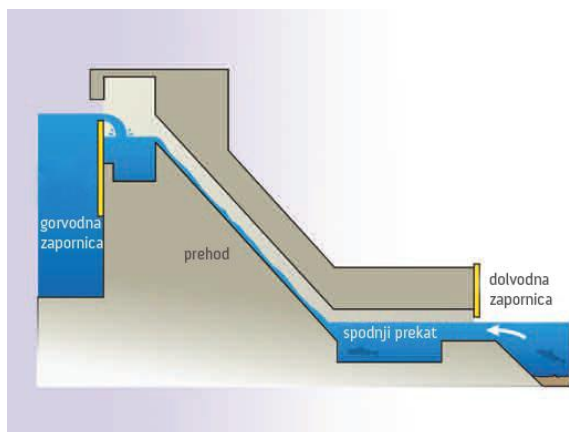
3.1.3.1 Ribje splavnice

Ribje splavnice so običajno sestavljene iz spodnjega prekata, povezovalnega jaška in zgornjega prekata. Poleg tega ima spodnji prekat loputo, ki zapira vhod v splavnico dolvodno, zgornji prekat pa loputo, ki zapira izhod v splavnico gorvodno.

Splavnica deluje tako, da najprej teče voda skozi splavnico (zgornja in spodnja loputa sta odprti), ta tok vode privablja ribe, nato se spodnja loputa zapre in splavnica se začne polniti do kote zgornje vode. Ko se napolni, se ribe spodbudi, da zapustijo splavnico, tako da se spodnja loputa deloma odpre, vendar je dotok še vedno večji kot iztok. Na koncu se splavnica povsem sprazni tako, da se odpre do kraja spodnja loputa in zapre zgornja. Nato se cikel ponovi.

Splavnice v splošnem ne veljajo za zelo učinkovite, predvsem zato, ker so ciklične in v trenutku, ko se polnijo, ne morejo sprejemati novih rib, poleg tega so trajanja posameznih faz obratovanja lahko optimizirana samo za določeno vrsto rib (nekatero na primer ne čakajo tako dolgo v spodnjem prekatu, nekatere pa tako hitro ne zapustijo splavnice). Splavnice so tudi zelo omejene glede na količino rib, ki jih lahko sprejmejo.

Zaradi navedenih vzrokov so ribje splavnice marsikje opustili ali pa so jih izboljšali z dodatno mehansko opremo (na primer s premikajočimi mrežami, ki ribe prisilijo, da zapustijo splavnico). Vendar so potem postale tako drage, da je bolj smiselno uporabiti ribje dvigalo.



Slika 7: Splavnica za ribe (Baudoin in sod., 2014)

3.1.3.2 Splavnice za ladje

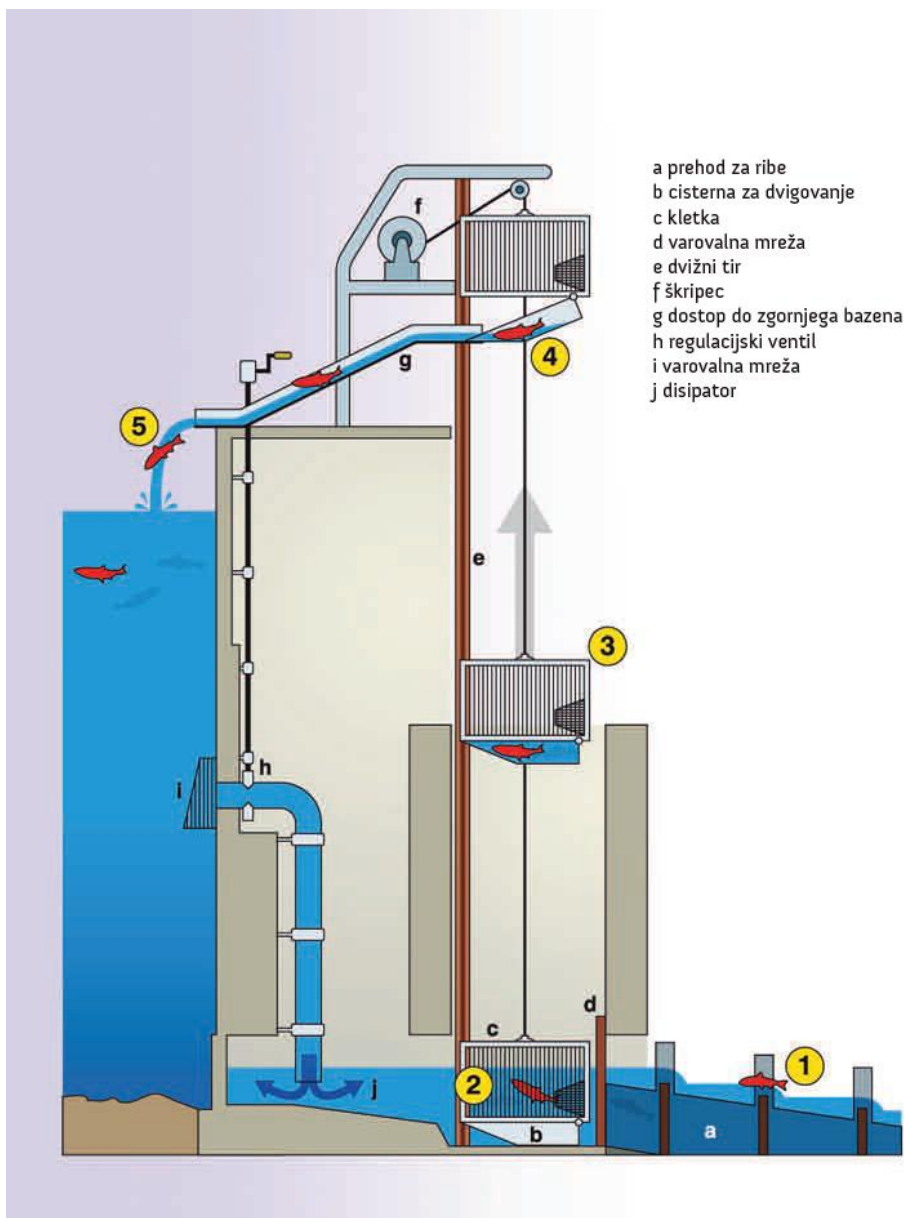
Splavnice za ladje ribe uporabljajo bolj po naključju, in to v zelo majhnem deležu potujoče populacije, saj ni toka iz splavnice, ki bi jih privabljal, prav tako ni toka, ki bi jih spodbujal, da jo zapustijo. Delujejo le, ko pride ladja. Z dodatkom tokov za privabljanje rib in za spodbujanje, da zapustijo splavnico, so nekoliko izboljšali situacijo, a so zahteve za premeščanje ladij povsem drugačne od zahtev za premeščanje rib.

3.1.3.3 Ribja dvigala

Ribja dvigala delujejo tako, da najprej ujamejo ribe, jih nekaj časa zadržujejo v kletki ali spodnjem bazenu, nato jih dvignejo in spustijo čez pregrado. Tudi tukaj se uporablja tok za privabljanje rib v dvigalo.

Prednost ribjih dvigal pred ostalimi ribjimi prehodi je v tem, da so relativno poceni glede na višino, ki jo premoščajo (cena je skoraj neodvisna od višine premoščanja), poleg tega zavzamejo malo prostora in so neobčutljiva za nihanja vode za pregrado. Poleg tega omogočajo prenašanje manjših rib, ki sicer ne bi zmogle skozi druge ribje prehode.

Slabosti pa so predvsem visoki stroški obratovanja, saj je dosti gibljivih delov. Stroški vzdrževanja zelo naraščajo s kompliciranostjo ribjega dvigala. Poleg tega ribja dvigala ne delujejo, ko na njih poteka vzdrževanje ali pa so v okvari. Prav majhne ribe večine ribjih dvigal ne morejo uporabljati, saj imajo kletke, ki so zasnovane kot past za ribe, dokaj velike luknje (če bi bile luknje manjše, bi bile večje ribe pazljivejše in ne bi zašle v past, saj so že tako težave pri postrvih). Težave z velikostjo kletke, ki lahko sprejme samo določeno količino rib, so podobne kot pri ribji splavnici in se rešujejo na podoben način, kar spet privede do znatnega zvečanja stroškov obratovanja.



Slika 8: Primer ribjega dvigala (Baudoin in sod., 2014)

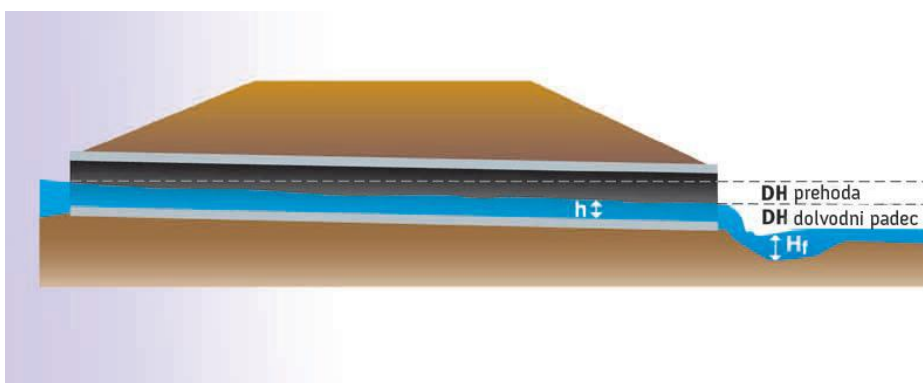
3.1.4 Ribji prehodi skozi prepuste, skalne ovire in ovire v ustjih rek

Skupno tem prehodom je, da v njih zelo nihata pretok osnovnega toka in vodna gladina tako na vходу v ribji prehod kot na izhodu.

3.1.4.1 Ribji prehod skozi prepuste

Tok skozi prepuste je navadno zelo hiter in včasih celo deroč, poleg tega je dokaj konstanten po celotni dolžini, širini in globini, torej vodnim organizmom ne omogoča počitka na poti skozenj. Poleg tega imajo velikokrat veliko višinsko razliko na iztoku, ki največkrat nastane zaradi velike erozije, kar večini rib onemogoča vstop v ta objekt. V samih prepustih so vodne gladine največkrat zelo nizke, kar predstavlja veliko oviro za večje ribe. Ti problemi se običajno rešujejo na več načinov, mora pa se upoštevati nevarnost zasutja s plavinami. Pri

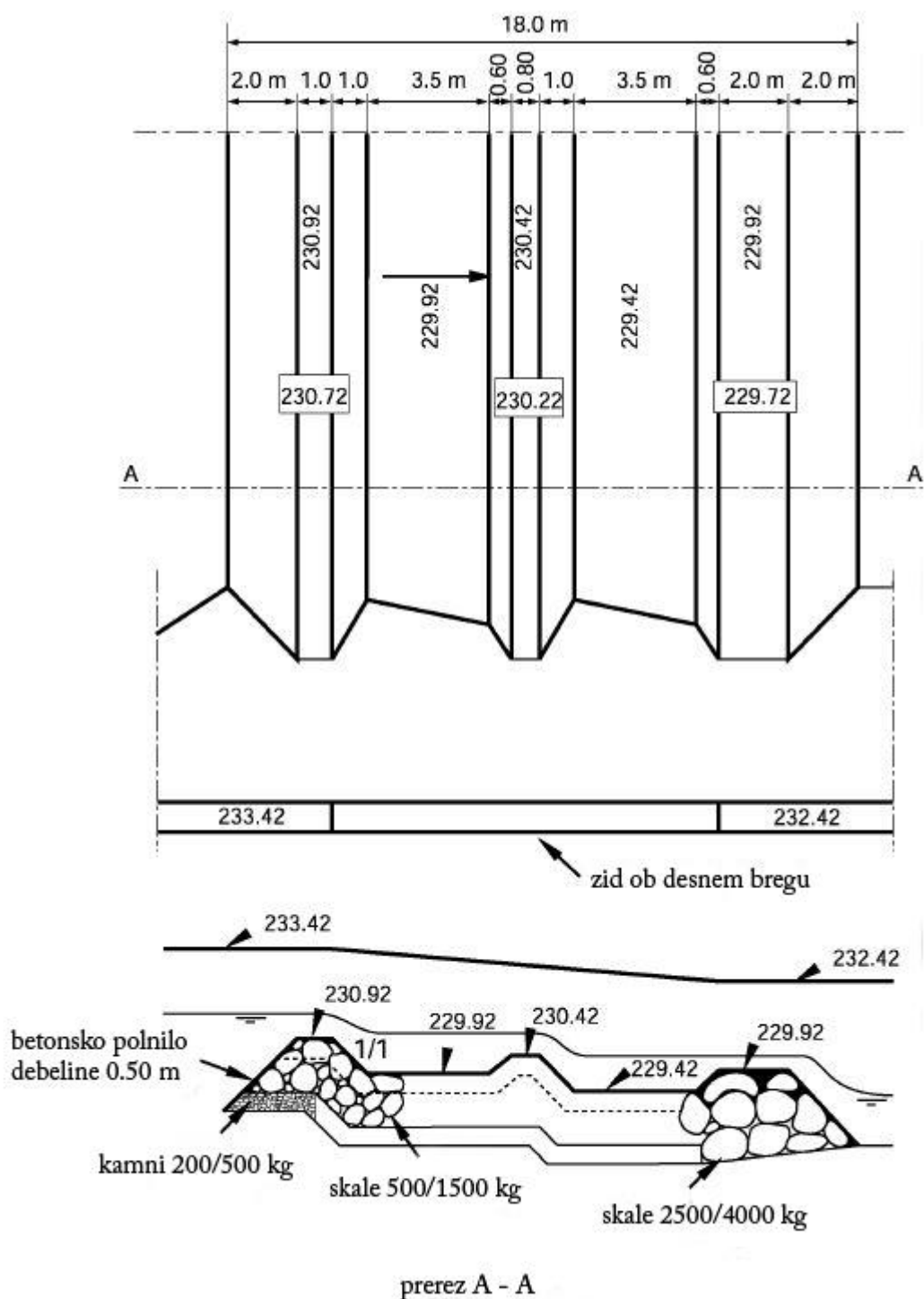
majhnih naklonih se problem najučinkoviteje reši tako, da je prepust večjih dimenzij, dno prepusta (mišljeno je dno, kjer teče voda) pa je montirano nižje od dna prvotne struge (koliko nižje, je odvisno od materiala, ki je na dnu prvotne struge). Tako se prepust lahko zapolni z materialom, iz katerega je običajno dno struge, kar omogoča podobne tokovne razmere kot v prvotni strugi. Seveda je zato prepust veliko večji, kot bi bil sicer. Poleg tega se na določeni razdalji od prepusta postavijo skalne ovire, ki omogočajo dvig gladine v prepustu in s tem lažji vstop v prepust ribam ob nizkih vodah. Tolmun, ki se ustvari med skalnimi ovirami in prepustom, omogoča ribam počitek, preden gredo prečkat prepust, in zmanjša erozijo na koncu prepusta, ki bi lahko ustvarila veliko višinsko razliko, ki je ribe ne bi mogle prečkati. Če je naklon velik, se za učinkovito disipacijo energije uporabljajo prilagojeni bazenski tipi ali Denil prehodi, ki niso tako občutljivi na zasutje.



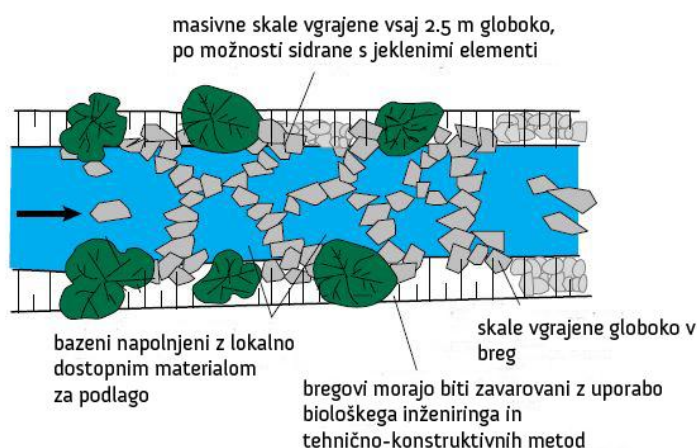
Slika 9: Primer prepusta z značilnim tolmunom, ki nastane zaradi erozije (Baudoin in sod., 2014)

3.1.4.2 Ribji prehod skozi skalne ovire

Skalne ovire, ki so nastale kot pragovi pri mostovih in za zmanjšanje erozijske moči vode s tem, da se tam energija porablja, so ob nizkih pretokih neprehodna ovira za velike ribe, saj ne morejo skozi drobne luknje, skozi katere teče voda, ob visokih vodah pa ovirajo skoraj vse ribe, saj takrat hitrosti na teh odsekih zelo narastejo. Tudi tukaj je potrebno upoštevati nevarnost zasutja klasičnih ribjih prehodov bazenskega tipa. Poleg tega je tok, ki bi tekkel skozi te vrste ribjih prehodov, sorazmerno majhen in šibek v primerjavi s celotnim tokom, zato ne privablja dovolj rib. Tako rešitve s klasičnimi prehodi bazenskega tipa praviloma niso ustrezne. Najboljša rešitev je, da poskušamo ovire prilagoditi ali obstoječe prilagoditi tako, da že same po sebi omogočajo prehod ribam in še vedno opravljajo osnovno funkcijo. Tako Larinier (Larinier in sod., 2002) predlaga, da naj bodo njihove višine kar se da majhne. Če je pregrada majhna, predlaga, da se poskuša ustvariti širok trikotni preliv, če pa je višina večja, se razdeli na serijo manjših prelivov, ki so prav tako trikotni, med prelivoma pa so manjši bazeni. Ta oblika omogoča, da je višina vode ob nizkih pretokih sprejemljiva, ob večjih pa, da lahko ribe migrirajo bolj pri strani. Poleg tega se lahko manjši bazeni med prelivoma ob večjih pretokih zlahka sami očistijo. Mešanica te rešitve in sonaravne ureditve so lahko hrapave drče čez celotno strugo (seveda le, če struga ni preširoka in bi bilo to neekonomično), ki prav tako lahko prevzamejo vlogo pregrade za umirjanje vodnega toka in ribjega prehoda hkrati.



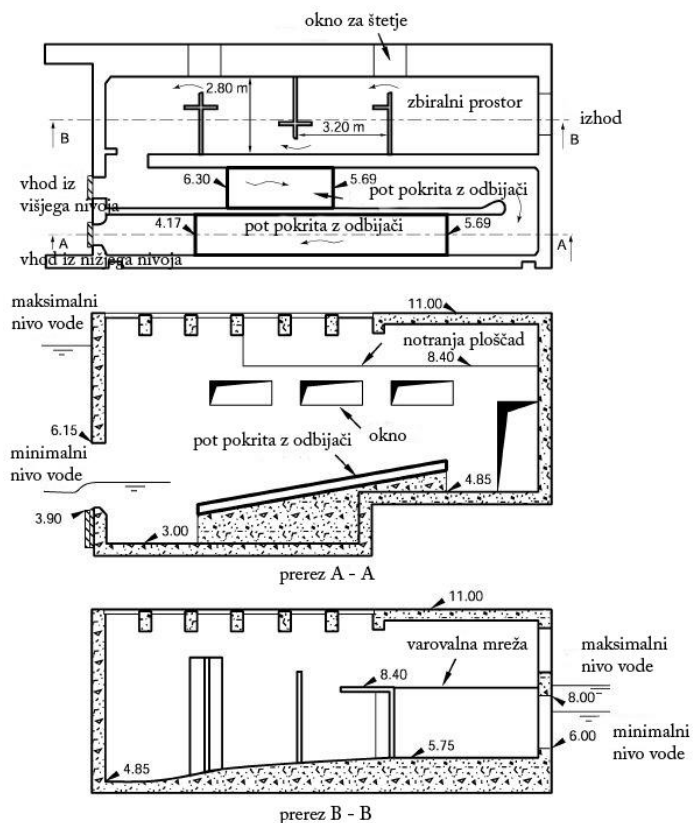
Slika 10: Primer prilagoditve skalne ovire (Larinier in sod., 2002)



Slika 11: Primer kamnite drče (FAO/DVWK, 2002)

3.1.4.3 Ribji prehod v ustjih rek

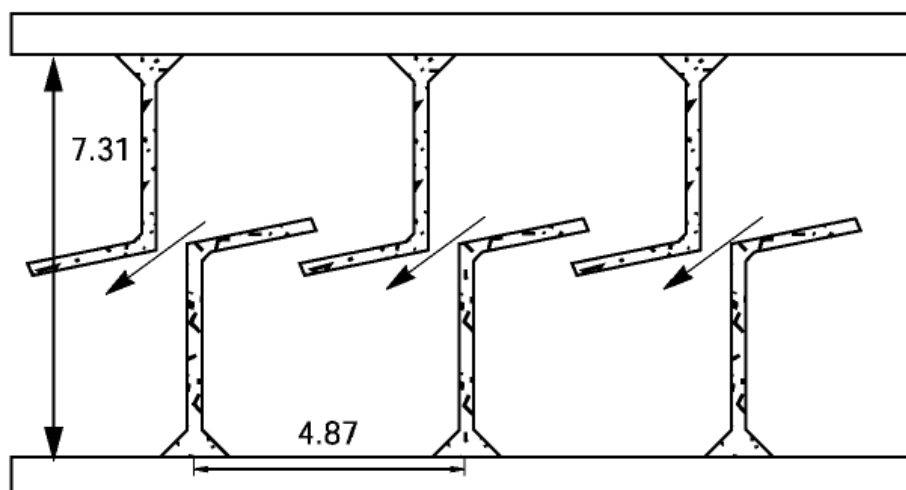
Ta tip prehodov uporabljamo ob ustjih rek, kjer so postavljene pregrade, ki preprečujejo poplavitve kmetijskih površin, mest in pristanišč ob velikem nihanju morske gladine zaradi plime ali pa ob elektrarnah, ki izkoriščajo plimo. Ti prehodi so specifični, saj morajo prevzeti veliko nihanje gladin vode, veliko nihanje pretokov in celo smer pretoka. Poleg tega pride do problema prehoda iz slane v sladko vodo, ki pri pregradah nastane skoraj hipoma, kar je za nekatere vodne organizme stresno ali celo smrtno. Običajno se ribji prehod postavi ob ali na delu iztoka (prepust skozi pregrado), kjer je zagotovljeno privabljanje vodnih organizmov že z osnovnim tokom. Pred samim vhodom v ribji prehod bazenskega tipa je postavljena serija prelivov, podobnih, kot sem jih omenil v točki 3.1.4.2, nato pa se postavi več vhodov v ribji prehod. Postavljeni so na različnih višinah in se običajno zapirajo z loputo. Ti vhodi omogočajo vodnim organizmom vstop v ribji prehod ob vsakršni gladini morja. Sam ribji prehod je običajno bazenskega tipa in je zasnovan tako, da lahko vodne organizme sprejme skozi trenutno odprti vhod. Larinier (Larinier in sod., 2002) ugotavlja, da kljub njihovi relativni kompleksnosti glede na ostale ribje prehode ni bilo opaziti velikega vpliva na ribjo populacijo gorvodno po rekah, na katerih so bili ti ribji prehodi zgrajeni.



Slika 12: Primer ribjega prehoda v ustju reke (Larinier in sod., 2002)

3.1.5 Prehodi za čepe (alosa)

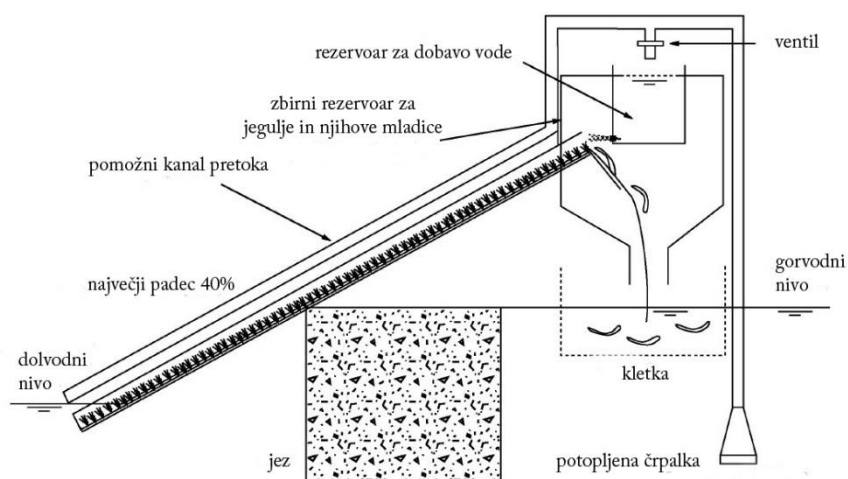
V splošnem so ti prehodi namenjeni ribam, ki so slabše plavalke, tako po hitrosti plavanja (to hitrost lahko vzdržujejo le kratek čas) kot po skupni vzdržljivosti in orientaciji v vodnem toku. Čepe spadajo med slabše plavalke, poleg tega ne morejo skakati in rade potujejo v jatah. Običajni bazenski tipi so za to vrsto rib povsem neučinkoviti (ob nekaj svetlih izjemah, kjer pa so dimenzije ribjih prehodov zelo velike). Izkazalo se je, da za orientacijo potrebujejo tok z malo turbulentnosti. Potrebujejo tudi več prostora, da se jata ne pretrga. Poleg tega je potrebno paziti, da se ne ujamejo v močna recirkulacijska območja. V ribjih dvigalih pa potrebujejo večjo zbirno cisterno. Tako so za take vrste rib, kot je čepa, ustrezni bazenski tipi večjih dimenzij, ki imajo manj območij z veliko turbulentnostjo.



Slika 13: Primer prehoda za čepe (Larinier in sod., 2002)

3.1.6 Prehodi za jegulje

Jegulje so zelo slabe plavalke. Vendar pa znajo plezati, tako da se opirajo na opore ali pa uporabljajo površinsko napetost vode, ki se ustvari med njimi in mokro steno (slednji način je omejen na manjše mladice). Jegulje za razliko od večine rib napredujejo po rekah navzgor kot mladi osebki, po reki navzdol v morje pa se vračajo odrasli osebki drstit. Jegulja ima v svojem življenju veliko preobrazb (sprememb oblike). Preobraža se tudi med samim vstopom v ustje rek in na poti do cilja. To je potrebno upoštevati, tako da se predvidi ustrezen prehod za jegulje tudi glede na to, kje se v vodnem toku pojavlja ovira (ali je bližje ustju reke ali je bližje izviru reke). Zelo se je uveljavil koncept klančine s substratom, ki omogoča jeguljam plezanje navzgor. Cela klančina se vlaži z omejenim tokom vode.



Slika 14: Primer prehoda za jegulje (Larinier in sod., 2002)

3.2 Deli ribjih stez

Ribje steze so sestavljene iz več delov. Učinkovitost delovanja ribje steze je tako odvisna od najšibkejšega člana.

3.2.1 Vhod v ribjo stezo

Vhod v ribjo stezo na dolvodni steni pregrade je med najpomembnejšimi deli steze, zato mu je potrebno posvetiti posebno pozornost. Odvisen je od možnosti, ki jih imamo na določeni pregradi, in značilnosti same pregrade.

Vhod mora biti postavljen tako, da upošteva dejstvo, da ko ribe, ki plavajo navzgor po strugi, naletijo na oviro v toku (to je lahko pregrada ali premočan vodni tok, ki presega njihove plavalne zmožnosti), iščejo pot mimo. To lahko storijo tako, da se pomikajo ob oviri navzgor, če je ovira pravokotna na smer toka, pa levo in desno, vsekakor pa se ne vračajo nazaj po strugi. Poleg tega moramo paziti, da se vhod v ribjo stezo ne nahaja v območjih z veliko turbulentnostjo, saj ga lahko zgrešijo.

Da ribe najdejo ribji prehod, sta zelo pomembni tudi tokovna slika pred vhodom v ribji prehod in stopnja raztopljenega kisika v vodi, ki prihaja iz ribje steze. Da se dodatno poudari vhod v ribjo stezo, se velikokrat uporablja tudi dodaten curek vode. Zavedati se je treba, da se ribe pri migriranju po reki ne zanašajo veliko na oči, ampak na druga čutila, ki jim pomagajo, da se pravilno orientirajo.

3.2.2 Glavni kanal ribje steze

Ta del je osnovni del in odloča o tem, katere ribe bodo sposobne prečkati ribjo stezo in katere ne. Bistveni parametri, ki odločajo o tem, so globina vode, stopnja razburkanosti in turbulentnosti, ozračnost, pretok, hitrostno polje, pogostost mest, kjer ribe lahko počivajo, ter same dimenzije, ki odločajo o velikosti rib, ki lahko gredo skozi.

Stopnja turbulentnosti in razburkanosti odloča o ribji orientaciji in o njeni hitrosti plavanja. Večja kot je turbulentnost, težje riba napreduje. Da je stabilnejša, razprostire prsne plavuti. To še posebej velja, če so veliki vrtinci približno take velikosti, kot je riba, ali pa večji (Lupandin, 2005). Njena orientacija prav tako peša, saj ji vid v turbulentni in razburkani vodi ne pomaga prav veliko, prav tako težko z ostalimi čutili sledi glavnemu toku skozi ribjo stezo.

Ozračnost je tudi pomemben dejavnik, saj so ribe posebno občutljive na pomanjkanje kisika v vodi, kar je še posebej vidno ob množičnih poginih rib poleti v akumulacijah, ko pride do intenzivnega cvetenja alg. Ozračnost je odvisna od stopnje turbulentnosti, od temperature (v toplejši vodi se težje raztaplja kisik, zato je pomembno, da se temperatura vode v ribji stezi ne dvigne previsoko, kar dosežemo tako, da je že vtok v akumulacijo na delu, kjer je voda nekoliko hladnejša in da je ribja steza senčena z zarastjo) in od stopnje prelivanja (bolj kot se preliva, bolj je ozračena).

Zadostni pretok v ribji stezi zagotavlja ustrezne globine vode v stezi. Nekatere ribje steze imajo zelo majhen razpon optimalnega pretoka, saj hitrosti pri velikem pretoku lahko zelo narastejo (kamnita drča), pri majhnem pa so nefunkcionalne (ribji prehod tipa Denil). Zadosten pretok je pomemben zlasti v času migracije, ko je povečano število rib v ribji stezi.

Hitrostno polje je eden glavnih parametrov, na katerega poskušamo vplivati s hidravličnim modeliranjem ribje steze, saj je od njega odvisno, kako dobre plavalke bodo lahko napredovale po ribji stezi. Običajno stezo dimenzioniramo za ciljne ribe, za katere določimo njihove hitrosti (normalno, pospešeno in maksimalno) (Hladnik, 2007) in dolžino plavanja pri teh maksimalnih hitrostih. Te so odvisne od hitrosti vode v ribji stezi, temperature vode v ribji stezi (večja kot je temperatura, večja je maksimalna hitrost, a je hkrati tudi manjša vzdržljivost rib).

Pogostost mest za počitek je zlasti pomembna za slabše plavalke na daljših ribjih stezah, saj brez njih obnemorejo in ne pridejo do konca.

Dimenzije odločajo o hitrostih vode v ribji stezi, o stopnji turbulentnosti, o velikosti pretoka skozi ribjo stezo pa tudi o velikosti in številu rib, ki jo lahko prečkajo. Nekatere ribje steze so namenjene zgolj manjšim ribam, saj so za večje neprimerne, ker ribe za plavanje potrebujejo določen prostor. Če ga je premalo, pride do poškodb ali pa niti ne zaidejo v tako ribjo stezo.

V splošnem se je izkazalo, da so ribje steze z velikimi dimenzijami zelo ugodne, saj nudijo velik razpon hitrosti, prav tako pa omogočajo prehod večjim jatam rib hkrati, kar je še zlasti pomembno za ribe, ki rade potujejo v jatah.

Pomembna je tudi možnost samoočiščenja, saj je ribja steza, zapolnjena s plavjem in plavinami, neuporabna. Vzdrževanje pa je drago, kar je še posebej problematično na manjših in manj gospodarsko zanimivih pregradah, kjer z leti ni več velikega interesa za njihovo vzdrževanje. To dokazujejo številni primeri manjših ribjih stez, ki so po določenem času zaradi zapolnitve z materialom nehale obratovati.

3.2.3 Izhod iz ribje steze

Stroške obratovanja ribje steze največkrat narekuje prav izhod iz ribje steze nad pregrado, saj pravilno zasnovan izhod zmanjša stroške čiščenja ribje steze. Poleg tega je velikokrat za slabo delovanje ali celo nedelovanje ribjih stez krivo ravno to, da se zapolnijo s plavjem. Izhod mora biti praviloma postavljen tako, da ni preblizu preliva ali vtoka v turbine, tako da rib ne odnese nazaj dolvodno. Zaradi istih razlogov tudi ne sme biti premočan tok. Po drugi strani pa je dobro, da tok ni popolnoma miren, saj bi se sicer pri ribjem vhodu začele nabirati plavine. Prav tako je bolje, da ob izhodu iz ribjega prehoda ni območja vrtinca, saj bi ta prav tako povzročil nabiranje plavja.

3.3 Opis ribje steze ob HE Arto Blanca

Ribja steza ob HE Arto Blanca se je začela graditi in bila zgrajena v letu 2009. Nahaja se na desnem bregu reke Save ob HE Arto Blanca. Njena celotna dolžina je bila 680 m, a je sedaj krajša, saj je že polna akumulacija HE Krško, tako da zdaj po projektu meri 650 m.

Sestavljena je iz treh odsekov, in sicer iz vtočnega odseka, sonaravnega odseka in iztočnega odseka (Ciuha in sod., 2014; Jašič, 2010; Inštitut za vode Republike Slovenije, 2014). Celotna ribja steza omogoča vodnim organizmom premostiti višinsko razliko 9,4 m. Po navedenih avtorjih bom tudi na kratko povzel osnovne tehnične lastnosti obravnavane ribje steze. Celotna ribja steza je prikazana na sliki 15.



Slika 15: Celotna ribja steza ob HE Arto Blanca (Jašič, 2010)

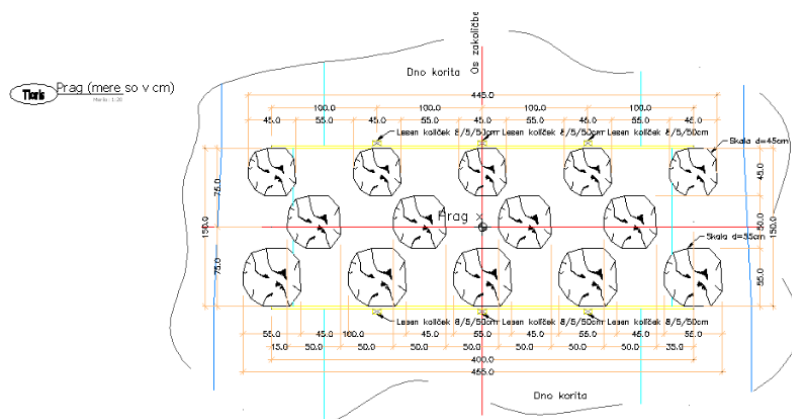
3.3.1 Vtočni odsek

Vtok v ribjo stezo je urejen skozi dve odprtini, ki ju zapirata zapornici. Vtočni odprtini, ki sta zamaknjeni glede na strugo, se nahajata približno 60 m gorvodno od pregrade in sta na različni koti. Vtok skozi posamezno odprtino se nadaljuje v svoj krak vtočnega objekta. Nato se kraka združita v dolvodnem delu vtočnega objekta v podolgovatem jezercu, to jezero je hkrati začetek sonaravnega odseka. Daljši krak vtočnega odseka je dolg 110 m in ima 24 prekatov, ki so mi bili osnova za optimizacijo in so predstavljeni v točki 5.1.1, krajši krak pa sestavljajo 4 prekati. Vzдолžni nagib na odseku prekatov je 1,7 %. Dno je prekrito s substratom, ki ga sestavljajo večinoma kamni in manjše skale velikosti 10–30 cm. Torej je vtočni objekt bazenskega tipa z vertikalnimi režami. Relativno grob substrat zelo zmanjša hitrosti ob dnu glede na ostale hitrosti v prekatu, kar omogoča vodnim organizmom, ki se lahko plazijo po dnu, napredovanje po ribji stezi. Delovanje dveh zapornic, ki ju poganjata elektromotorja, narekuje režim delovanja, ki je vnaprej določen, upošteva pa nivo vode v akumulaciji in čas drsti ključnih ciljnih vrst rib. Tako je v osnovi zamišljenih 5 režimov delovanja (Ciuha in sod., 2014): »Q660«, »Q900«, »PREHODNO«, »Q500« in »KALNOST«. Številke izražajo približen pretok skozi ribjo stezo (skupni pretok skozi oba kraka vtočnega odseka v l/s). Najobičajnejši je režim »Q660«, ki je vzpostavljen ob času drsti in migracij manjših rib, ki ne sovpada s časom drsti večjih rib, in v času drstne migracije boljših plavalk. Ko ni pričakovana nobena drstna migracija v reki Savi, je predviden režim »Q500«, ki služi za ohranjanje biotopa v ribji stezi. Za obdobje povečane drstne migracije večjih rib in za obdobja povečane drstne migracije manjših rib, ki ne sovpada s časom migracije večjih rib, pa tudi v obdobju drstne migracije boljših plavalk (kot so ščuka, menek, sulec ...), je predviden režim »Q900«. Za obdobja, ko sovpadajo drstne migracije večjih vrst rib, in še posebej za obdobja drstne migracije velikih rib je predviden režim »PREHODNO«, ki poskuša v stezi zagotoviti največje možne pretoke, ki so še optimalni. Za izredne razmere se uporablja režim »KALNOST«, ko je na primer zelo povečana kalnost vode v Savi in ko je v njej veliko plavin. Pri režimih »Q660« in »Q900« se s točnim krmiljenjem zapornic (predvsem spodnje, saj je zgornja pri teh dveh režimih vedno polno odprta), točno uravnava pretok, da znaša pri režimu »Q660« približno 660 l/s, pri režimu »Q900« pa 900 l/s. Meritev pretoka je izvedena s pomočjo vodomera, ki se nahaja na koncu vtočnega odseka dolvodno. Pri režimu »Q500« je določen le minimalni pretok 500 l/s, navzgor pa je omejen s 700 l/s. Kdaj se uporabljajo režimi »Q500«, »Q660« in »Q900«, je torej odvisno od časov drstnih migracij različnih vrst rib, ki so odvisni od naravnih razmer, zato se vsako leto ti časi nekoliko spremenijo. Čase drstnih migracij določenih vrst rib potrdi ali spremeni Zavod za ribištvo Slovenije in glede na to se potem določijo časovna obdobja uporabe prej naštetih treh pretočnih režimov.

3.3.2 Sonaravni odsek

Če gledamo dolvodno, se sonaravni odsek začne pri jezercu, kjer se kraka vtočnega odseka združita. To jezero služi ribam za počitek pred napredovanjem v enega od krakov vtočnega odseka. Sonaravni odsek se konča z iztočnim odsekom. Sonaravni odsek je skupno dolg 570 m. Vsebuje 106 talnih pragov.

V grobem je razdeljen na dva dela, in sicer (če gledamo dolvodno) na gorvodni del od prepusta in dolvodni del od prepusta. Prvi del sonaravnega odseka ima povprečni padeč dna struge 2 %, dolg je približno 174 m, konča se s prepustom pod cesto. Prepust je izveden tako, da je v njem voda globlja kot v ostalem delu sonaravnega odseka. Tako se zagotovi



Slika 18: Tloris praga sonaravnega dela (Jašič, 2010)

3.3.3 Iztočni odsek

Iztočni odsek je urejen podobno kot sonaravni odsek in bi ga lahko prišteli kar k sonaravnemu odseku. Drugačen je le naklon, ki znaša 2,5 %. Poleg tega je odsek izveden v premi. S tema dvema spremembama se nekoliko poveča hitrost vode, ki izteka iz ribje steze v reko pod pregrado, tako da bolj privalja ribe. Izток je skoraj pravokoten na smer struge reke pod pregrado. Poleg povečanih hitrosti vode na samem iztoku je bilo predvideno tudi dodatno povečanje pretoka oziroma dodatni močan curek vode (atrakcijski curek), ki bi še bolj privabljal ribe. Ta curek vode bi bil zagotovljen z izgradnjo dodatne male HE, ki ne bi porabila celotne razpoložljive energijske višine, ampak le del, ostalo pa bi se porabilo za večjo hitrost curka.

4 OSNOVNI NAČINI OPTIMIZACIJE RIBJE STEZE

Optimizacije ribjih stez se izvajajo na dva osnovna načina: z optimiziranjem na osnovi zgrajenega fizičnega modela ali pa z optimiziranjem z uporabo matematičnega numeričnega modela, torej podobno kot pri vseh ostalih hidrotehničnih objektih. Ker so računalniki vedno zmogljivejši, se vedno pogosteje tudi za ribje steze uporabljajo matematični modeli, saj je to veliko ceneje kot gradnja in spreminjanje fizičnega modela. Pri fizičnih modelih dobimo le točkovne vrednosti v merjenih točkah, pri matematičnih modelih pa dobimo celotni prostorski potek iskanih hidravličnih parametrov, kar je pri toku vode skozi ribjo stezo zelo pomembno, saj se vrednosti relativno hitro spreminjajo glede na prostorske koordinate. Nedolgo nazaj so bili računalniki prešibki za obravnavanje takih tokovnih razmer, kot vladajo v ribji stezi, saj imamo tukaj, vsaj kar se tiče bazenskega tipa ribjega prehoda z vertikalnimi režami, izrazito dvodimenzionalni tok, pri katerem odločilno vlogo igra turbulentnost. Že nekaj desetletij se za modeliranje turbulence v matematičnih modelih uporablja k-ε model. Zakaj ravno ta model turbulence, je natančno pojasnil Bombač (2014).

4.1 Optimizacija ribje steze z matematičnim modelom PCFLOW2D

Optimizacijo ribje steze sem izvedel na praktičnem primeru, katerega podrobnosti so prikazane v nadaljevanju. Uporabil sem dvodimenzijski (2D) matematični model PCFLOW2D, ki ima vgrajeno možnost uporabe k-ε modela za modeliranje turbulence. Program PCFLOW2D je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in je namenjen za raznovrstne simulacije dvodimenzijskih tokov tekočin (poleg vode in ostalih newtonskih tekočin tudi nenevtonske tekočine – primer take je drobirski tok) (Četina, 1998).

Enačbe, ki se uporabljajo pri k-ε modelu za preračun tokovnih razmer v ribji stezi, sta opisala Bombač (2014) in Hamzić (2012). Torej bom te enačbe le na kratko povzel in komentiral pomen posameznih členov.

4.1.1 Osnovne enačbe

Osnovne enačbe, ki jih uporabljamo za opis toka realne tekočine, so izpeljane ob predpostavkah, da je stisljivost tekočine majhna in jo zato lahko zanemarimo, saj so hitrosti toka majhne v primerjavi s hitrostjo širjenja zvoka v vodi (to predpostavko lahko uporabimo skoraj vedno, le pri nekaterih posebnih primerih, kot je vodni udar, ne), gostota vode je konstantna. Če te predpostavke upoštevamo, dobimo iz zakona o ohranitvi mase, zakona o ohranitvi gibalne količine in zakona o ohranitvi toplotne energije ali mase tuje snovi tri enačbe: kontinuitetno enačbo (3), dinamično enačbo (4) (dinamična Navier-Stokesova enačba) in konvekcijsko difuzijsko enačbo za skalar Φ (5).

$$\text{---} \tag{3}$$

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \tag{4}$$

smer (16). Te tri skalarnе enačbe skupaj s transportnima enačbama za k in ϵ , opisane v naslednjem podpoglavju, so bile uporabljene pri preračunu tokovnih razmer v ribji stezi.

Kontinuitetna enačba:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (14)$$

Dinamična enačba v x smeri:

$$\rho \frac{D u}{D t} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot \tau_x \quad (15)$$

Dinamična enačba v y smeri:

$$\rho \frac{D v}{D t} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot \tau_y \quad (16)$$

4.1.3.2 Transportni enačbi pri globinsko povprečenem k- ϵ modelu turbulence

Bistveni enačbi k- ϵ modela turbulence sta transportni enačbi, s katerima določimo transport turbulentne kinetične energije k in stopnjo njene disipacije ϵ .

$$\frac{D k}{D t} = P_k - \epsilon + \nabla \cdot \tau_k \quad (17)$$

$$\frac{D \epsilon}{D t} = P_\epsilon - \epsilon \frac{\epsilon}{k} + \nabla \cdot \tau_\epsilon \quad (18)$$

Pri tem k predstavlja turbulentno kinetično energijo na enoto mase in je torej neposredno merilo za intenzivnost turbulence.

$$P_k = \nu \nabla^2 k \quad (19)$$

Disipacijo turbulentne kinetične energije na enoto mase pa predstavlja ϵ .

$$\epsilon = \nu \nabla^2 \epsilon \quad (20)$$

Turbulentno viskoznost označimo z ν_t in predstavlja posredno zvezo med k in ϵ , če iz enačbe (4.1.4) izrazimo L_m in vstavimo v enačbo (20), dobimo enačbo (21).

$$\nu_t = L_m^2 \frac{\epsilon}{k} \quad (21)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (22)$$

Celotna efektivna viskoznost je zapisana z enačbo (23) kot vsota molekularne in turbulentne kinematične viskoznosti, ki se spreminja od točke do točke.

$$\nu = \nu + \nu_t \quad (23)$$

Z enačbo (24) je določena produkcija turbulentne kinetične energije na enoto mase P_k zaradi horizontalnih gradientov hitrosti osnovnega toka.

$$P_k = \nu \nabla^2 k \quad (24)$$

Produkcija P_{kv} in disipacija $P_{\epsilon v}$ turbulentne kinetične energije na enoto mase zaradi trenja ob dno sta definirani s pomočjo enačb (25) in (26), pri tem u_{str} predstavlja strižno hitrost, definirano z enačbo (27). Vpliv trenja ob dno je zajet preko koeficienta C_{str} , ki je definiran s pomočjo enačbe (28).

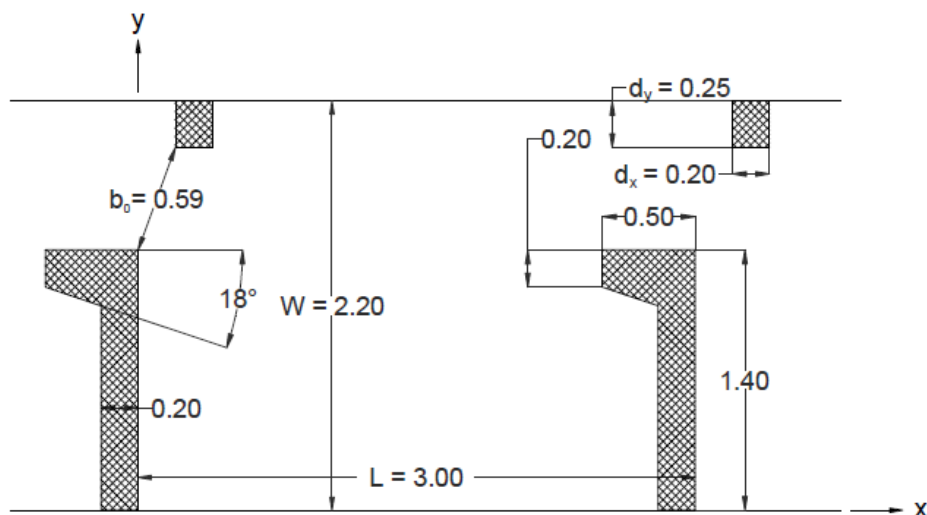
5 PRIMER OPTIMIZACIJE RIBJE STEZE OB HE ARTO BLANCA

5.1 Računski model

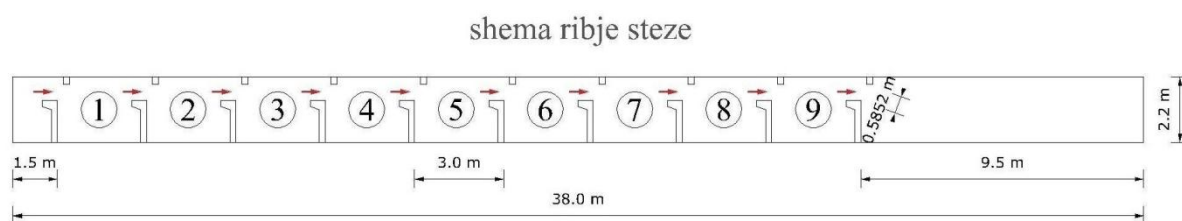
Izhajal sem iz primera že zgrajene ribje steze s prekaty ob HE Arto Blanca. Da ne bi vplival spodnji in zgornji robni pogoj, je matematični model obsegal 9 aktivnih prekatov, dotočni del in iztočni del.

5.1.1 Geometrija

Osnovna geometrija prekata ribje steze ob HE Arto Blanca je prikazana na sliki 19.



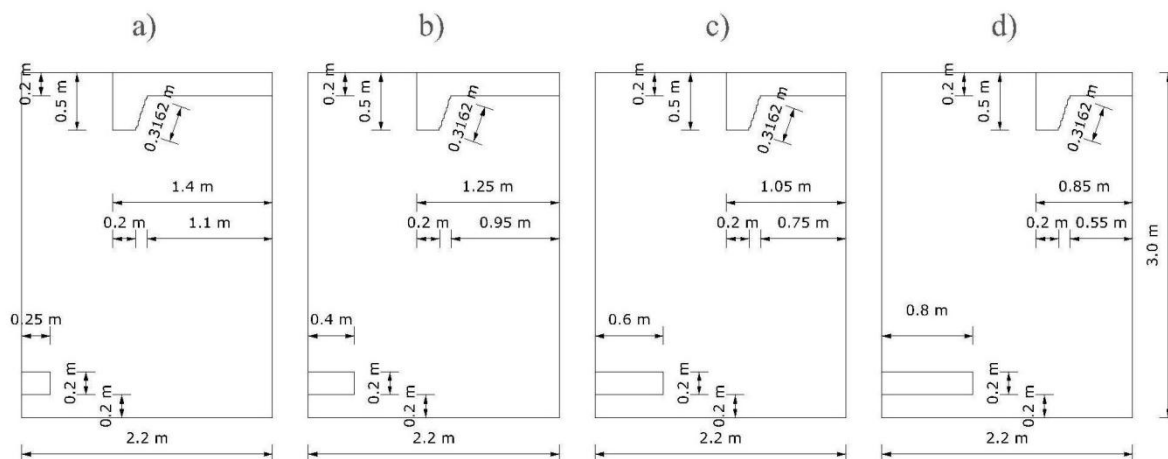
Slika 19: Tloris detajlov v posameznem prekatu osnovne geometrije ribje steze (Bombač, 2014)



Slika 20: Celotni računski model ribje steze (osnovna geometrija)

Celotni računski model ribje steze je dolg 38,0 m, obsega, kot sem že omenil, 9 prekatov, ki so dolgi 3,0 m in široki 2,20 m (slika 20).

Optimizacijo ribje steze sem izvedel tako, da sem spreminjal dolžino krajšega in daljšega rebra. Dolžini sem spreminjal pri konstantni odprtini med rebri. Za kolikor sem podaljšal krajše rebro, za toliko sem skrajšal daljše rebro. Začetna vrednost krajšega rebra, kot je vidno na sliki 19, je 0,25 metra (primer a). Nato sem izračunal, kakšne so razmere v ribji stezi pri dolžini krajšega rebra 0,40 m (primer b), 0,60 m (primer c) in 0,80 m (primer d). Vse 4 variante so prikazane na sliki 21.



Slika 21: Variante ribje steze

Vzolžni padec dna kanala znaša $S_0 = 0,0167$.

5.1.2 Numerična mreža

Gostoto mreže sem vzel po priporočilih za ta program in tak primer (Bombač, 2014). Torej sem izbral mrežo, ki je v vzdolžni smeri x razdeljena na korake $\Delta x = 2$ cm, v prečni smeri y pa na korake $\Delta y = 1$ cm. Tako sem dobil $1902 \times 222 = 422244$ računskih točk. Ob robovih in na mestu reber sem izključil računanje, tako da je bilo število aktivnih računskih točk dejansko manjše.

5.1.3 Čas računa

Ker sem računal z modelom za nestalni tok, sem moral izbrati maksimalni čas, do katerega je potekal račun. Kljub temu da se tok ustali po okoli 1200 s ali že nekaj prej, kot je ugotovil Bombač (2014), sem zaradi konsistentnosti in nedvoumnosti simulacije izvršil do časa 2 ur, kar kljub podaljšanju ni zahtevalo veliko dodatnega časa za izračune. Ko se tok približuje ustalitvi, se namreč manj spreminja in zato potrebno število iteracij znotraj časovnega koraka pade. Pri vseh računih je bil upoštevan časovni korak $\Delta t = 0,1$ s, znotraj posameznega časovnega koraka pa je bilo nastavljeno maksimalno število iteracij 60. Število iteracij se je določilo na podlagi dovoljene relativne napake, ki je v mojem primeru znašala 1 %.

5.1.4 Začetni in robni pogoji

Zaradi hitrejšega preračuna sem na začetku po celi ribji stezi določil višino vode 1 cm, kar v nadaljevanju ni vplivalo na rezultate. Nato sem predpostavil, da skozi začetek ribje steze začne hipno teči pretok 1 oziroma 0.6 (račun sem izvršil za oba pretoka), kar mi je predstavljalo tudi zgornji robni pogoj. Spodnji robni pogoj mi je predstavljala višina vode na koncu ribje steze pri določenem pretoku. Ker sem računal tokovne razmere samo za čas po

tem, ko se voda v kanalu že ustali, sem določil le eno višino pri polnem pretoku skozi konec računskega modela, torej pri pretoku 1 oziroma 0.6. Ta spodnji pogoj sem določil glede na zahtevo, da je razlika gladin v srednjih dveh prekatih (prekata 5 in 6) 5 cm. Določil sem ga iteracijsko s pomočjo linearne interpolacije na 1 cm natančno. Ob vzdolžnih robovih, torej ob bočnih stenah kanala, je pravokotna komponenta hitrosti glede na steno enaka nič, vzdolžna pa je pri modelu k-ε določena z logaritemskim zakonom.

5.1.5 Umerjenost modela

Da sem zagotovil enakomerne tokovne razmere v kanalu, sem model umeril s spreminjanjem spodnjega robnega pogoja, kot sem že zapisal v prejšnji točki. Cilj je bil torej, da bi imel čim bolj enake globine v srednjih prekatih, kar pri danem padcu in dolžini prekatov pomeni, da se mora višina v srednjih prekatih razlikovati za 5 cm.

Manningov koeficient hrapavosti nima velikega vpliva na rezultate, kar so ugotovili že Bombač (2014) in mnogi drugi pred njim. Izbral sem enak koeficient hrapavosti $n_g = 0,030 \text{ sm}^{-1/3}$, kot so ga izbrali Bombač in sodelavci (2015), ki so opravljali izračune na isti ribji stezi. Izbrali so ga glede na tip podlage v ribji stezi. Kljub vsemu je v naravi zelo pomembno, da pri takem tipu ribje steze dno kanala obložimo s kamenjem, saj se tam lokalno zelo zmanjšajo hitrosti, kar omogoča počasnejšim ribam in nevretenčarjem, da se prebijejo navzgor ob kamenju ali tik nad njim.

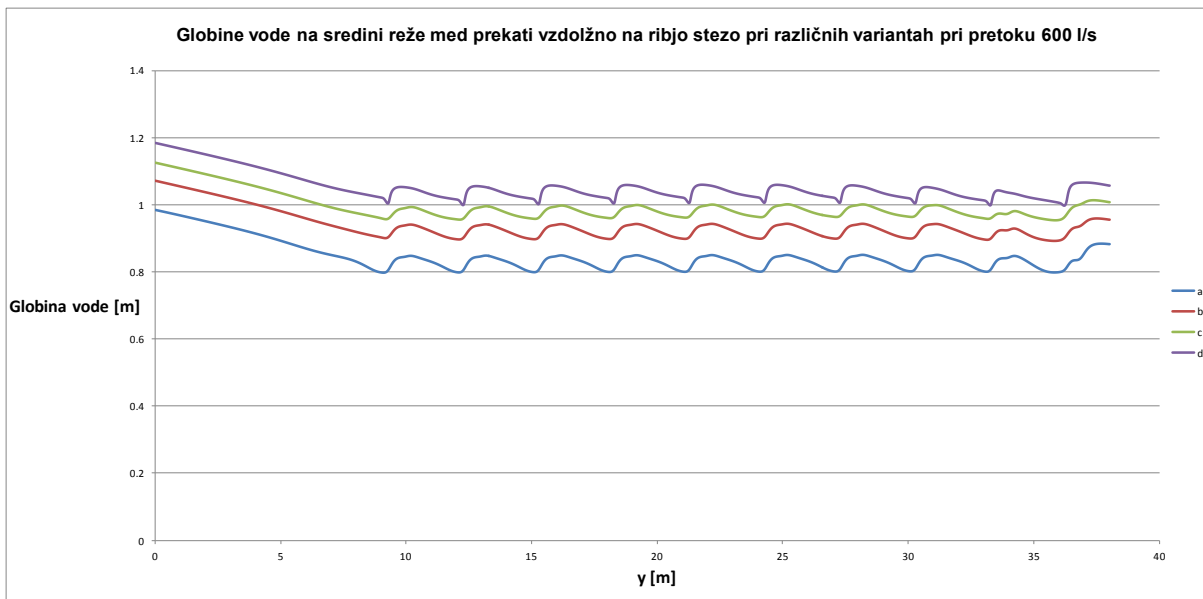
Da pri preračunu ribje steze s k-ε modelom turbulence ne potrebujemo nobenih posebnih dodatnih nastavitvev konstant računskega modela, so potrdile meritve, ki jih je Bombač (2014) izvedel na pomanjšanem merilu ribje steze s 5 prekatih. V mojem primeru imamo 4 prekate več, kar vpliva le na to, da je manjši vpliv zgornjega in spodnjega robnega pogoja na tokovno sliko v srednjih prekatih.

5.2 Rezultati in hidravlična analiza

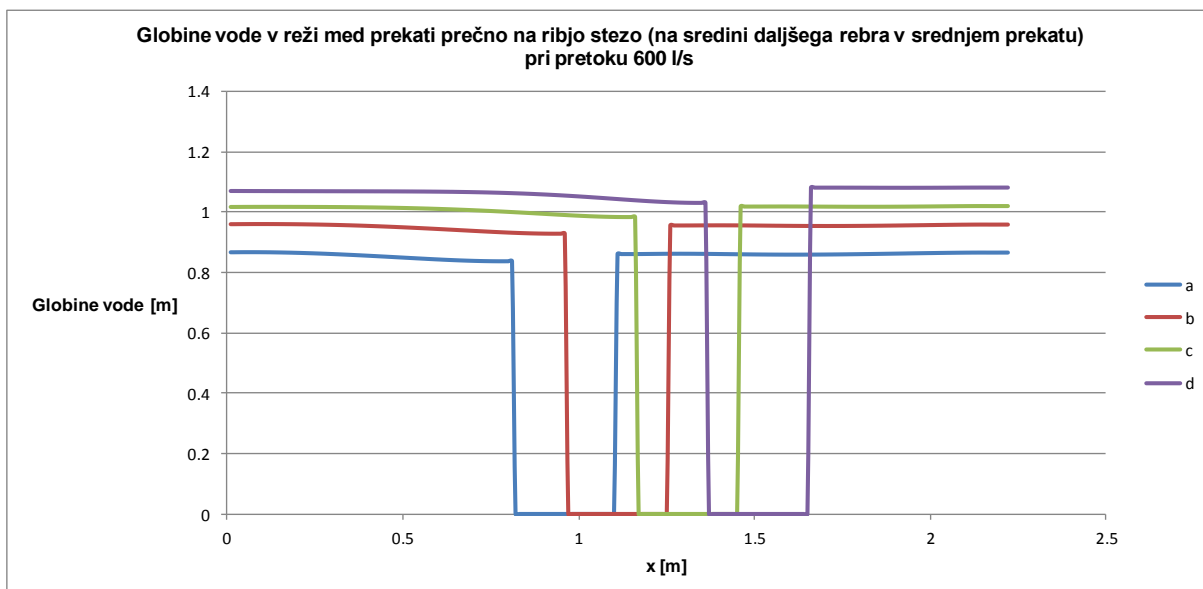
5.2.1 Globine

Globina vode v srednjem prekatu se pri posamezni postavitvi razlikuje nekje do 10 cm, največ pri postavitvi a, kjer so razlike globin tudi do 15 cm, kar je glede na skupno globino vode še vedno relativno veliko. Ta ugotovitev velja tako za pretok 600 l/s kot tudi za pretok 1000 l/s. Med posameznimi postavitvami pa prihaja do zelo velikih sprememb gladine. Bolj kot je manjše rebro pomaknjeno v ribjo stezo, bolj voda zadene v to rebro, kjer se lokalno zelo dvigne. Poleg tega je jasno razvidno, da se ob vertikalnih rebrih ustvarja vedno večja zajezba, kar dvigne nivo vode v celotnem prekatu. Razlog za nastanek take zajezbe je v tem, da daljše rebro z vokalom ustvarja recirkulacijsko območje, ki lokalizira udar ob steno prvotno daljšega rebra, ker med recirkulacijskim območjem pri stanju, ko je tok v ribji stezi že dokaj umirjen, skoraj ni več pretoka. To je jasno vidno iz tokovnic. Če na kratko povzamem, je pri primeru a tok manj moten z zožitvami in razširitvami kot pri nadaljnjih primerih, saj močno oblikovano recirkulacijsko območje dobro usmerja tok med rebri, s krajšanjem daljšega rebra se ta učinek izgublja in vedno bolj tok postaja odvisen od narave zožitve in razširitve.

Te ugotovitve veljajo tako za pretok 600 l/s kot tudi za 1000 l/s, le gladine so pri manjšem pretoku nižje. Do nekoliko večjih odstopanj prihaja pri osnovni varianti, saj je moč recirkulacijskega vrtinca nekoliko manjša.



Grafikon 1: Globine vode na sredini reže med prekatih vzdolžno na ribjo stezo pri različnih variantah pri pretoku 600 l/s

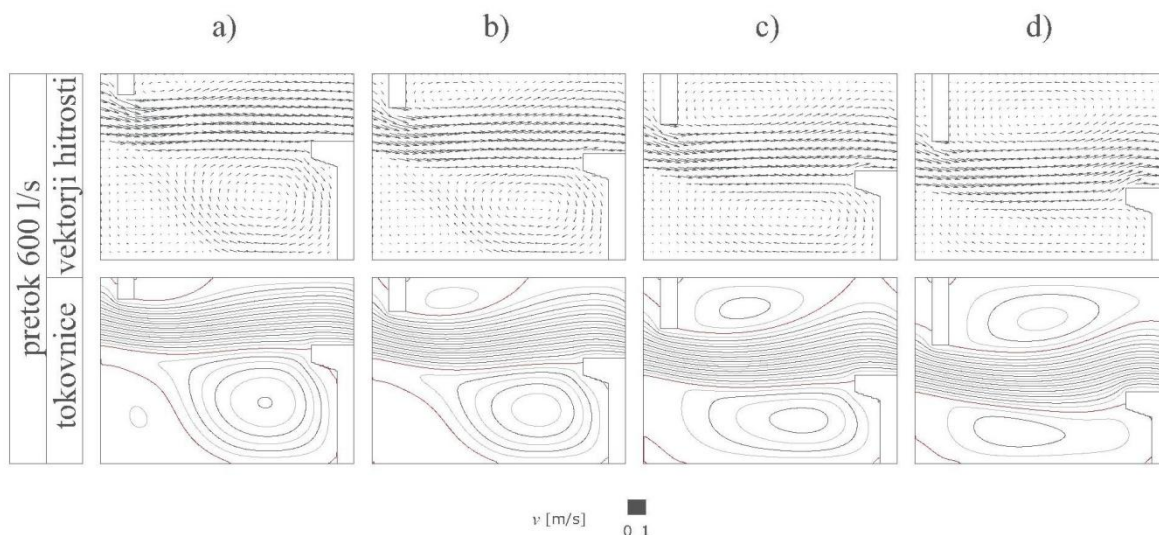


Grafikon 2: Globine vode v reži med prekatih prečno na ribjo stezo (na sredini daljšega rebra v srednjem prekatu) pri pretoku 600 l/s

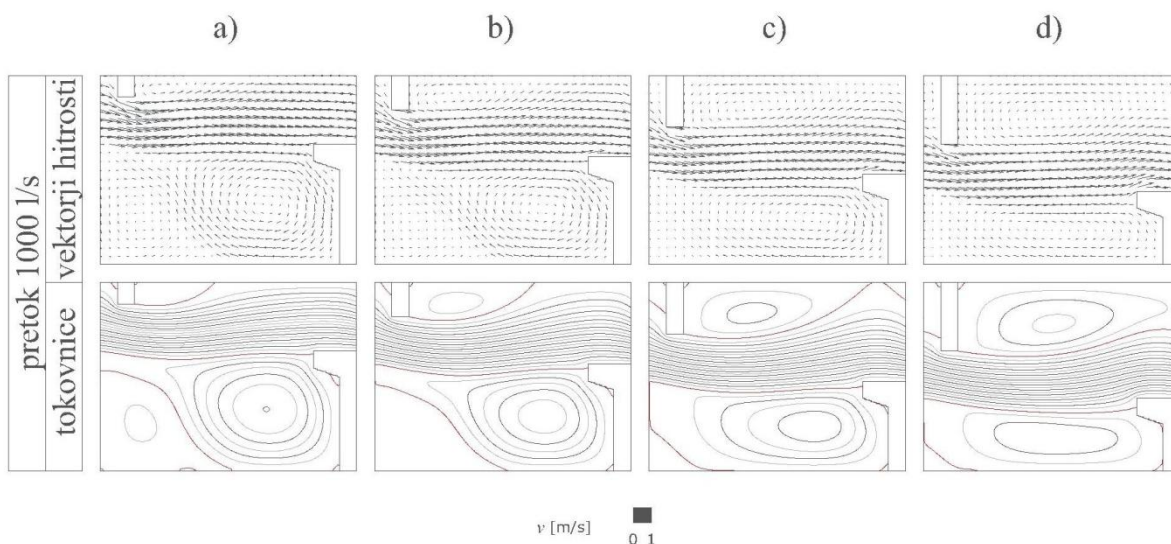
5.2.2 Tokovnice

V osnovni postavitvi (varianta a) nastaneta med večjima rebroma dva vrtinca, ki se vrtita v nasprotni smeri, pred krajšim in za krajšim rebrom pa ni vrtincev, če gledamo z izbrano natančnostjo, v kateri so izrisane tokovnice (na vsakih 5 % pretoka). V primeru b manjšega vrtinca za daljšim rebrom ni (spet če gledamo v izbrani natančnosti risanja tokovnic), je pa

zato vrtinec za krajšim rebrom izrazitejši. Z daljšanjem krajšega rebra in manjšanjem daljšega se vedno bolj manjša vrtinec pred prvotno daljšim rebrom in vedno bolj povečuje vrtinec za prvotno krajšim rebrom, vendar tudi pri najdaljšem primeru kratkega rebra ne dosega izdatnosti kot v osnovnem primeru največji vrtinec pred daljšim rebrom. V osnovnem primeru namreč večji vrtinec nastaja pred večjim rebrom kot posledica zožitve. Poleg njega je prisoten, kot smo že omenili, tudi vrtinec, ki je posledica razširitve, a je veliko manjši. Pri primeru d pa tega manjšega vrtinca sploh ni, je pa zato večji raztegnjen na celotno dolžino med daljšima rebroma.



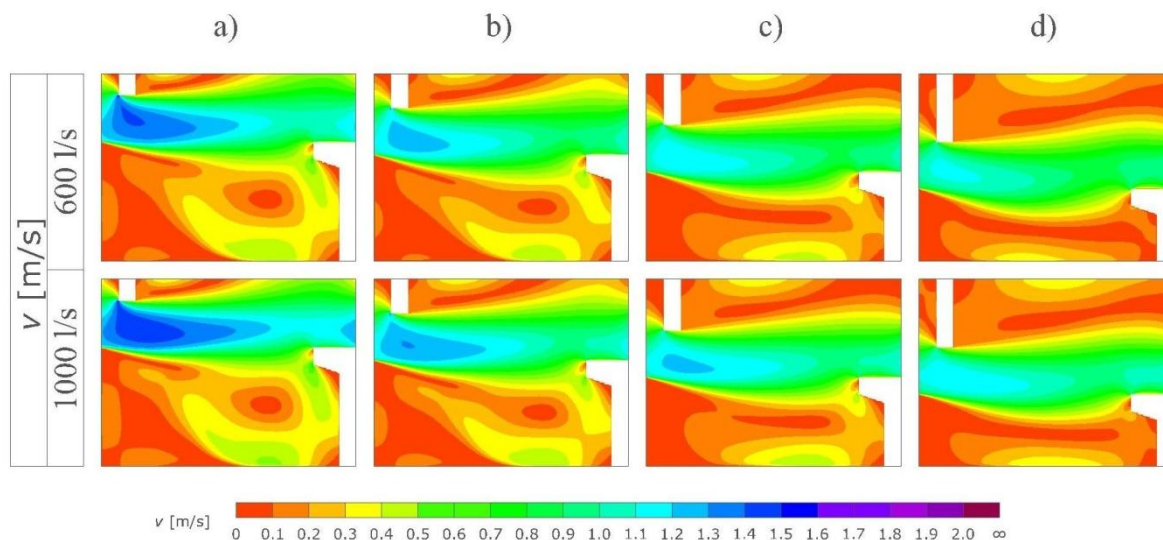
Slika 22: Vektorji hitrosti in tokovnice za pretok 600 l/s



Slika 23: Vektorji hitrosti in tokovnice za pretok 1000 l/s

5.2.3 Hitrosti

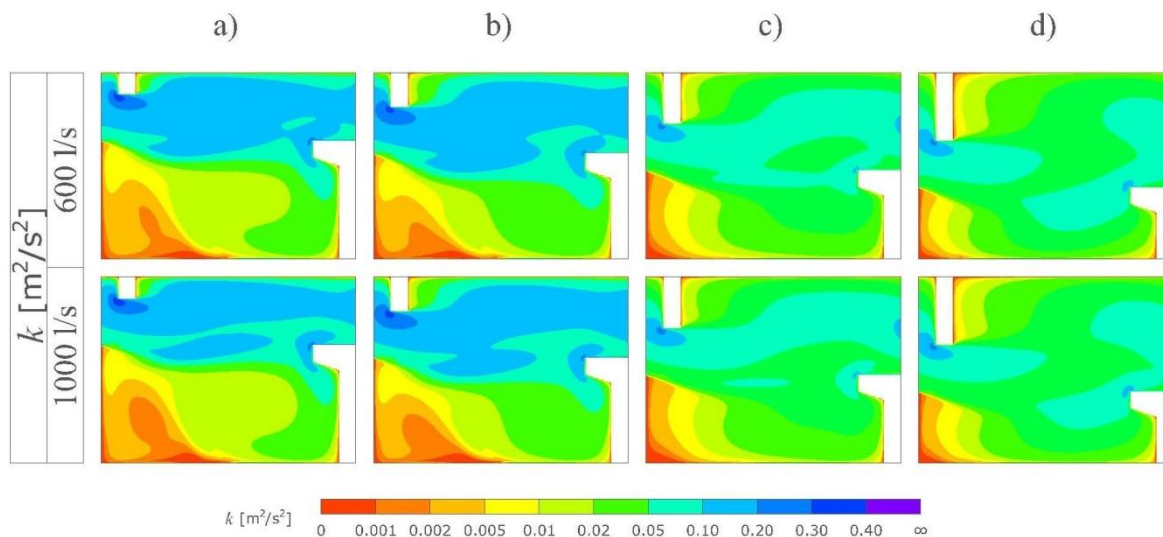
Maksimalne hitrosti se v vseh obravnavanih primerih pojavijo v območju reže med obema vertikalnima rebroma. V osnovnem primeru (a) se pojavijo še nekoliko večje hitrosti na obodu večjega vrtinca. Z daljšanjem krajšega rebra pa maksimalne hitrosti upadejo, zmanjša pa se tudi območje, kjer imamo izrazito majhne hitrosti. To je posledica tega, da z daljšanjem manjšega rebra dobimo višje gladine, kar privede do večjega pretočnega profila in posledično do manjših hitrosti ($Q = \text{konst.} = A \cdot v$).



Slika 24: Hitrosti v srednjem prekatu

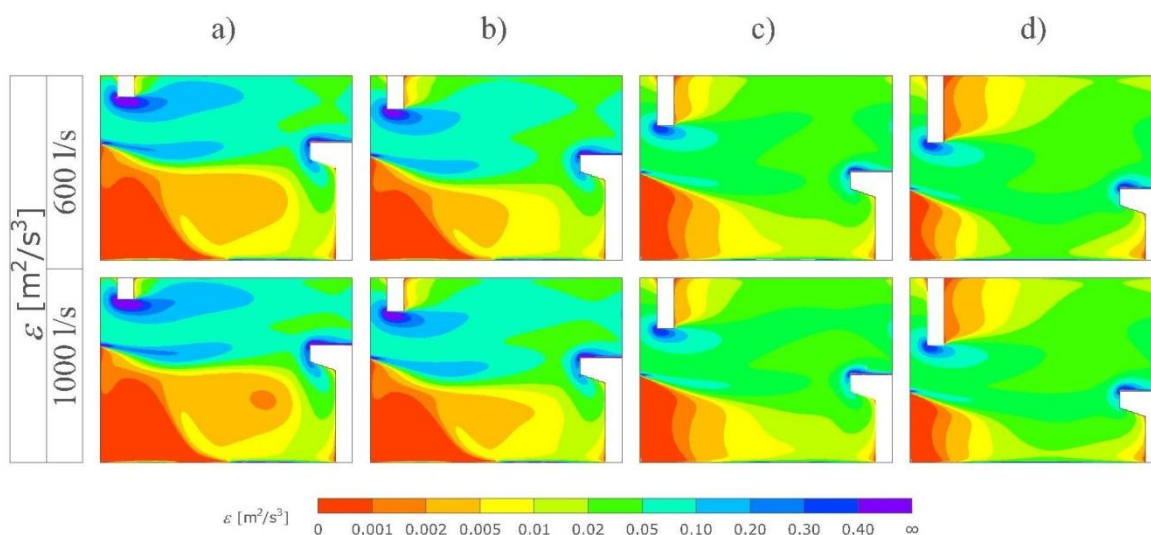
5.2.4 Turbulentna kinetična energija na enoto mase (k) in njena disipacija (ϵ)

Vidimo, da v osnovnem primeru obstajajo tri območja z močno povečanim k , ki predstavlja turbulentno kinetično energijo na enoto mase oziroma kvadrat vrednosti pulzacij hitrosti v določeni točki. Območje z največjim k se nahaja nad krajšim rebrom, sledi območje nad daljšim rebrom, potem pa je še območje v matici glavnega toka, kjer pa so vrednosti k že precej manjše. V drugem primeru (b) se sami ekstremi sicer zmanjšajo, razširi pa se območje večjih vrednosti k . Z nadaljevanjem daljšanja rebra se zmanjšujejo področja mirnih con, zmanjšujejo pa se tudi območja z izrazito velikim k . Primerjava med razporeditvijo k pri 1000 l/s in pri 600 l/s pove, da so razmere zelo podobne, pri pretoku 1000 l/s se le malenkostno povečajo območja z večjim k .



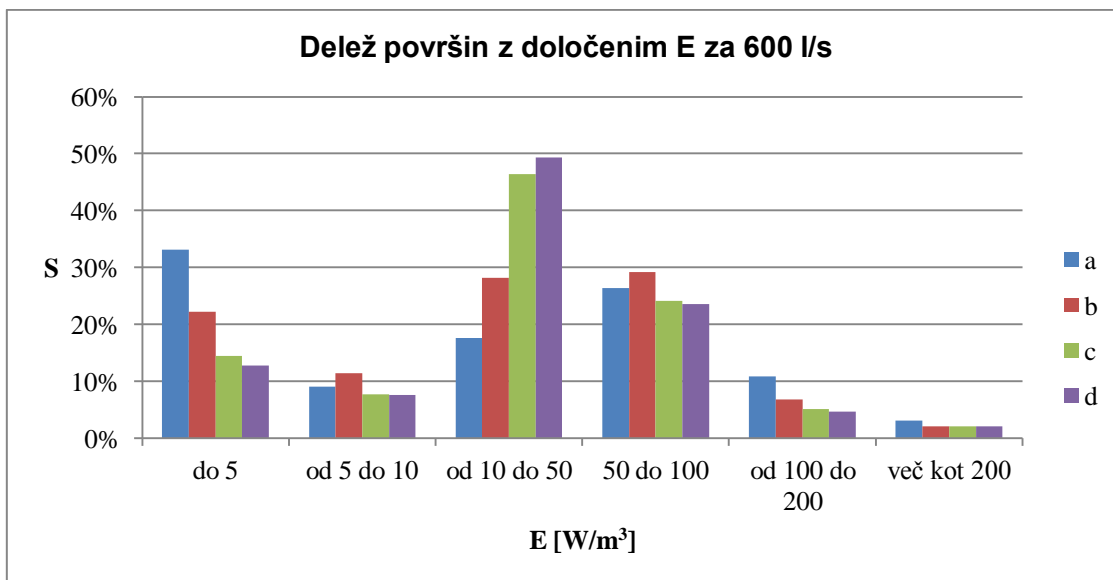
Slika 25 Turbulentna kinetična energija na enoto mase k (m^2/s^2)

Če vrednosti disipacije energije ε pomnožimo z gostoto vode ($1000 \text{ kg}/\text{m}^3$), dobimo E (ki sem ga opisal v točki 3.1.1). Razporeditev ε je podobna kot pri k . To kaže na to, da je z vidika lažjega prečkanja reže med prekaty ugodnejša varianta d. Kar pa se tiče počivanja in mirnega plavanja, je ugodnejša osnovna varianta (a), kjer se najde večje mirno področje v prekatu v območju večjega in manjšega vrtinca.

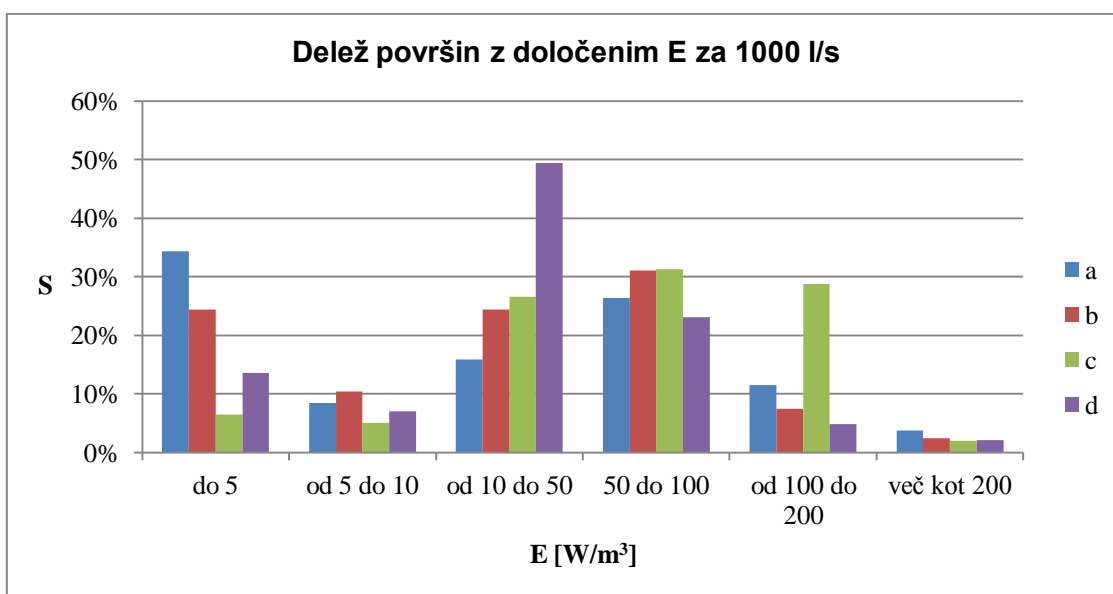


Slika 26: Disipacija turbulentne kinetične energije na enoto mase ε (m^2/s^3)

To potrjujejo tudi številke, ki so prikazane v preglednici 5. Iz njih je jasno razvidno, da ima osnovna postavitev (a) največje področje, kjer je tok izrazito miren, ima tudi relativno velika področja, kjer je tok zelo turbulenten in razburkan.



Grafikon 3: Delež površin z določenim E za 600 l/s



Grafikon 4: Delež površin z določenim E za 1000 l/s

5.1.5 Primerjava geometrij ribjih stez glede na vpliv na ribe

Glede na hitrosti vode in povprečno vrednost disipacije kinetične energije na enoto volumna (E) vidimo, da je d nedvomno najboljša varianta za prehod rib skozi ribjo stezo, ker ima najnižjo maksimalno hitrost, poleg tega pa tudi najnižji povprečni E (preglednica 5). Največji povprečni E ima c varianta pri pretoku 1000 l/s.

Preglednica 5: Primerjava maksimalnih hitrosti v_{MAX} in stopnje disipacije kinetične energije na enoto volumna E za različne velikosti pretoka in položaja reže med prekati

		Delež površine prekata, kjer je $E <$ od					Srednji E $E[W/m^3]$	Maks. hitrosti $V_{MAX}[m/s]$
		$E < 5 [W/m^3]$	$E < 10 [W/m^3]$	$E < 50 [W/m^3]$	$E < 100 [W/m^3]$	$E < 200 [W/m^3]$		
Pretok 600 l/s	a	33%	42%	60%	86%	97%	61	1.398
	b	22%	34%	62%	91%	98%	53	1.234
	c	14%	22%	69%	93%	98%	51	1.160
	d	13%	20%	70%	93%	98%	48	1.097
Pretok 1000 l/s	a	34%	43%	59%	85%	96%	64	1.466
	b	24%	35%	59%	90%	98%	56	1.287
	c	6%	11%	38%	69%	98%	74	1.211
	d	14%	21%	70%	93%	98%	50	1.178

5.3 Analiza rezultatov v kontekstu že zgrajene ribje steze ob HE Arto Blanca

5.3.1 Rezultati ihtiološkega pregleda ribje steze

Na območju HE Blanca in HE Boštanj je Zavod za ribištvo Slovenije v letih 2009–2012 opravil ihtiološke preglede, pri katerih je bilo ugotovljeno dobro delovanje ribje steze. V letih 2009, 2010 in 2012 je bil opravljen pregled ribje steze z elektroizlovom, v letih 2010 in 2012 pa tudi z lovljenjem rib v vrše. Rezultati so bili objavljeni v poročilih Zavoda za ribištvo Slovenije (Zabrc, 2009, 2010 in 2011). V nadaljevanju bom kratko povzel ključne ugotovitve omenjenih poročil, ki se tičejo prehodnosti ribje steze ob HE Arto Blanca.

Od ene vrste piškurja in 40 vrst rib, ki so naseljevale to območje pred izgradnjo HE Arto Blanca, je bilo v obravnavani ribji stezi do sedaj (Zabrc, 2012) zabeleženih 32 vrst rib in ena vrsta piškurja. Vrste, ki niso bile zabeležene, so bile že pred izgradnjo jezusa HE Arto Blanca redke.

Z elektroizlovom je bila ugotovljena prostorska razporeditev rib po ribji stezi.

Preglednica 6: Razporeditev posameznih vrst rib po posameznih odsekih ribje steze in ocena njihove številčnosti (št. rib/100 m²), dne 24. 5. 2012 (Zabrc, 2012)

vrsta	sonaravni odsek				tehnični odsek	
	izlivni odsek	sonaravni odsek 1	tolmun	sonaravni odsek 2	kratki krak	dolgi krak
babica	4	4	10	8		
beloplavuti globoček	4	1	41	4	42	
blistavec			1			
klen	9	5	44	20	21	12
mrena	51	48	48	71	21	22
navadna nežica	1		18	1		1
navadni globoček		< 1	54	3	12	1
navadni koreselj		1				
navadni okun	< 1					
pezdirk			12	2	4	1
pisanka	107	83	45	124	42	192
platnica		2	12	24	129	40
podust	2	2	1	14	42	46
pohra	21	20	7	17		2
potočna postrv	< 1	< 1				
rdečeoka			1		4	
velika nežica		1	43	1		
zelenika	1	< 1		1	33	10
zvezdogled	< 1	< 1				
skupno št.rib/100m ²	201	169	339	291	350	328

Preglednica 7: Razporeditev posameznih vrst rib po posameznih odsekih ribje steze in ocena njihove številčnosti (št. rib/100 m²), dne 11. 9. 2012 (Zabrc, 2012)

vrsta	sonaravni odsek			tehnični odsek	
	izlivni odsek	sonaravni odsek 1	tolmun	kratki krak	dolgi krak
babica	7	1	4		
beloplavuti globoček	5	1	55	21	
blistavec		1	3		
klen	939	23	31	521	128
mrena	787	249	120	42	122
navadna nežica	1	1	15	4	3
navadni globoček	39	9	49	21	2
ogrica	2		1		1
pezdirk	15		67	21	2
pisanka		460	557	3.333	2.252
platnica		17	35	117	108
ploščič				12	

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 7

vrsta	sonaravni odsek			tehnični odsek	
	izlivni odsek	sonaravni odsek 1	tolmun	kratki krak	dolgi krak
podust		20	35	175	57
pohra	10	15	7		
potočna postrv		1			
pseudorazbora		1	88		
rdečeoka	2	1			1
srebrni koreselj			13	4	
velika nežica			35		
zelenika	32	1	1	271	8
zlata nežica			1		
skupno št.rib/100m ²	1.838	801	1.116	4.550	2.687

Izlov rib z vršo se je izvajal v najbolj gorvodnih prekatih krajšega in daljšega kraka vtočnega odseka. Ta dva prekata, ki se nahajata za krajšim kanalom, ta pa za zapornico, skozi katero priteka voda iz akumulacije, se je zamrežilo s kovinsko mrežo z dveh strani. Na dolvodni mreži je bila luknja, ki se v prekat zoži v obliki prisekanega stožca, tako da je ribam (razen prav zelo majhnim) omogočeno, da potujejo samo gorvodno skozi to odprtino in preidejo v prekata. Vrniti se nato ne morejo več, prav tako ne morejo ven na gorvodni strani prekatov, saj jim pot zastavlja gorvodna mreža. Pripravljeni vrši se je pustilo v ribji stezi 24 ur, nato se je izvedel elektroizlov v prekatih. Ribe se je omamilo, določilo vrsto in izmerilo. Po merjenju se jih je dalo v svežo vodo, da so se prebudile iz narkoze, in nato izpustilo v akumulacijo za pregrado. Ta metoda se je uporabila večkrat letno.

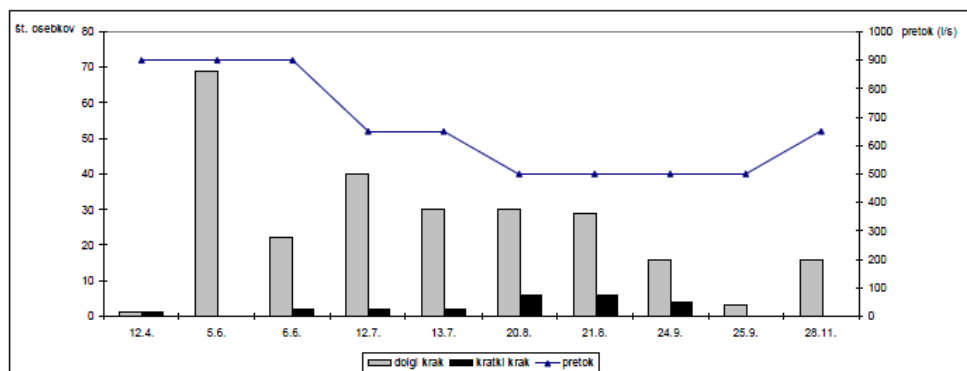
Preglednica 8: Število osebkov posameznih vrst rib, ki so bili ulovljeni v vršo v letu 2012 pri gorvodni migraciji (Zabric, 2012)

Vrsta	12.4.	5.6.	6.6.	12.7.	13.7.	20.8.	21.8.	24.9.	25.9.	28.11.
babica					1					
belop. globoček								1		
bolen							1			
nav. globoček	12?	3?	1	1	3					
klen	2	7		8	4	4	3	26	10	3
mrena		2	2	34	46	35	14	5	17	
navadna nežica		1								
navadni ostriž					1					
ogrica	2	2	1	2	1	3	1	2	2	
pezdirk			1	1				1		
pisanka	12	23	15	46	23	44	48	147	8	22

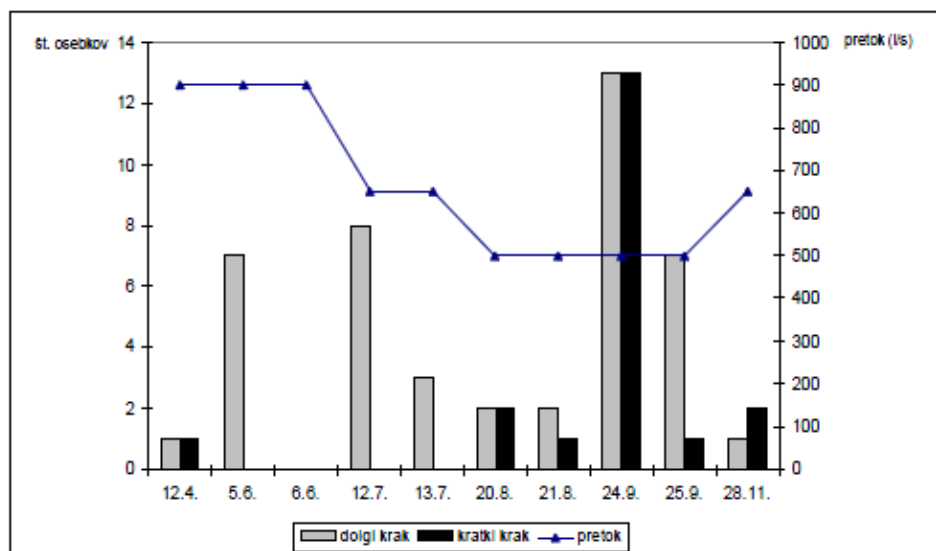
se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 8

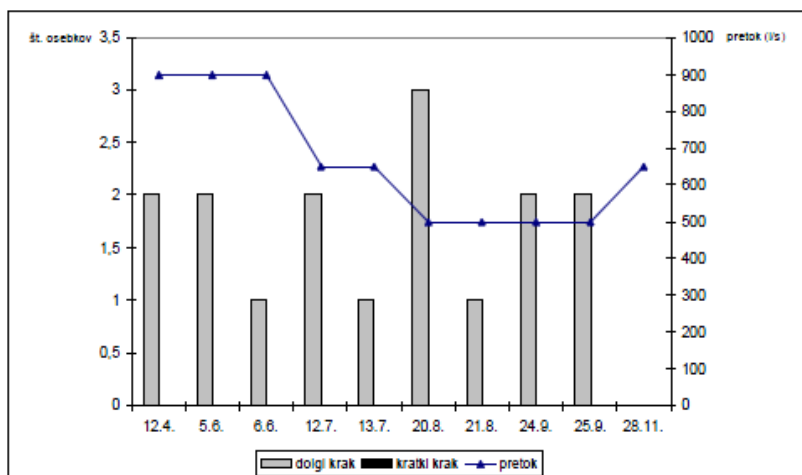
Vrsta	12.4.	5.6.	6.6.	12.7.	13.7.	20.8.	21.8.	24.9.	25.9.	28.11.
platnica	11	35	35	63	24	27	23	10	14	9
ploščič									2	
podust	2	69	24	42	32	36	35	20	3	16
pohra		2								
psevдоразбора									3	
rdečekoka									1	
sončni ostriž				1						
srebrni koreselj		1						1	2	
sulec			1							
šarenka		1								
zelenika		2				4			10	1
št. osebkov	41	148	80	198	135	153	125	213	72	51
št. vrst	6	12	8	9	8	7	7	9	11	5



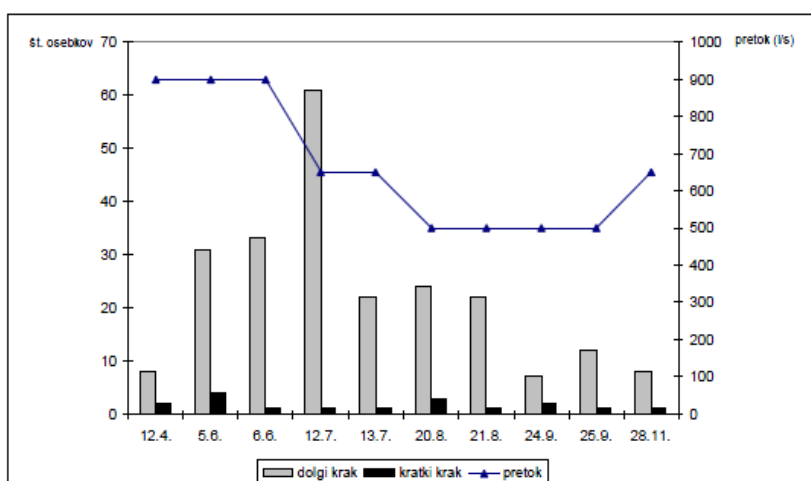
Grafikon 5: Število ulovljenih podusti v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabrc, 2012)



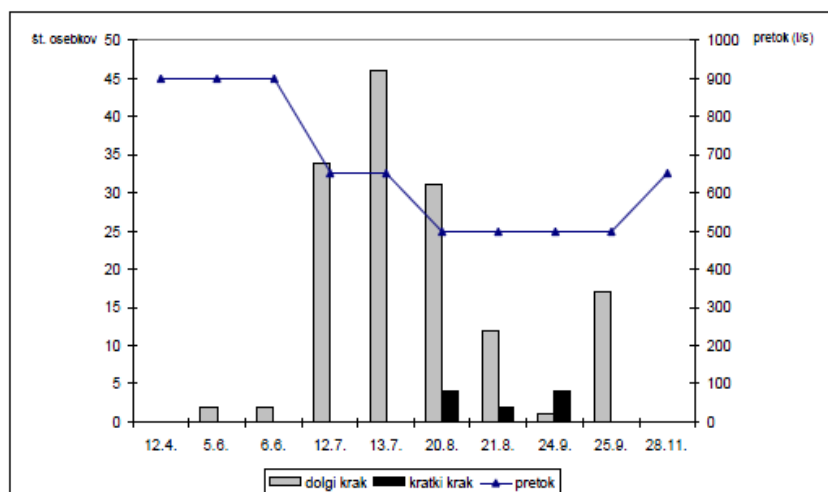
Grafikon 6: Število ulovljenih klenov v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabrc, 2012)



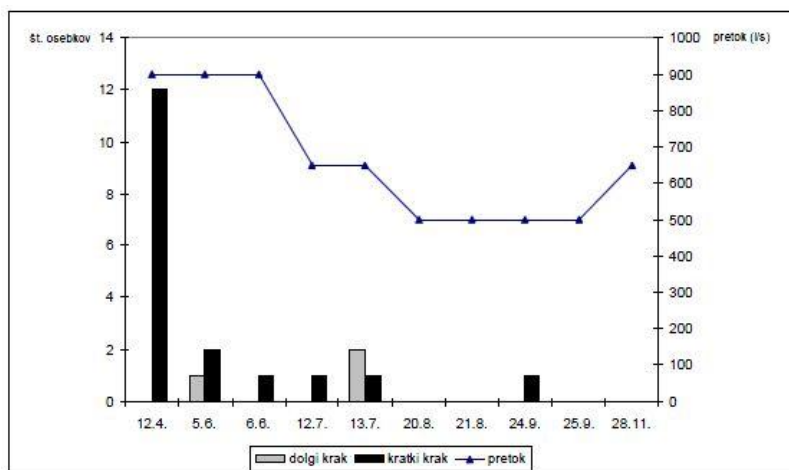
Grafikon 7: Število ulovljenih ogric v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabrc, 2012)



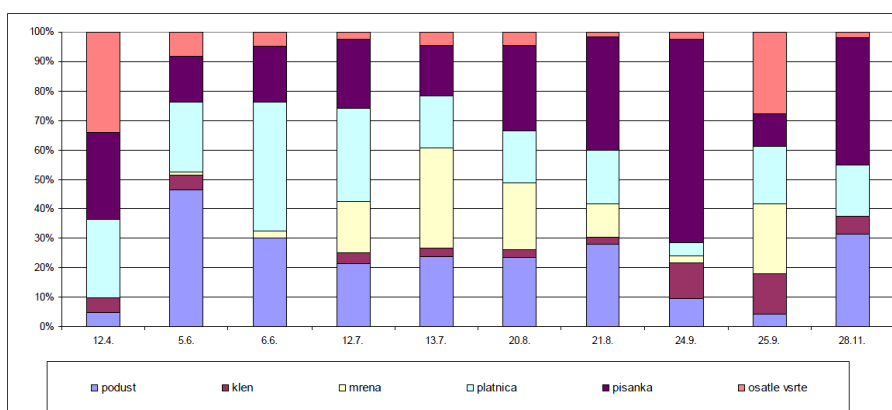
Grafikon 8: Število ulovljenih platnic v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabrc, 2012)



Grafikon 9: Število ulovljenih mren v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabrc, 2012)



Grafikon 10: Število ulovljenih globočkov v vršah in pretok v ribji stezi v letu 2012 (Zabrc, 2012)



Grafikon 11: Deleži posameznih vrst rib, ki so bile v letu 2012 ulovljene v vrše pri gorvodni migraciji (Zabrc, 2012)

5.3.2 Hidravlična analiza rezultatov

Glede na prostorsko in časovno porazdelitev rib v ribji stezi ugotavljamo, da ribe ne uporabljajo ribje steze samo za prečkanje ovire, ampak tudi za druge namene. Nekatere vrste rib se zadržujejo v ribji stezi daljše obdobje, saj so se ulovile v vršo čez celo leto, torej ne le v času drstne migracije. Poleg tega je bilo v ihtiološkem pregledu (Zabrc, 2010) ugotovljeno, da prihaja tudi do drstenja v ribji stezi – zabeležena je bila drst podusti.

Iz prostorske porazdelitve je tudi jasno razvidno, da se veliko več rib nahaja v kratkem kraku vtočnega odseka, čeprav je ta krajši in ima zato tudi manjši volumen vode. Iz rezultatov ulova rib v vrši je razvidno, da je bilo neprimerno več rib ulovljenih v zadnjem prekatu dolgega kraka kot v kratkem kraku. Ta dva na prvi pogled različna rezultata nam skupaj s hidravličnim modelom in z režimom delovanja dajeta odgovor na vprašanje, kaj se dogaja v ribji stezi. Ker sta najpogostejša režima »Q660« in »Q900«, kot sem že navedel v tehničnih lastnostih ribje steze, zagotovljena s stalno odprto zgornjo zapornico in po potrebi še spodnjo (deloma ali v celoti), je večji povprečni pretok vode skozi daljši krak in zato so tam ribe bolj spodbujene k migraciji. Zato pridejo do zadnjega prekata. V krajšem kraku so nižji pretoki, a so zaradi njegove kratke dolžine in majhnega naklona visoke gladine vode, saj se od zbirnega jezera dno krajšega kraka dvigne le za okoli 10 cm in je zato tudi ob pretoku 0 l/s skozi spodnjo

vtočno zapornico globina vode več kot 1 m. Poleg tega so hitrosti in disipacija energije v prvem (če gledamo dolvodno) prekatu krajšega kraka večje že zaradi večjih iztočnih hitrosti, saj se vtok v krajši krak nahaja nižje glede na gladino akumulacije (voda vteka izpod lopute). To ribam ne omogoča (razen v primeru, da bi bila zapornica do kraja odprta in bi bila gladina akumulacije zares nizka), da bi prečkale zadnji prekat in splavale pod loputo. V drugih prekatih pa je voda dokaj mirna in veliki ter zelo počasni recirkulirajoči vrtinci omogočajo ugodno okolje za ribe.

Iz vrstne sestave rib, ulovljenih v vrše, je razvidno, da so vtočni odsek sposobne prečkati skoraj vse ribe. Ribjo stezo je sposobna prečkati celo pisanka, ki je po preglednici 3 ena najslabših plavalk.

6 ZAKLJUČEK

Pri načrtovanju ribjih stez je potrebno upoštevati veliko dejavnikov, da dimenzionirana ribja steza omogoča čim večjemu številu rib migracijo mimo ovire v vodnem toku.

Najprej je potrebno ugotoviti, kateri vodni organizmi se nahajajo na vplivnem območju, kjer se ali se bo nahajala ovira. Potrebno je predvsem ugotoviti, kako bo ovira v vodnem toku vplivala na njihovo dolgoročno preživetje. Nekatere vrste rib potrebujejo za dolgoročno preživetje zelo različna okolja (okolja, kjer se hranijo in prebivajo večino svojega življenja, so lahko zelo drugačna od tistih, kjer se razmnožujejo, prav tako nekatere vrste rib prezimujejo v globljih vodah, večino leta pa preživijo v plitvejših pritokih), z oviro v vodnem toku pa so jim poti preprečene. Prav tako je potrebno ugotoviti, katere ribe bomo varovali prednostno (običajno bolj ogrožene ali dobičkonosnejše). Za te ciljne vrste rib moramo poznati njihove plavalne sposobnosti.

Ko določimo ciljne vrste organizmov in njihove biološke ter fiziološke značilnosti, izberemo pravi tip ribjega prehoda. Izbira ni odvisna samo od vrste vodnih organizmov, za katere je namenjena, ampak tudi od same ovire. Ovire se med seboj zelo razlikujejo: lahko so visoke pregrade, ki so običajno namenjene proizvodni električne energije in imajo dokaj konstanten pretok ter veliko višino, prepusti, kjer pretok običajno zelo niha, ali skalne ovire v rekah, kjer prihaja do velikih nihanj pretokov in problemov s plavjem ter plavinami.

Predstavili smo že zgrajeno ribjo stezo ob HE Arto Blanca, ki je ena redkih dobro delujočih ribjih stez na velikih pregradah v Sloveniji.

V nadaljevanju smo prikazali možnost njene nadaljnje optimizacije s spreminjanjem dolžin reber. Ugotovili smo, da s premikanjem reže med prekati proti sredini zmanjšamo ekstremne vrednosti hitrosti in disipacijo turbulentne kinetične energije, a na račun tega izgubljammo področja z izrazito majhnimi hitrostmi in majhnimi vrednostmi disipacije turbulentne kinetične energije. Hidravlični parametri (hitrost, turbulentna kinetična energija – k in disipacija turbulentne kinetične energije ϵ) se zelo malo spreminjajo s spremembo pretoka, kar je že dolgo znana prednost te vrste ribjih stez (bazenski tip ribjih stez z vertikalnimi režami).

Na obstoječi ribji stezi in vplivnem območju HE Arto Blanca je bilo opravljenih več ihtioloških pregledov, ki kažejo na dobro delovanje te ribje steze. V vseh delih steze je bila ugotovljena tudi prisotnost slabih plavalk (preglednici 2 in 3). Vendar se je pokazalo, da se je zmanjšalo število določenih vrst drstič. Torej ribja steza ni edini ukrep za zagotavljanje dolgoročnega preživetja določenim vrstam rib, a je eden nujnih.

7 NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO

Za še hitrejšo, enostavnejšo in učinkovitejšo analizo ribjih stez bi bilo program PCFLOW2D potrebno ustrezno nadgraditi. Predvsem bi ga bilo potrebno prilagoditi in dopolniti, tako da bi omogočal:

- a) začetek računa iz predhodno izračunanega stanja (t.i. »hot start«)
- b) paralelno računanje
- c) obdelavo vhodnih in izhodnih podatkov z izboljšanim grafičnim vmesnikom

a) »Hot start«

Ker se pri optimizaciji ribje steze z manjšimi spremembami geometrije in pretoka izračunani hidravlični parametri le nekoliko spreminjajo (včasih celo linearno), je časovno zelo potratno, da za spremembo ponovno preračunamo vse parametre v ribji stezi od začetnega časa $T = 0$. Takrat še ni vode v ribji stezi in račun teče do časa, ko se tok ustali. Računske čase bi lahko precej skrajšali, če bi lahko račune pognali iz predhodno že znanega stanja za najbližjo že izračunano geometrijo ribje steze, saj bi bil čas do ustalitve toka pri spremembi geometrije občutno krajši.

b) Paralelno računanje

Dandanes se lahko paralelni računi izvajajo tudi doma na osebnih računalnikih z več jedri ali z močnimi procesorji na grafičnih karticah, ki jih lahko izkoristimo za računanje, in ne samo na dragih superračunalnikih kot v preteklosti. Seveda morajo biti programi za takšno paralelno računanje ustrezno prilagojeni. Zaradi dolgotrajnosti računov toka v ribji stezi bi bilo smiselno paralelizirati tudi kodo programa PCFLOW2D, ki bi lahko tako postal še učinkovitejše orodje za optimizacijo oblike steze.

c) Grafični vmesnik

Pri delu s programom PCFLOW2D bi bil dobrodošel izboljššan grafični vmesnik, saj bi nam omogočal hitrejšo delo pri pripravi vhodnih in izhodnih podatkov. Tako bi za ta opravila porabili manj časa in bi se lahko posvetili optimizaciji ribje steze z raziskavo več variant v krajšem času.

VIRI

Baudoin, J.-M., Burgun, V., Chanseau, M., Larinier, M., Ovidio, M., Sremski, W., Steinbach, P., Voegtle B. 2014. Assessing the passage of obstacles by fish. Concepts, design and application. Onema: 200 str.

Bombač, M. 2014. Matematično in fizično modeliranje toka v rekah s poplavnimi področji. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Bombač): 109 str.

Bombač, M., Novak G., Mlačnik, J., Četina, M. 2015. Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations. Ecological Engineering. (Sprejeto v objavo.)

Bombač, M., Novak G., Rodič, P., Četina, M. 2014. Numerical and physical model study of a vertical slot fishway. J. Hydrol. Hydromech. 62, 2: 150–159.

Ciuha, D., Povž, M., Muck, P., Brenčič, M., Kvaternik, K. 2014. Zasnova in tehnične rešitve prehodov za vodne organizme pri pregradah HE na spodnji Savi s poudarkom na prehodu HE Arto Blanca. V: 25. Mišičev vodarski dan: 228–236.
<http://www.mvd20.com> (Pridobljeno 31. 3. 2015.)

Četina, M. 1998. Dvodimenzijski program PCFLOW2D za račun toka s prosto gladino. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 82 str.

FAO/DVWK. 2002. Fish passes – Design, dimensions and monitoring. Food and Agriculture Organization of the United Nations in arrangement with Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK). 118 str.

Hamzić, R. 2012. Dopolnitev modela PCFLOW2D s k-e modelom turbulence za nestalni tok. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Hamzić): 47 str.

Hladnik, A. 2012. Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hladnik): 74 str.

Jašič, A. 2010. Izvedba prehoda za vodne organizme v verigi HE na spodnji Savi. Diplomski naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba A. Jašič): 77 str.

Kolman, G., Mikoš, M. 2006. Tipi ribjih prehodov in pregled razmer v Sloveniji. Acta hydrotechnica 24, 41: 1–26.

Kolman, G., Mikoš, M., Povž, M. 2010. Ribji prehodi na hidroenergetskih pregradah v Sloveniji. Varstvo narave 24: 85–96.

Kolman, G., 2014. Ribe in vzdolžna povezanost vodotokov na porečju Sore. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Kolman): 119 str.

Koruza, J. 2012. Gradnja prehodov za ribe po sodobnih smernicah. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Koruza): 50 str.

Larinier, M., Travade, F., Porcher, J. P. (Eds.) 2002: Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture No. 364: 1–207. <http://www.kmae-journal.org/articles/kmae/abs/2002/04/contents/contents.html> (Pridobljeno 31. 3. 2015.)

Lupandin, A. I. 2005. Effect of Flow Turbulence on Swimming Speed of Fish. Biology Bulletin 32, 5: 461–466.

Primeri sonaravnega urejanja površinskih voda. 2013. Inštitut za vode Republike Slovenije. <http://www.izvrs.si/wp-content/uploads/2013/10/PRIMERI-SONARAVNIH-UREDITEV.pdf> (Pridobljeno 1. 9. 2015.)

Ribje steze. 1911. Lovec 2: 119.

Šulgaj, A. 1938. Ribje steze. Ribiškološki vestnik 5, 7: 89–91, 8: 154–159 in 9: 193–199.

Zabric, D. 2008. Recenzija projekta Ribja steza HE Blanca. Zavod za ribištvo Slovenije: 44 str.

Zabric, D. 2009. Ihtiološki pregled na HE Boštanj in HE Blanca. Monitoring ribje steze HE Blanca. Končno poročilo. Zavod za ribištvo Slovenije: 27 str.

Zabric, D. 2012. Ihtiološki pregled na HE Boštanj in HE Blanca v letu 2012. Poročilo o projektni nalogi. Zavod za ribištvo Slovenije: 96 str.

Zabric, D., Pliberšek, K., Jenič, A., Bertok, M. 2009. Ihtiološki pregled na HE Boštanj in HE Blanca. Končno poročilo. Zavod za ribištvo Slovenije: 90 str.

Zakon o sladkovodnem ribištvu. Uradni list RS št. 61/2006: 6613–6623.

SEZNAM PRILOG

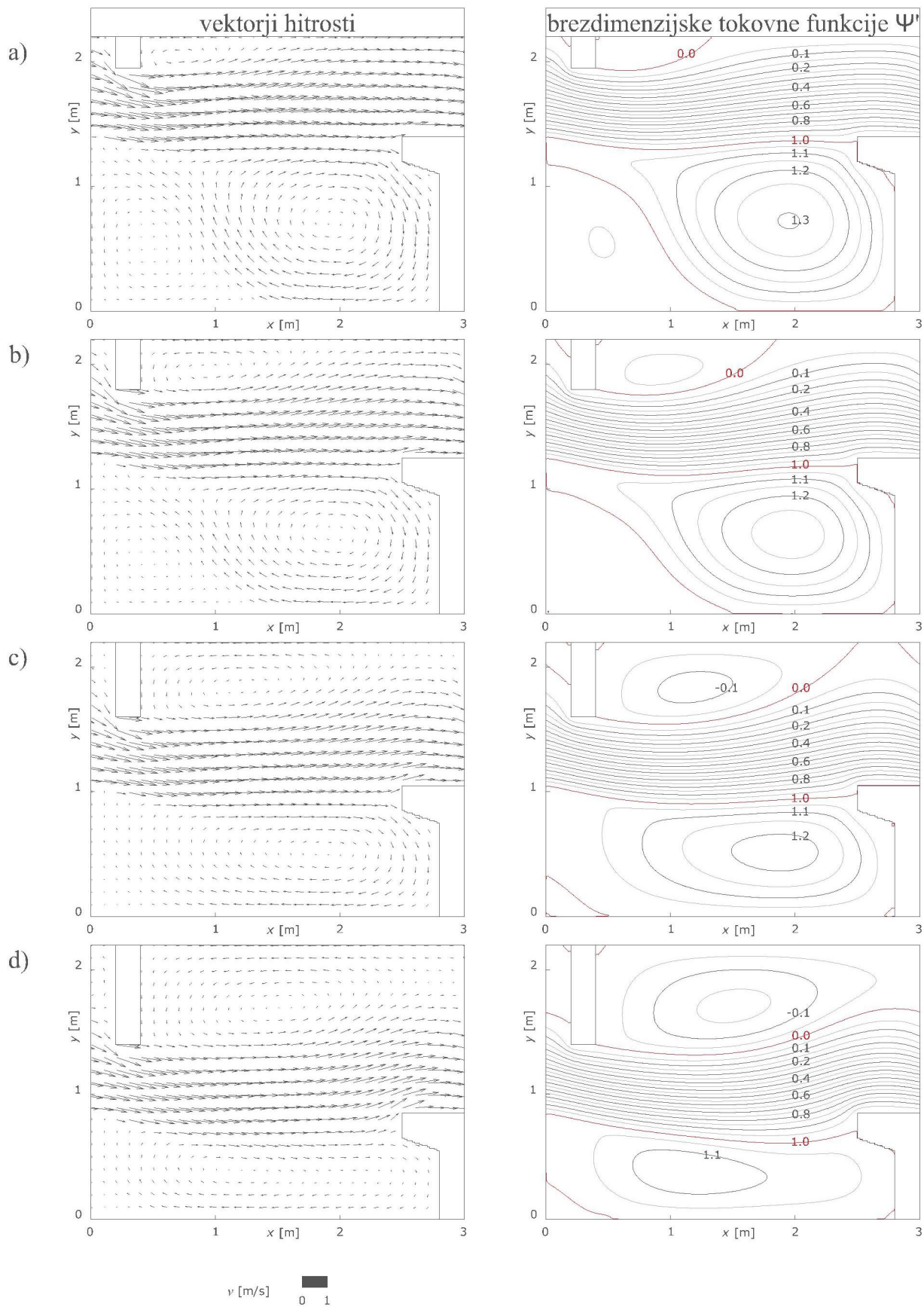
PRILOGA A: Vektorji hitrosti in brezdimenzijske tokovne funkcije ψ' pri pretoku 600 l/s

PRILOGA B: Vektorji hitrosti in brezdimenzijske tokovne funkcije ψ' pri pretoku 1000 l/s

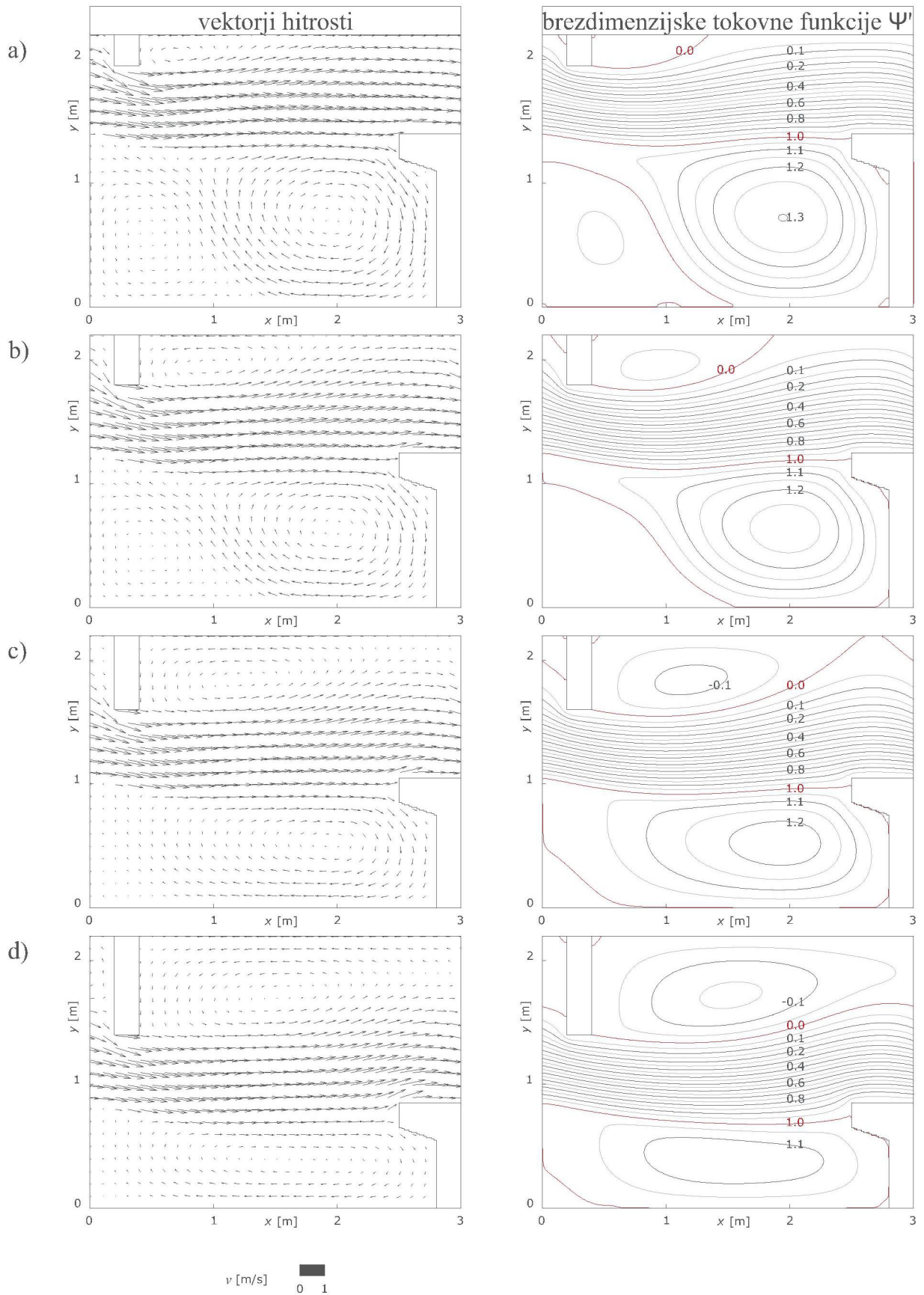
PRILOGA C: Turbulentna kinetična energija na enoto mase

PRILOGA D: Disipacija kinetične energije na enoto mase

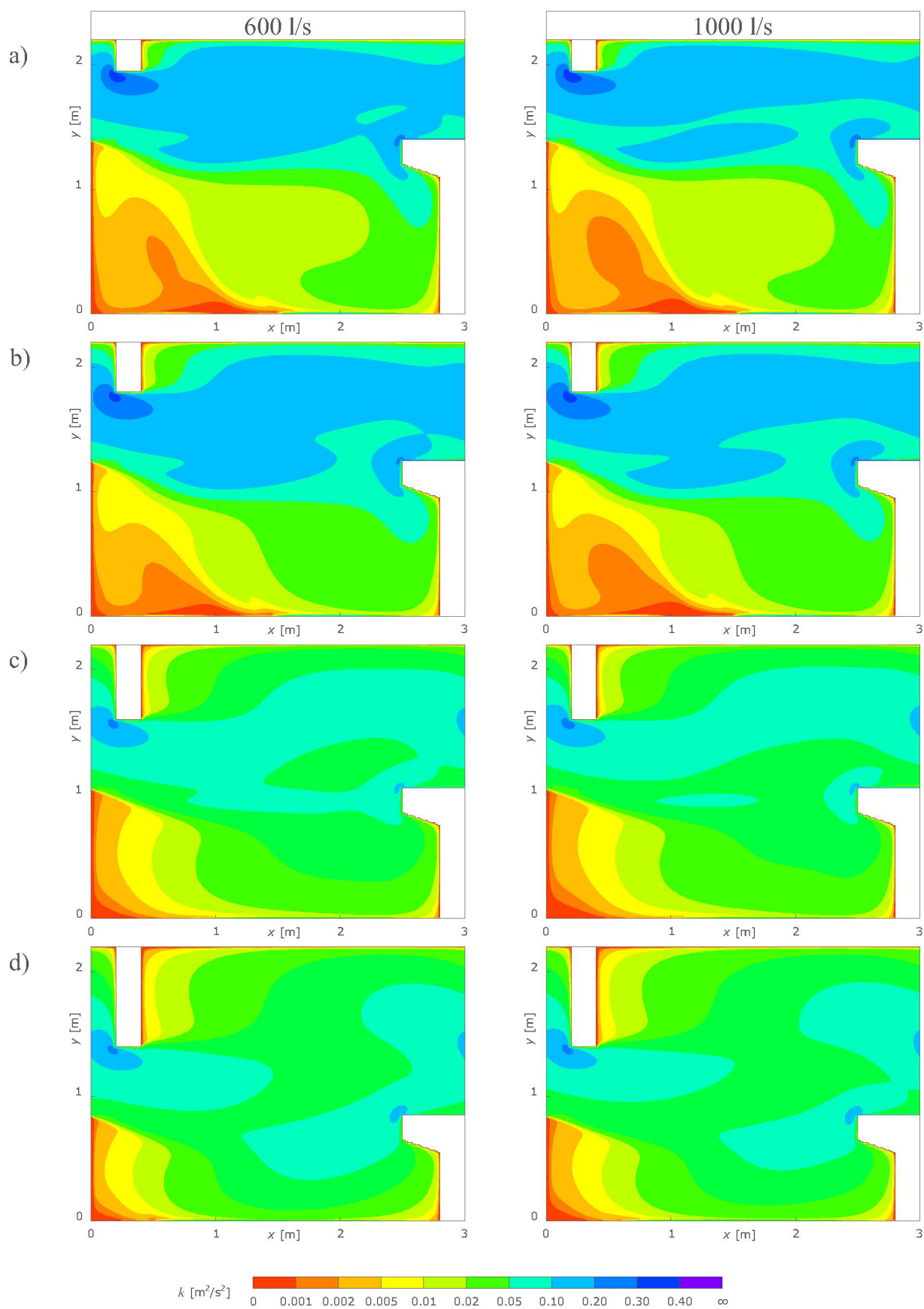
PRILOGA E: Hitrosti



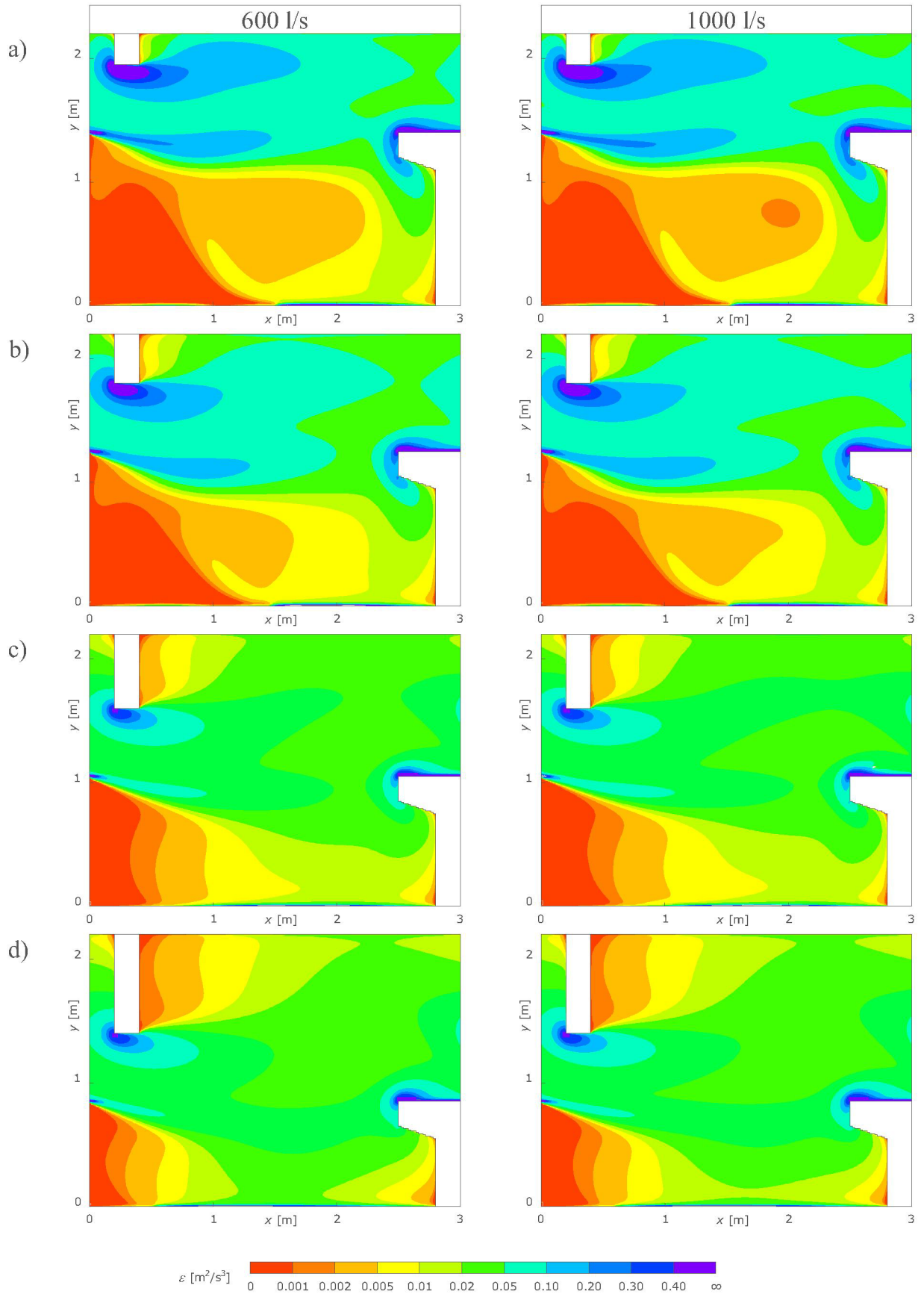
PRILOGA A: Vektorji hitrosti in brezdimenzijske tokovne funkcije Ψ' pri pretoku 600 l/s



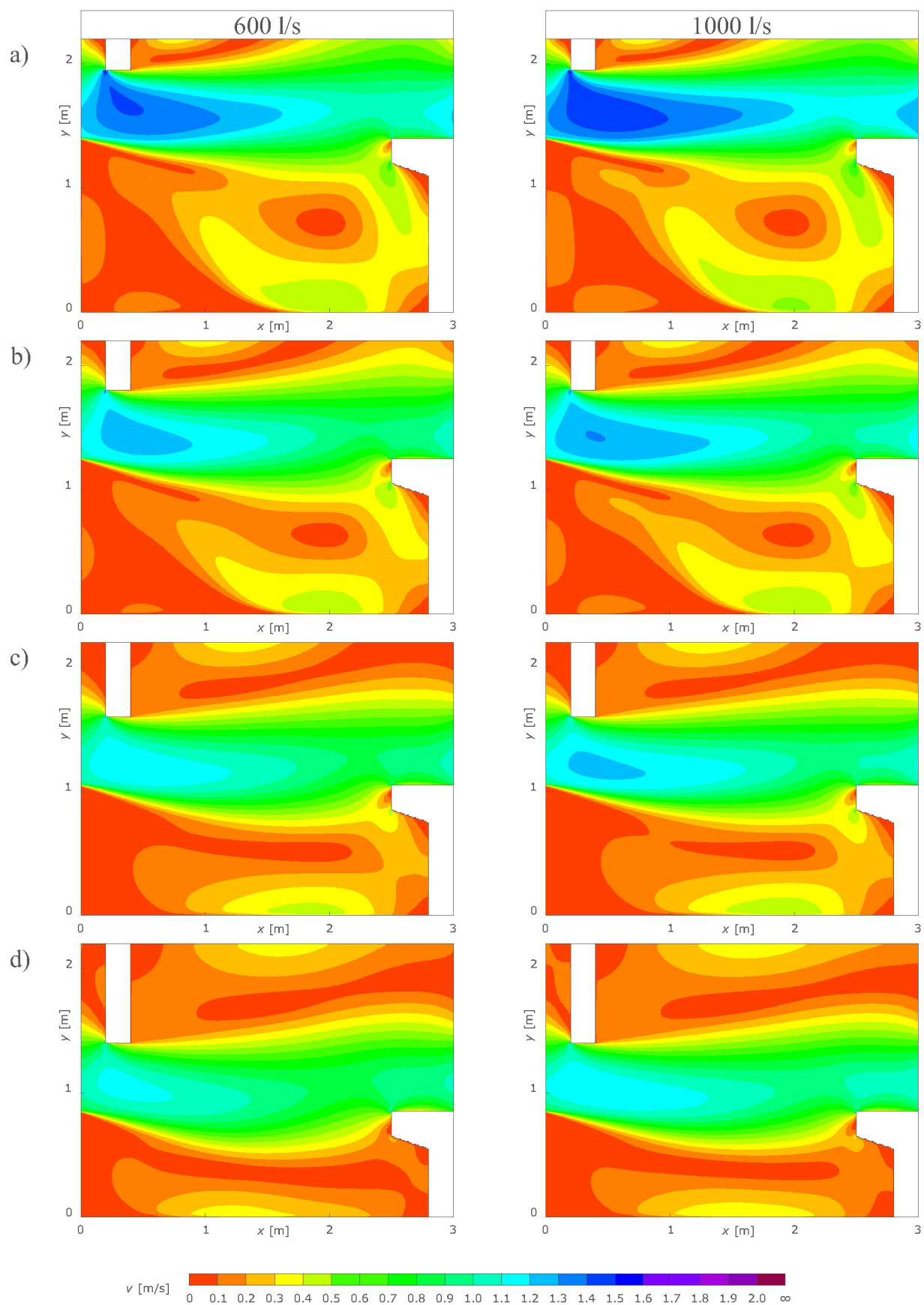
PRILOGA B: Vektorji hitrosti in brezdimenzijske tokovne funkcije Ψ' pri pretoku 1000 l/s



PRILOGA C: Turbulentna kinetična energija na enoto mase
 k [m^2/s^2]



PRILOGA D: Disipacija turbulentne kinetične energije na enoto
 mase ε [m^2/s^3]



PRILOGA E: Hitrosti v [m/s]