

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:

Oven, A., 2016. Vpliv vzdolžnega padca na tokovne razmere v ribji stezi. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Četina, M., somentor Bombač, M.): 70 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5961/>

Datum arhiviranja: 17-10-2016

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:

Oven, A., 2016. Vpliv vzdolžnega padca na tokovne razmere v ribji stezi. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Četina, M., co-supervisor Bombač, M.): 70 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5961/>

Archiving Date: 17-10-2016

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 GRADBENIŠTVO
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidat:

ANDRAŽ OVEN

**VPLIV VZDOLŽNEGA PADCA NA TOKOVNE
RAZMERE V RIBJI STEZI**

Diplomska naloga št.: 3529/HS

**INFLUENCE OF LONGITUDINAL SLOPE ON FLOW
CONDITIONS IN A FISHWAY**

Graduation thesis No.: 3529/HS

Mentor:

prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:

dr. Martin Bombač

Ljubljana, 23. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani študent Andraž Oven, vpisna številka **26108599**, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Vpliv vzdolžnega padca na tokovne razmere v ribji stezi**.

IZJAVLJAM*1. Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
 - b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
 3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
 4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
 5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
 6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
 7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študenta/-ke:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 626.882(043.2)
Avtor: Andraž Oven
Mentor: prof. dr. Matjaž Četina
Somentor: dr. Martin Bombač
Naslov: Vpliv vzdolžnega padca na tokovne razmere v ribji stezi
Tip dokumenta: Diplomaska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 70 str., 7 pregl., 46 sl., 41 pril.
Ključne besede: ribja steza, PCFLOW2D, k - ε model turbulence, matematični model, ribja steza z vertikalnimi prekat, ribje migracije, vzdolžni padec

Izvleček

V diplomski nalogi je opisan primer matematičnega modeliranja turbulentnega toka v ribji stezi s programom PCFLOW2D. V zadnjem času se v Sloveniji posveča vedno večja pozornost raziskavam za izboljšanje vzdolžne povezljivosti vodotokov za doseganje dobrega ekološkega stanja, ki ga zahteva Vodna direktiva za vse stare in nove ribje steze do leta 2027. Pri tem lahko uporabimo tudi izračune s hidravličnimi modeli, ki pomagajo pri določevanju tokovne slike, s katero bomo ocenili primernost ribjih stez za ribje migracije. V prvem delu naloge se najprej predstavi glavne lastnosti najpogostejših tipov ribjih stez v svetu in našteje njihove dobre in slabe lastnosti, vključno z vprašanjem postavitve na pregradi. Razložen je pomen uspešnosti ribje steze in možnosti izboljšav našega razumevanja dogajanja na osnovi zbirke standardiziranih meritev migracij. V drugem delu naloge je obravnavana steza z vertikalno režo na HE Arto Blanca. Ker je tok izrazito dvodimenzionalen smo za simulacijo toka uporabili globinsko povprečni model PCFLOW2D z vgrajenim k - ε modelom turbulence. Izračun petih različnih primerov pretokov in štirih vzdolžnih padcev je pokazal, da je stopnja turbulence v stezi v največji meri odvisna od spremembe padca. Pri ugotavljanju primernost toka v stezi za ribe se izkaže, da imajo dovolj nizke vrednosti disipacije turbulentne kinetične energije le primeri z najmanjšim vzdolžnim padcem 10 cm na prekat ribje steze.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 626.882(043.2)
Author: Andraž Oven
Supervisor: prof. Matjaž Četina, Ph.D
Cosupervisor: Martin Bombač, Ph.D
Title: Influence of longitudinal slope on flow conditions in a fishway
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 70 p., 7 tab., 46 fig., 41 ann.
Keywords: fishway, PCFLOW2D, k - ε turbulence model, mathematical model, vertical slot fishway, fish migration, longitudinal slope

Abstract

This thesis discusses the use of mathematical modeling of a turbulent flow using PCFLOW2D in a fishway. Recently in Slovenia they gained increased attention for the research of the improval of the longitudinal connectivity of watercourses to achieve good ecological status required by Water Framework Directive for all existing and new fishways by the year of 2027. We can therefore use hydraulic models to calculate different flow conditions of various fishway examples to assess their suitability for fish migration. In the first part of the thesis we present the main features of the most common types of fishways currently used in the world and list their strengths and weaknesses. We then explain the importance of efficient fishways and how it could improve our understanding by collecting large data of standardized measurements of migrations on existing fishways. In the second part of the thesis we use the example of the vertical slot fishway used on HPP Arto Blanca. Its flow can be described as an example of a two dimensional flow. where the vertical component of the velocity is negligible, therefore we use depth-averaged model of flow for the existing two planar velocity components. We perform our calculations with the k - ε turbulence model on four different examples of longitudinal slopes in five different flow conditions, which shows that the degree of turbulence is only slope dependent. When checking the suitability for target fish species it turns out that only the lowest level of longitudinal slope of 10 cm per pool gets sufficient enough low levels of dissipation of the turbulent kinetic energy.

ZAHVALA

Pri izdelavi diplomske naloge se v prvi vrsti zahvaljujem mentorju prof. dr. Matjažu Četini za vse nasvete ter čas, ki mi ga je pri tem namenil. Zahvaljujem se somentorju in raziskovalcu na Inštitutu za hidravlične raziskave dr. Martinu Bombaču za deljenje izkušenj iz matematičnega modeliranja in za možnost uporabe njegove strojne opreme. Zahvalil bi se tudi svoji družini za podporo, ki sem jo bil deležen med časom študija in pri pisanju diplome.

KAZALO

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION	IV
ZAHVALA	V
KAZALO.....	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	IX
1 UVOD	1
2 OBRAVNAVA RIBJIH STEZ V VODNI DIREKTIVI	3
2.1 Oblikovanje Vodne direktive.....	3
2.2 Stanje v Sloveniji.....	4
3 SPLOŠNO O RIBJIH STEZAH	6
3.1 Pregled zgodovine ribjih stez	6
3.2 Vrste ribjih stez.....	9
3.2.1 Bazenski tip	9
3.2.2 Vertikalna reža.....	13
3.2.3 Denilov tip steze	14
3.2.4 Sonaravna steza	16
3.3 Deli ribje steze	17
3.3.1 Pozicija ribje steze	17
3.3.2 Oblike tokov na pregradi	19
3.3.3 Tok v ribji stezi.....	21
3.3.4 Dodatni (stranski) tok ribje steze	22
3.4 Opis ribje steze na HE Arto Blanca.....	22
3.5 Učinkovitost ribje steze	24
3.5.1 Kdaj je ribja steza učinkovita	24
3.5.2 Neučinkovitost ribjega prehoda	29
3.5.3 Pregled učinkovitosti ribjih stez v svetu	30
4 MIGRACIJE RIB.....	34
4.1 Anadromne selitve	35
4.2 Ribe tekočih voda	36
4.3 Sposobnost rib pri migriranju	36
5 MAMETATIČNO MODELIRANJE TOKA Z DVODIMENZIJSKIM PROGRAMOM PCFLOW2D	39

5.1	Matematični model.....	39
5.1.1	Predpostavke	39
5.2	Osnovne enačbe.....	39
5.2.1	$k - \varepsilon$ model turbulence	40
5.2.2	Numerična metoda reševanja	41
5.3	Matematični model ribje steze	41
5.3.1	Opis modela in geometrija	41
5.3.2	Začetni in robni pogoji	43
6	REZULTATI MATEMATIČNIH MODELOV	44
6.1	Pregled računov za različne pretoke in padce dna.....	44
6.2	Primerjava hitrosti za različne pretoke in vzdolžne padce dna	47
6.3	Turbulentna kinetična energija na enoto mase (k) in njena disipacija (ε)	55
6.4	Disipacija turbulentne kinetične energije na enoto volumna E	60
6.5	Analiza primernosti posameznih primerov za migracije rib	62
6.6	Analiza vpliva velikosti numerične mreže	64
7	ZAKLJUČEK.....	66
VIRI.....		67

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Odvisnost teoretične maksimalne hitrosti skozi režo glede na višinsko razliko gladin sosednjih bazenov	12
Preglednica 2:	Odvisne spremenljivke uspešnosti ribje steze	27
Preglednica 3:	Kovariante za uspešnost ribje steze	27
Preglednica 4:	Fizične in hidravlične karakteristike posamezne ribje steze	28
Preglednica 5:	Pregled karakteristik po tipih ribjih stez	32
Preglednica 6:	Sposobnost ribjih vrst, ki migrirajo na daljše razdalje	38
Preglednica 7:	Zbrane karakteristike vseh obravnavanih pretokov in padcev.....	63

KAZALO SLIK

Slika 1: Ribja steza »Hells Gate« z dvema vertikalnima režama in sliko značilnega toka (Clay, 1995, str 30).....	9
Slika 2: Značilna tipa prelivanja toka med bazeni ribje steze	10
Slika 3: Primeri odprtin med bazeni ribje steze: a) potopljena reža, b) vertikalna reža, c) preliv, d) drča	11
Slika 4: Primer tipične smeri glavnih delov toka v ribji stezi z enojno vertikalno režo	14
Slika 5: a) Vzdolžni in b) prečni prerez Denilove steze	15
Slika 6: a) in d) sta pravilno postavljena vhoda ribje steze glede na poševno postavljeno pregrado, b) in c) nepravilno	18
Slika 7: Različne izvedbe vhoda steze pri strojnici, d) ni primerna	19
Slika 8: Variante oblike vodnega skoka pod prelvi	20
Slika 9: Oblika toka pod pregrado	21
Slika 10: Celotna ribja steza na HE Arto Blanca: 1) tehnični del steze z vertikalnimi režami, 2) sonaravni del, 3) vtočni del v stezo (povzeto po Jašič, 2010, str. 20)	23
Slika 11: Zveza med stroški in biološkim idealom za primerke rib A, B, C	26
Slika 12: Krivulja preživetja populacije migrirajočih rib skozi več zaporednih prehodov pri fiksni uspešnosti; x os - zaporedni prehodi, y os – padanje preživelih od 1000 naprej (povzeto po Armstrong et al. 2010, str. 236)	30
Slika 13: Delež uspešnih ribjih prehodov glede na njihov red (povzeto po Noonan et al., 2012, str. 456)	31
Slika 14: Efektivnost ribjih stez: a) bazenski tip, b) vertikalna reža, c) sonaraven tip, d) Denil, e) ribja splavnice/dvigala (povzeto po Noonan et al.2012, str. 454)	33
Slika 15: Odstotek uspešnosti rib glede na a) različne padce dna steze, b) dolžine ribje steze, c) srednje hitrosti toka in d) dolžne rib (povzeto po Noonan et al. 2012, str.457)	33
Slika 16: Maksimalna hitrost plavanja v odvisnosti od temperature	37
Slika 17: Maksimalna vzdržljivost pri različnih temperaturah vode	38
Slika 18: Shema ribje steze v matematičnem modelu (vse dimenzije v metrih)	42
Slika 19: Detajlne kote vertikalne reže ribje steze	42
Slika 20: Odvisnost h_{RP} in h_{POV} od pretoka za padec dna 10 cm na bazen	44
Slika 21: Odvisnost h_{RP} in h_{POV} od pretoka za padec dna 15 cm na bazen	45
Slika 22: Odvisnost h_{RP} in h_{POV} od pretoka za padec dna 20 cm na bazen	45
Slika 23: Odvisnost h_{RP} in h_{POV} od pretoka za padec dna 25 cm na bazen	46
Slika 24: Primerjava globin bazenov v kontrolnih točkah po padcih na bazen	46
Slika 25: Povprečna globina bazena v odvisnosti od Q po padcih na bazen	47
Slika 26: Razporeditev vektorjev hitrosti po stezi za pretok 600 l/s (levo) in 2000 l/s (desno) pri padcu 10 cm na bazen	48
Slika 27: Razporeditev vektorjev hitrosti po stezi za pretok 600 l/s (levo) in 2000 l/s (desno) pri padcu 25 cm na bazen	48
Slika 28: Srednja (modra) hitrost v glavnem toku, srednja hitrost v umirjenem toku (oranžna) s standardnimi odkloni ter maksimalna hitrost (zelena) v ribji stezi pri padcu 10 cm na bazen.	49
Slika 29: Srednja (modra) hitrost v glavnem toku, srednja hitrost v umirjenem toku (oranžna) s standardnimi odkloni ter maksimalna hitrost (zelena) v ribji stezi pri padcu 15 cm na bazen.	50
Slika 30: Srednja (modra) hitrost v glavnem toku, srednja hitrost v umirjenem toku (oranžna) s standardnimi odkloni ter maksimalna hitrost (zelena) v ribji stezi pri padcu 20 cm na bazen.	50
Slika 31: Srednja (modra) hitrost v glavnem toku, srednja hitrost v umirjenem toku (oranžna) s standardnimi odkloni ter maksimalna hitrost (zelena) v ribji stezi pri padcu 25 cm na bazen.	51
Slika 32: Izotahe hitrosti za padec 10 cm pri a1) 600 l/s, a2) 800 l/s, a3) 1200 l/s, a4) 1600 l/s in a5) 2000 l/s ..	52
Slika 33: Izotahe hitrosti za padec 15 cm pri b1) 600 l/s, b2) 800 l/s, b3) 1200 l/s, b4) 1600 l/s in b5) 2000 l/s. 53	
Slika 34: Izotahe hitrosti za padec 20 cm pri c1) 600 l/s, c2) 800 l/s, c3) 1200 l/s, c4) 1600 l/s in c5) 2000 l/s ..	54
Slika 35: Izotahe hitrosti za padec 25 cm pri d1) 600 l/s, d2) 800 l/s, d3) 1200 l/s, d4) 1600 l/s in d5) 2000 l/s. 55	
Slika 36: Razporeditev k pri pretoku 1200 l/s za padce a3) 10 cm, b3) 15 cm, c3) 20 cm, d3) 25 cm	57
Slika 37: Razporeditev ϵ pri pretoku 1200 l/s za padce a3) 10 cm, b3) 15 cm, c3) 20 cm, d3) 25 cm	58
Slika 38: $\sqrt{k}$ glede na padec bazena v glavnem in umirjenem toku	59
Slika 39: Izotahe $\sqrt{k}$ za primere padcev a3) 10 cm, b3) 15 cm, c3) 20 cm in d3) 25 cm	60
Slika 40: Delež površin E za padec 10 cm na bazen	61
Slika 41: Delež površin E za padec 15 cm na bazen	61
Slika 42: Delež površin E za padec 20 cm na bazen	62

Slika 43: Delež površin E za padec 25 cm na bazen	62
Slika 44: Primer izotah E pri padcu 10 cm in pretoku 800 l/s.....	64
Slika 45: Tokovnice v srednjem bazenu ribje steze za k - ϵ model turbulence pri numerični mreži a) 1 x 1 cm in b) 2 x 1cm	65
Slika 46: Primerjava razmerja VISRAZ za a) gostejšo in b) redkejšo mrežo	65

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Ribe so pomemben člen v verigi vodnih ekosistemov, saj predstavljajo njihovo neposredno kakovost glede na številčnost in starostno razporeditev posameznih ribjih vrst. Kakršno koli odstopanje od normalnega naravnega stanja lahko pomeni, da jim življenjski cikel pri migriranju v neki točki omejuje bodisi prostorska prepreka bodisi onesnaženje vodotoka, če omenimo samo glavna dva. V diplomski nalogi se bomo osredotočili predvsem na prvi problem, ki je včasih za ribe še večja ovira kot onesnaževanje, ki ga lahko do neke mere uspešno kontroliramo z zakonodajo in s kontroliranjem vzorcev. Po drugi strani so objekti na rekah v vsakem trenutku prisotne v življenjskem prostoru rib in jih ne moremo enostavno odstraniti ali optimizirati od danes na jutri. V mislih imamo predvsem nedelujoče ali pa slabše delujoče ribje steze, postavljene v preteklosti, ki zaradi različnih razlogov ne opravljajo svoje funkcije. Tu je lahko problem že v sami zasnovi objekta zaradi nepoznavanja vseh posameznih spremenljivk ali pa gre preprosto za pomanjkanje vzdrževanja. Le-to, v primerjavi z obsežnostjo vodotoka ter migracijskih poti malenkostno točko, spremeni v veliko oviro za organizme na svoji poti proti toku. Zato je pomembno, da ob načrtovanju novih ribjih stez sproti urejamo tudi stare, da bo imelo to delo širši smisel na način celovitega reševanja migratorne problematike.

V diplomski nalogi smo obravnavali že preverjen sistem ribje steze na hidroelektrarni (HE) Arto Blanca, ki je namenjen migraciji različnih vrst rib, katere živijo na tem rečnem odseku. Gre za našo najštevilčnejšo družino rib, mislimo na ciprinide, oziroma prave krapovce, za katere so značilne nižje plavalne hitrosti in manjše vzdržljivosti pri migracijah proti toku, kot na primer pri družini salmonidov (postrvi). Zato je temu primerno na omenjeni ribji stezi izbran položen vzdolžni padec dna, in sicer $f_0 = 1,67\%$ ali $\Delta H = 5$ cm na bazen tehničnega dela ribje steze v obliki bazenov z vmesnimi vertikalnimi režami. Omenjeni del predstavlja za ribe s slabšimi plavalnimi sposobnostmi kritično točko celotnega sistema ribje steze. Ta se povezuje s sonaravnim delom v dolgo mimobežno pot ob strani HE, da premaga celotno višinsko razliko zgornje in spodnje vode pregrade. Večina višinske razlike se premaga s sonaravnim delom, ki pa je zaradi velike dolžine v primerjavi s tehničnim odsekom zato tudi položnejši. Velika dolžina pomeni eno izmed slabosti sonaravnih delov, saj je zanje potrebno zagotoviti dovolj obvodnega prostora, kar pa je v praksi pogosto težko, včasih pa celo nemogoče. V diplomski nalogi smo želeli z numeričnimi simulacijami ugotoviti, ali je mogoče ob povečevanju vzdolžnega padca dna tehničnega dela ribje steze doseči primerne tokovne razmere glede na mejne plavalne sposobnosti rib. Odločili smo se za testiranje novih vzdolžnih naklonov dna s padci $\Delta H = 10$ cm, 15 cm, 20 cm in 25 cm na posamezni bazen ob spreminjanju toka s petimi različnimi pretoki $Q = 600$ l/s, 800 l/s, 1200 l/s, 1600 l/s oziroma 2000 l/s.

Največji problem pri migraciji predstavljajo ribam ozki odseki in prehodi z visokimi hitrostmi toka in velikimi padci gladin med njimi. Za te zožitve je značilno, da na njihovem mestu pride do lokalnega zvišanja hitrosti, dolvodno pa nato posledično pride do cone, kjer se višek nabrane kinetične energije porablja. Če je bil tako na mestu zožitve značilen izrazito laminarni tok*, se v nadaljevanju ob razširitvi struge pojavi pretrganje tokovnic in veliko mešanje vode. Disipacijo tega curka predstavlja pojav številnih nestalnih vrtincev, ki jih tekom časa ni lahko napovedati. Zato smo morali poseči po naprednejšem programu, ki bi te turbulentne strukture toka znal v pravilni meri opisati. Uporabili smo dvodimenzijski program PCFLOW2D za računanje turbulentnih tokov, s katerim smo računali primere z dodatnima dvema enačbama za transport turbulentne kinetične energije na enoto mase k in stopnjo njene disipacije ε . Rezultate smo na koncu primerjali z nekaterimi empirično določenimi količinami, ki opisujejo glavne značilnosti toka.

*laminarni tok: Pri laminarnem toku tečejo tokovnice druga ob drugi in se ne vrtinčijo, molekule med seboj ne trkajo in se ne ovirajo pri gibanju

Pri diplomski nalogi smo našli še nekaj teoretičnih izhodišč, ki nam pomagajo pri razumevanju problema in reševanju programa za simulacijo tokov. Našli smo teoretična izhodišča za Vodno direktivo in določila, ki jih predpisuje, ter opisali določila, ki so predpisana v Sloveniji na področju zaščite vodnih ekosistemov. Opisali smo nekatere najbolj uporabljene ribje steze v svetu z izhodišči njihovega osnovanja iz preteklosti in današnje izkušnje o njihovem delovanju. Izpostavili smo njihove dobre in slabe lastnosti in področja uporabe. Pri tem nismo pozabili na omembo dodatnih pogojev za dobro delovanje ribjih stez, ki niso kritične samo pri zagotavljanju primernega toka znotraj njihovih bazenov. Ugodne razmere za prehajanje gorvodno namreč določajo tudi drugi tokovi na pregradi (izpod turbin, prelivov,...), ki so prisotni zaradi njenih značilnih elementov, postavitve in različnih načinov obratovanja HE.

Predstavljene so točke, ki predstavljajo uspešno ribjo stezo, s poudarkom na znanstvenih sodelovanjih različnih strok za skupno reševanje problematike migriranja. Opisani so primeri, kako učinkovitost ribjih stez variira s stroški, katerih povečanje za poskus izboljšanja pretočnih razmer ne deluje nujno pozitivno. Omenjen je način, kako bi lahko uspešnost prihodnjih ribjih stez ali pa sanacijo starih izboljšali na podlagi zajema večje količine podatkov iz že obstoječih, večinoma spregledanih, naprav s popisom standardnih spremenljivk pri monitoringu migriranja. Bistveno je, da bi se zaradi samega obsega in poenotenja merjenih količin, oblikoval sistem za enostavnejšo medsebojno primerjavo ribjih stez. S tem bi se poskušalo izločevati slabe primere in v bodoče uporabiti steze z lastnostmi, ki preverjeno delujejo.

Omenja se še glavne načine migriranja rib v svetu in opis dveh glavnih skupin ribjih migrantov, ki so najpomembnejši uporabniki obravnavanih ribjih stez. Predstavljena je omejitev za nekatere ogrožene ribje vrste, ki jo je bilo treba upoštevati pri preverjanju vplivov vzdolžnih padcev na tok v ribjih stezah.

2 OBRAVNAVA RIBJIH STEZ V VODNI DIREKTIVI

Sladkovodni ekosistemi so v zadnjih stoletjih doživeli enega največjih posegov v naravne, kar je pustilo resne posledice na biološko raznovrstnost ribjih populacij. V Evropi je tako zaradi industrializacije v 19. in 20. stoletju prišlo do upada, ogroženosti oziroma izumrtja rib v tekočih vodah predvsem pri potamodromnih vrstah, ki migrirajo samo znotraj celinskih voda, zato je povečana skrb za ohranjanje ribjega živeža ključnega pomena. Ohranjanje in obnova rečne raznolikosti ostajata med težjimi izzivi v EU, saj je za njuno realizacijo treba upoštevati več faktorjev. Skoraj nikoli na poslabšanje ne vpliva samo en dejavnik, ampak se to odraža v kombinaciji štirih (Breve et al., 2014). Ti glavni so lahko komercialne narave (ribolov), degradacija okolja (kakovost vode, temperatura vode, sprememba struge), izguba življenjskega prostora (izkop gramoza in peska), prekinjanje življenjskih prostorov z različnimi objekti na vodotokih, deltah, obalnih območjih (zmanjšanje poplavne nevarnosti, transport, proizvodnja energije, zajem pitne vode).

Na migracije ribe ima največji negativen vpliv prekinitev vzdolžne povezave vodotoka. Njihov vzgib za prehajanje med področji leži v prilagoditvenemu procesu različnih časovnih in prostorskih razsežnosti, s katerim naj bi si poiskali kar najboljše mesto za njihovo uspešno razmnoževanje, preživetje in povečevanje populacije. Zaradi prekinitev vodne poti postanejo organizmi vse bolj občutljivi na razne nestalne procese odvijanja v vodotoku, njihova genetska variabilnost se manjša, zmanjša se število posameznikov in na koncu celo lahko popolnoma izumrejo. Posebno so ranljive vrste reofilnega področja hitrih tekočih voda (Zitek et al., 2008).

Z ribjega vidika bi bil seveda najboljši ukrep odstranitev vseh pregrad, vendar za povezljivost obstaja tudi boljši kompromis v obliki različnih tehničnih in sonaravnih obvoznih (bypass) sistemov. Ti morajo biti za vsako lokacijo ustrezno prilagojeni, saj je njihova izvedba odvisna od številnih dejavnikov: tipa ribje populacije, ki ji bo prehod namenjen; pretoku skozi ribjo stezo; tipa pregrade, ki ga premaguje steza; in socialno-ekonomskih dejavnikov (Breve et al., 2014).

2.1 Oblikovanje Vodne direktive

Devetdeseta leta 20. stoletja so prinesla zasuk k bolj holističnemu in okoljskem razmišljanju in upravljanju, skrbi za nadziranje onesnaževanja, tako da so države pristopile na raven obravnavanja celotnega ekosistema, ki je združeval naravne in socialne vede z skupnim namenom reševanja okoljske problematike. Vprašanja in zavedanja za prihodnost so začeli oblikovati na raznih združevanjih po svetu (Earth Summit), leta 1992 (Rio de Janerio), 1995 (New York), 2002 (Johannesburg) ter s Konvencijo o biološki raznovrstnosti (1992), kjer so se zavzeli za trajnostni razvoj okolja (Herring, 2009). Znotraj Evrope je prišlo do oblikovanja Vodne direktive (»Water Framework Directive«), sprejete leta 2000 s strani Evropskega parlamenta, z namenom upravljanja vodotokov v smeri zagotavljanja ekološkega stanja z obnovo in ohranjanjem voda. Eden glavnih ciljev direktive je doseči »dobro ekološko stanje« za vsa tekoča vodna telesa in ponovno vzpostaviti vse prej izgubljene vzdolžne povezave za uspešno migracijo rib, in sicer do leta 2015 oziroma s pogojnimi izjemami do 2021, najkasneje pa do leta 2027 (Bizjak, 2008). Vzpostavitev kontinuitete rečnega toka je eden glavnih pokazateljev hidromorfološke kvalitete vodotoka, enako ekološko stanje določajo tudi vrstna in starostna pestrost ribjih združb ter številčnost njihovih populacij.

Želja po obnovi voda naj bi pomenila popolno povrnitev originalnega stanja in bi predstavljala popolno in zdravo okolje, kar pa je zaradi obsežnosti in težavnosti razumevanja naravnih procesov bržkone težko

dosegljivo. V ta namen se zato za zadovoljitev potreb evropske direktive raje odloči za 'rehabilitacijo' stanja, kjer se obnova izvede v večji meri, in je zato realno tudi lažje izvedljiva.

Direktiva je vplivala na številna področja okoljskega upravljanja z vodnimi viri in spodbudila reorganiziranje v uprave po hidroloških porečjih, v nasprotju z omejevanjem po državnih mejah. Bila je tudi pobudnik za poenotenje klasifikacije in metod monitoringa po celotni Evropi. Če je pred uveljavitvijo direktive 30 let bilo večinoma posvečeno dokumentiranju in čiščenju odpadnih voda ter nadzoru onesaževanja, je direktiva stopila korak naprej v preučevanje ekosistema kot celote. Dejstvo je, da toksični onesnaževalci, eutrofikacija (cvetenje voda) oziroma ostali stresni dejavniki predstavljajo bolj kompleksno delovanje in niso le skupek sprememb fizičnih ali kemijskih spremenljivk. V ta namen je direktiva bolj usmerjena v hidromorfološko obnovo v smeri »ekološke kvalitete«, kjer se bolj podrobno preučuje odziv živih organizmov, ki je težje opisljiv in manj predvidljiv (Reyol et al., 2014). Kljub temu je direktiva bila zaradi inovativnosti in direktnega pristopa k ocenjevanju statusa tekočih voda z upoštevanjem bioloških skupnosti namesto omejenega pogleda samo na posamezno kemično lastnost večinoma dobro sprejeta.

2.2 Stanje v Sloveniji

V Sloveniji je problematika oviranja rečne kontinuitete ribjim migracijam in ostalim vodnim organizmom prisotna že desetletja, saj v preteklosti snovanju in postavljanju prehodov ni bilo namenjeno dovolj pozornosti. Na starejših objektih so nameščeni le redki, zato bo v prihodnosti potrebno doseči večje sodelovanje z upravljavci vodne infrastrukture in tudi s strokovnjaki z različnih področij. Poudariti je treba seveda tudi, da je vzpostavljane prehodnosti slovenskih vodotokov za ribe smiselno le ob hkratni skrbi za same habitate, kjer te vrste živijo.

V Sloveniji so ribe, njihovi habitati in povezanost njihovega selilnega območja zaščiteni tako z mednarodno kot slovensko zakonodajo. V svetovnem merilu je določena prehodnost organizmov z Bonško konvencijo (»Konvencija o varstvu selitvenih vrst prostoživečih živali«; Bonn, 1979) in Bernsko konvencijo (»Konvencija o varstvu prosto živečega rastlinstva in živalstva ter njunih naravnih življenjskih prostorov«; Bern, 1979). Na evropski ravni je predpisana z Direktivo o habitatih (»The Habitat Directive«) in prej omenjeno Okvirno direktivo o vodah. V slovenski zakonodaji so zahteve svetovne in evropske zakonodaje prenešene v pravne akte, ki se navezujejo na ohranjanje narave, sladkovodno ribištvo in upravljanje z vodami, (Zabrc et al., 2014).

V Zakonu o vodah (2002) je tako navedeno, da je cilj upravljanja z vodami ter vodnimi in s priobalnimi zemljišči doseči dobro stanje voda in z njimi povezanih ekosistemov na način dolgoročnega varstva vodnih virov in doseganja njihove kakovosti. Vsakršno rabo in posege v vode je treba načrtovati in izvajati tako, da se ohranja naravno ravnovesje vodnih in obvodnih ekosistemov in da se ne poslabšuje stanja. Z Zakonom o sladkovodnem ribištvu (2006) se tudi določa ohranjanje ribje pestrosti vrst, starostne strukture in številčnosti. Vsakemu lastniku oziroma najemniku objektov na vodah je tudi določeno, da mora zgraditi ustrezen prehod za ribe za nemoteno prehajanje.

Merilo za stanje površinskih voda predpisuje Uredba za stanje površinskih voda (2009). Ta je sestavljena iz treh meril, ki opisujejo dobro stanje, in sicer takrat, ko je zagotovljeno dobro kemijsko stanje, kot drugo, vsaj dobro ekološko stanje in zadnje, da ima umetno ali močno preoblikovano vodno telo vsaj dober ekološki potencial. Na ribe se navezuje predvsem ekološko stanje, ki v Prilogi 5 Uredbe ... (2009) opredeljuje to stanje. Pravi, da je dobro stanje doseženo takrat, ko sta vrstna sestava in številčnost v določeni populaciji rib zaradi človeških vplivov malo spremenjeni glede na značilne vrednosti v

naravnih vodotokih brez človeških vplivov na elemente kakovosti vode. Prav tako te vplive kaže tudi starostna struktura ribjih združb, kjer v nekaterih primerih lahko zaradi pomanjkanja nekaterih starostnih razredov potrjuje, da prihaja do prekinitev v razmnoževalnem procesu ali razvoju določene vrste.

Kljub večjemu številu pravnih aktov pa ostaja prehodnost rib v Sloveniji v večini primerov samo spisek želja, ki se redko izvedejo v praksi. Vendar je treba upoštevati, da se prehodnosti ne bo več smelo obravnavati samo kot opsijski nadstandard, ampak z ostrejšo zakonodajo celo kot nujnost za zagotavljanje prehodnosti (Zabrc et al., 2014).

3 SPLOŠNO O RIBJIH STEZAH

Da se lahko lotimo preučevanja toka v ribji stezi, je treba najprej narediti pregled najbolj značilnih ribjih stez v svetu in razložiti nastanek in oblikovanje toka znotraj njih. Predstaviti se poskuša tiste lastnosti, ki jih delajo dobre oziroma nam služijo kot primer slabe izbire, ko se odločamo za primeren tip ribje steze. Na koncu poglavja so predstavljeni še kazalci uspešnosti ribje steze, ki bi se jih lahko upoštevalo za poenotenje meritev uspešnosti za vsak stari ali novi objekt, da bi bili rezultati lahko globalno primerljivi. S tem bi se lahko samo na podlagi, sicer dokaj redko izpeljanega, monitoringa uspešnosti prehajanja rib po toku navzgor sestavila baza znanja, ki bi lahko pri snovanju novih stez služila kot hitra in učinkovita pot za odločitve o izbiri najboljših primerov v prihodnosti. Samo s poznavanjem najboljših primerov obstoječih objektov bi lahko bistveno pomagali k izboljševanju rezultatov tudi drugod.

3.1 Pregled zgodovine ribjih stez

Prvi poskusi k vzpostavitvi rečnega prehoda preko jezovnih ovir segajo že v 17. stoletje v Evropo, ko se je že oblikovalo zavedanje o nevarnosti prekinitve migracije, ki je prej stoletja na naravnih strugah nemoteno potekalo. Najprej so to urejali v Severni Ameriki leta 1709, kjer je na ozemlju današnjega Massachusettsa v koloniji Plymouth bil sprejet zakon, ki bi preprečeval postavljanje jezov, ki bi onemogočali oziroma omejevali spomladansko migracijo (Katopodis, 2010). Zanimivo je, da je že v tem času veljalo zanimanje za ohranitev več vrst ribje populacije, kar kaže na to, da so lokalni prebivalci dobro poznali tiste bolj ogrožene, v tem primeru velikooke čepe. Kljub zakonskim poskusom in določilom pa je bilo prehajanje še dolgo zasnovano na primitivnih rešitvah brez znanstvenega pristopa in tako neuspešno. Ustrezne rešitve so se pojavile šele v 20. stoletju. Za začetke razvoja prehoda ribjih organizmov pa se lahko zahvalimo tudi vzporednemu razvoju znanja iz hidravlike in sorodnih panog, kar je šele omogočilo razumevanje problema in pomenilo hrbtenico pri nadaljnjem raziskovanju. Začetni razmah v predpisih je nato nastopil v 19. stoletju s postavljanjem aktov širom Evrope in Severne Amerike. Ti so bili usmerjeni v glavnem na ekonomsko zanimive losose. Na Irskem je ribolovni akt leta 1842 zahteval za vse novo postavljene jezove tudi pripadajoče ribje steze z namenom, da omogoči prehod lososom, a drugih specifikacij, kako naj se jim prehod omogoči, ni vseboval. V Kanadi je bil naslednje leto po združitvi britanskih kolonij v Kanadsko konfederacijo v letu 1868 vpeljan ribolovni akt kot ustavni predpis o ohranjanju in zaščiti ribolovnih virov. A že kmalu se je pokazalo, da samo želje ne pripomorejo k izboljšanju na tem področju, saj so bili rezultati posameznih rešitev nemalokrat neuspešni. Poleg nepoznavanja razmer, ki privedejo do tega, je k temu nedvomno doprineslo tudi stremljenje k čim nižji ceni. To je botrovalo postavljanju mnogokrat prekratkih in prestrmih prehodov, ki ciljnim ribam, kot je dokazano za salmonide, niso odgovarjali. To je verjetno glavni razlog, da je v 20. stoletju prišlo do pospešenega razvoja v projektiranju različnih tipov prehodov, ki bi omogočili uspešnost prehoda in stroškovno učinkovitost. Francis (1870) je med drugim izpostavil, da uspešno reševanje problema prehoda zahteva mnogo več kot samo oblikovanje bazenov s primernimi hidravličnimi lastnostmi. Najprej je namreč potrebno zagotoviti uspešen vstop posamezne ribe v ribjo stezo, kar pomeni, da je treba veliko raziskav nameniti tudi vhodom v stezo s točno določeno lokacijo, ter dodatno k vhodu speljati še privlačni tok, ki omogoča njegovo detekcijo. Do podobnih spoznanj so kasneje prišli tudi v Kanadi z določitvijo 13 potreb za učinkovitost ribjih stez.

Začetki znanstvenih študij v 20. stoletju so se začeli z G. Denilom iz Belgije, ki je izpeljal obsežna empirična opazovanja na podlagi poskusov in pogreškov. Raziskoval je najbolj ekonomično rešitev s spreminjanjem geometrije, naklona in dimenzije z namenom oblikovati kar najbolj preprosto ribjo stezo s čim večjim naklonom, ki bi bila kar se da kratka. S podrobnimi študijami omenjenih karakteristik je tako doprinesel h ključnemu razvoju na področju strmih prehodov, ki se uporabljajo še danes in so po

njem tudi poimenovani. Povod za raziskave je bila popolna neučinkovitost strmega prehoda na jezu iz leta 1907. Prve uspehe je dosegel že naslednje leto, sicer pa je laboratorijske teste izvajal do leta 1925. Obliko je optimiziral s hidravličnim modeliranjem in pri tem testiral različne vrste rib. Uspešno instalacijo Denilove ribje steze ste izvedla Mcleod in Nemenyi (1941), ki sta v 1939 in 1940 izvedla eno prvih primerjalnih eksperimentov med različnimi tipi stez in s tem postavila temelje za prihodnje celovitejše študije z upoštevanjem prototipov večjih skal in testiranje večjega števila vzorcev starih in novih modelov. Za to sta izrabila domače okolje v Iowi, od koder sta uporabila lokalne ribe za testiranje, ob tem pa sta primerjala standardne oblike Denilovega prehoda s serijo različnih bazenskih tipov z najrazličnejšimi kombinacijami prelivov in podvodnih odprtín. Z laboratorijskimi poskusi sta želela čim bolj optimizirati disipacijo energije in poenostaviti dizajn. Njuno delo je bilo uspešno, na petih različnih pregradah sta postavila 12 Denilovih pregrad z različnimi karakteristikami ter naklonom 16,67 oziroma 25 %, ki so jih v nadaljevanju uporabljale vse ribje vrste z dolžino posameznika vsaj 152 mm. Njun doprinos so nato s pridom uporabili na pregradi Dryden leta 1949, kjer so po testiranjih prišli do zadovoljivih 89 % prehodnosti rib od lososov, postrvi do katostomidov. To je sprožilo v naslednjih letih pravi razmah Denilovih stez po Severni Ameriki s poudarkom predvsem na reke na Aljaski, uspeh pa ni bil preslišan niti v Evropi, med drugim tudi v Skandinaviji.

Prvi primerki bazenskih tipov ribje steze izvirajo iz Evrope, kjer so jih uspešno uporabili za prehajanje lososov in postrvi, v obliki serije kamnitih bazenov, skozi katere je prelivala voda in sicer že v zgodnjem 19. stoletju. V nadaljevanju so postali zanimivi zaradi uspeha pri zasnovi na večjih pregradah, saj tam strme in kratke Denilove proge tega niso dovoljevale oziroma so bile slabše učinkovitosti. Najbolj znan primer iz začetka znanstvenega razvoja teh stez sega v 30. leta 20. stoletja z reševanjem razmer na reki Columbia ZDA ob izgradnji pregrade Boneville (Williams, 2012) in (Clay, 1995). Pregrada je pomenila resno grožnjo za izumiranje oziroma upad največjih naravnih zalog lososa vrste chinook na svetu, zato je bilo potrebno uporabiti za zagotovitev prehoda vse možnosti. Zasnova je vsebovala nove principe, ki so temeljili na sistemu treh vzporednih stez vključno z dodatnimi tremi pari eksperimentalnih zapiralnih ribjih dvigal za primere okvar osnovnih prehodov. Poleg tega so zasnovali še serijo več povezovalnih cevi za dovod obratovalne vode proti strojnici, postavili enega večjih sistemov za privlačnostni tok za ribje steze ter zasnovali poskus za dolvodno migrirajoče mladice. Prva steza je bila postavljena zraven strojnice, nato pa sta ostali dve oklepali prelive preko pregrade, medtem ko so bili pari dvigal postavljeni v neposredni bližini posameznih ribjih stez. V primerjavi z Denilovimi standardnimi ribjimi stezami so bili ti bazenski tipi mnogo položnejši, z naklonom 1:16 (6,25 %), obenem mnogo prostornejši, saj je en sam bazen v vrsti meril kar 9,1 m dolžine in 4,9 m širine, preko katerega sta bila speljani dve potopljeni 0,6 m široki odprtini za ribji prehod. Kot se je izkazalo pozneje, so ribe v večini uporabljale za gorvodni prehod samo bazene, kar je prineslo postopno zaprtje dvigal in nato tudi njihovo bodočo neuporabo. Za namene proučevanja omenjenega projekta so postavili cel laboratorij, ki se je ukvarjal izključno s testiranjem različic pri realnih obratovalnih pogojih in z originalnimi velikostmi prototipov. S tem so želeli potrditi povezavo med višanjem naklona ribje steze in njeno učinkovitostjo. Poleg prototipa z originalnim naklonom so preizkusili tudi dvakrat strmejšega (12,5 %) in z različnimi potopljenimi odprtinami od 0,3 m do 0,6 m širine. Ugotovili so, da čeprav lososi lahko premagujejo tudi zelo dolge steze z veliko absolutno višino in brez izgube kondicije, začnejo izgubljati na uspešnosti pri povečevanju razlike gladine med dvema bazenoma (Collins et al., 1963). V primeru lososa chinook je bilo ugotovljeno, da jim odgovarja višinska razlika do 0,45m.

Na začetku 20. stoletja so bile Denilove in bazenske ribje steze že dovolj izpopolnjene, da so zadovoljivo opravljale svojo nalogo preko pregrad, ki so bile redno nadzorovane s kontroliranim izpustom želenega pretoka v samo stezo, da so te optimalno delovale. Znano je bilo, da za ta dva tipa potrebujemo za uspešno delovanje, potrebno za optimalne hidravlične razmere v stezi, čim bolj konstanten dovod vode.

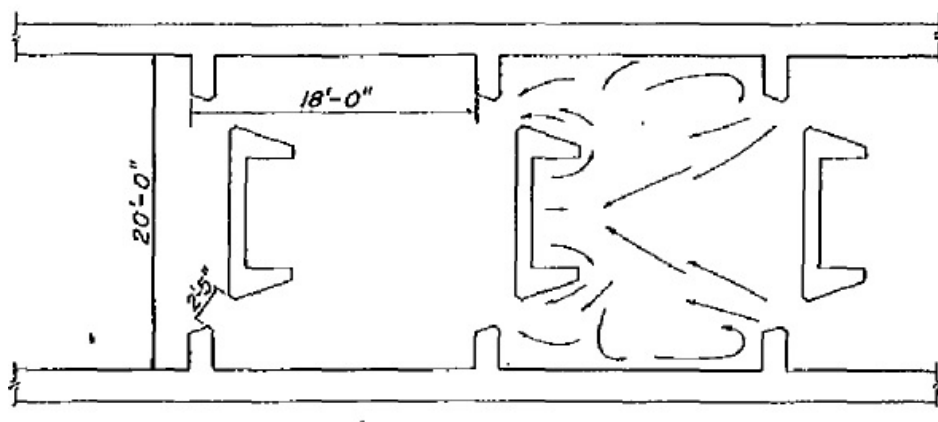
Problem je nastal, ko so želeli znanje o gorvodnem prehodu izpeljati na naravnih rečnih ovirah, ker se nivo vode mimo ovire nenehno spreminja zaradi naravnih procesov. Edina rešitev je zato bila, da se postavi ribja steza, ki bi omogočila čim bolj normalno migracijo ob predpostavki, da bi lahko tolerirala visoke razlike v nivoju vode tekom delovanja, da bi bili pogoji ob vseh primerih čim bolj ugodni. Bazenski tip je prav s tem namenom presegla Denilova ribja steza, ki je še lahko prenašala manjše razlike v vtočnih gladinah v stezo brez večjih izgub učinkovitosti. Na primeru naravne ovire Hells Gate reke Fraser v Kanadi česa takega ni bilo moč izvesti, zato se je začel razvijati nov tip ribje steze z vertikalno režo, ki jo omenja Katopodis (2010). Med gradnjo bližnje železnice v letih 1910–1915 so sprožili kamniti plaz, s katerim so deloma zajezili rečno strugo, in v prihodnjih letih dosegli, da je na omenjenem mestu z zožitvijo prihajalo do naravne ovire, ki je spreminjala višino vode med maksimalnim in minimalnim letnim nivojem do 33 m, v času migracije lososov pa celo do okoli 2 m dnevno. Pred tem dogodkom je bila leta 1913 ocena za letni prehod rib 39 milijonov posameznikov, po preteku nekaj sezon pa je ta upadel na samo 2 milijona rib, tako da je bilo treba nekaj spremeniti, da ne bi sledilo popolno uničenje vrste v tem vodotoku. Upad so povzročile ekstremne lokalne razmere s spremembo višine med gornjo in spodnjo vodo kar 2,5 m in z ocenjenimi hitrostmi preko 6 m/s.

Da bi do rešitve prišli z znanstvenim pristopom, je k projektu pristopila mednarodna komisija za pacifiške losose z namenom doseči sodelovanje tako biologov kot inženirjev, s čimer bi lahko dosegli boljše rezultate, kot če bi delovali ločeno. Prvi so bili v vlogi opazovalcev rib, ki so s spremljanjem tistih lososov, ki so bili pri prehodu uspešni, s pomočjo čipiranja beležili njihove poti ter odzive na spremembe v toku (turbulenco, vrtince), te hidravlične razmere pa so nato razlagali inženirji. Najbolj jih je skrbelo za postavitev vhoda v ribjo stezo, zato so izvedli veliko število fizičnih modeliranj z namenom, da bi zadostili potrebam pri spremenljivem nivoju rečnega toka, kjer je bilo treba zagotoviti ustrezne hitrosti in turbulentne razmere, da bi ga ribe lahko vedno poiskale.

Izgradnja novega tipa ribje steze z vertikalnimi režami je nato stekla med leti 1944 in 1946, ko so postavili po en primerek na vsak breg ovire »Hells Gate«. Gre za stezo z dvojno vertikalno režo širine 737 mm, med bazeni velikosti 6,1 m x 5,5 m, pri naklonu 4,8 % in višinski razliki med bazeni 0,3 m. Stezi sta ob postavitvi kmalu izpolnili pričakovanja in vrnili prehodnost, ki je bila prej izgubljena. Največji izmerjen prehod po letu 1913, ko blokade v strugi še ni bilo, je tako presegel 32 milijonov primerkov. To jim je uspelo po zaslugi nemotenega delovanja tudi pri razliki v višinah vode v stezi za 13 m, kar je bilo do sedaj na drugih tipih nekaj nepredstavljivega.

Prva in najpomembnejša prednost tega tipa stez, kakor navaja Clay (1995), je ta, da je omogočena prehodnost po celotni višini stene bazena. S tem je odločitev za prehod prepuščena posamezni ribi sami, kar omogoča, da se same usmerijo v njim kar najbolj primerno višino prehajanja v višje bazene, odvisno od časa tekom dneva, svetlobe in turbulence. Druga dobra lastnost je, da ribam taka postavitev rež odgovarja in jih manj obremenjuje kot pri drugih napravah. Opazovanja so pokazala neprimerno bolj težaven prehod rib pri klasičnih potopljenih odprtinah in prelivih običajnih bazenskih tipov, pri katerih so razmere mnogo bolj kaotične in se spreminjajo po višini sten bazenov. Pri vertikalnih režah imajo zaradi enakomernosti odprtine po celotni višini bazena veliko bolj jasno predstavo o smeri toka in njegovi vrtinčnosti, brez ostrih sprememb, ki bi jih pri uspešnem iskanju prehoda samo zavajale in povečevale utrujenost in zato čas prehoda. Poleg tega je pri vertikalnih režah ugodna še postavitev rež ob vzdolžne stene bazena, ki dobro odgovarja na ribjo preferenco po iskanju prehoda ob robovih strug. Zadnja izmed glavnih značilnosti je zmožnost počitka rib v posameznih bazenih pred nadaljevanjem prehoda v višje ležeče bazene. S pomočjo principa povratnega toka je namreč v vsakem bazenu omogočena cona z umirjenimi hitrostmi, kjer plavalne sposobnosti niso trošene, in je zato omogočeno počivanje. Ta lastnost pride prav pri dolgih stezah, saj kljub pomanjkanju znanja o psiholoških potrebah

za njihovo izbiro vzpenjanja oziroma čakanja, postaja jasno, da se v območjih brez neposrednega stresa rade zadržujejo, zato umirjene cone za napredovanje obvezno potrebujejo.



Slika 1: Ribja steza »Hells Gate« z dvema vertikalnima režama in sliko značilnega toka (Clay, 1995, str 30)

Ugodna postavitev odprtine po celotni višini pa sama po sebi ne prispeva k zagotavljanju uspešnih hidravličnih razmer v posameznem bazenu. Te so v veliki meri odvisne od učinka disipacije curka skozi vertikalno režo, ki jih moramo z modeliranjem preusmeriti pod takim kotom, da se srečata na sredini nad spodnjo osrednjo ločevalno steno—slika 1. S tem principom dosežemo pomembno prednost pred ostalimi tipi, da se curka sama med seboj iztrošita in ne prenašata energije na celotno področje bazena. V bazenu obstajata še dve področji s povratnim tokom na lokaciji med krajšimi stranskimi rebri levo in desno od središča bazena in pomenita glavno področje počivanja za ribe gorvodno. Oblikujeta se na primerni lokaciji v bližini roba bazena in tik pod vertikalno režo, zato je pot rib do nje s tem kar najkrajša in najbolj naravna glede na njihove biološke preference. Tudi za ta območja umirjenega toka velja, da so razmeroma stabilna po celotni globini, kar pripomore k ugodnim razmeram za zadrževanje selilne populacije.

3.2 Vrste ribjih stez

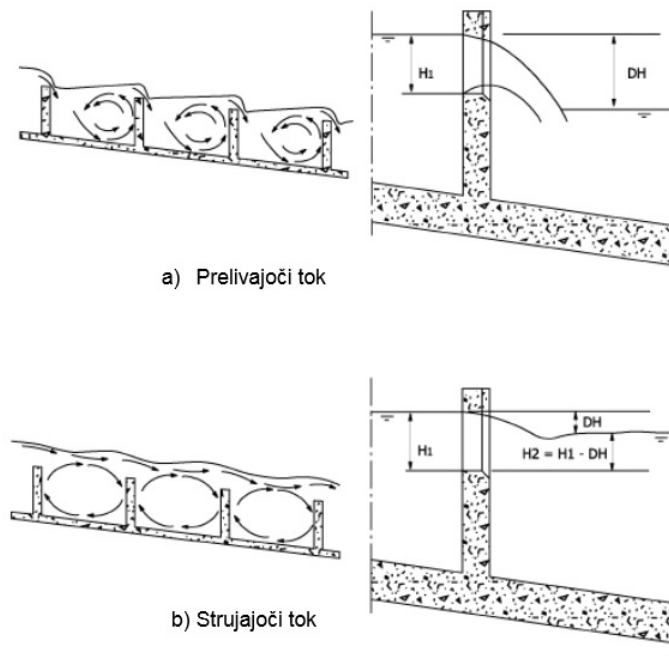
V nadaljevanju so predstavljene vrste najbolj pogostih ribjih stez z opisom značilnega toka v njih.

3.2.1 Bazenski tip

Bazenski tip ribjih stez je eden najstarejših načinov premagovanja zajezb, znan že iz časov pred sistematičnim začetkom znanstvenih raziskav. Prvotno so bili zgrajeni iz enostavnih materialov, npr. skal, ki so predstavljale stene bazenov, skozi katere so bile izvedene odprtine za zagotavljanje pretoka.

Zasnove so na principu premagovanja višinske razlike s pomočjo razdelitve na manjše dele, v tem primeru bazene, ki umirjajo potek toka iz enega v drug bazen na način, da učinkovito znižajo njegovo moč znotraj bazena. Umirjanje toka v posameznem prekatu pomeni sekundarno tudi omogočanje počitka ribam in s tem lažjo migracijo. Voda lahko med bazeni prehaja preko površinskih prelivov, potopljenih odprtin, rež in njihovih kombinacij. Pri napovedi hidravličnih količin (pretokov, hitrosti vode, višine prelivanja med bazenoma) so pomembne prav dimenzije teh prepustov vključno z geometrijo bazenov in višinama vode nad in pod ribjo stezo (Fish passes-design ..., 2002).

Bazenski tipi steze se glede na tok med bazeni ločijo na dva značilna: prelivajoči oziroma strujajoči tok, slika 2. Pri prvem se voda dejansko preliva iz zgornjega bazena v spodnjega, pri čemer se ustvari hidravlični skok, ki s turbulentnim mešanjem učinkovito disipira energijo (Larinier et al., 2002).

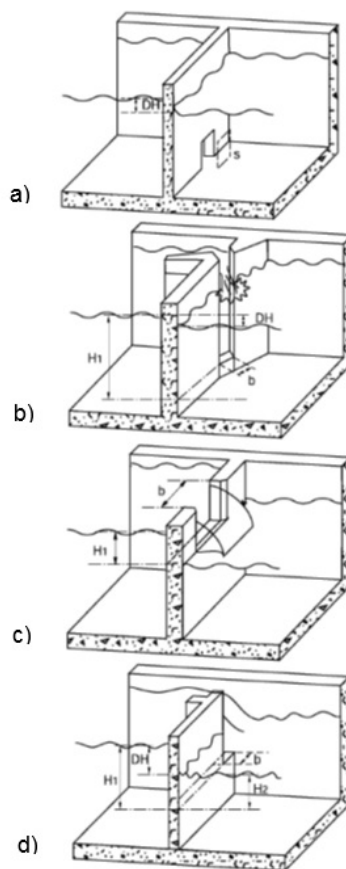


Slika 2: Značilna tipa prelivanj toka med bazeni ribje steze

Pri prelivajočih tokovih, kjer je voda spodnjega bazena bistveno nižje od nivoja vode zgornjega, morajo ribe za premagovanje prosto padajoče vode uporabiti skok. Tega načina ne uporabljajo vse ribe in je v glavnem prisoten samo pri salmonidih. Za povprečne steze s takim tokom se uporablja višinska razlika med bazenoma 0,3 m, čeprav za določene primere večjih salmonidov lahko uporabimo do 0,6 m višine ter do 0,45 m za postrvi.

Pri strujajočem toku se pri prelivanju preko ločilne stene med bazeni ustvari močan curek, ki ostane na površini, njegova energija se disipira z velikim vrtincem v nasprotni smeri prelivajočega tipa preliva. Razmere za tak tip se pojavijo v primeru, ko je nivo spodnje vode do kote dna preliva vsaj 0,5–0,6-kratnik nivoja zgornje vode do kote dna preliva ($H_2 > 0,5\text{--}0,6 H_1$)—slika 2b. Za strujajoče tokove velja, da so primerni za salmonide v območju višinske razlike med bazenoma okoli 0,3–0,4 m, za postrvi in hitrejšje krapovce so primerni za višine okoli 0,3 m, malo manj pa odgovarja za čepo (okoli 0,25 m). Za vse ostale slabše plavalke krapovcev in ostrižev se uporabljajo razlike med 0,15 in 0,25 m, z ustreznim znižanjem, če so vrste manjše.

V primeru vmesnega stanja med prelivajočim in strujajočim tokom se pojavijo nestabilnosti, ki se jih je treba izogibati zaradi težav, ki jih povzroča nekaterim ribam pri plavanju. Pri tistih, ki imajo težave pri skokih preko preliva, ker tega ne zmorejo oziroma ne uporabljajo, se zato priporoča zagotavljanje strujajočega toka (Larinier et al., 2002).



Slika 3: Primeri odprtín med bazeni ribje steze: a) potopljeni reža, b) vertikalni reža, c) preliv, d) drča

Težavnost prehoda pri migraciji je odvisna od obsežnosti turbulence in ozračnosti v posameznem bazenu. Preprosta ocena turbulence je opisana z disipacijo turbulentne kinetične energije na enoto volumna in je opisana z naslednjo enačbo:

$$E = \rho g Q \Delta H / V_p \quad (3.1)$$

Simboli predstavljajo:

$\bar{E}$ disipacija turbulentne kinetične energije na enoto volumna [W/m^3]

ρ gostota vode [1000 kg/m^3]

g težnostni pospešek [$9,81 \text{ m/s}^2$]

Q pretok skozi ribjo stezo [m^3/s]

ΔH sprememba višine gladine med sosednjima bazenoma [m]

V_p volumen vode v bazenu [m^3]

Kriterij lahko omogoči določanje minimalnega volumna vode v bazenu, ob čemer sta razlika gladine skozi odprtino nad spodnjim bazenom in pretok vnaprej izbrana ali drugače, če želimo poiskati največji pretok z znano višino gladine in volumnom bazenov. Glavna želja pri dimenzioniranju ribje steze je

poiskati primerno velikost bazena, da bodo imele ribe dovolj prostora in da se voda disipira s čim nižjo vrednostjo turbulence. Zato so za zadovoljivo mero predpisane meje, da se $\bar{E}$ vrednost ne sme povzpeti nad 150 W/m^3 , kar predstavlja mejo med turbulentnimi in manj turbulentnimi bazeni in zagotavlja ugodne razmere ribjim vrstam slabših plavalnih zmožnostim, za naše kraje predvsem krapovcem. Dovoljuje se zgornja meja 200 W/m^3 , če je ribja steza primarno postavljena za boljše plavalce salmonide. Višje vrednosti $\bar{E}$ lahko nastopijo le v primerih manjšega števila bazenov ter pri načrtovanju za velike ribe, vključno s pretoki velikosti nekaj m^3/s .

Zavedanje o pomembnosti disipacije energije se pojavi v primeru pojava imenovanega 'kratki stik' («short-circuiting»), kjer se curek pri prehajanju med bazeni zaradi previsoke hitrosti ne more ustrezno disipirati, česar se je treba v praksi izogibati. Preostala energija curka bi se v tem primeru prenesla v naslednji bazen, kar bi pomenilo postopno poslabšanje razmer v vsakem nadaljnjem bazenu. Poleg tega je treba paziti tudi, da curek pri zadevanju v steno ne dosega previsokih hitrosti, ki bi pri plavanju tako motile ribe, da bi to negativno vplivalo na ribjo orientacijo. Rezultira lahko v neželenem obnašanju rib, na primer skakanju iz vode, ki lahko privede do poškodbe ali celo skoka izven meja ribje steze.

Nižji kot je padec gladine med bazenoma, lažje so razmere za ribji prehod navzgor zaradi manjših hitrosti. Kljub temu pa padca ne moremo preveč nižati, da s tem ne pride do potrebe po povečanju števila bazenov, s čimer bi vplivali na višje stroške. V glavnem pa je potrebno najprej upoštevati ustrezne padce gladin glede na zelene ribje vrste, ki bodo prečkale zasnovano ribjo stezo s skokom ali pa z maksimalno hitrostjo plavanja. Maksimalno hitrost curka zaradi padca ΔH lahko aproksimiramo z naslednjo enačbo:

$$v = (2g\Delta H)^{0,5} \quad (3.2)$$

Nekateri primeri izračunov so navedeni v preglednici 1. Enačba sicer predstavlja poenostavitev vtočnih razmer, saj je pravega reda velikosti le za primere, ko je prenos energije zaradi nepopolne disipacije turbulentne energije zgornjega na spodnji bazen zanemarljiv. Enačba upošteva le višinsko razliko stoječe vode gornjega bazena proti spodnjemu, zato daje v nekaterih primerih močno podcenjene vrednosti maksimalne hitrosti. Bombač et al. (2015) opaža na svojem primeru celo do 50 % manjše napovedane vrednosti v primerjavi z matematičnimi modeli potrjenimi z 3D akustičnim merilcem hitrosti.

Preglednica 1: Odvisnost teoretične maksimalne hitrosti skozi režo glede na višinsko razliko gladin sosednjih bazenov

Padec gladine [m]	Hitrost [m/s]
0,10	1,4
0,15	1,7
0,20	2,0
0,25	2,2
0,30	2,4
0,45	3,0
0,60	3,4

Pri dimenzioniranju bazenov se je željeno držati že uveljavljenih razmerij na že postavljenih objektih, ki so se izkazali za delujoče. Dolžina bazena je tako po pravilu velikosti med $7d$ in $12d$, pri čemer d predstavlja:

- pri običajnih prelivih višino padca gladine na prelivu
- pri prelivih s potopljenim dnem manjšo vrednost od širine in padca gladine med bazenoma

- pri vertikalni reži širino reže
- pri potopljenih režah premer, če so okrogle, ali pa manjšo dimenzijo od širine višine, če so pravokotne oblike

Bazenski tipi ribjih stez niso brez razloga eni najstarejših objektov za pomoč pri ribji migraciji, saj zagotavljajo dobro prehodnost tako za dobre plavalce, ki si lahko pomagajo s skakanjem preko prelivov, kot tudi za slabše plavalce in tiste, ki se zadržujejo v glavnem ob dnu struge. V vsakem primeru je za uspeh potrebno zagotoviti ustrezno oblikovanje, postavitve na pregradi in redno čiščenje. Za slabše plavalce ob dnu steze je treba zagotoviti ustrezno hrapavost dna, da se ustvarijo ustrezni pogoji z nižjimi hitrostmi toka za boljše možnosti prehajanja. Zaradi možnosti prehoda skozi potopljene odprtine, ki lahko segajo do dna, se pojavi glavna težava teh stez, saj njihovo čiščenje predstavlja višje stroške, zaradi nabiranja materiala in nenehno vzdrževanje ob obratovanju (Fish passes-design ..., 2002).

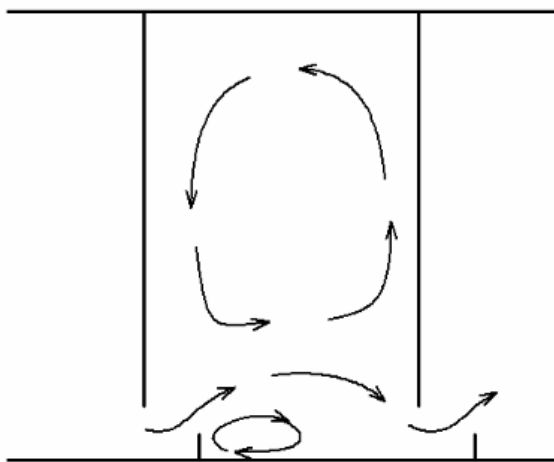
Da so te odprtine zelo pomembne govori tudi dejstvo, da so prehodi preko gladine v primeru prelivov v glavnem precenjeni glede števila prehajanja preko njih, saj selilne ribe zaradi želje po čim bolj ekonomični poti raje izbirajo plavanje kot pa skakanje preko ovire, kar seveda govori v prid postavljanja potopljenih prehodov (Fish passes-design ..., 2002). Dodatna težava prelivov se pojavi še zaradi njihovega močnega curka, ki v nekaterih primerih celo prosto pada preko stene, kar ustvarja dodatno turbulenco in bistveno spremeni naravo toka. V primeru, da se vseeno zagotovi prehode preko gladine, je treba spodnji rob preliva v steni, če je le mogoče, potopiti pod nivo vode spodnjega bazena. S tem se ustvari strujajoč tok, bolj primeren za ribji prehod, ker ga lahko ribe v celoti prečkajo pod vodno gladino.

3.2.2 Vertikalna reža

Ribja steza tipa vertikalne reže je bila sredi 20. stoletja razvita kot nadgradnja klasičnih bazenskih tipov s prvotnim namenom uporabe na naravnih preprekah (primer »Hells Gate«), kjer ni bilo možno zagotavljati čim bolj stalnega pretoka skozi stezo, da bi ta optimalno delovala. Rešitev so poiskali s postavitvijo vertikalnih rež v stene bazena, ki potekajo po njegovi celotni višini in tako omogočajo prehod pri vseh pretokih. Skozi režo se ustvari vodni curek, ki ga s stranskimi stenami–rebri usmerimo v bazen pod kotom, s čimer mu omogočimo ustrezno disipacijo v sredini bazena in stabilen tok, ki bi preprečeval dezorientacijo rib. Disipacija se izvede avtomatično v primeru dveh rež, postavljenih na vsaki strani stene, s trkom obeh curkov na spodnji strani bazena in posledično disipacijo kinetične energije (Clay, 1995). Zaradi potrebe po manjših stezah z nižjimi pretoki so dvojne reže v zadnjih letih zamenjale enojne na način, da so prepolovili po vzdolžni simetrali bazene dvojnih rež (slika 4). Namenoma se je v primerjavi z ostalimi bazenskimi tipi ohranila striktna postavitve enojnih rež na isto stran skozi vse bazene, da ustvarimo čim bolj enako smer toka po celi stezi, kar ugodno vpliva na obnašanje rib brez motenja. S porušenjem simetrije pa bazen omogoča slabše pogoje za disipacijo ob izgubi mešanja parnih curkov. Zato je zelo pomembno doseči pravilno usmeritev curka, da pride do čim bolj ugodnega mešanja v zato namenjenem volumnu bazena. Obenem mora ostati dovolj prostora še za mesta umirjenega povratnega toka z recirkulacijo za počivanje rib. Zgodi se namreč lahko, da se curek skozi režo takoj usmeri direktno proti spodnji reži in ustvari neugodno premeščanje hitrosti na spodnje bazene brez ustrezne disipacije, kar je znano kot »kratki stik«. Rešitev se lahko izvede z oblikovanjem primerne stranskega rebra, ki tok usmeri proti centru bazena. Primerna rešitev za ribje steze z manjšimi globlinami je postavitve podvodne police višine do 0,3 m, postavljene na dno vertikalne reže, ki deluje dvojno: obenem zniža pretok in pomaga pri usmerjanju toka.

Najpomembnejša lastnost steze tipa vertikalne reže je dimenzija reže, ki jo je potrebno določiti glede na ribjo populacijo in možne pretoke. Za postrvi, krapovce in manjše ostale vrste zadostuje že reža širine

0,15 do 0,17 m. Na večjih rekah s primerljivo višjim pretokom in za večino salmonidov se uporablja širine od 0,3 do 0,6 m, pri čemer se poveča tudi sama dimenzija bazena (Fish passes-design ..., 2002).



Slika 4: Primer tipične smeri glavnih delov toka v ribji stezi z enojno vertikalno režo

3.2.3 Denilov tip steze

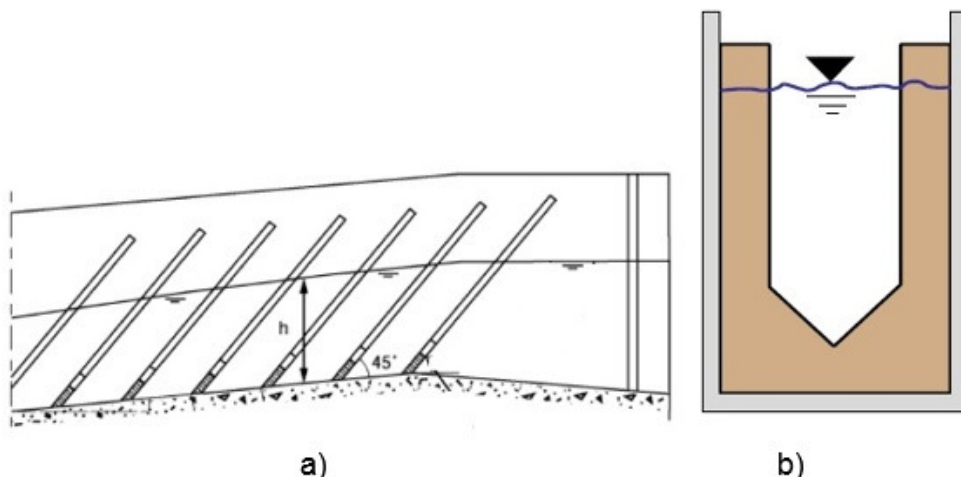
Na začetku 20. stoletja je belgijski inženir G. Denil zasnoval nov tip ribje steze, znan kot »prehod povratnega toka« z namenom, da bi omogočili prehod salmonidov na reki Ourthe. Cilj je bil dosežen s postavitvijo ravne struge, razmejene z več vmesnimi stenami, imenovanimi deflektorji, ki v razmeroma strmi stezi poskrbijo za znižanje srednje hitrosti toka na primerne hitrosti ribjega prehajanja (slika5). Energija se izredno efektivno in porazdeljeno preko celotne dolžine steze disipira s pojavom spiralastega toka izpod deflektorja, ki se pojavi v samo ozko določenem območju pretokov. Tok zaradi interakcije s povratnim tokom izpod stene formira dobre pogoje za umirjanje energije, tako da se spodaj globini ustvari območje nizkih hitrosti, primernih za slabše plavalce (Larinier et al., 2002). Originalno je bil zasnovan iz prehodnih sten konkavne oblike, ki so se skozi izboljšave oblikovale v standarden Denilov prehod sten, obrnjenih proti toku v obliki črke U. Danes se od teh tipov prehodov uporablja v večini samo standardne prehode, ki so si med seboj geometrijsko zelo podobni zaradi predpisanih karakteristik vmesnih sten (širina, višina) v brezdimenzijskem formatu, saj edino na ta način lahko obdržijo tokovne pogoje za nastop spiralnih tokov. Vsako manjše odstopanje od medsebojnih relacij med dimenzijami bi lahko že bistveno spremenilo tok v strugi in pokvarilo želen učinek.

Za Denilovo stezo sta znani dve operativni območji delovanja in sicer hidravlični in biološki (Larinier et al., 2002). V hidravličnem območju je pretok tako nizek, da do spiralastih tokov ne prihaja, ustvari se klasični bazenski tip s prelivajočim tokom, zaradi malih dimenzij je zato primeren samo za manjše vrste, ki so v bazenih zmožne počivati. Nad določenim pretokom nato glede na dimenzije in naklon nastopi neugodno valovanje, ki lahko odnese ribe po strugi navzdol. Spiralasti tok se ustvarja le poredkoma, tok postaja vedno bolj kritičen in se na koncu ne more učinkovito disipirati v stezi, zato to operativno območje ne izpolnjuje pogojev ugodnega obratovanja steze. Ob dovolj velikem pretoku se nato razvije biološko območje, ki smo ga želeli za čim bolj primeren tok, ki bo odgovarjal največjemu naboru ribjih vrst. Obstaja zgornja meja, do katerega Denilov pas še normalno funkcioniira, dokler se pri določenem pretoku spiralni tok ne poruši in nastopi strujajoč tok.

Ta tip ribje steze se večinoma uporablja za prehajanje diamodromnih ribjih vrst, kot so lososi, večje vrste postrvi, piškurji in večje potamodromne vrste, kot je mrena. Povprečno gre za vsaj 30 cm dolge ribe, se pa da omogočiti prehod tudi manjšim ribam tipa potočne postrvi, če je zato steza primerno zožana in skrajšana. V večini primerov manjše ribe ne zmorejo prehajanja, ker nimajo dovolj plavalnih zmožnosti, saj bi morale plavati z maksimalno hitrostjo. Ker lahko to hitrost ohranijo samo za nekaj sekund, bi morale biti temu primerno oblikovane steze z dolžinami samo nekaj metrov, kar bi bilo izredno nepraktično. Edina možnost bi bila oblikovati stene manjših dimenzij za znižanje hitrosti in spiralnih tokov, da bi dosegli tok, ki omogoča potovalne hitrosti rib, ki podaljšajo čas njihovega plavanja na nekaj deset sekund. S tem bi ribe lahko premagovale te strme steze, a posledice, ki jih poseg prinaša, so prevelike. Operativni pretok bi obsegal zelo ozko območje, merjeno v litrih na sekundo, kar bi negativno vplivalo na privlačni tok steze, večjo možnost za blokade in omogočalo minimalne spremembe v spremembah zgornjega nivoja vode.

Pomembna lastnost pri dimenzioniranju ribje steze je, da zaradi želje po ohranitvi toka v želenem operativnem območju lahko poteka samo v ravni liniji brez sprememb smeri struge. Kakršno koli spreminjanje je mogoče izvesti z umirjevalnimi bazeni, ki obenem omogočajo tudi počitek ribam, ki morajo pri plavanju skozi Denilov prehod poskus opraviti naenkrat. Tako je celotna steza sestavljena iz zaporedja Denilovih prehodov z vmesnimi umirjevalnimi bazeni, s čimer lahko sestavimo poljubno dolgo zaporedje, ki nam omogoča premagovanje večjih preprek.

Za losose in pikaste grbe velja pravilo o umirjevalnem bazenu na vsake 1,8 do 2,5 m višine z 10 do 12 m dolgimi Denilovimi prehodi med njimi. Če se izpusti manjše vrste rib (<60 cm) bi lahko postavili tudi daljše. V nasprotnem primeru se upošteva največ 1,2 do 1,5 m in dolžine od 6 do 8 m, npr. za postrvi. Zelo pomembno za te bazene je omogočanje dejanskega transformiranja dovedene energije v tok nizke turbulence znotraj posameznega bazena, da se energija toka ne prenaša naprej in da se curka izpod zgornjega Denilovega prehoda ne usmerja v stene umirjevalnega bazena. Zato je določena minimalna dolžina tega bazena $10d$ (d je manjša od dimenzij širina/višina stene Denila) in volumetrična disipacija manjša od 25 do 50 W/m³.



Slika 5: a) Vzdolžni in b) prečni prerez Denilove steze

3.2.4 Sonaravna steza

Postavljene steze na način, da posnemajo dinamiko in morfologijo naravnih ribjih habitatov z razdelitvijo na manjše dele umirjenih bazenov z območji pospešenega toka predstavljajo primerljivo uspešnost z znanimi tehničnimi ribjimi stezami. Sprva so nastale kot alternativa za prehod ribjih organizmov in se nato izkazale še s sočasnim reševanjem tudi drugih negativnih vplivov, povzročenih z zaježitvijo. Uporabljajo se lahko za področja, kjer je težje zbrati podatke o ribjem prehajanju ali pa so ti pomanjkljivi in z namenom poiskati bolj ekološke načine povezovanja izgubljenih poti. Z razliko od tehničnih so sonaravne steze bolj uspešne pri povegljivosti zgornje in spodnje vode tudi na račun izbire kar se da podobnih naravnih materialov iz rečne okolice, kar jo oblikuje v strugo primerljive kakovosti z naravnim odsekom. Uporablja se različne kombinacije zemljin, gramoza in skal, da se ustvari raznolike hidravlične pogoje, primerne za vse vrste rib kot tudi možnost uporabe za športne in rekreacijske namene (Katopodis, 2012).

Avtor nadaljuje, da prvi poskusi sonaravnega urejanja segajo v leto 1970 v kanadsko Arktiko z željo po simuliranju tehnike naravne struge skozi prepust pod tamkajšnjo hitro cesto. Eden izmed razlogov za njeno postavitev je bilo tudi pomanjkanje zadostnega števila podatkov o hidrologiji, geomorfologiji, habitatu in ribjih vrstah, zato je bila odločitev o posnemanju naravnega habitata na mestu. Z dimenzijami tamkajšnjega vodotoka (širina in naklon) so ocenili potrebne velikosti prepustov in jih nato opremili s substratom iz skal, da so dosegli pogoje za oblikovanje hrapave drče, sestavljene iz serije kratkih strmih odsekov, med katerimi so postavljeni umirjevalni bazeni. Kasnejše študije so pokazale učinkovit prehod za množico rib ob spomladanski migraciji brez dodatnih zastojev, meritve pa so razkrile dobro ujemanje velikosti in porazdelitve rečnih hitrosti z naravno strugo. Ribje steze so služile svojemu namenu tudi slabih trideset let kasneje, za razliko od slabih rezultatov tamkajšnjih podobnih objektov, ki so bili primarno postavljeni za poplavne tokove in niso bili primerni za ribji prehod.

V grobem se ločita dva tipa konstrukcij, podobnih naravnim razmeram, hrapave drče in pa obtočni kanali (Fish passes-design ..., 2002). Drče so preprosti in cenovno ugodni prehodi, postavljeni preko celotnega rečnega profila ali pa ob rob pregrade ob tistem bregu, ki ima večji tok in zato višjo privlačnost. Deluje na principu umirjanja hidravličnega padca med zgornjo in spodnjo vodo na čimbolj položnem naklonu. Glavni element sestavljajo skale različnih dimenzij, postavljene v prečne vrste, namenjene oblikovanju čim večje strukturne raznolikosti in gradientov znotraj drče. Njeno uporabo se je dalo izkoristiti na primer pri navpičnih ali pa zelo strmih padcih na vodotoku ter kot zamenjavo za klasične pregrade, ki niso več služile za urejanje pretokov.

Obtočni kanali so lahko naravnim strugam še najbolj podobni, kar pomeni, da tudi omogočajo prehod vsem plavalcem, tudi manjšim ribam in nevretenčarjem. Zaradi podobnega padca so zato tudi izredno dolgi, s čimer zahtevajo za izgradnjo veliko površine, kar si ponekod ni mogoče privoščiti. Primerni so na že obstoječih jezovih, kjer je želja po ponovni obuditvi migracije, saj ne potrebujejo posegov na samih pregradah in so popolnoma ločeni od njih. Pomembno je, da za uspešno delovanje njihov vhod stoji čim višje v vodotoku v neposredni bližini pregrade, da se v čim večji meri uporabi njen privlačni tok. Če razmere dovoljujejo postavitev vhoda le daleč stran od pregrade, npr. na velikih rekah, te steze ne delujejo uspešno. Širina kanala naj bi bila kar najbolj raznolika za naravni izgled prehoda, z minimalno širino 0,8 m, obenem pa naj bo naklon med 1:100 in 1:20 z zaželenimi srednjimi hitrostmi od 0,4 do 0,6 m/s (Fish passes-design ..., 2002). Pri najbolj strmih stezah se pojavi težava zagotavljanja teh hitrosti, zato je potrebno postaviti serijo objektov za povečevanje hrapavosti v obliki velikih skal, razporejenih preko cele površine dna kanala. S tem se poveča globina vode in zmanjša hitrost, obenem pa se omogoči ribam zavetje. Bolj znan je način s postavljanjem prečnih sten preko kanala z vmesnimi

prelivi, ki oblikujejo podobne razmere kot v bazenskih tipih ribjih stez. Obstaja pa še način postavitve potopljenih prečnih sten v obliki kaskad z vmesnimi umirjevalnimi bazeni.

3.3 Deli ribje steze

Tok znotraj ribje steze ni edino merilo pri učinkovitem migriranju rib, saj predstavlja le enega izmed množice dejavnikov na pregradi. Začeti je potrebno že z dobro postavljenim vhodom v stezo, ki ga morajo najti na čim enostavnejši način, in nato uspešno vstopiti vanjo, pri čemer jim je potrebno zagotoviti čim bolj primeren tok, ki ne presega ribjih plavalnih zmožnosti.

3.3.1 Pozicija ribje steze

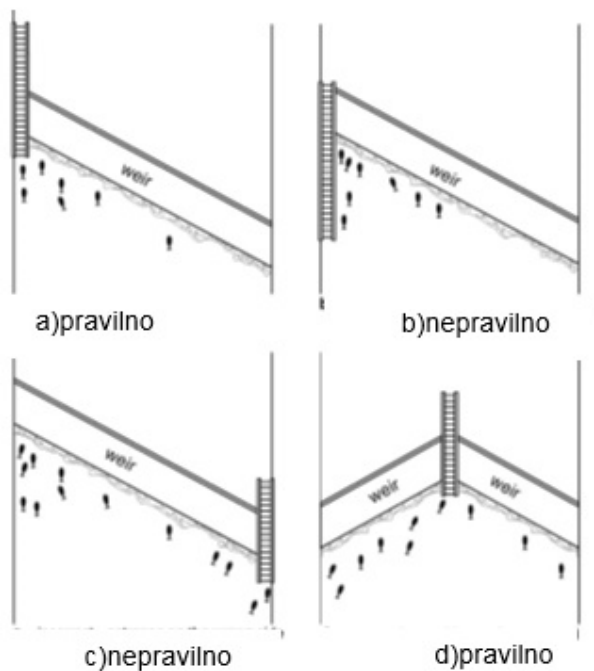
Če želimo, da ribje steze delujejo učinkovito, je eden glavnih faktorjev primerno zasnovan vhod v ribjo stezo s čim manjšim časom, ki ga ribe potrebujejo za to, da ga poiščejo. Edini neposreden faktor za njihovo detekcijo in nato uspešno prehajanje v ribjo stezo je oblikovan tok pod pregrado, ki jasno nakazuje željeno usmeritev proti prehodu. Seveda bi bilo to v idealnih razmerah lahko doseči, če bi lahko za ribjo stezo zagotovili tok celotnega vodotoka, na katerem je postavljena pregrada oziroma če bi bil vhod v stezo izveden preko celotne širine rečne struge. Ker je to večkrat nemogoče, so v praksi vse dimenzije ribjega prehoda mnogo manjše v primerjavi z celotnim objektom, ki pregrajuje, vključno s pretoki. Pri dizajnu je v osnovi najbolj pomembno to, da se uporabi čim manjši delež osnovnega pretoka, pri katerem se dosega uspešno prehodnost. Generalno lahko podamo dva faktorja omejitve, ki ju je treba upoštevati (Williams, 2012). V prvem primeru je treba vedeti, da višji pretoki skozi ribjo stezo pomenijo tudi višje stroške postavitve objekta. V drugem pa, da je nižji pretok skozi ribjo stezo povezan tudi z večjim deležem pretoka, ki nam preostane na voljo za koriščenje, predvsem npr. za proizvodnjo električne energije. Tudi največje pregrade na svetu, na primer na reki Columbiji z več sto tisoč migracijami letno in pretoki nekaj sto m³, imajo za ribje steze namenjeno samo okoli 5 m³/s. Iz tega malega deleža je tako jasno, kako pomemben je pravilno načrtovan (pretok, hitrosti toka, smer toka) in postavljen vhod ribje steze, da ga ribe sploh zaznajo. Ne smejo ga motiti niti turbulentni tokovi izpod turbin ter skozi prelive, kot tudi ne povratni tokovi in stoječe vode.

Za populacijo rib, ki bodo migrirale, predvidevata Katopodis (2012) in Larinier et al. (2002) kasnejše postavitve vhoda v bazenu jezu spodnje vode na način in lokacijo, ki ponazarja principe njihovega naravnega okolja, pri plavanju navzgor preko raznih ovir, kjer enolične poti ni, kot so drče, slapovi in ostala območja pospešenega toka. Načeloma se vodni organizmi premikajo gorvodno najraje v področju glavnega toka, kjer so hitrosti najvišje in je smer najbolj očitna. Glavni tok je v sredini struge pri ravnih rečnih linijah, še pogostejše pa se dotika enega zunanega brega struge tam, kjer reka meandrira, zato je smiselno ob bregove postaviti tudi vhod v ribjo stezo. To odgovarja tudi večini migrantov, ki se ob robu zadržujejo, ker jim znižane hitrosti omogočajo lažjo pot.

Obenem se ribe navzgor pomikajo čim višje, kolikor zmorejo, dokler jim to ne preprečijo previsoke hitrosti oziroma prevelika turbulenca. Zato je priporočeno je, da se vhod postavi čim bližje pregradi, saj se lahko ob preveliki oddaljenosti navzdol po vodotoku pojavi težava, da ga ribe zgrešijo in plavajo v vmesno območje bližje pregradi. Tu v mrtvi coni nimajo možnosti za zaznavo vhoda v stezo oziroma je njihov čas prehajanja močno podaljšan. Če je kljub temu treba postaviti vhod stran od pregrade zaradi prostorskih omejitev, je treba zato temu primerno povečati privlačni tok.

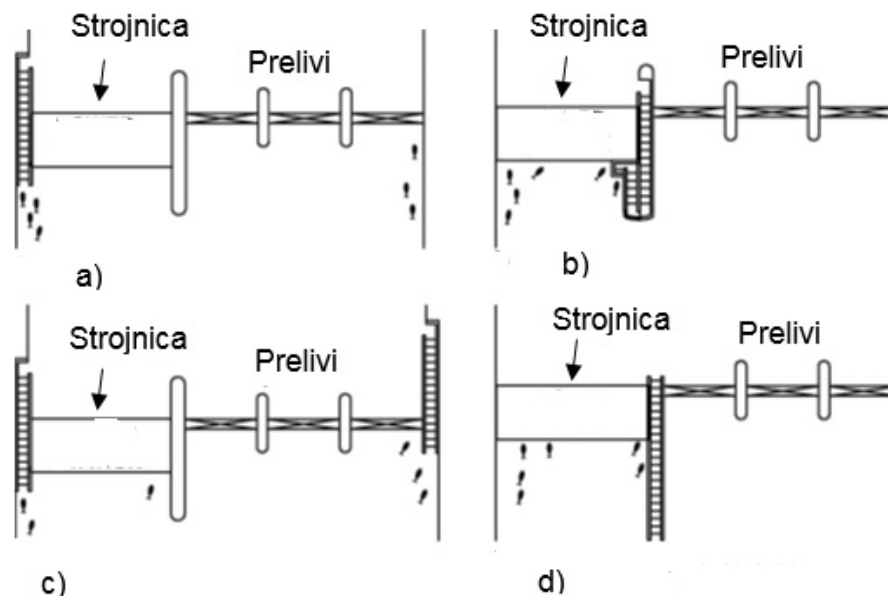
Dober primer za to so pregrade, postavljene pod kotom glede na smer vodotoka na sliki 6, kjer je eden izmed bregov spodnje vode višje gorvodno glede na drugega. Edina sprejemljiva rešitev je, da se tja

postavi vhod v ribjo stezo, ki ne sme biti preveč podaljšan v bazen, da ga ribe ne zgrešijo. V nekaterih primerih pri pregradi iz dveh poševnih krakov bi bil lahko vhod tudi na sredini struge, saj je ta najvišje. Tu je edini problem samega dostopanja in vzdrževanja, zato je bolj praktično iskati rešitve, kjer bi bila steza postavljena ob enega izmed bregov.



Slika 6: a) in d) sta pravilno postavljena vhoda ribje steze glede na poševno postavljeno pregrado, b) in c) nepravilno

Na jezovih s hidroelektrarno glavni pretok poteka skozi turbine, zato je na mestu njihovega izpusta za ribe selivke najbolj primerno mesto za postavitev vhoda na celotnem objektu, na sliki 7. Treba je slediti enakim pogojem kot že navedeno, da so čim bližje bregu in najvišje v toku ter da ne segajo predaleč v spodnji bazen. Na širših pregradah je smiselno postaviti še dodatno stezo ob rob prelivnih polj, ker ni verjetno, da bi lahko zajeli ribe samo s stezo na enem robu struge, kjer stoji strojnica.



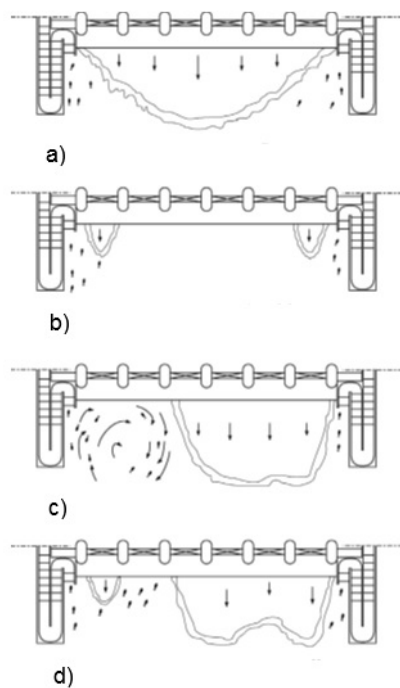
Slika 7: Različne izvedbe vhoda steze pri strojnici, d) ni primerna

Kjer je v uporabi več turbin na velikih elektrarnah, se zaradi same velikosti lahko postavi več zaporednih vhodov v ribjo stezo, ki so povezani v tako imenovano zbiralno galerijo. Vhodi so po navadi opremljeni z avtomatskimi zapornicami, ki delujejo kot preliv, z namenom ohranjanja želene razlike v gladinah med galerijo in nivojem v spodnjem bazenu. Na ta način lahko ohranjajo stalno hitrost na vseh vstopih v stezo ne glede na nivo spodnje vode, s čimer lahko zagotovijo v vsakem trenutku enake pogoje delovanja. Preveč dodatnih vhodov lahko vpliva tudi negativno, saj lahko ribe, ki so uspešno vstopile pri enem vhodu, pomotoma zapustijo zbiralno galerijo pri drugem.

Če je HE zasnovana z dovodnim kanalom do turbin, ločenim od osnovne struge vodotoka, se lahko uporabi dve varianti za lociranje ribjega vhoda. Prvi je tako v neposredni bližini strojnice, kjer naj bi zaradi večinskega toka gledano skozi celotno pregrado potekala glavna smer zaradi privlačnosti za plavajoče ribe. Na drugi strani je pretok v osnovni strugi poleg kanala večino časa vzdrževan na minimalni ekološko sprejemljivi pretoku skozi ribjo stezo ob jezu. Ker nima večje zbiralne moči za ribe, je lahko postavitve te steze vprašljiva. Potreba po postavitvi vhoda ob jezu se pojavi takrat, ko pretoki presegajo delovno kapaciteto turbin in pride do preliivanja dela pretoka preko jezovne zgradbe v osnovni vodotok.

3.3.2 Oblike tokov na pregradi

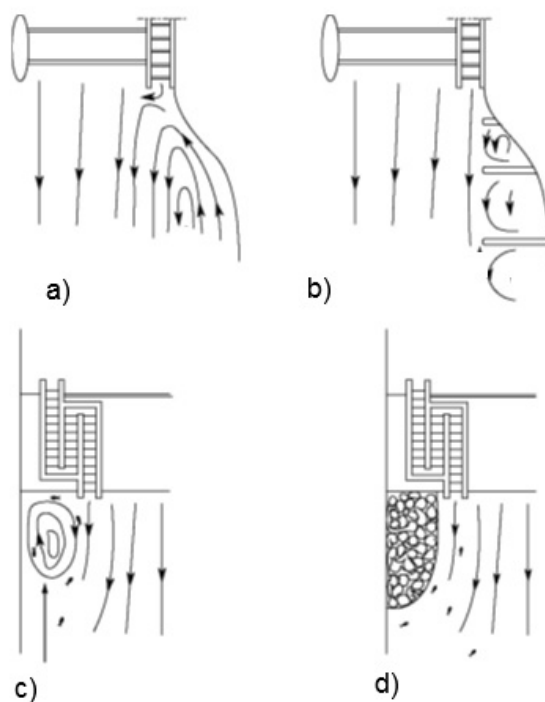
Na prelivih poznamo več načinov, kako lahko pridodamo k izboljšanju razmer za ribjo detekcijo vhoda v stezo, slika 8 (Larinier et al., 2002). V pogojih povišanega pretoka, ko na pregradah polne kapacitete prelivov še niso izkoriščene, lahko izvedemo postopno zmanjševanje pretoka skozi posamezen preliv od sredine prelivnega območja proti levemu in desnemu robu pregrade, kjer sta postavljeni ribji stezi. To nam omogoči oblikovanje primerne oblike prepreke za ribe, turbulentnega toka visokih hitrostih pod prelivnimi polji, ki se postopoma približujejo vhodoma v stezo in s tem pomagajo pri vodenju rib vanje.



Slika 8: Variante oblike vodnega skoka pod prelivi

Ob nizkih pretokih, ko so nekateri prelivi lahko tudi zaprti, bi lahko odprli samo tista dva, ki sta ribjima stezama najbližja. Da rib ne zavedemo, se je tu treba izogibati odprtju prelivov v sredini prelivnega področja, ker bi ribe lahko s tem nehote vodili stran od vhodov.

Ob višjih pretokih se pojavi potreba po odprtju več prelivov. Treba je paziti, da se katerih v sredini prelivnega območja ne pusti zaprtih, saj lahko pride v tem področju do statičnega toka, ki bi lahko ujel nekatere ribe. Prav tako se je treba izogibati zaprtju večjega števila prelivov ob enem robu pregrade, ker bi zaradi nepretočnega območja v tem delu prišlo do povratnega toka, ki bi lahko motil privlačni tok skozi vhod ribje steze oziroma bi ga v celoti izničil. Obenem tak tok proti vhodu tudi zbega ribe, saj so navajene pot navzgor premagovati pri jasnem in močnem čelnem toku. Cona povratnega toka se lahko ustvari tudi izven prelivnega območja, predvsem na problematičnem mestu med bregom in vhodom v ribjo stezo. Da do takega toka ne prihaja, je zato potrebno območje primerno zagraditi s skalami vse do vhoda ali pa se postavi fiksna krila prečno na bregove, ki zožajo strugo matice toka, da se med njimi oblikujejo področja mirnega toka (slika 9).



Slika 9: Oblika toka pod pregrado

3.3.3 Tok v ribji stezi

Tok skozi ribjo stezo bi morale ribe zaznati kar najdlje od njenega vhoda. Privlačnost je odvisna od velikosti in usmeritvi curka na vhodu, čim močnejši je, dlje bo segal v bazen spodnje vode in s tem privabil več migrantov. Pomembno je, da ga ne motijo drugi tokovi v bazenu, vključno s povratnimi ter da nima vpliva posebnih oblik toka, kot sta npr. hidravlični skok in pa turbulentni tok. Curek na vhodu prav tako ne sme biti postavljen pravokotno na smer glavnega toka, saj bi ga to hitro uničilo in ne bi imel večjega vpliva v bazenu. V glavnem se ga postavi v smer enaki glavnemu toku oziroma v posebnih primerih pod rahlim kotom. Postavitev pod kotom pride v poštev takrat, ko zaradi razloga vhod leži zunaj cone matice toka ali ko leži v conah zelo nizkih pretočnih hitrosti (Larinier et al., 2002).

Da omogočimo detekcijo vhodnega curka čim dlje od ribje steze, mora biti njegova hitrost čim večja. Pri tem ne smemo preseči meje plavalnih sposobnosti rib, predvsem slabših plavalk, ki bi jih lahko s tem odvrnili ali jim popolnoma preprečili možnost vstopa v ribjo stezo. Minimalne hitrosti morajo biti tako vsaj 1 m/s za vse ribje vrste, pri salmonidih pa je priporočljiva hitrost med 2,2 in 2,4 m/s, kar sovpada s predpisanimi padci med sosednjimi bazeni velikosti od 0,2 do 0,3 m. Ker mora curek na vhodu ohranjati primerno hitrost, se je treba izogibati vsakršnemu pojavljanju vodnega skoka, ki bi dovedeno energijo hitrega toka disipiral in izničil moč privlačnosti.

Zagotavljanje primerne hitrosti je v večini omogočeno z reguliranjem velikosti odprtine na vhodu v stezo. To je še posebej pomembno zaradi spreminjanja nivoja spodnje vode pregrade, ko lahko dvig gladine negativno vpliva na privlačnost ribje steze. V tem primeru namreč visok pretok vodotoka dvigne spodnjo vodo in posledično zaradi večje presečne površine vhoda in ob konstantnem pretoku skozi stezo povzroči znižanje vhodne hitrosti in s tem znižanje učinkovitosti dostopanja rib. Da se temu izognemo, na vhodu postavimo zapornico, ki lahko pozneje uspešno regulira nivoje vode med stezo in spodnjo vodo, da je privlačni tok v vseh pogojih čim bolj konstanten. Pri reguliranju nivoja je treba paziti, da se ne zanašamo na zagotavljanje velikih hitrosti, ampak da se zagotovi tudi dovoljšen tok. V primeru, da

bi pustili le malo režo na vhodu, bi namreč željeno hitrost lahko brez težav dosegli, bi pa z zmanjšanim prečnim presekom dosegli nizek pretok preko vhoda in s tem poslabšano privlačnost, ker bi zaradi zmanjšane obsega vpliva ribe težko našle pravo pot. Da se izognemo težavam, si zato na vhodu izbiramo čim večje odprtine kot je to ekonomsko in praktično mogoče. Na manjših pregradah se lahko uporabi že preproste odločitve v obliki ročno nadzorovanih zapornic ali zagatnice.

Odločanje o velikosti pretoka skozi ribjo stezo ni enolično. Problem se lahko jasno opazi na velikih pregradah, kjer pretoki dosegajo več tisoč m^3/s . Za dobro prehodnost rib pa je nujna še napeljava dovolj velikega pretoka skozi ribje steze, kar pomeni tudi povečanje velikosti teh naprav in višje stroške. Pretoke moramo prav tako povečati na stezah postavljenih na manj optimalnih mestih, tako lahko s kompenzacijo ohranjamo uspešnost prehoda. Na manjših pregradah lahko tako preko ribje steze uporabljamo velike deleže celotnega pretoka, včasih celo več kot 50% ali kar celotnega, če je ribja steza edini prehod vode čez zaježbo. Seveda je to nemogoče pričakovati na velikih napravah več sto m^3/s pretoka, kjer naj bi bil delež pretoka skozi steze približno od 1 do 5%, odvisno od posameznega primera in potrebe po količinah.

3.3.4 Dodatni (stranski) tok ribje steze

Delež pretoka skozi ribje steze je glede na pretok vodotoka zelo omejen in v določenih primerih ne predstavlja zadostnega privlačnega toka za uspešno prehajanje migrantov. Ko je potreba po pretoku prevelika, da bi se posledično splačalo povečevati stezo, obstaja rešitev, s katero se zagotovi dodaten tok skozi stranski dovod mimo ribje steze. Deluje povsem neodvisno od steze in skrbi edino za povečano atrakcijo in ugodno vpliva tudi na objekte, na katerih nastajajo večje spremembe nivoja spodnje vode. Dodaten tok je lahko doveden s tlačnimi cevovodi ali pa bolj primerno z odprtim kanalom. Upošteva se nizke dovedene hitrosti pod 0,30 do 0,40 m/s v kombinaciji z minimalno ozračenostjo, izliv pa je opremljen tako, da vanj ni mogoč dostop, z uporabo rešetk. Voda, ki zadostuje tem pogojem se lahko pridobi iz različnih virov. Lahko je odvzeta iz gornjega bazena pregrade in preko disipatorjev energije dosega primerno nizko hitrost in turbulenco. Drug način zajema uporabo vode, ki poteka preko turbin z manjšimi padci gladin kot osnovne turbine. Med načini pa je tudi zajem vode iz spodnje vode pregrade. Stranski tok se lahko dovaja neposredno izpod vhoda v ribjo stezo oziroma se ga dovede do povezovalnega bazena z ribjo stezo, kjer omogočamo mešanje (Larinier et al., 2002).

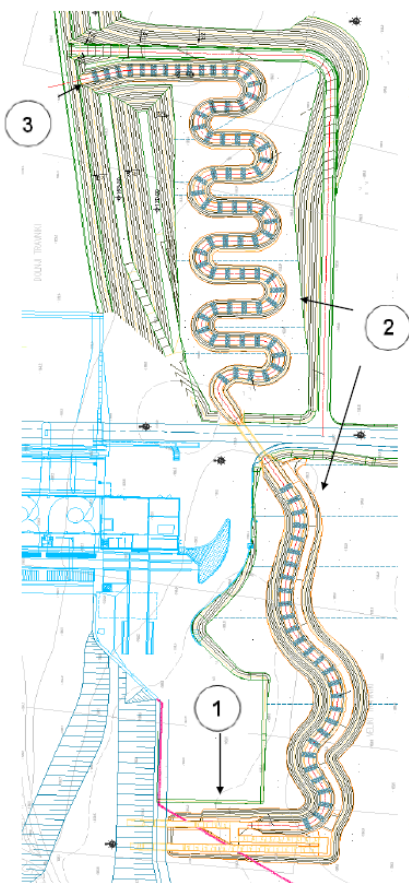
Preden pride voda iz stranskega toka na rešetke jo je treba še umiriti na dovoljšno stopnjo, predvideva se postavitev tako velikega bazena, da je moč disipacije na volumen od 1000 do 1500 W/m^3 v kombinaciji z različnimi umirjevalnimi elementi, s čimer skozi rešetke nato izhaja homogen pretok. Paziti je treba, da zaradi velikih hitrosti stranski tok ne bi moteče vplival na ribe in jih preusmerjal od ribje steze. Z njegovo pomočjo lahko bistveno znižamo stroške postavitve ribje steze, se pa na drugi strani povečajo stroški vzdrževanja, saj je treba nabrati material z rešetk redno čistiti.

3.4 Opis ribje steze na HE Arto Blanca

Po zaježitvi Save s HE Krško je zdaj celotna ribja steza dolga 655 m in je sestavljena iz treh delov, slika 10. Na gorvodnem vtoku stoji dvokraka dvonivojska tehnična betonska ribja steza z vertikalnimi režami med rebri bazenov po celotni višini, ki se nadaljuje v sonaravni odsek in nato v iztočni del v spodnjo vodo hidroelektrarne (Ciuha et al., 2014). Višinska razlika med gornjo in spodnjo vodo znaša 9,4 m. Pretok vode v ribjo stezo je na gorvodnem koncu uravnan z avtomatiziranimi regulacijskima zapornicama. Del steze z ribjo stezo z vertikalnimi režami med bazeni ima vzdolžni nagib 1,67 %, z daljšim krakom dolžine 110 m in 24 bazeni ter krajšim s 4 bazeni. Dolžina prekata je 3 m, svetla širina

2 m, normalna globina 1,4 m, širina reže pa znaša 0,6 m. Dno je prekrito s substratom v večini sestavljenim iz kamnov in manjših skal dimenzij med 10 in 30 cm.

Na gorvodnem delu sonaravnega odseka se združita oba tehnična dela ribje steze. Tam je postavljeno počivališče rib v obliki podolgovatega bazena. Sonaravni odsek se nato nadaljuje v 570 m dolgo traso, zgrajeno iz 106 pragov z medsebojno višinsko razliko 10 cm ter vmesnimi tolmoni. Sonaravni odsek je širok 4,7 m in na začetku rahlo vijuga, pod prepustom pod mostom javne ceste pa začne serpentinasto vijugati do iztočnega odseka v naklonu 2 %. V tem delu so pragovi med seboj oddaljeni 5 m, zgrajeni pa so iz skal treh vrst v velikosti 0,5 m s postavitvijo v obliki šahovnice. Tolmuni med pragovi so posuti z rečnim prodcem in so globoki do 0,7 m.



Slika 10: Celotna ribja steza na HE Arto Blanca: 1) tehnični del steze z vertikalnimi režami, 2) sonaravni del, 3) vtočni del v stezo (povzeto po Jašič, 2010, str. 20)

Za ribjo stezo je določenih pet pretočnih režimov obratovanja, ki se razlikujejo po velikosti pretoka in posledično po različni prehodnosti za ribe, odvisnih od različnih obdobj v letu in rečnem pretoku. Ti režimi so »Q660«, »Q900«, »PREHODNO«, »Q500« in »KALNOST«, številke v njih pa predstavljajo približen pretok v l/s. Trajanje obratovanja v posameznem režimu med letom je odvisno predvsem od intenzivnosti migracije in vrstne sestave rib. Režimi so prilagojeni povprečnim selitvenim in drstnim obdobjem različnih vrst rib, ki se selijo in drstijo v različnih razmerah. Ta obdobja so zaradi naravnih razmer in njihovih sprememb vsako leto nekoliko drugačna, tako da jih vsakič znova potrdi ali spremeni upravni organ za ribe Zavod za ribištvo republike Slovenije (ZZRS).

Najpogostejši je osnovni režim Q660, ko je pri polni akumulaciji HE odprta zgornja zapornica na daljšem kraku, na krajšem pa je zaprta. Ob nižji gornji vodi se odpre tudi druga zapornica. Uporabljena

je v času konca migracij večjih rib, ob migraciji in času drstenja manjših rib, ki ne sovpadajo z drstnimi časi večjih rib in v zimskem obdobju drstne migracije boljših plavalk (sulec, ščuka, mrena, menek).

Pri Q900 je pretok 900 l/s in je približno konstanten v celotnem obsegu normalne 1,0 m denivelacije bazena. Primeren je za enake tipe migracij kot so našteje za Q660, le da se želi z njim doseči večjo vodnatost in bolj dinamične razmere v sonaravnem in iztočnem odseku ribje steze.

V času najintenzivnejših ribjih migracij vrst večjih rib se uporablja najbolj vodnat pretočni režim »PREHODNO«, ki naslednjim ribjim vrstam omogoča kar najbolj olajšan prehod: podust, platnica, klen, mrena, ploščič in drugi. Pretok v ribji stezi je deloma konstanten, deloma odstopa pri različnih nivojih zgornje vod

Ko v Savi ni drstnih migracij, se za ohranjanje biotopa uporablja režim Q500, pri katerem pretok niha med 500 in 700 l/s. Posebnost je pretočni režim »KALNOST« za visoke vode Save, ki je usmerjen na podrejanje tem izrednim razmeram, predvsem zaradi v sami reki povečane količine plavja in kalnosti.

Pretočne režime se uravnana samodejno z vtočnima regulacijskima zapornicama s podatki iz vodomeroz na dolvodnem koncu vtočnega odseka ribje steze in v Savi. Za delovanje zapornic in komunikacijo s sistemom vodenja elektrarne skrbi ustrezen krmilnik, ki omogoča operaterju na elektrarni določenega dne izbiranje ustreznega pretočnega režima delovanja regulacijskih zapornic, glede na podatke na nadzornem računalniku s sliko upravljanja ribje steze.

3.5 Učinkovitost ribje steze

3.5.1 Kdaj je ribja steza učinkovita

Projektiranje za doseg učinkovitega prehoda organizmov preko rečnih pregrad zahteva upoštevanje tako bioloških kot hidravličnih parametrov, pri tem pa je za uspešnost pomembno, da se jih rešuje integrirano. Težava je v tem, da ostajajo biološki parametri pogosto slabo opredeljeni ali pa so nasploh pomanjkljivi, da bi zadostovali nadaljnji uporabi (Castro-Santos et al., 2009). Danes je to še posebej problematično, če upoštevamo, da so vsa dela usmerjena v prizadevanje za prehod in s tem ohranjanje čim večje biotske raznovrstnosti v vodnem ekosistemu. Eno glavnih vprašanj pri načrtovanju učinkovitosti ribjih prehodov pa kljub vsemu ostaja težava pri prepoznavanju tistih bistvenih parametrov, ki omogočijo ribam uspešen prehod. Moramo se namreč zavedati, da kljub poznavanju plavalnih sposobnosti posameznih vrst, še vedno ne moremo z gotovostjo napovedati, kako uspešne bodo le te pri premagovanju ovir, zato je pri biološkem poznavanju parametrov še veliko prostora za napredek. V zadnjem obdobju se tako preučuje že vedenjske lastnosti rib na tok, tako da se ugotavlja njihove priljubljene zadrževalne prostore za počitek glede na različno turbulenco v toku, opaža Tritico (2009). Za razumevanje učinkovitosti prehoda je zato predlagano, da bi se, ob upoštevanju do zdaj zbranega znanja, izvajali čim pogostejši monitoringi obstoječih ribjih stez in čim sodobnejši način zajema podatkov. S tem bi konkretno pripomogli k razvoju obstoječih stez in tistih v nastajanju, saj sta znanje in primerjava med obstoječimi objekti še vedno preveč skromna. Ob tem bi lahko s postavljanjem novih vprašanj povezanih s prehodom spodbudili zagon novih procesov za izboljšave obstoječih objektov z iterativnim procesom odločanja, ki bi postopoma izničeval neželene dogodke, oziroma izboljševal stanje pri prehodu (»adaptive management«). V osnovi naj bi to ne bil poenostavljen proces poskusov in pogreškov, kjer je izbira novih poskusov naključno izbrana in nima neke premišljene poti. Šlo naj bi za testiranje hipotez ob predpostavki zadostnega znanja zbranega pri predhodnih opazovanjih ter upoštevanje znanosti, tako da bi se izognili kakršnekoli ugibanju.

Inženirji hidrotehnike že več kot 100 let razvijajo ribje steze, da bi čimbolj zadostili pogojem za prehod rib, na primer Denil leta 1909. Že od samih začetkov razvoja so se spoprijeli s pomembnim vprašanjem ribjih plavalnih zmožnosti, porabljene energije na poti, biomehanike. Vrhunec takratnega razvoja so dosegli v 50. in 60. letih v ameriškem laboratoriju Columbia River Fisheries Research Laboratories, kjer so se pri razvoju zanašali na sodelovanje med biologi in inženirji. V teh izjemno produktivnih letih so dobili ogromno informacij in odgovorov o hidravliki, ribjih plavalnih zmožnostih in fizičnih omejitvah pri prehodu. V veliko pomoč so jim zagotovo bili prototipi ribjih stez v naravnih velikostih, kar jim je dalo natančno sliko o posledicah pri izvajanju primerljivih poskusov, in nato hitro korekcijo vhodnih parametrov (npr. spreminjanje dna ribje steze). Zanimivo je, da so se v večini primerov posvetili samo selitvam salmonidov, ki imajo v Ameriki dolgo tradicijo in so globoko zakoreninjeni v njihovo kulturo. Drug razlog, ekonomski, pa je najbrž še bolj odločujoč.

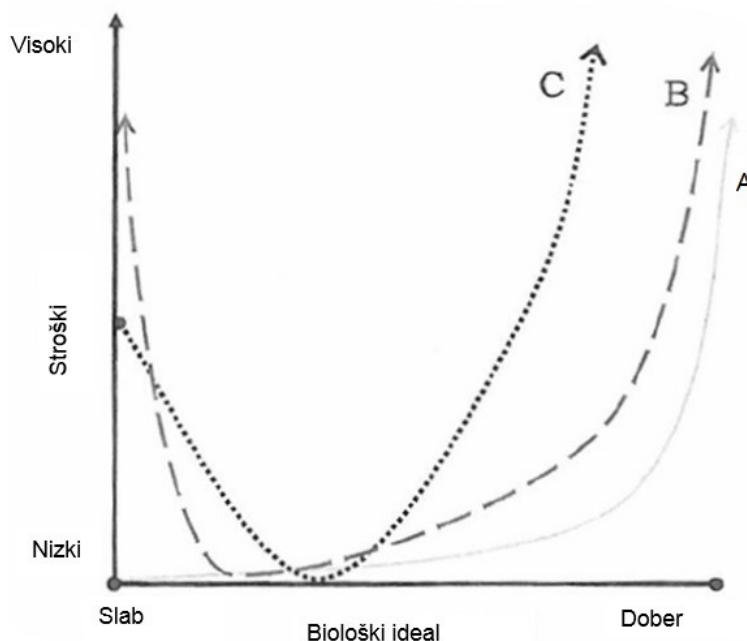
Proti koncu 60. let je bilo sodelovanje med dvema panogama vse slabše in je začelo izgubljati integralni pristop. Inženirji so se posvečali samemu povečanju uspešnega prehoda, biologi pa so še naprej preučevali ribjo fizično sposobnost plavanja in biomehaniko, tokrat v ločeni izvedbi predvsem na testnih kanalih, ki niso bili povezani z ribjimi stezami. Sčasoma so opazili, da je razvoj dosegel vrhunec, salmonidi so masovno prečkali prehode in zato so dobili občutek, da imajo zadosti nabranega znanja, zapisuje Bell (1991). Obenem še vedno niso dokončno poznali vseh odločujočih faktorjev ribjega prehoda in priznavali, da je še vedno veliko neznanega, prav tako tudi veliko nejasnih vprašanj in ciljev za naprej.

Raziskovalci so se dolgo zavedali, da je treba za celovito rešitev zagotoviti tudi prehodnost vrstam, ki niso salmonidi, saj bi v bi lahko drugače s postopnim izginjevanjem teh vrst grozila nevarnost za porušenje ravnotežja tako v vodnih kot v kopenskih biotopih, navaja Meyer et al. (2007). Raziskave so namreč pokazale, da potamodromne vrste in ribe, ki se preseljujejo na krajše razdalje, slabo migrirajo po vodotokih gorvodno prav zaradi neuspešnega prehoda preko ribje steze. Zato je v širšem interesu, da se predstavi direktiva, s katero bi se izvajali postopki zbiranja podatkov na obstoječih objektih, ki bi omogočili boljše razumevanje in vnovično povezovanje bioloških ter inženirskih faktorjev v celostno reševanje problema ribjega prehoda. Za tak pristop je treba najprej definirati namen in jasno izraziti pričakovane cilje teh opazovanj. V našem primeru je logično, da želimo prehodnost po vodotoku gorvodno povrniti v prvotno stanje pred izgradnjo pregrade, da se njenega vpliva ne bi čutilo oziroma se ga čimbolj ublaži. To seveda pomeni tudi, da je treba zagotoviti čimbolj podobne pogoje, kot so jih imeli vodni organizmi pred postavitvijo umetne ovire. Zato je treba ribje steze načrtovati z mislijo, da so čim manj naporne za gorvodno migriranje in da prehod po njih poteka čim bolj nemoteno. Če je prehajanje onemogočeno, lahko pride do upadanja števila populacije in v najslabšem primeru izumrtje. Čeprav so v konceptualnih načrtih lahko mišljeni prehodi z ničelnimi posledicami na organizme, je to glede na ostre ekonomske in biološke pogoje, ki jih moramo tu upoštevati zelo težko izvedljivo.

V pogojih, v katerih bi bil prehod preko pregrade neomejen, je definirana idealna ribja steza:

- posamezna vrsta naj bi v stezo vstopila brez časovnih zadržkov
- vstopu bi takoj zatem sledil uspešen prehod
- pri prehodu ne bi bilo časovnih in energijskih izgub
- prehod ne bi predstavljal šoka na posamezno vrsto, brez bolezni, poškodb ali uplenitve

Očitno je, da so cilji projektiranja ribjega prehoda optimiziranje načina delovanja do te mere, da bodo zadovoljili tako biološke kot cenovne okvire. Oboje je v medsebojnem navzkrižju, kar pa ni nujno, saj lahko uspešno reševanje enega ne pomeni nujno poslabšanje drugega. V prikaz medsebojnega odnosa lahko definiramo tri hipotetične primere, vsaka od njih ima svoje posledice. V prvem primeru je posameznik A, predstavlja ga losos. Zanj je značilno, da ob odsotnosti ribjih stez ne bi mogel opraviti razmnoževanja v zgornjem toku, zato bi ta vrsta na tem vodotoku propadla. Čim začnemo v ribjo stezo vlagati minimalne izboljšave, mu nemudoma zelo olajšamo prehod, tako da lahko že z normalnim vlaganjem dosežemo zadovoljive rezultate, slika 11. Drug primer je ribja vrsta B, iskalec priložnosti, ki kljub preprečeni poti gorvodno pri postavljeni pregradi lahko preživi brez večjih posledic. Skoraj v nobenem primeru mu to ne predstavlja nevarnosti za izumrtje, mu pa rahlo poslabša pogoje. Z izgradnjo ribje steze se primerku izboljša stanje že z normalnimi vložki, z dodatnim povečevanjem pa se mu številčnost približno logaritmsko izboljšuje glede na stroške. Obstaja pa še tretja vrsta ribe C. Tej skoraj vsak ukrep po zaježitvi vodotoka ne pomaga bistveno pri plavanju navzgor. Najboljši primer za to je ameriška čepa, avtohtona riba ameriških vodotokov, ki je navajena na migracije globoko v zgornji tok, a ji ustreza tudi drstenje v spodnjem toku. S postavljanjem pregrad v preteklosti so tako njeno število le malo zmanjšali zaradi prekinitev drstnega habitata, a ga čez čas stabilizirali.



Slika 11: Zveza med stroški in biološkim idealom za primerke rib A, B, C

V praksi se običajno poišče in minimizira stroške, pri tem pa išče čim večjo učinkovitost prehoda. Biološke pogoje je na drugi strani veliko težje optimizirati. Želja je poiskati tisti primer, pri katerem lahko migranti naenkrat preplavajo čim daljšo razdaljo. Ob daljši zmožnosti plavanja preko ovir je namreč večja verjetnost, da bodo uspešno migrirali, čeprav so za to potrebovali daljšo pot in se jim ni bilo treba vrniti oziroma počivati v bazenih ribje steze. V takem primeru se močno podaljša čas prečkanja steze ali pa ta celo ni uspešen. Določanje maksimalne razdalje plavanja je kompleksen proces, ki se ga sicer lahko meri, težko pa ga je napovedati in razumeti, kaj vse ima največji vpliv. V raziskavah skozi zgodovino konstantno prevladuje dimenzioniranje ribjih stez glede na ribjo plavalno sposobnost, vendar še zdaleč ne predstavlja zadostnega napovednika za uspešnost prehoda. Je pri uspehu nezanemarljivo to, koliko časa je posameznik porabil za prečkanje, so vedenjski vzorci pomembni in

kako bi jih lahko merili, kako vplivajo turbulenca in druge spremembe v toku, kako je odvisna psihofizična pripravljenost posameznika?

Vse več vprašanj bioloških procesov ter njihove vprašljive povezave z uspešnim preходом zameglijo pogled na reševanje problema, zato je verjetno sama napoved v veliki meri nenatančna. Zaradi kompleksnega področja bioloških faktorjev se raje usmeri v bolj preverljivo smer preučevanja prehoda, kar naj bi predstavljal monitoring obstoječih ribjih stez. Za njegovo uspešnost je potrebno, da bi se izvajali na čim večjem številu ribjih stez v svetu, saj bi to omogočilo medsebojne primerjave in bi boljše pokazalo dejanske vzroke za njihovo neuspešnost. Trenutno je namreč merjenj še veliko premalo, ker se le ta po navadi izvajajo le na objektih večjega pomena, na desetine drugih pa ostaja prezrtih.

Za lažje zajemanje podatkov in nadaljnjo obdelavo je najpomembnejše, da se drži enotno definirane sistema bioloških in fizikalnih podatkov, ki predstavljajo posamezne člene prehoda, na preglednicah 2, 3 in 4.

Preglednica 2: Odvisne spremenljivke uspešnosti ribje steze

Biološke spremenljivke	Enota	Cilji
Odstotek rib usmerjenih k vhodu ribje steze	P_g	Maksimum P_g in dP_g/dt
Odstotek, ki vstopijo v stezo	P_g	Maksimum P_g in dP_g/dt
Odstotek rib, ki prečkajo stezo	P_p	Maksimum P_p na enoto
Višina ribje steze (H)	P_p/m	Višine (dP_p/dH)
Dolžina ribje steze (D)	P_p/m	Dolžine (dP_p/dD)
Čas prehoda preko steze (t)	h	Minimalen t
Usmerjanje	P_g/h	Max dP_g/dt
Vstop	P_e/h	Max dP_e/dt
Prehod	P_p/h	Max dP_p/dt
Neuspeh (P_f)	P_f/h	
Kondicija/Zdravje		Minimalen efekt
Energija (E)	J/kg	Minimalna ΔE
Sprememba energije		
Po času (dE/dt)	J/kg/h	Minimalen dE/dt
Po višini (dE/dH)	J/kg/m	Minimalen dE/dH
Po dolžini (dE/dD)	J/kg/m	Minimalen dE/dD
Indikator stresa	[kortizol], [plazma ioni], [glukoza], spolni hormoni	Minimalen stres
Poškodbe	Poškodbe, izguba lusk	Minimalne poškodbe
Odstotek preživelih	P_s	Maksimalen P_s

Preglednica 3: Kovariante za uspešnost ribje steze

Kovariante	Enota	Cilji
Ribje vrste	Kategorija	Ugotoviti specifične posebnosti med vrstami in razumeti njihov pojav
Telesna dolžina	m, cm, mm	Povezati velikost s prehodnostjo, hidravličnimi karakteristikami steze
Temperatura / kakovost vode	°C, d°C	Vplivi temperature in kakovosti na uspešnost in biološko sposobnost
Čas (t)	h	Vpliv zadrževalnega časa in sezonskosti na uspešnost in biološko sposobnost
Hidravlične, fizične karakteristike steze	Glej naslednjo tabelo	Vpliv na druge biološko odvisne spremenljivke

Preglednica 4: Fizične in hidravlične karakteristike posamezne ribje steze

Fizična/hidravlična karakteristika steze	Enota
Fizične karakteristike	
Tip steze	Kategorija steze
Dimenzije	
Žleb	m, m ² , m ³
Bazen	m, m ² , m ³
Vmesne stene steze	m, m ²
Celotna dolžina	m
Število bazenov istega tipa	Število
Naklon	cm na posamezen bazen ali v stopinjah
Bazeni za spremembo smeri/počivalni bazeni	m, m ² , m ³
Dimenzije	m, m ² , m ³
Višinske kote	m
Dolžine	m
Hidravlične karakteristike	
Reynoldsovo število	-
Froudovo število	-
Faktor disipacije turb. kin. energije	W/m ³
Celotna turbulentna kinetična energija	W/m ³
Hitrost toka	
Minimalen	m/s
Maksimalen	m/s
Povprečen	m/s
Turbulenca	
Standarden odklon hitrosti	m/s
Vrtinci	
Velikost	m
Frekvenca	Hz
Perioda rotacije	s
Vrtinčnost	rad/s
Impulz: linearen	kg m/s
Impulz: kotni	kg m ² /s
Potisna moč	kg m/s ²
Cirkulacija	m ² /s

3.5.2 Neučinkovitost ribjega prehoda

Slab učinek ribjih stez lahko pripišemo trem razlogom (Fish passage technologies ..., 1995):

- nejasni cilji ribje steze
- slabo načrtovana ribja steza
- slaba operativa in vzdrževanje ribje steze

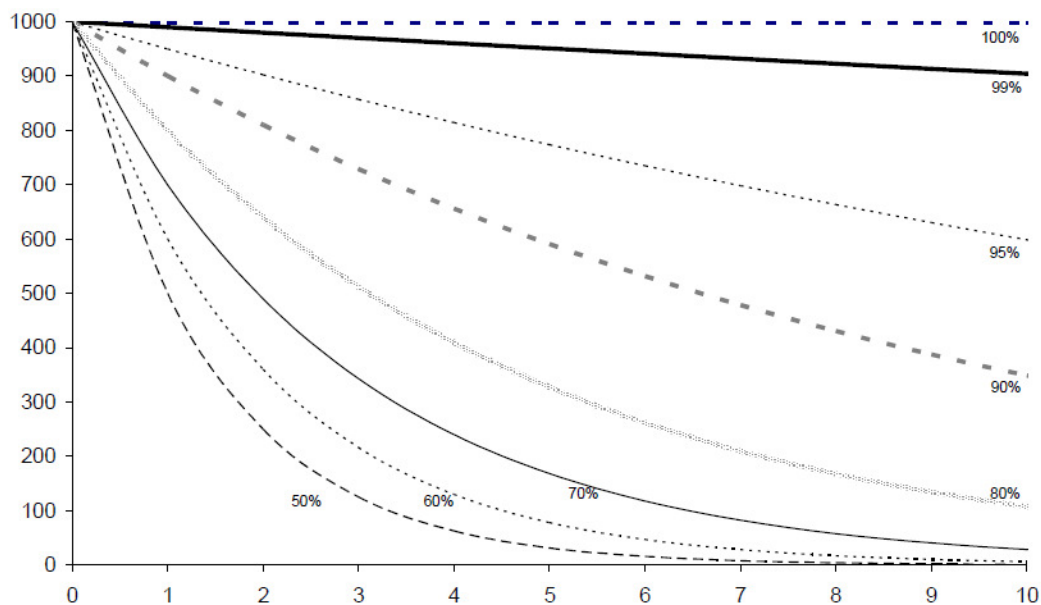
Cilji so prva in glavna točka pri razvoju projekta ribje steze iz teorije v prakso. Brez jasnih ciljev namreč tudi ni mogoče oceniti, kakšen učinek smo dosegli pri prehodnosti. Vsak prehod je unikaten, zato so za vsakega želje pri izpolnjevanju drugačne; treba si je postaviti širino problema, ki ga želimo s postavitvijo steze na določenem mestu rešiti. Izberemo lahko ozko, zelo direktno usmerjeno pot z enostavnimi vprašanji, ali ribe stezo uporabljajo ali npr. kolikšno je število prehodov posameznih ribjih vrst. Na ta način lahko dobimo popačeno predstavo o učinkovitosti, saj s tem ne izvemo niti, kakšen vpliv je na celotno živečo populacijo in navsezadnje, če zaradi tega na dolgi rok morda trpi rečni ekosistem. Kadar skrbimo predvsem za ohranitev ali celo obnovitev ribjih vrst, je zato samo štetje primerkov s pomočjo naprav premalo.

Kljub dobremu znanju o ribjem prehodu se po svetu pojavijo slabi rezultati iz več razlogov: neustrezen privlačni tok, slabo načrtovan vhod v stezo, neustrezen tok v stezi, slabo postavljen izhod. Poleg hidravličnih pogojev so za slabo prehodnost lahko krivi tudi senzorični elementi, med glavnimi temperatura, vonj in predvsem svetloba. Ta lahko deluje na ribe negativno ali pa jih spodbuja pri prehajanju. V primeru ameriške čepe premalo svetlobe deluje zaviralno, saj se takrat ribe te vrste na stezi težje orientirajo, zato je pri načrtovanju nujno, da jim zagotovimo primerno osvetljenost. Podobno jim lahko težave povzroča prehiter tok, ki prav tako otežuje orientacijo. Po drugi strani je lahko preveč svetlobe tudi škodljivo za nekatere vrste sledi, ki se med migracijo izogibajo osvetlitvam sredi dneva.

Pričakovana prehodna uspešnost ribjih stez v več letih je na koncu vedno odvisna predvsem od rednega opazovanja in vzdrževanja. Čim se v stezi pojavi določena ovira, ali so reže med bazeni blokirane, privede do spremembe hidravličnih pogojev, ki se spremenijo do te mere, da je prehod preko steze neučinkovit. Obstaja razlika med različnimi tipi ribjih stez v občutljivosti na te naplavljenе ovire, predvsem je razlika v tem, kako velike odprtine so prisotne glede na celotno višino sten med bazeni ribjih stez. Problematične so na primer potopljene odprtine, ki se hitro zapolnijo z naplavljenim materialom, samočistilna sposobnost pa je mala. V takem primeru je primernejša izbira steze z vertikalno režo po celotni višini med sosednjima bazenom, ki nabran material na dnu struge lažje prenese z manjšo izgubo učinkovitosti. Prav tako je za dobre pogoje prečkanja pomembno redno spremljanje gladin nad in pod ribjimi stezami, da zagotavljamo ustrezne gladine oziroma pretoke, ki nam dajo želeno tokovno sliko

Za boljšo sliko čim večje uspešnosti ribje steze pri prehajanju rib skrbi slika 12, ki predstavlja učinek večkratnega zaporednega prehajanja ene ribje populacije po toku navzgor in posledično njenemu krčenju v številu posameznikov. Slika prikazuje več različnih krivulj upada od začetnih 1000 rib, ki se med seboj razlikujejo po uspešnosti prehoda ribje populacije po ribji stezi od 50 do 99 %. Če vzamemo na primer, da so ribe na posamezni stezi samo polovično uspešne, nam že po treh zaporednih prečkanjih število pade na le 15 % (150 rib) od začetne populacije, nič boljša ni niti uspešnost 80 %, ki zmanjša število rib po treh pregradah kar na polovico. Iz tega izhaja jasna potreba po ugodnejši zasnovi ribje

steze, ki bi ustrezala največjemu številu rib in bi povzročila minimalne posledice, za kar pa bi morali dosegati rezultate že okoli 99 % uspešnosti, to pa bi pomenil že zelo velik zalogaj za inženirje in biologe.



Slika 12: Krivulja preživetja populacije migrirajočih rib skozi več zaporednih prehodov pri fiksni uspešnosti; x os - zaporedni prehodi, y os - padanje preživelih od 1000 naprej (povzeto po Armstrong et al. 2010, str. 236)

3.5.3 Pregled učinkovitosti ribjih stez v svetu

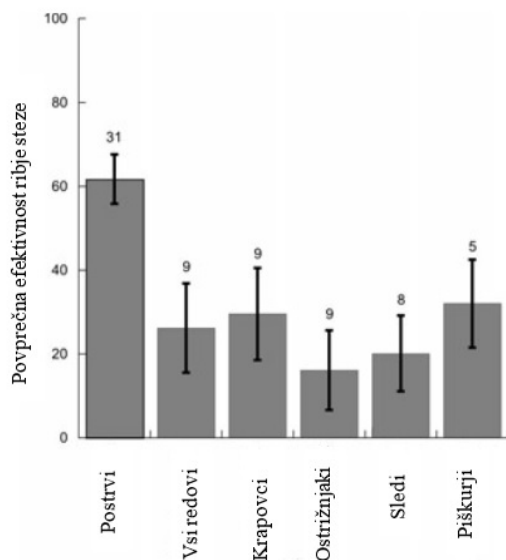
Da se zberejo podatke o prehodnosti ribjih stez v svetu in se primerjajo po njihovem tipu, je Noonan et al. (2012) opravil obširno raziskavo obstoječih znanstvenih člankov, ki so bili objavljeni do zdaj. Iskali so tako rezultate gorvodnih kot dolvodnih raziskav, z željo po pridobitvi naslednjih informacij: lokacija, smer migracije, tip ribjega prehoda, tehnične podatki prehoda (dolžina, širina, srednja globina, naklon, srednja hitrost toka), podatki o ribjem vzorcu, srednja dolžina ribe posameznega vzorca in seveda rezultati povprečnih uspešnostih prehoda. Našli so 96 primernih člankov, napisanih od leta 1964, a jih je bilo pred junijem 2008 objavljenih le 26. Članki zajemajo rezultate 61 raziskanih objektov iz 20 različnih držav, večina jih je iz Severne Amerike oziroma Evrope (30 in 24), le mali delež predstavljata Južna Amerika (3) in Avstralija (4). Za uspešnost ribje steze so med ribjimi vrstami primerjali datum migracije, uspešnost privlačenja rib do ribje steze, uspešnost vstopa v ribjo stezo, uspešnost prehoda, čas prehoda, odstotek vračajočih rib, ki so se ob izhodu iz steze vrnile skozi pregrado v spodnji bazen. Ob tem so privzeli točno določene termine iz prakse, ki se širše uporabljajo za opis posameznih merjenih vrednosti. Tako je učinkovitost privlačnosti definirana kot odstotek potencialnih migrantov, ki so sposobni locirati vhod ribje steze. Učinkovitost vstopa je odstotek tistih, ki so uspešno vstopili, v primerjavi z vsemi, ki so bili tik pred samim vhodom. Učinkovitost prehoda je odstotek rib, ki so bile uspešne tako pri vstopu kot izstopu iz ribje steze. V tem primeru to pomeni, da uspešen prehod zajema tako uspešnost atrakcije kot uspešnost vhoda. Čas prehoda se označuje kot pretečeni čas od posameznikove začetne detekcije privlačnega toka do trenutka njegovega izstopa s steze.

Za statistično analizo se je sprva prerazporedilo ribe glede na njihovo družino in red. Da bi se izognili operacije z velikimi količinami podatkov so uvedli beleženje le enega rezultata na posamezno stezo in na študijo. Kjer je podanih več rezultatov za eno meritev uspešnosti, so upoštevali uteženo poprečje, da

so se vse študije poenotile na želen en rezultat za eno meritev posameznih ribjih redov. Če je bil vzorec dovolj velik, so izvedli nadaljnjo analizo vpliva posameznih meritev na uspešnost prehoda, kot so red rib, tip ribje steze, tehnični podatki ribje steze.

Zaradi velikih razlik so pri analizi od preostalih rib ločili družino salmonidov. Ti so predstavljali največjo populacijo v analizi, zaradi boljših plavalnih sposobnosti in dolgoletnega razvoja ribjih stez te v njihovi luči predstavljajo bistveno razliko z drugimi redovi rib ne glede na tip ribje steze: dvostranski ANOVA test pokaže $F_{1,50} = 11,31$, $P = 0,002$, $\alpha = 0,05$. Pri vrednostih $P < \alpha$ gre za bistveno razliko med vzorci, obratno pa za manj bistveno. Povprečna uspešnost za salmonide je bila $\bar{x} = 61,7 \%$, standardni odklon $\sigma = 5,9$, $n = 31$, za ostale pa $\bar{x} = 21,1 \%$, $\sigma = 3,7$, $n = 30$. Vse ribe razen salmonide so v nadaljevanju analizirali v primerjavi s salmonidi kot eno skupino zaradi majhne razlike v uspešnosti ribjega prehoda med redovi, saj je ANOVA test pokazal $F_{2,35} = 0,544$, $P = 0,697$. Razlikovanje med tema dvema skupinama se je pokazalo tudi pri prehajanju preko ribje steze čez dan, saj so takrat salmonidi izrazito prehajali, in sicer v 16 od 17 primerov, medtem ko drugi niso imeli preferenčnega časa v dnevu, ko so prehajali, rezultati so bili enakomerno razporejeni med dnevom in nočjo, po 5 študij v obeh delih dneva.

Skupna povprečna uspešnost celotne populacije je tako samo 41,7 %, kar je dosti nižje, kot bi si lahko želeli pri skrbi za ohranjanje in obnavljanje vodnega ekosistema ter za zagotavljanje nemotene povezljivosti celotnega rečnega toka (Slika 13). Za kakršne koli zadovoljive razmere, bi morala uspešnost pri posameznih nenaravnih ovirah nujno biti med 90 do 100 %, da bi na daljši migracijski poti vsaj za določen delež zagotovili preživetje. Še vedno je kar nekaj primerov, ko uspešnega prehoda sploh ni bilo. V večini primerov se je to zgodilo pri ribjih vrstah s slabšimi plavalnimi sposobnostmi, redko pri salmonidih, ki so bili pri preučevanih objektih osrednja vrsta katero se je upoštevalo pri načrtovanju prehoda navzgor. To se pokaže predvsem v primeru Snake Rivers v Kolumbiji, kjer salmonidi prehajajo nemoteno, za druge ribe pa je prehod nemogoč.



Slika 13: Delež uspešnih ribjih prehodov glede na njihov red (povzeto po Noonan et al., 2012, str. 456)

Tip ribje steze je poglavitno vplival na uspešnost prehoda (ANOVA test, $P = 0,002$), slika 13, prav tako pa tudi ribji red (ANOVA test, $P < 0,0005$). Povezave med samimi redovi in tipi ribjih stez ni bilo zaznati (ANOVA test, $P = 0,776$), tako lahko rečemo, da ribe niso imele preferenc pri posameznem tipu

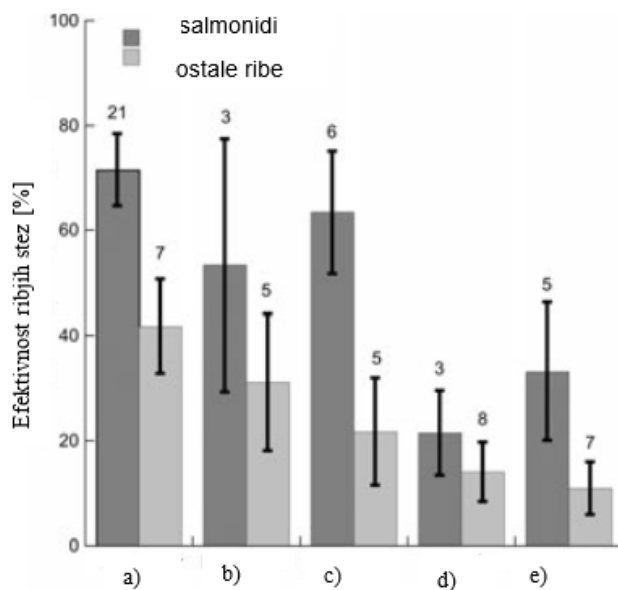
ribje steze. Steze z bazeni in odprtini med posameznimi bazeni kot najboljše v prehodnosti se niso bistveno razlikovale v uspešnosti od tistih z vertikalnimi režami (3. najboljše) ter naravnimi (2. najboljša prehodnost), saj je test pokazal za vse vsaj $P > 0,14$. So se pa te bistveno razlikovale od Denilovih in ribjih zapornic/dvigal, saj je bila vrednost samo $P < 0,0005$, torej veliko odstopanje. Na to so lahko najbolj vplivale predvsem fizične karakteristike med posameznimi tipi, saj je dokaj hitro opazno, da se te med seboj močno razlikujejo. V preglednici 5 so zbrane njihove značilnosti kot so dolžina ribje steze, naklon in hitrost. Zapornice in dvigala so v nadaljnjem delu izpuščene, ker se preveč razlikujejo od drugih tipov, tako da primerjava ni bila smiselna.

Preglednica 5: Pregled karakteristik po tipih ribjih stez

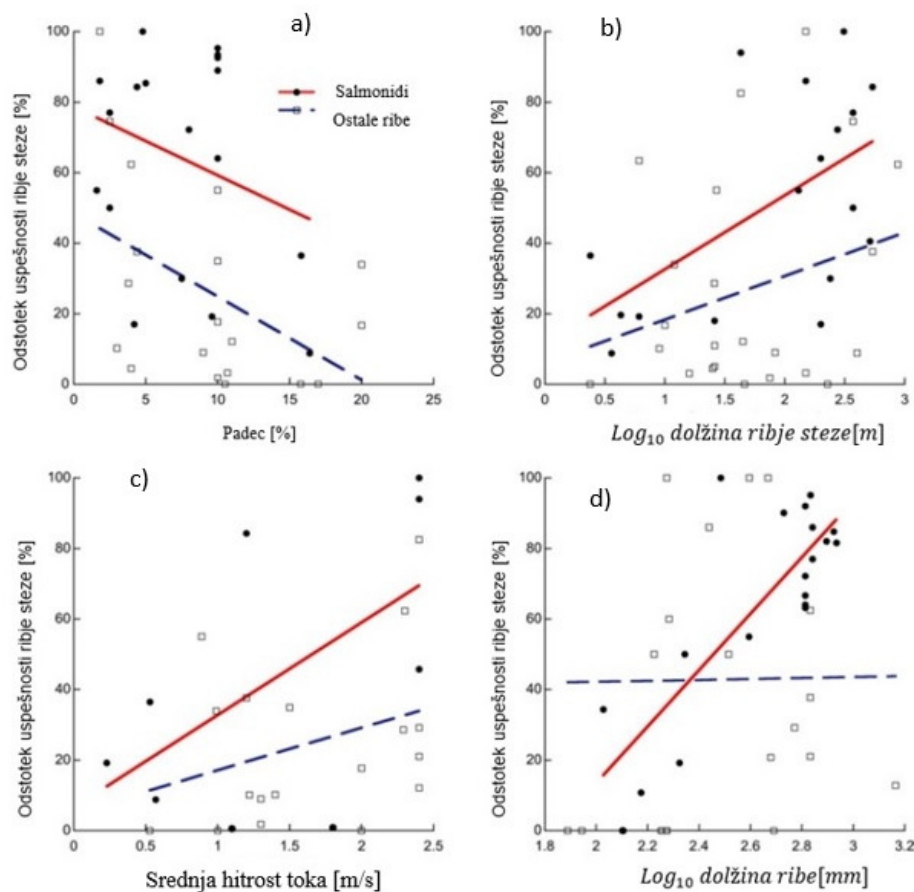
Tip ribje steze	Dolžina [m]	σ [m]	Naklon [%]	σ [%]	Hitrost [m/s]	σ [m/s]
Bazen z odprtini	190,3	$\pm 71,4$	8,1	$\pm 0,75$	1,78	$\pm 0,18$
Vertikalni prekat	175,6	$\pm 101,8$	6,3	$\pm 2,42$	2,07	$\pm 0,33$
Sonaravna steza	202,9	$\pm 41,4$	4,2	$\pm 1,11$	1,80	$\pm 0,50$
Denil	14,2	$\pm 5,3$	14,5	$\pm 1,47$	0,89	$\pm 0,21$

Primerjava med karakteristikami za prve tri tipe, na preglednici 5, pokaže rezultate testa, da so večje od vrednosti 0,086, kar pomeni da večjih razlik med njimi ni, čeprav nizka vrednost testa še vedno pomeni, da si niso povsem identične. Seveda pa se te zelo razlikujejo v primeru Denila, ki ima vse tri vrednosti, primerjave z drugimi stezami pod 0,046. Iz tabele lahko ugotovimo, da so fizične karakteristike močno vplivale na uspešnost prehoda in so dobro nakazale kateri tipi bodo po uspehu med seboj podobni, kar nam potrdi tudi ANOVA test. Denilova ribja steza je v številnih primerih najcenejša rešitev na pregradah, vendar ima tudi ta svojo ceno, saj je bila povprečna uspešnost rib samo okoli 16-odstotna. Slabe rezultate lahko pripišemo velikemu naklonu steze in krajši poti, kar najbrž s svojo specifično obliko oteži normalen prehod, čeprav je srednja hitrost toka v primerjavi z drugimi stezami najnižja.

Na sliki 14 je prikazana povprečna uspešnost rib na posameznih tipih ribjih stez z ločenimi rezultati za salmonide od rezultatov za druge ribe. Slika 15 predstavlja prav tako ločeno uspešnost, tokrat v odvisnosti od značilnih karakteristik ribje steze in glede na ribjo dolžino.



Slika 14: Efektivnost ribjih stez: a) bazenski tip, b) vertikalna reža, c) sonaraven tip, d) Denil, e) ribja splavnice/dvigala (povzeto po Noonan et al.2012, str. 454)



Slika 15: Odstotek uspešnosti rib glede na a) različne padce dna steze, b) dolžine ribje steze, c) srednje hitrosti toka in d) dolžine rib (povzeto po Noonan et al. 2012, str.457)

4 MIGRACIJE RIB

Migracije organizmov po zemlji in zraku so bile zaradi možnosti enostavnejšega opazovanja, sledenja in beleženja posameznikov na njihovi poti preučevane v večji meri kot migracije po rekah. Zato ni nenavadno, da je znanje na tem področju pomanjkljivo, obenem pa je zaradi pomanjkanja raziskav na področju vodnih migracij prevladovalo mnenje, da so migracije v tekočih vodah tako ali tako dokaj redke, saj naj bi se večina ribjih vrst raje zadrževala na ožjih območjih in izvajala le krajša gibanja (glej Lucas in Baras (2001)). Izjema so bili seveda salmonidi, ki so s svojo dolgo potjo vse od morja do drsnega habitata z izjemnimi skoki čez ovire pritegnili opazovalce in dosegli, da je njihova življenjska pot najbolj dokumentirana in raziskana med vsemi ribami. V zadnjih letih je napredek v tehnologiji omogočil spremljanje posameznikov na njihovi poti po vodotoku, zaradi česar so se postavila vprašanja o vedenju rib med migracijami v tekočih vodah. Zdaj so skoraj vse ribje vrste označene kot gibajoče v prostoru in času. Zmožnost zajemanja podrobnejših podatkov o migracijah je pomenila odprtje novih študijskih možnosti, prej bolj poenostavljenih in opisnih je nadomestilo raziskovanje hipotez, namenjenih za preučevanja vzrokov in posledic za tako vedenje rib.

Poznamo več vrst migracij, ki jih lahko kategoriziramo po funkciji, habitatu, letnem času ali po posameznikih (Brönmark, 2014).

Migracije po funkciji zajemajo razmnoževalne, prehranjevalne, skrivanje pred plenilci in umik pred škodljivim okoljem. Razmnoževanje je najbolj poznana oblika migracije, v kateri optimalni življenjski prostor za rast in preživetje med mladimi in odraslimi ribami ni enak. Prehajanje skozi prostor zaradi prehranjevanja ribe opravljajo zaradi vsakodnevne menjave položajev med nočnim počitkom in nato zadrževanjem na območju hranjenja podnevi. Zaradi možnosti, da postanejo plen, ribe zapuščajo varna območja, predvsem v času mirovanja in manjše rasti pozimi in zavzemajo območja hitrejšega toka z manj plenilci. Ribe migrirajo tudi zaradi sezonskih sprememb v okolju v katerem živijo. Primernejše kraje poiščejo npr. zaradi nizkih temperatur ali sprememb v koncentraciji kisika.

Druga delitev migracij je po habitatih. Nekatere ribe, ki migrirajo med sladkimi in slanimi vodami, so poznane kot diadromne. Tiste, ki živijo večino časa v morju in pridejo v tekoče vode samo na drstenje, imenujemo anadromne ribe. Med te sodijo najrazličnejši salmonidi, čepe, jesetri in piškurji. V obratni smeri migrirajo katadromne ribe, najznačilnejša predstavnica je jegulja. Ribe, katerih vsi življenjski cikli potekajo v tekočih vodah, selijo se le med drstenjem, se imenujejo potamodromne. Nekatere ribe prebivajo izključno v vodotokih in obenem nimajo daljših selitev.

Migracije se lahko odvijajo tudi glede na časovne cikle. Večina se jih odvija sezonsko v skladu z razpoložljivimi viri hrane, zmanjšano nevarnostjo za uplen v habitate, optimalne za razvoj in preživetje mladice. Znanе pa so tudi migracije na krajši ravni, in sicer dnevne vertikalne migracije, opažene pri nekaterih vrstah. Te ribe se zadržujejo ali pod gladino ali na dnu struge, odvisno, ali je dan ali noč. Podobnega časovnega okvira so tudi horizontalne migracije med dnevom in nočjo, ribe se namreč premikajo med stoječimi oziroma tekočimi vodami podnevi.

Migracije ne zajemajo širše populacije celovito. Spoznanja v zadnjem obdobju kažejo, da je prej pravilo kot izjema delno migriranje posameznikov znotraj vrst. Znano je na primer ločeno migriranje skupin salmonidov ženskega in moškega spola proti morju, nekateri primerki moškega spola celo nikoli ne zapustijo naravnega habitata svoje mladosti. Migracije se tako danes kažejo kot kompleksen proces, v katerem so znotraj ene populacije pogoste variacije. Zadnja poročila zajemajo tako imenovane delne migracije, ki kažejo na razlike v odzivih posameznih rib, nekatere izkažejo več druge pa manj želje po migriranju.

Migracije zajemajo ogromno množico posameznikov, vendar se za pot odloči vsak zase zaradi prilagoditvenega načrta, ki jim veleva iskanje območja za čim večjo možnostjo reprodukcije. Gre za razvoj v evoluciji z iskanjem čim večjega razmerja koristi proti ceni, ki je za to potrebna. Motivacija za migriranje sledi iz ocenitve, da je možnost razploda na oddaljeni lokaciji večja kljub ceni dostopa do nje, kot je ta na trenutnem življenjskem mestu.

4.1 Anadromne selitve

Ribe anadromnih selitev so izležene v tekočih vodah in se že zelo zgodaj iz rodne območja odpravijo proti morju. Tam preživijo eno do več let, dokler nimajo dovolj moči za pot nazaj, kjer se bodo lahko drstile in s tem zaključile svoj življenjski cikel. Dolžina poti zelo variira tako znotraj vrste, kot tudi med njimi. Čeprav nekateri osebkii lahko opravijo več tovrstnih potovanj, so nekateri sposobni tako pot opraviti samo enkrat in nato poginejo. Zaradi specifike vračanja in odhajanja od svojega matičnega prostora izleganja, so anadromne vrste zelo občutljive na morebitne prepreke na poti, ki bi jim preprečile zaključevanja razmnoževalnega cikla. Jezovi lahko močno ogrozijo njihove populacije, če ni zagotovljenega uspešnega prehajanja po ribjih stezah. Tako je treba njihovo dimenzijo prilagoditi plavalnim sposobnostim migrantov ob upoštevanju, da se izvaja redno vzdrževanje. Mladicam, ki plavajo proti morju, je treba prav tako zagotoviti nemoten prehod na način, da se na prelivih ali prelivnih kanalih čim manj poškodujejo.

S pojavom vprašanja o smiselnosti migriranja anadromnih vrst se lahko njihovo početje razlaga kot iskanje boljših pogojev mladice za rast s potjo v morsko vodo, kjer so večje zaloge hrane. Večji posamezniki ženskega spola so dokazano plodnejši in imajo večje jajčeca piše (Brönmark, 2014). Prav tako večja rast ugodno vpliva na moške predstavnike, ki so na drstnih območjih lahko uspešnejši v borbi za razplod. Drugi pomembnejši razlogi so lahko še manjša nevarnost plenilcev in parazitov v sladkih vodah v primerjavi s slanimi vodami ter zmanjšanje tveganja za umrljivost zaradi pomanjkanja kisika.

Posebno poglavje anadromnih selivk je dolvodno migriranje mladice, ko pridejo v stik z rečnimi pregradami (Fish passage technologies..., 1995). Če te nimajo postavljenega obhodnega kanala namenjenega nemotenemu prehajanju rib, je potem edina možna pot, ki jo lahko uberejo, skozi turbine, pod zapornicami ali pa čez prelive. Kadar so zapornice spuščene in so prelivii zaprti, je njihova edina možnost prehoda skozi dovodne cevovode turbine. Ta način prehajanja je še vedno sporen in postavlja vprašanja, če je z njim ribam odvzeto nemoteno prehajanje, saj predstavlja oviro na poti, ki mnoge posameznike lahko poškoduje ali pa jih smrtno rani. Raziskave na to temo potekajo že vse od 30. let prejšnjega stoletja naprej in navajajo široko variiranje dobljenih rezultatov, od celotne do nične umrljivosti populacije, odvisno od zasnove turbine, operativnih parametrov in ne nazadnje vrst selilnih rib.

Umrlijivost rib je razdeljena na štiri potencialne nevarnosti: mehanske poškodbe, spremembe v tlaku, kavitacija, strižne sile (Fish passage technologies ..., 1995). Mehanske poškodbe nastanejo z ribjim stikom s fiksnimi ali premikajočimi se deli turbine in so pozitivno korelirane z dolžino ribjega telesa. V vhodnem kanalu turbine je vodni pritisk razmeroma visok, vendar so ribe nanj normalno prilagojene, predvsem plavalke, ki se večino časa zadržujejo na rečnem dnu. Takoj pod turbino v izhodnem kanalu se pojavi območje podtlaka, vodnega tlaka, ki je nižji od atmosferskega. Ta nato naprej hitro preide v območje z atmosferskim tlakom v spodnjem delu kanala, ki se izliva v spodnji bazen jezu. Te hipne spremembe toka lahko ribe znatno poškodujejo. Kavitacija poškoduje ribe, ko se v lokaliziranem področju s podtlakom tlak spusti na mejo, potrebno za uparitev vode, kar povzroči nastanek zračnih mehurčkov. Ti se nato s pretokom prestavijo nižje v območje z visokim vodnim tlakom, kjer se v trenutku

razblinijo in povzročijo močan udarni val, ki na kratki razdalji poškoduje celo jeklene lopatice turbine. Če se razletijo v bližini rib jih lahko poškodujejo ali ubijejo. Zadnja potencialna nevarnost je strig, ki se pojavi na meji med dvema sosednjima tokovima različnih hitrosti, obrača ribe obrača okoli svoje osi ali jih celo poškoduje.

4.2 Ribe tekočih voda

V preteklosti se je ribam, ki živijo izključno v tekočih vodah, namenjalo malo pozornosti, prav tako opazovanju glede potrebe po postavitvi ribjih stez, ki bi jih lahko uporabljale. Tiste, ki so bile postavljene, so zagotavljale prehode za anadromne vrste. Te so dokazane boljše plavalke, zato verjetno ribe tekočih voda takih ovir niso mogle preseči. Od tod izhaja argument, da so v vseh teh letih (50 do 100 let nazaj), ko niso prehajale, ribje populacije vzpostavile relativno uravnotežen način življenja, ki jim ne pogojuje napredka čez pregrade za nadaljevanje njihovega obstoja. Teorija o njihovih krajših selitvah izhaja iz obdobja, ko so za spremljanje uporabljali še preprostejšo metodo z vnovičnim ulovom prej označenih posameznikov. V številnih študijah se je izkazalo, da so bile ujete ribe večinoma v bližini mesta, kjer so jih izpustili ob označevanju. Teh ulovov je bilo relativno malo, kar je kazalo na to da ni točno jasno, kaj se dogaja s preostalimi, ki jih niso ujeli. Ribe so tako lahko opravile daljše selitve in bile pozneje naključno ujete prav v območju raziskav, tako da ni bilo mogoče potrditi trditve o prehajanju po rečni strugi. Če se vnovično lovljenje rib izvaja na manjšem območju je seveda tudi možno, da so ribe zapustile te meje, in so bile predpostavke o njihovem maksimalnem dosegu podcenjene, ribe pa izgubljene. V zadnjih letih se je zato začela uporabljati tudi novejša tehnologija za spremljanje selitev, ki pa je glede na primitivnejše postopke zelo draga. Poznani sta hidroakustična tehnologija na principu sonarja in pa sledenje označenim ribam s pasivnimi integriranimi oddajniki (Fish passage technologies ..., 1995).

Omenjeni oddajniki so pripomogli k beleženju sezonskega seljenja krapovcev med plitvimi jezeri in vodotoki (Brönmark, 2014). Odkrili so, da so selitve najverjetneje posledica prilagajanja na trenutne sezonske razmere v okolju, z motivom po bivanju oziroma migriranju v predele, v katerih je verjetnost, da postanejo uplenjeni čim nižja in da so možnosti za rast čim večje. Tako se je večina opazovanih krapovcev selila v vodotoke v oktobru in se nato vračala v jezera v aprilu. Glavna nevarnost za uplenitev so bile ribojede plenilke kot so ščuke in ostriži, od ptic pa kormorani in ponirki. Manjše ribe imajo večjo možnost postati plen plenilskim vrstam, zato bi se morale seliti v večji meri kot večji primerki iste vrste. Te delne selitve vrste se lahko vidijo kot dve nasprotni strategiji. Bodisi naj riba ostane v jezeru in je ob tem izpostavljena večjemu tveganju, da bo uplenjena, ali naj se preseli v tekoče vode, kamor sicer plenilci redkeje zahajajo, so pa zato na slabšem zaradi izbire hrane, ta je večja v stoječih vodah. Med drugim je pomembna tudi ugotovitev, da nastajajo razlike v selitvah tudi glede na telesno stanje, saj se bolje nahranjeni posamezniki prej odločijo za prehod v reke, kot tisti v slabšem stanju. Ti bodo kljub višji izpostavljenosti plenilcem skušali zmanjšali možnost deficita v prehrani tako, da bodo ostali v jezeru, bogatejšim s hrano.

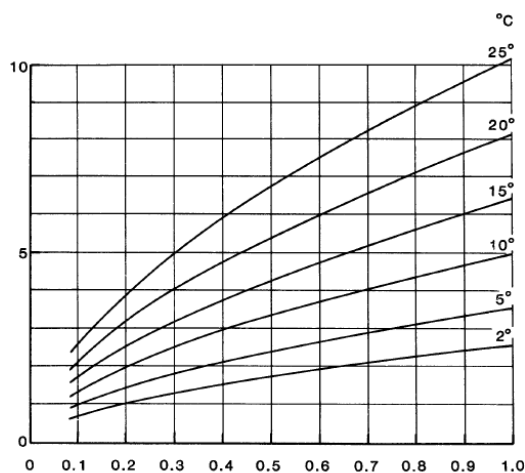
4.3 Sposobnost rib pri migriranju

Poleg omenjene disipacije turbulentne kinetične energije v poglavju o vrstah ribjih stez se je treba pri dimenzioniranju ribje steze osredotočiti tudi na doseganje primernih hitrosti toka skozi reže, da te ne presežejo maksimalnih plavalnih zmožnosti migrantov. Beach (1984) opisuje dve različni plavalni hitrosti rib; potovalno in maksimalno, sunkovito. Za prvo je značilno, da za ribo ni naporna in jo lahko vzdržuje po več ur naenkrat brez počitka. Zato je tudi smiselno, da se jo poskuša zagotoviti, a ne preseči,

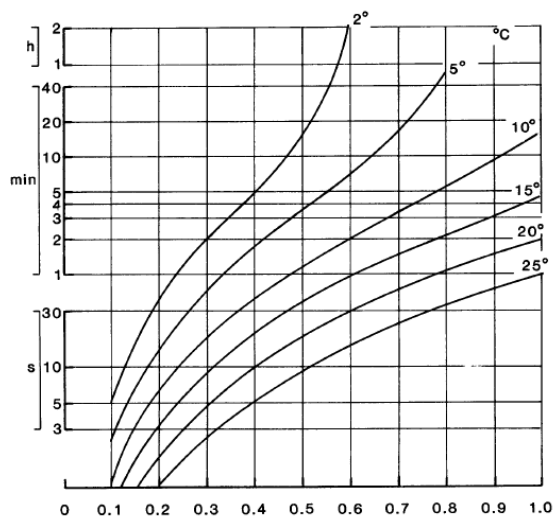
v umirjenem delu ribje steze, kjer se riba lahko pripravi na naslednje prečkanje skozi ožino s hitrim tokom. Na tem delu moramo med rebri nadzorovati dopustno mejo maksimalno mogočih hitrosti rib, ki jo še lahko dosežejo. Za to stanje velja, da ga ribe lahko ohranjajo preden se utrudijo le nekaj sekund, zato moramo doseči, da hitrosti niso prevelike, obenem pa da pot do zgornjega umirjenega toka bazen ni predolga.

Maksimalno plavalno hitrost je empirično predstavil Wardle (1975), ki je dokazal, da se jo da določiti že, če poznamo dolžino ribe in čas mišične kontrakcije plavuti, ki je odvisna predvsem od temperature vode. Spoznal je namreč, da ribam sposobnost za doseganje maksimalne hitrosti močno upade z nižanjem temperature. Razlika pri primer pri temperaturi med 10 in 20°C je več kot tretjina. Njegove empirične enačbe je v grafični obliki (slika 16) prikazal Beach (1984) s krivuljami maksimalnih hitrosti odvisnih od različnih vrednosti temperature (2, 5, 10, 15, 20 in 25 °C). Poleg je treba za uporabo v praksi poznati še drug graf (slika 17) za ohranjanje te maksimalne hitrosti, glede na temperaturo, ki poteka od nekaj sekund do dveh ur.

Za dimenzioniranje prehoda na naših rekah nas zanimajo predvsem plavalne sposobnosti ciprinidov - krapovcev, ki se selijo na daljše razdalje. Ti bi za uspešne migracije in razmnoževanje nujno potrebovali ustrezen tok znotraj ribje steze. Drugi krapovci, ki se ne selijo daleč, niso tako ogroženi s postavitvijo stez z neugodnimi razmerami za njihovo prečkanje, je pa z ekološkega vidika njihova uspešnost tudi dobrodošla za prehod med različnimi življenjskimi okolji. Edina dodatna izjema je še sulec, ki se za razliko preostalih avtohtonih salmonidov prav tako seli na daljše razdalje, zato je treba preveriti sposobnost plavanja tudi zanj.



Slika 16: Maksimalna hitrost plavanja v odvisnosti od temperature



Slika 17: Maksimalna vzdržljivost pri različnih temperaturah vode

Glede na prejšnje grafe je sestavljena preglednica maksimalnih hitrosti in pripadajoči čas plavanja za pomembne slovenske ribe selivke na daljše razdalje pri temperaturi 15 °C, povprečni temperaturo vode ob migracijah v spomladanskem času. Za odčitavanje je treba poznati primerne dolžine povprečnih primerkov selivk, ki se določijo glede na njihove dolžine, ko dosežejo spolno zrelost. Dolžine so povzete po Povževi in Sketu (1990) glede na minimalne dolžine odraslih rib, zbrane pa so v preglednici 6.

Preglednica 6: Sposobnost ribjih vrst, ki migrirajo na daljše razdalje

Vrsta	Dolžina [cm]	Maksimalna hitrost [m/s]	Vzdržljivost [t]
Sulec	60	4,8	60
Mrena	25	2,8	5
Podust	25	2,8	5
Ogrica	20	2,6	3
Ploščič	30	3,2	10
Jez	30	3,2	10
Platnica	20	2,6	3

5 MAMETATIČNO MODELIRANJE TOKA Z DVODIMENZIJSKIM PROGRAMOM PCFLOW2D

5.1 Matematični model

Reševanje toka s prosto gladino se največkrat izvaja na dva načina; s fizičnimi in matematičnimi modeli. Prednost prvih je v tem, da z njimi lahko obravnavamo splošne trodimenzionalne tokove z vsemi geometrijskimi detajli. Vzporedno s prvimi lahko uporabimo verificirane matematične modele, ki so zaradi določenih poenostavitev lahko obravnavani v eni ali dveh dimenzijah, kar bistveno poceni in skrajša naše delo. Na drugi strani pa se je z razvojem računalniške tehnike v zadnjem času uporaba matematičnih modelov zelo razširila, saj je možno z njimi dovolj natančno simulirati tokove, če so ustrezno umerjeni na fizičnih modelih in preverjeni.

5.1.1 Predpostavke

Prikazane enačbe v nadaljevanju bodo upoštevale nekatere predpostavke za tok v dvodimenzionalnem prostoru, s čimer jih bomo poenostavili.

- Tok je približno dvodimenzionalen, zato lahko vertikalno komponento hitrosti zanemarimo. Pri računu uporabljamo globinsko povprečne vrednosti horizontalnih hitrosti $\bar{u}$ in $\bar{v}$ v x oziroma y smeri.
- Porazdelitev tlakov je hidrostatsična
- Izgube energije zaradi trenja ob dno izrazimo z Manningovo empirično enačbo
- Za modeliranje globinsko povprečnih turbulentnih napetosti uporabimo k- ϵ model turbulence

5.2 Osnovne enačbe

Osnovne enačbe za zapis našega matematičnega modela so, ob upoštevanju predpostavk in po integraciji Reynoldsovih enačb, kot jih opisuje Četina (1988), sestavljene iz kontinuitetne in dveh dinamičnih enačb, zapisanih v konservativni obliki.

Kontinuitetna enačba:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (5.1)$$

Dinamična enačba v x smeri:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn^2_g \frac{\bar{u} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h\nu_{ef} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h\nu_{ef} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \quad (5.2)$$

Dinamična enačba v y smeri:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{v}^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn^2_g \frac{\bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h\nu_{ef} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h\nu_{ef} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \quad (5.3)$$

Pomen oznak:

h ... globina vode [m]

$\bar{u}, \bar{v}$... globinsko povprečni komponenti hitrosti v x oziroma y smeri [m/s]

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

t ... čas [s]

g ... težnostni pospešek [m/s^2]

ν_{ef} ... koeficient efektivne viskoznosti [m^2/s]

n_g ... Manningov koeficient hrapavosti

5.2.1 $k - \varepsilon$ model turbulence

Dinamične enačbe so v osnovi zapisane kot Navier – Stokesove enačbe, kot razlaga Četina (1988). Gre za tako imenovane nelinearne parcialne diferencialne enačbe, ki jih lahko ob določenih robnih in začetnih pogojih lahko rešujemo le numerično, ob tem pa smo omejeni na večinoma laminarne tokove in z neko zgornjo mejo Re . Za večje vrednosti Re oziroma za turbulentne tokove, ki se v modelih in v življenju največkrat pojavljajo, nadalje Četina (1988) razlaga, da je treba za reševanje enačb uporabiti statistični pristop. Inženirja v praksi ponavadi zanimajo srednje vrednosti hitrosti toka in tlakov. Za tak pristop velja, da so trenutne vrednosti toka definirane kot vsota povprečnih vrednosti ter pulzacij. Te vsote nato vstavimo v splošne enačbe, ki vsebujejo tudi dinamične Navier – Stokesove enačbe, da dobimo nove enačbe za časovno povprečne vrednosti, znane tudi kot Reynoldsove enačbe. Glavna razlika od prej je edino ta, da zdaj namesto trenutnih vrednosti nastopajo časovno povprečne, poleg pa se pojavijo še dodatni členi zaradi pulzacij, ki predstavljajo dodatne turbulentne napetosti ter poleg tega še členi turbulentne difuzije. Prav ti dodatni členi imajo pri modeliranju pomembno vlogo, ki so nato glavna naloga modelov turbulence.

Za tok v ribji stezi smo uporabili zato standardno obliko modela turbulence imenovano $k - \varepsilon$ model. Spada v skupino modelov, ki za opis turbulentnega gibanja uporabljajo dve dodatni transportni enačbi; transportno enačbo za turbulentno kinetično energijo na enoto mase k in transportno enačbo za disipacijo turbulentne kinetične energije na enoto mase ε . Njegova glavna prednost je uporabnost za široko področje različnih vrst tokov, kar ga zato uvršča med najbolj uporabljane modele turbulence v svetu.

Intenzivnost turbulence, ki jo predstavlja turbulentna kinetična energija, je zapisana z izrazom:

$$k = \frac{1}{2} \sum u_i'^2 \quad (5.4)$$

Disipacija turbulentne kinetične energije

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{Lm} \quad (5.5)$$

Zvezo med koeficientom turbulentne viskoznosti in karakteristikama turbulence $\nu_t = \nu_t(k, \varepsilon)$ dobimo preko Kolmogorov – Prandtlove relacije:

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5.6)$$

kjer je c_μ brezdimenzijski koeficient.

Karakteristiki k in ε se spreminjata od točke do točke in vplivata tudi na vrednosti v sosednjih točkah. Za ta namen potrebujemo transportne enačbe za k in ε :

$$\frac{\partial(h\tilde{k})}{\partial t} + \frac{\partial(h\tilde{u}\tilde{k})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tilde{v}\tilde{k})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\tilde{v}_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\tilde{v}_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial \tilde{k}}{\partial y} \right) + hG - c_D h \tilde{\varepsilon} + hP_{kv} \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial(h\tilde{\varepsilon})}{\partial t} + \frac{\partial(h\tilde{u}\tilde{\varepsilon})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tilde{v}\tilde{\varepsilon})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\tilde{v}_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\tilde{v}_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial y} \right) + c_1 \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} hG - c_2 \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{\tilde{k}} h + hP_{\varepsilon v} \quad (5.8)$$

$\tilde{k}$, $\tilde{\varepsilon}$, $\tilde{v}_{ef}$ niso strogo definirane kot globinsko povprečne vrednosti, zato so označene z vijugo. Vrednosti vseh dodatnih oznak na desni strani enačb so podane v Hamzić (2012), edina dopolnilna relacija, ki je tu še pomembna je zveza:

$$\nu_{ef} = \nu + \nu_t = \nu + c_\mu \frac{\tilde{k}^2}{\tilde{\varepsilon}} \quad (5.9)$$

ν ... dinamični koeficient molekularne viskoznosti

ν_t ... dinamični koeficient turbulentne viskoznosti

5.2.2 Numerična metoda reševanja

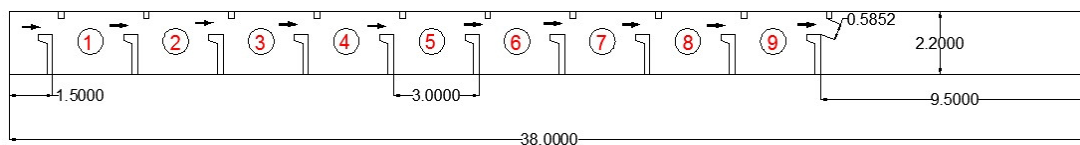
Način reševanja sistema petih parcialnih diferencialnih enačb sta opisala Patankar in Spalding z njuno metodo kontrolnih volumnov, ki je podrobneje opisana v Četina (1988). Osnovne značilnosti te metode so premaknjena numerična mreža, uporaba hibridne sheme (kombinacija centralnodiferenčne in sheme gorvodnih razlik) ter iteracijsko popravljanje polja globin, dokler hitrosti in globine ne zadovoljijo kontinuitetne in dinamičnih enačb. Pri tem upoštevamo kriterij konvergence tako imenovani SORMAX, ki določa največjo dopustno vsoto napak v vseh točkah mreže zaradi neizpolnjenosti kontinuitetne in dinamičnih enačb. Ta je v vseh izvedenih računih znašala 1%.

5.3 Matematični model ribje steze

5.3.1 Opis modela in geometrija

Glavna naloga diplomske naloge je bila preučitev vpliva spreminjanja padca dna bazena ribje steze za različne pretoke. Želeli smo preveriti čim več primerov, da bi lahko prišli do zaključka o najustreznejšem vzdolžnem padcu. Osnovni vzdolžni padec ribje steze HE Arto Blanca je 5 cm na bazen (1,67 %), nas pa je zanimalo kaj se dogaja z izrazitejšim povečevanjem, zato smo izbrali primere s padci 10 (3,33 %), 15 (5 %), 20 (6,67 %) in 25 cm (8,33 %) padca na bazen. Pri vsakem padcu so bili izračunani primeri za različne pretoke in sicer za 600, 800, 1200, 1600 in 2000 l/s.

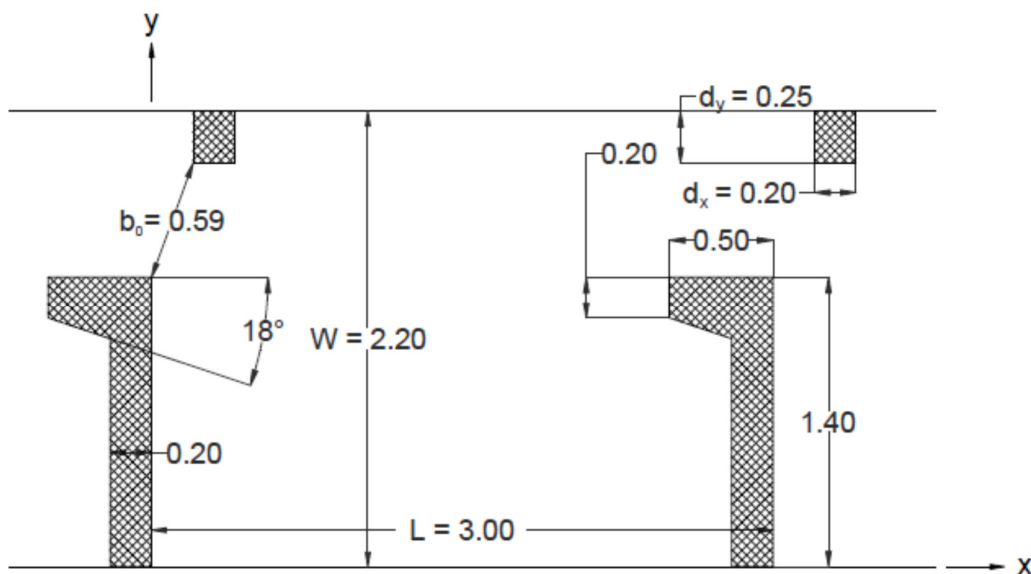
Geometrija je bila izbrana na podlagi preteklih izračunov (Bombač, osebna komunikacija, 2014), da bi za osrednji kontrolni bazen številka 5 dobil čim bolj stabilne pogoje nad in pod njem, torej čim večje ujemanje globin sosednjih bazenov, s čimer bi lahko zagotovili točnost rezultatov. Izkazalo se je namreč, da s povečanjem števila bazenov nad in pod njim bistveno izboljšamo kakovost, saj moramo doseči, da spuščena voda iz vtočnega profila iz leve gorvodne smeri ter iztok v spodnji bazen, ne prenašata svojega vpliva v kontrolni volumen. Tako smo vpeljali model z 9 bazeni in dvema umirjevalnima bazenoma, zgornji manjši in spodnji podaljšani.



Slika 18: Shema ribje steze v matematičnem modelu (vse dimenzije v metrih)

Celotni računski model (slika 18) je dolg 38,0 m in je razdeljen na 9 prekatov z dolžino 3,0 m in širino 2,2 m. Poleg njih sta dodana še vtočni in iztočni bazen z dolžinama 1,5 m in 9,5 m. Pomemben je predvsem zadnji, ki prav zaradi svoje dimenzije skrbi, da se račun korektno izvede. Bazeni so ločeni med seboj z dvema prečnima rebroma glede na tok (Slika 19), ki s svojo postavitvijo poskrbita za ugodno usmeritev toka, da ne pride do mešanja po celotnem volumnu bazena. Manjša stena je postavljena dolvodno od večje, ta pa ima na svoji gorvodni strani še dodatno odebelitev v obliki zoba širine 0,5 m, kar še dodatno izboljša pretočne tokovne razmere s preusmeritvijo dela toka nazaj v obliki protitoka. Reža med bazeni je postavljena poševno na vzdolžno os in je široka 0,59 m.

Uporabljena numerična mreža za tovrstne izračune je bila izbrana na podlagi vnaprejšnjih priporočil, da daje dosti natančne rezultate tudi v primerjavi z gostejšimi in je razdeljena v vzdolžni smeri s koraki po $\Delta x = 2$ cm ter v prečni smeri $\Delta y = 1$ cm. Dobljena mreža je tako velika $1902 \times 222 = 422244$ računskih točk, če upoštevamo še robne točke širine ene celice po celotnem zunanem obsegu numerične mreže. Za primer vpliva numerične mreže sem uporabil primerjavo med opisano numerično mrežo in pa gostejšo numerično mrežo velikosti 1×1 cm.



Slika 19: Detajlne kote vertikalne reže ribje steze

Za zagotovitev numerične stabilnosti in konvergence smo nastavili časovni korak računa $\Delta t = 0,1$ s. Bombač (2014) sicer omenja, da se je do zelo dobrih rezultatov dalo priti že pri večjih časovnih korakih med 1 in 2 s, vendar je bil zaradi primerljivosti rezultatov raje bila izbran le en časovni korak za vse izračune. Znotraj enega časovnega koraka se nastavi še maksimalno število iteracij, ki je bilo 60, dovoljena relativna napaka pa kot že omenjeno nastavljena na 1 %. Računi so bili izvedeni do končnega časa 3600 s, čeprav je bila končna rešitev zaradi vzpostavitve stalnega toka znana že prej, torej ko je

račun začel konvergirati k eni rešitvi in je za vsak časovni korak potrebna samo še ena iteracija. V povprečju se je to zgodilo že po približno tretjini celotnega časa.

5.3.2 Začetni in robni pogoji

Zgornji robni pogoj smo podali v obliki konstantnega pretoka po celotni širini steze za vseh pet primerov pretokov od 600 do 2000 l/s. Na tem robu smo zato predpisali enakomerno vzdolžno hitrost u ter pogoj, da je prečna hitrost v enaka 0. Spodnji robni pogoj nam podaja pretočna krivulja, ki je podana iteracijsko, in sicer tako, da je bila dosežena enaka globina vode v srednji treh prekatih ribje steze.

Robni pogoji ob bočnih stenah podaja predpis, prečna hitrost v enaka 0, razporeditev vzdolžne hitrosti ob steni, pa je za model turbulence $k - \varepsilon$ opisoval logaritemski zakon.

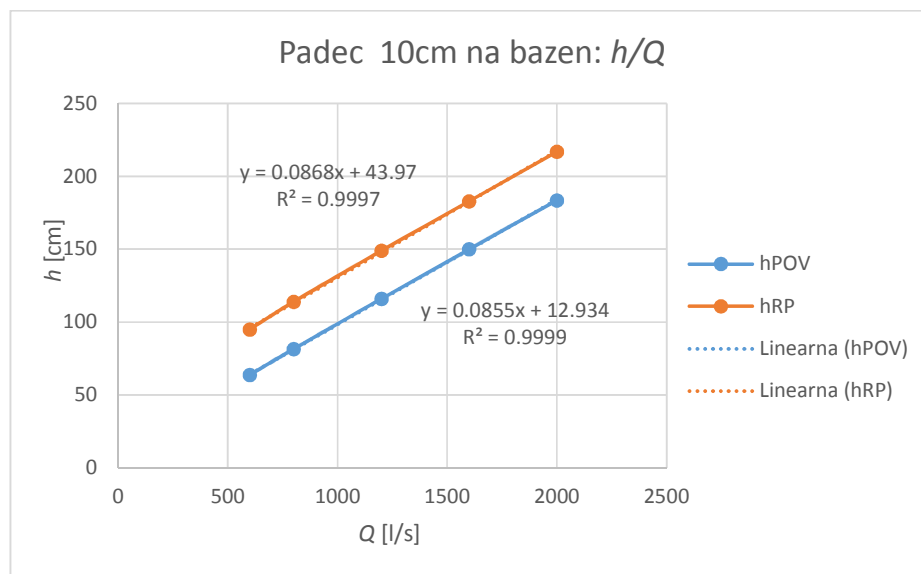
Manningov koeficient hrapavosti je bil za vse primere $n_g = 0,030 \text{ sm}^{-1/3}$. Izhaja iz raziskav (Bombač, 2014) na fizičnem modelu, ki potrjujejo, da zmanjševanje koeficienta (pri poskusih za $n_g = 0,020 \text{ sm}^{-1/3}$ oziroma $n_g = 0,010 \text{ sm}^{-1/3}$) nima večjega vpliva na točnost rezultatov. Vzdolžne komponente hitrosti so med 2 in 7 % nižje v matici toka za $n_g = 0,030 \text{ sm}^{-1/3}$, v območju povratnega toka pa so vrednosti praktično enake.

6 REZULTATI MATEMATIČNIH MODELOV

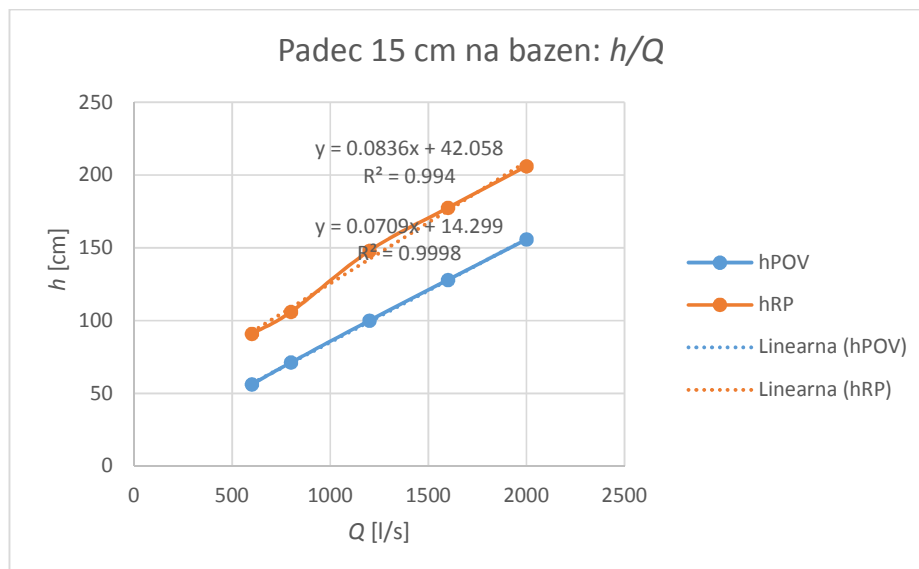
6.1 Pregled računov za različne pretoke in padce dna

V osnovnem načrtu je bilo za diplomsko nalogo predvideno poiskati relacije med pretokom in globino vode za vsak primer padca na bazen posebej. Točke (zveze) so predstavljene na spodnjih grafih (slike 20–23) za vsak vzdolžen padec posebej in povezane v krivuljo, ki se najbolj prilega, tako za globino na spodnjem robnem pogoju na iztoku iz modela (oznaka h_{RP}), kot za povprečne globine v osrednjem bazenu (h_{POV}). Vidimo, da se da vse krivulje zapisati s trendno linijo v obliki premice, ki ima za vse primere odlično ujemanje rezultatov, R^2 je praktično povsod blizu 1. Gre za ugodno lastnost ribje steze z vertikalno režo v območju delovanja pri različnih višinah vode, kjer lahko hitro napovemo pretoke in globine v bazenih že takrat, ko poznamo dve različni meritvi pretoka s pripadajočima globinama vode. Tako ugotovitev je dalo že več raziskovalcev, med katerimi izpostavljamo avtorja Wu et al. (1999).

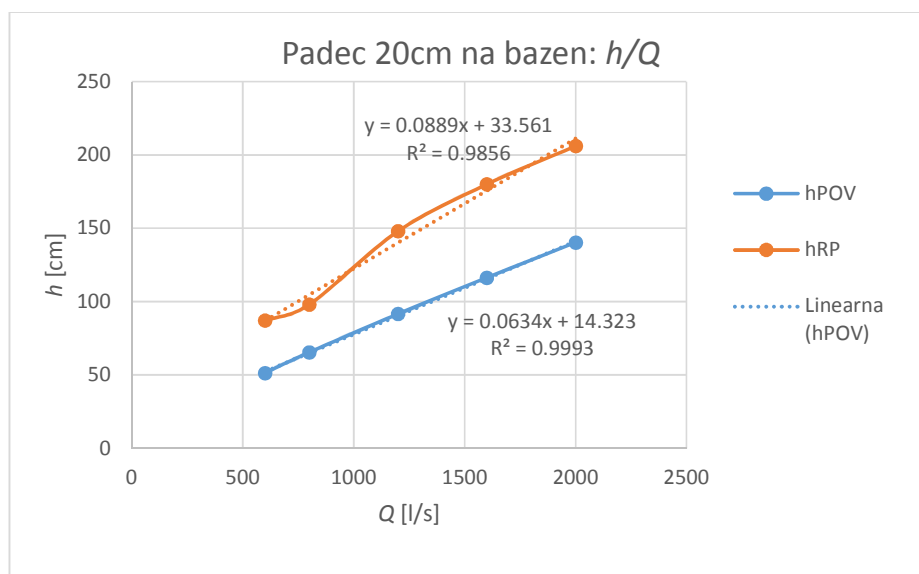
Premica, ki podaja globino vode na robnem pogoju na iztoku ima za vse štiri padce približno enak naklon, drugače pa se obnaša premica globine vode, pri kateri se z naraščanjem padca dna naklon manjša (slike 20–23).



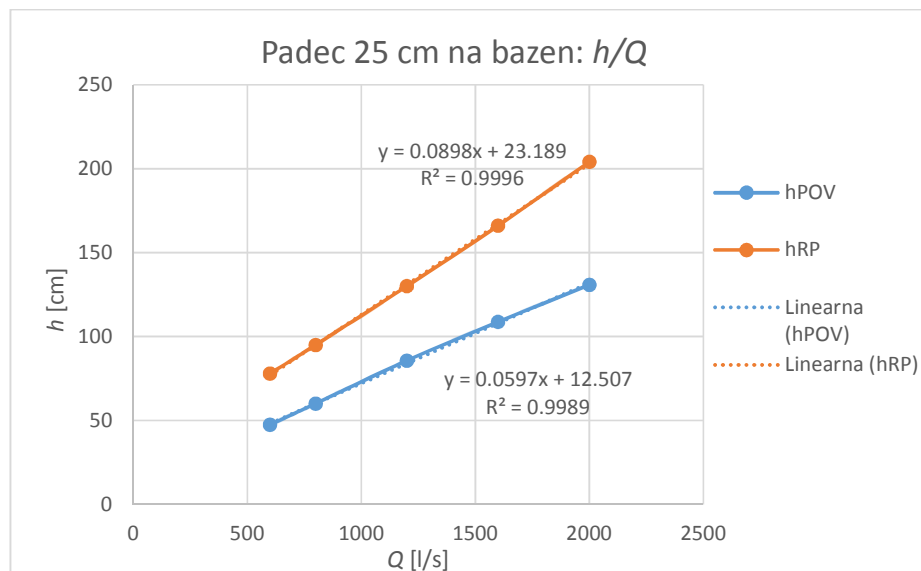
Slika 20: Odvisnost h_{RP} in h_{POV} od pretoka za padec dna 10 cm na bazen



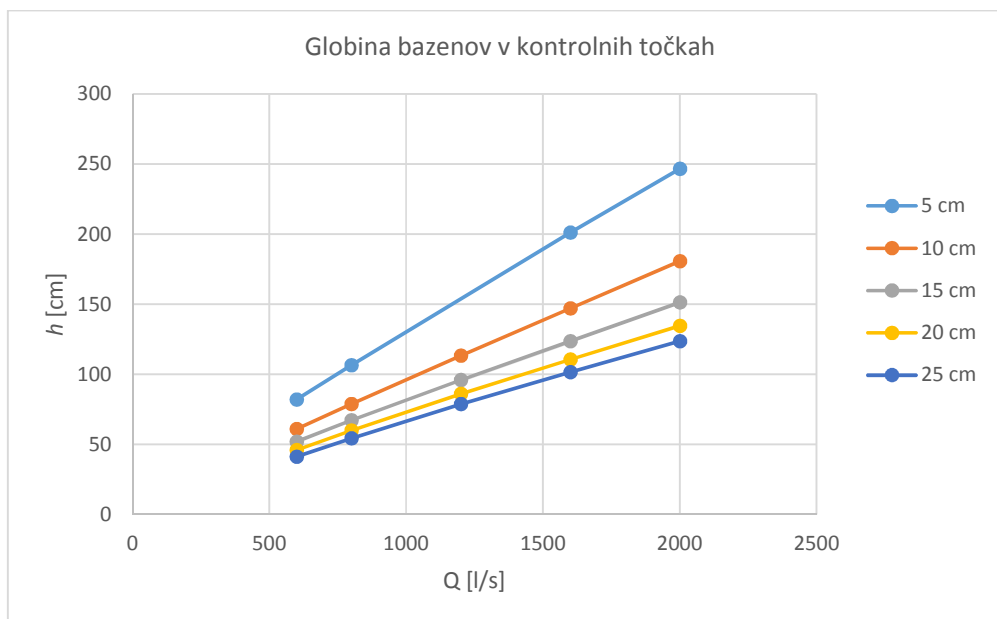
Slika 21: Odvisnost h_{RP} in h_{POV} od pretoka za padec dna 15 cm na bazen



Slika 22: Odvisnost h_{RP} in h_{POV} od pretoka za padec dna 20 cm na bazen

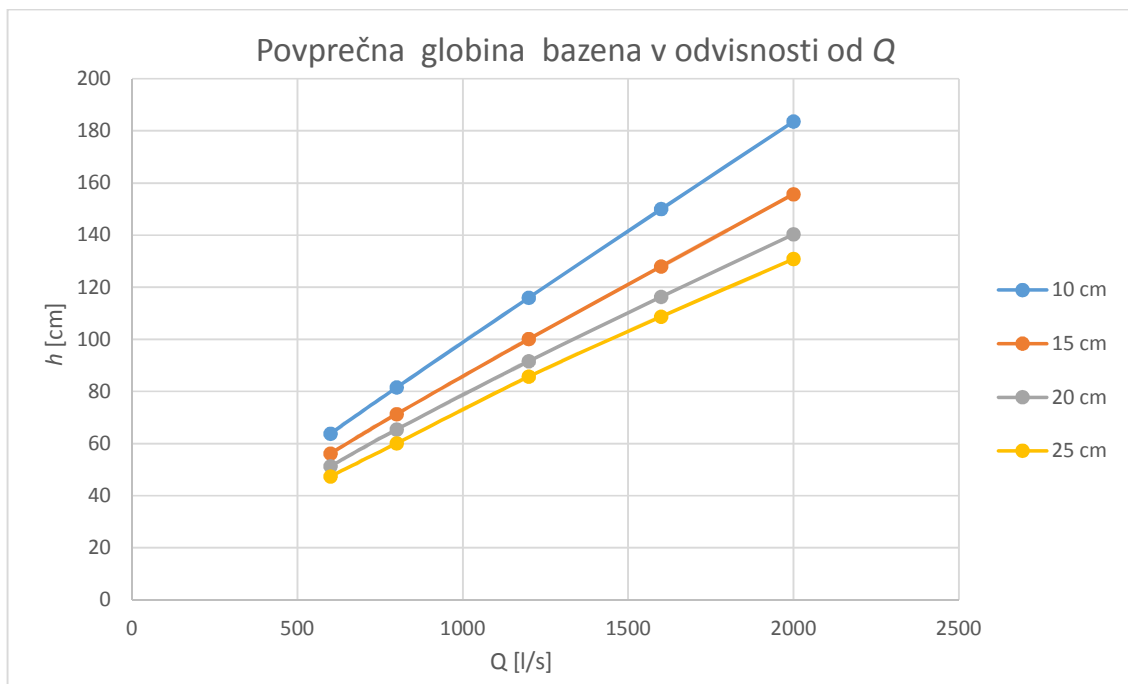
Slika 23: Odvisnost h_{RP} in h_{POV} od pretoka za padec dna 25 cm na bazen

Za primerjavo sem izvedel še izris grafa kontrolnih točk (slika 24) osrednjega bazena v primerjavi s primerom padca dna za 5 cm, ki jih je preverjal dr. Bombač zunaj okvira doktorske disertacije z enako numerično mrežo kot pri svojih primerih (Bombač, osebna komunikacija, 2014). Točke so ležale v umirjenem toku osrednjega bazena pod večjim rebrom. V medsebojni primerjavi teh točk se vidi prej zapisana opazka o zmernejšem naraščanju globin s povečevanjem padca dna bazena. Bolj strmi kot so ti padci, tem manjše so razlike med njimi. Kontrolni primer vzdolžnega padca 5 cm že bistveno odstopa od večine.



Slika 24: Primerjava globin bazenov v kontrolnih točkah po padcih na bazen

Na Sliki 25 so še enkrat zbrane vse zveze povprečnih globin za vse štiri primere vzdolžnih padcev. V **Prilogi A** je podana jasnejša slika teh zvez vključno s pripadajočimi enačbami trendnih črt.

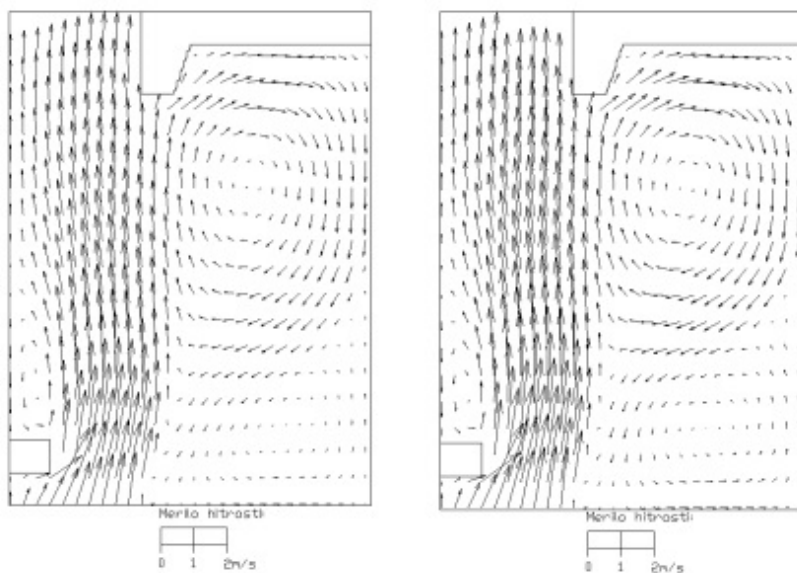


Slika 25: Povprečna globina bazena v odvisnosti od pretoka po padcih na bazen

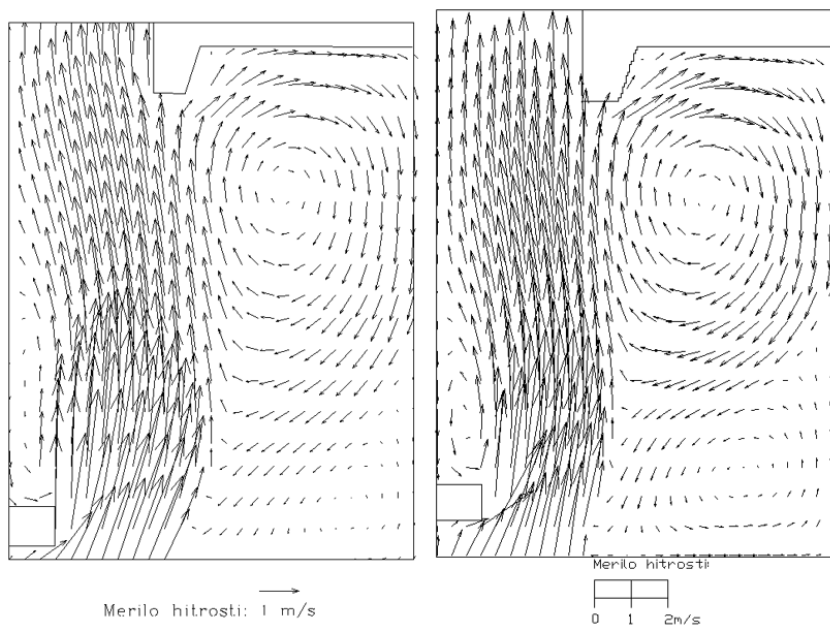
6.2 Primerjava hitrosti za različne pretoke in vzdolžne padce dna

V nadaljevanju analize rezultatov smo iz izhodnih datotek programa PCFLOW2D izrisali vektorsko polje hitrosti. Da se izognemo nepreglednosti zaradi goste numerične mreže, smo izrisali samo vsak osmi vektor v prečni in šestnajsti v vzdolžni smeri. Tako še vedno dobimo dovolj natančno sliko o značilnosti poteka toka ribje steze, obenem pa lahko še brez težav ocenimo velikost posameznega vektorja, ker se sosednje izrisane točke ne prekrivajo. Na slikah 26 in 27 so predstavljeni samo štirje skrajni primeri pretokov in vzdolžnih padcev dna, iz katerih lahko vidimo, da je usmeritev vektorjev hitrosti za vse primere približno enaka (**Priloga B**). Spreminja se le velikost hitrosti s povečanjem pretoka oziroma padca dna. Tok se pri prehodu skozi režo v prečnih stenah bazena takoj usmeri proti iztoku k naslednji reži in poteka praktično vzporedno z vzdolžno steno. Zaradi malega rebra postavljenega dolvodno od večjega, se tok na njegovem ostrem robu usmeri stran od sosednje vzdolžne stene zaradi odlepljanja od roba področja manjšega povratnega toka v nasprotni smeri urinega kazalca z nizkimi hitrostmi. Podoben tok se ustvari pod večjim rebrom ribje steze. Ta ima na svojem delu, obrnjenem proti toku, oblikovan nekakšen zob, ki poskrbi da del toka s povišanimi hitrostmi tik pred vstopom v spodnjo režo odvede nazaj proti toku v smeri urnega kazalca. Tok zaobide celotno stran širokega rebra in se ob desni steni usmeri gorvodno. Nato potuje nekje do polovice dolžine steze bazena in se razcepi na dva dela. Osnovni del z malo višjimi hitrostmi nadaljuje svojo pot v enaki smeri kot prej, v smeri urnega kazalca, drugi del pa se z zmanjšano hitrostjo usmeri proti gorvodni vertikalni reži. V njeni bližini zaradi visokih hitrosti vstopajočega curka spremeni smer in se usmeri desno ob široko rebro, kjer zaokroži v obratni smeri urinega kazalca.

V **Prilogi B** so poleg vektorjev hitrosti vključene še tokovnice po primerih, v katerih lahko prejšnje trditve še enkrat preverimo, o razporeditvi toka po bazenu ribje steze, z jasnimi ključnimi elementi, kot so glavni tok in vsi povratni tokovi ob straneh steze.



Slika 26: Razporeditev vektorjev hitrosti po stezi za pretok 600 l/s (levo) in 2000 l/s (desno) pri padcu 10 cm na bazen



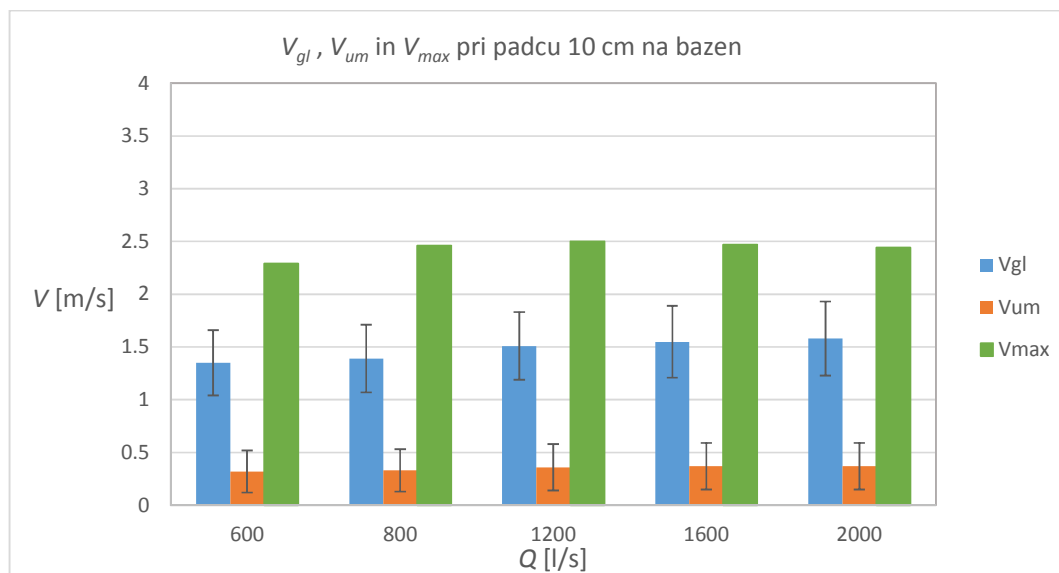
Slika 27: Razporeditev vektorjev hitrosti po stezi za pretok 600 l/s (levo) in 2000 l/s (desno) pri padcu 25 cm na bazen

Poleg prikaza razporeditve izotah hitrosti po prostoru (plastnic hitrosti z enakimi barvami), ki so v nadaljevanju, je za konkretnjšo sliko dogajanja najprej bolje preučiti vsak posamezen primer grafično. Primerjava je za vsak primer potekala z mislijo na razporeditev hitrosti v stezi, ki je izrazito razdvojena med hitrejšim tokom direktno med sosednjima režama in pa umirjenimi povratnim tokom poleg rež med večjima oziroma manjšima rebroma. Na grafu (slike 28–31) je tako prikazana povprečna hitrost v glavnem toku (V_{gl}) s standardnim odklonom ter enako povprečna hitrost umirjenega dela (V_{um}). Zraven je izrisana še maksimalna hitrost v celotnem bazenu.

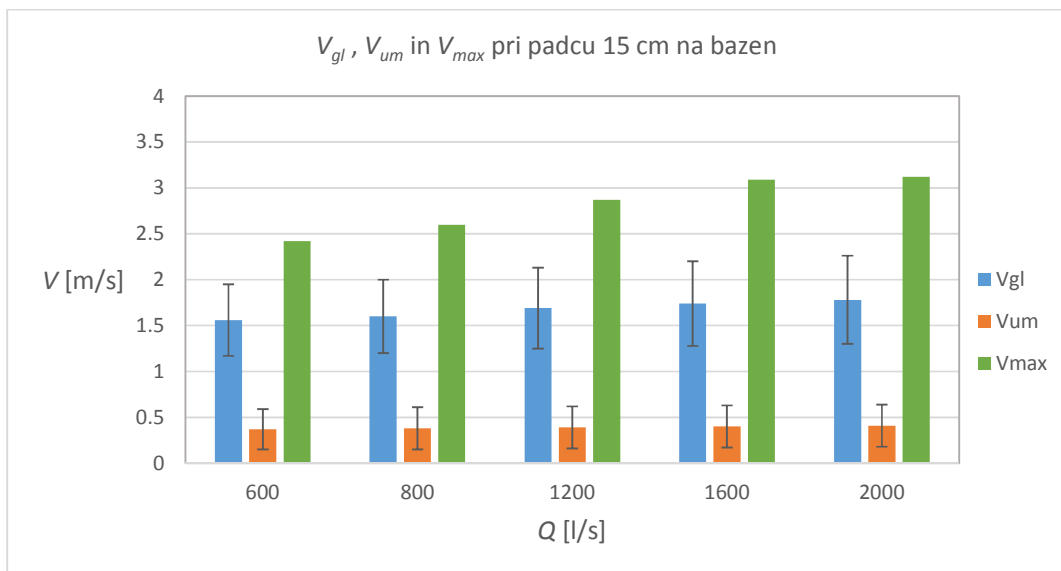
Opazimo lahko veliko razliko med tema dvema območjema, velikosti hitrosti se razlikujeta za faktor 4 za vse primere. Povprečne hitrosti umirjenega dela so povsod dokaj podobne velikosti, enako velja za

odstopanja, povprečna vrednost se nikoli ne dvigne nad 0,5 m/s. Pri najmanjšem padcu se vrednosti gibljejo od 0,32 do 0,37 m/s, za največji padec pa je interval povprečnih hitrosti od 0,4 do 0,44 m/s. Opaznejša je razlika povprečnih hitrosti v glavnem toku in ta vztrajno narašča z večanjem pretoka oziroma padca. Za padec 10 cm so hitrosti pri pretoku 600 l/s od 1,35 m/s do 1,58 m/s pri največjem pretoku 2000 l/s, pri padcu 15 cm med bazeni sta vrednosti med 1,56 in 1,78 m/s, padec 20 cm med 1,7 in 1,9 m/s, ter za padec z 25 cm na bazen 1,83 do 1,97 m/s. Na osnovi medsebojnih primerjav lahko zaključimo, da se s povečevanjem vzdolžnega padca razlike med povprečnimi hitrostmi v glavnem toku zmanjšujejo. Obratno lahko trdimo za standardni odklon, ki z večanjem padca narašča. Razlike standardnih odklonov so pri primerjavi pretokov med 600 in 2000 l/s pri 10 cm padcu na bazen 0,04 m/s, pri 15 cm 0,09 m/s, pri 20 cm 0,13 m/s in za 25 cm 0,14 m/s.

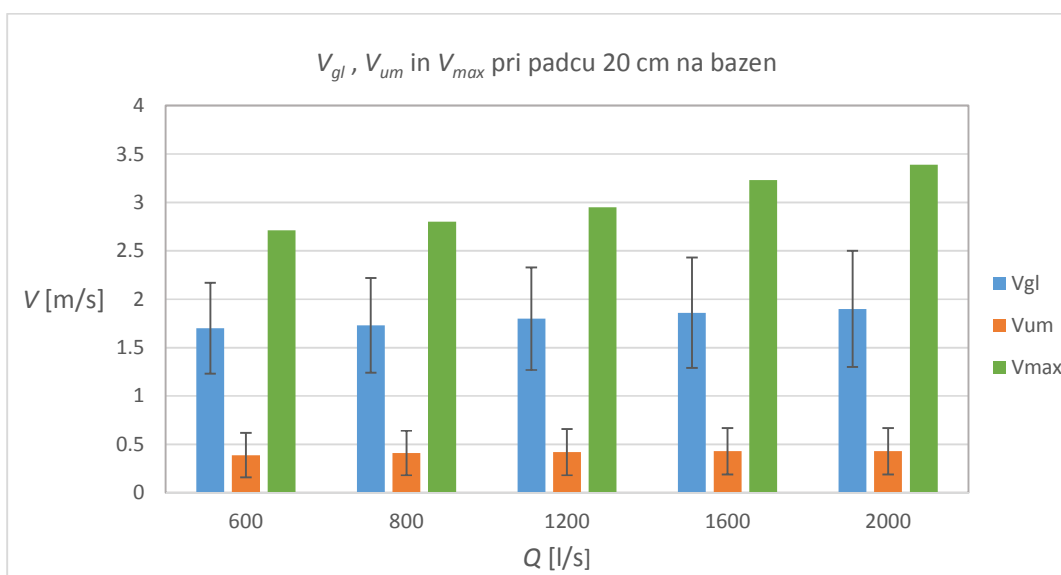
Omeniti velja še maksimalne hitrosti pri različnih pretokih, ki so za najmanjši padec 10 cm še razmeroma konstantne od 2,29 do 2,5 m/s, za nadaljnje padce pa velja trend naraščanja. Razlike so največje za padec 20 cm, in sicer med 2,71 in 3,39 m/s pri pretokih med 600 in 2000 L/s, malo nižje za padec 15 cm med 2,42 in 3,12 m/s. Nižje razlike med pretoki so za 25 cm padec, kjer so hitrosti med 2,95 ($Q = 600 \text{ l/s}$) in 3,49 m/s ($Q = 2000 \text{ l/s}$).



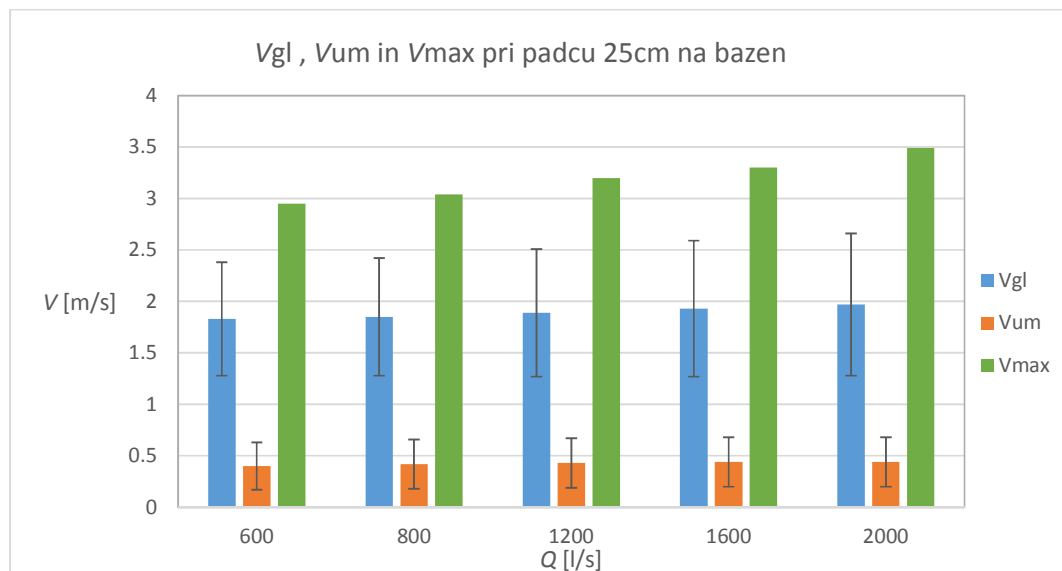
Slika 28: Srednja (modra) hitrost v glavnem toku, srednja hitrost v umirjenem toku (oranžna) s standardnimi odkloni ter maksimalna hitrost (zelena) v ribji stezi pri padcu 10 cm na bazen.



Slika 29: Srednja (modra) hitrost v glavnem toku, srednja hitrost v umirjenem toku (oranžna) s standardnimi odkloni ter maksimalna hitrost (zelena) v ribji stezi pri padcu 15 cm na bazen.



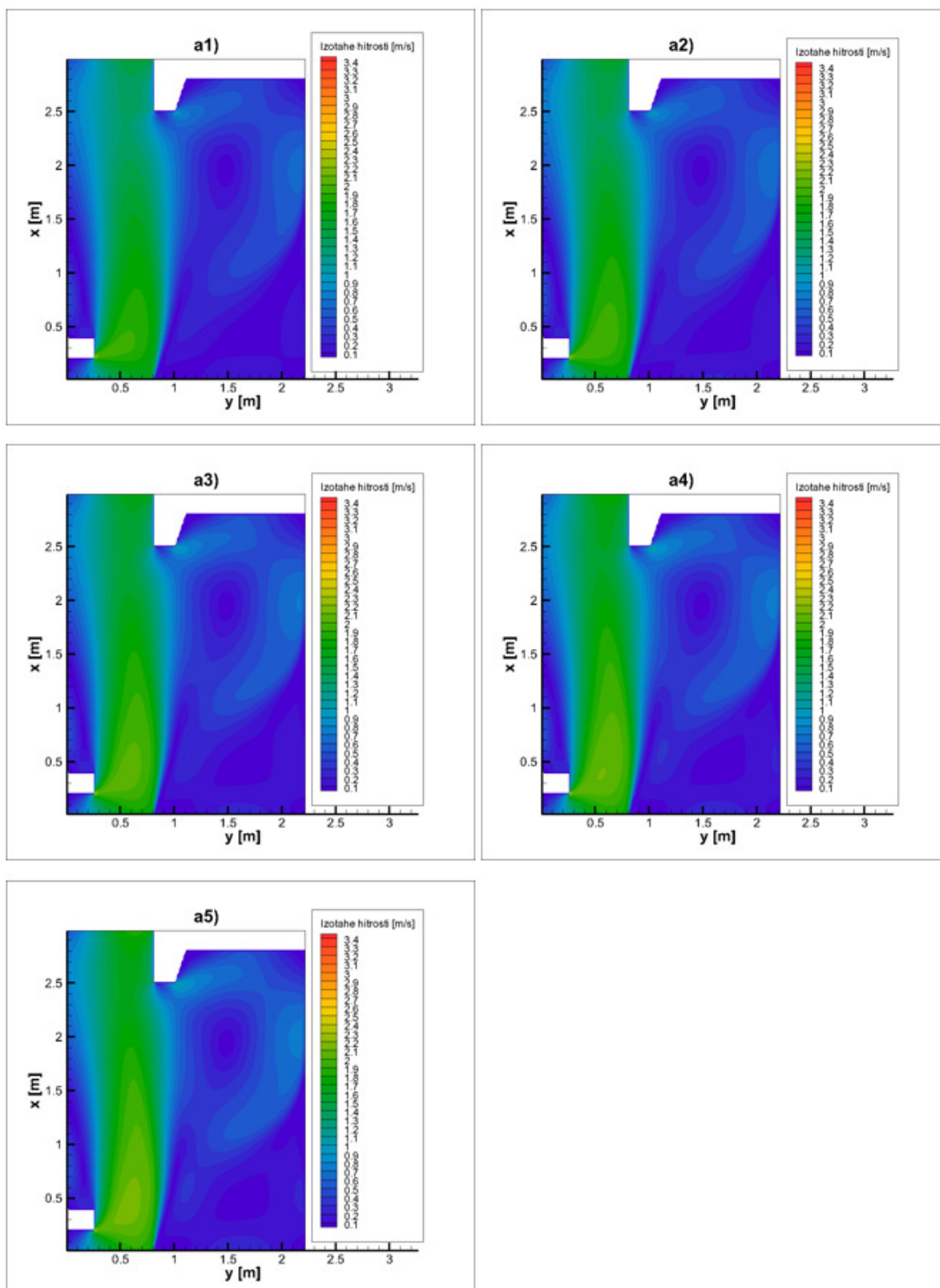
Slika 30: Srednja (modra) hitrost v glavnem toku, srednja hitrost v umirjenem toku (oranžna) s standardnimi odkloni ter maksimalna hitrost (zelena) v ribji stezi pri padcu 20 cm na bazen.



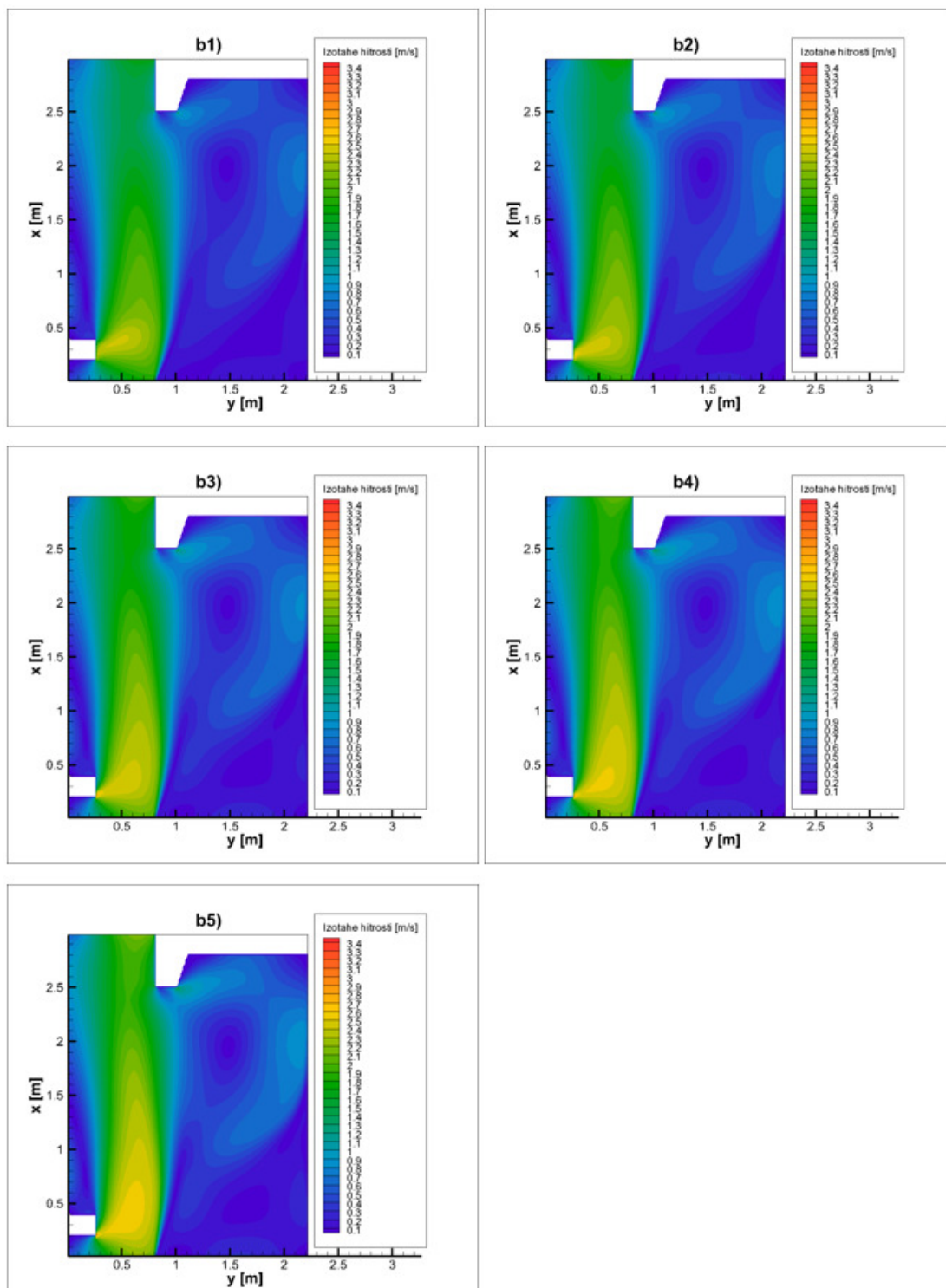
Slika 31: Srednja (modra) hitrost v glavnem toku, srednja hitrost v umirjenem toku (oranžna) s standardnimi odkloni ter maksimalna hitrost (zeleni) v ribji stezi pri padcu 25 cm na bazen.

Razporeditev hitrosti je nato predstavljena še s sliko izotah, plastnic hitrosti z enakimi barvami, za vsak primer posebej (slike 32–35). Vidi se konstantnost hitrosti v umirjenem delu bazena, ki pa se v njegovem spodnjem delu ob večjem rebro začnejo rahlo povečevati s večanjem naklona. Gre za stranski tok, odcepljen od glavnega na mestu proti toku obrnjenega zoba na večjem rebro, ki se v protitoku odbije od desne stranske stene v sourni smeri in se nato nekje na polovici dolžine bazena spet obrne nazaj v smer glavnega toka. Del protitoka nadaljuje pot k reži in nato zaokroži v obratni smeri urnega kazalca pod zgornjim večjim rebrom. Hitrosti so praviloma v zgornjem protitoku veliko nižje v primerjavi s spodnjim in se ne spreminjajo dosti niti pri največjih padcih dna. Večinoma so reda velikosti med 0,2 in 0,3 m/s, na robu s spodnjim sournim vrtincem pa znašajo do 0,5 m/s. Spodnji protitok ima razen stoječega jedra veliko večje hitrosti. Te narastejo za največje padce do okoli 1 m/s.

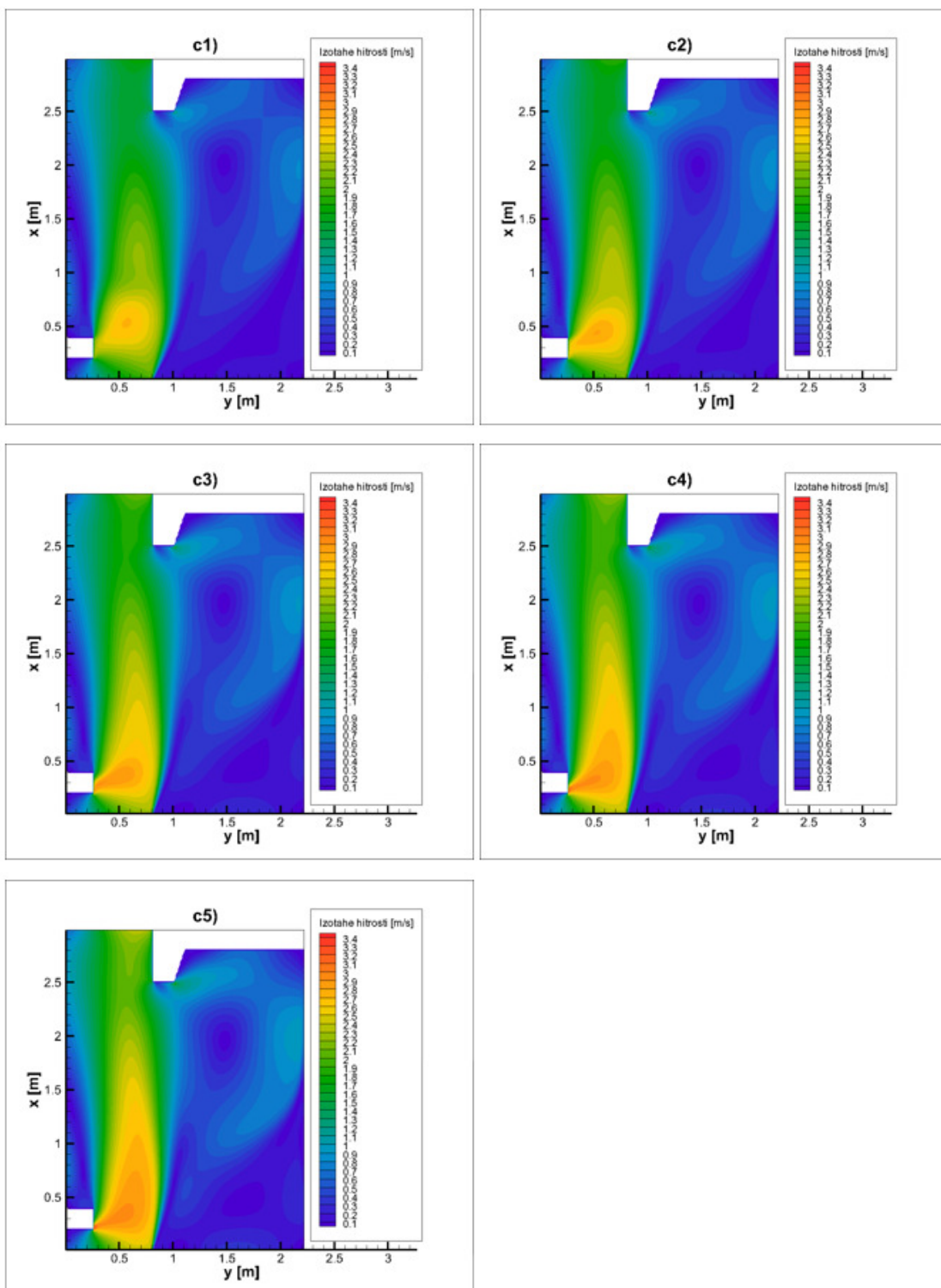
Hitrosti v glavnem toku so pri vsakem primeru posebej konstantne, ko se curek toka skozi režo umiri v spodnjem delu bazena. Razlika je le v obliki manjšega polja višjih hitrosti ob vtoku v bazen mimo manjše prekatne stene na levi strani. Gre za polje lokalnega hitrega povečanja hitrosti zaradi ostrega padca gladine med sosednjima bazenoma, ki se začne zmerno povečevati ob strmejših naklonih. Od padca 15 cm na bazen in navzgor opazimo, da se to polje povišanih hitrosti vztrajno pomika proti polovici dolžine ribje steze, kjer se šele začne umirjati in nato povsem umiriti pri iztoku v naslednji bazen, kot je to vidno na zgornjem levem robu slik 32–35. Pri največjem obravnavanem padcu dna se to zgodi celo tik pred začetkom desne večje prekatne stene z zobom, tako da lahko zaključimo, da se višek hitrosti ne prenašajo iz zgornjih bazenov na spodnje. S tem je tudi dosežen namen ribje steze, da se vsa dovedena energija iz zgornjega bazena disipira pred iztokom dolvodno.



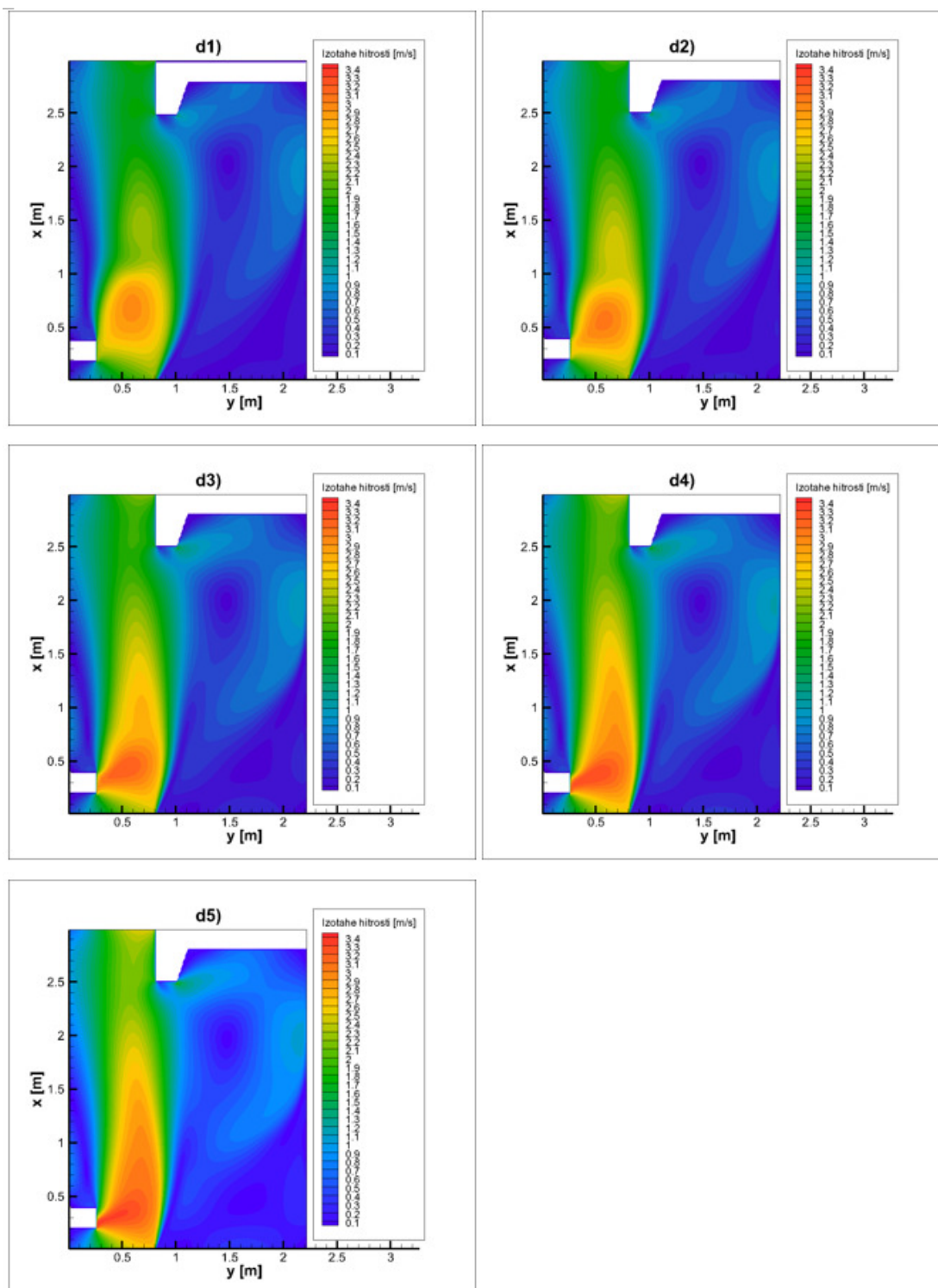
Slika 32: Izotahe hitrosti za padec 10 cm pri a1) 600 l/s, a2) 800 l/s, a3) 1200 l/s, a4) 1600 l/s in a5) 2000 l/s



Slika 33: Izotahe hitrosti za padec 15 cm pri b1) 600 l/s, b2) 800 l/s, b3) 1200 l/s, b4) 1600 l/s in b5) 2000 l/s



Slika 34: Izotahe hitrosti za padec 20 cm pri c1) 600 l/s, c2) 800 l/s, c3) 1200 l/s, c4) 1600 l/s in c5) 2000 l/s



Slika 35: Izotahe hitrosti za padec 25 cm pri d1) 600 l/s, d2) 800 l/s, d3) 1200 l/s, d4) 1600 l/s in d5) 2000 l/s

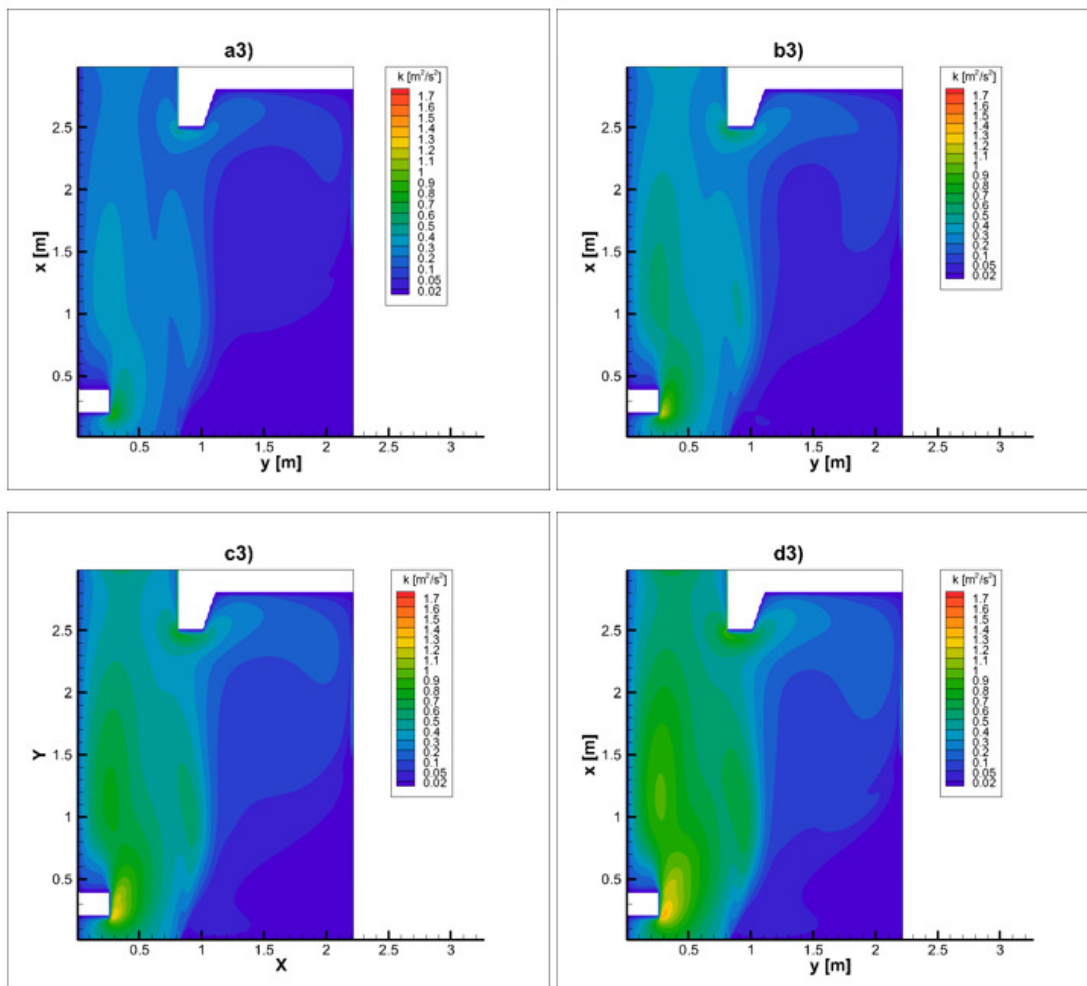
6.3 Turbulentna kinetična energija na enoto mase (k) in njena disipacija (ε)

Razlog, da smo pri izračunih uporabili k - ε model turbulence, je predvsem ta, da nas poleg hitrosti za oceno biološke učinkovitosti ribje steze zanima tudi dobra simulacija turbulence. Hitrosti sama po sebi

še ni pokazatelj na to, da bo ribja steza prehodna. Če je turbulentna v ribji stezi prevelika, lahko to moti ribe in jih utruja do te mere, da je prečkanje neuspešno ali upočasnjeno. Zato smo za prikaz območij s povečano stopnjo turbulence preučili še karakteristiki k in ε , ki nam jih omogoča matematični model z dvema transportnima enačbama, ki opisujeta ta model turbulence. Na sliki 36 so prikazani koeficienti turbulentne kinetične energije na enoto mase k , za primere vseh štirih padcev pri pretoku 1200 l/s.

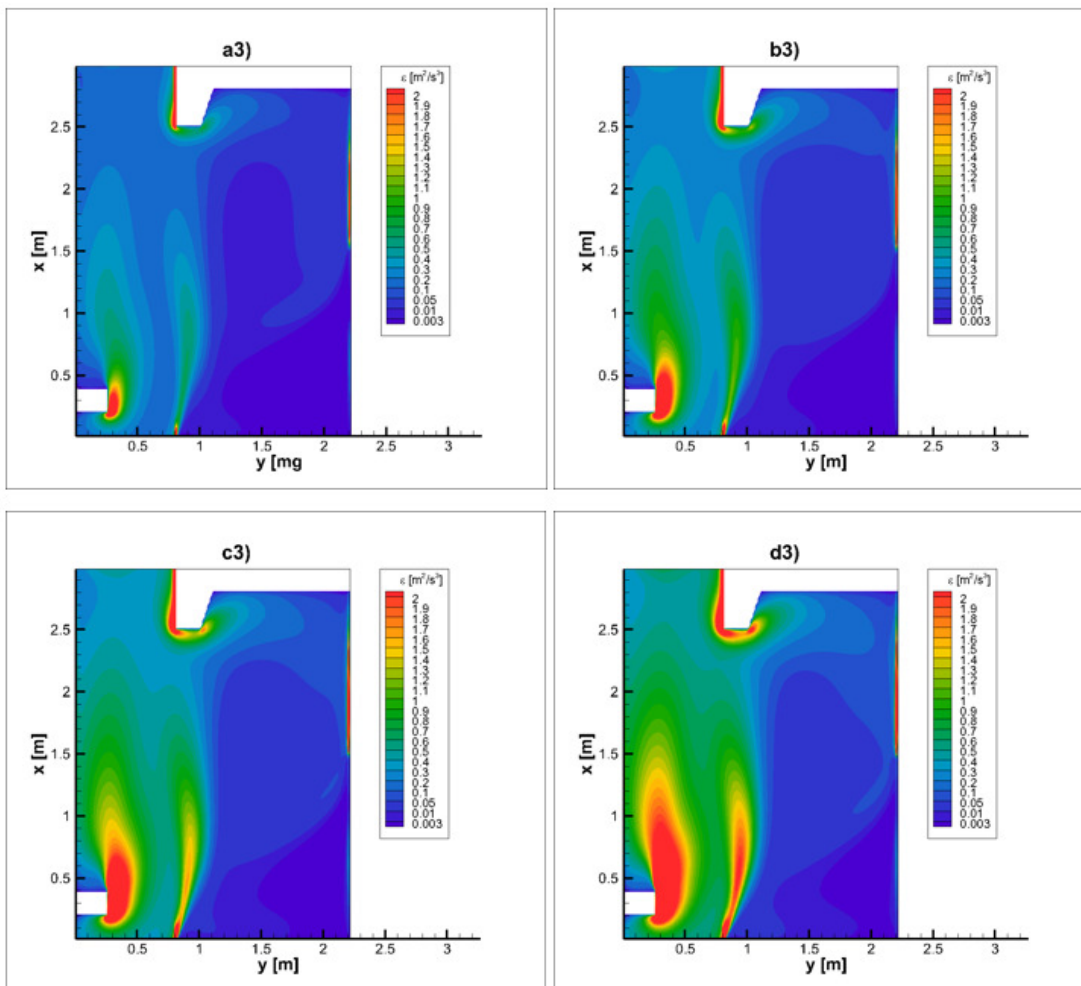
Razlog, da smo prikazali vrednosti samo za en pretok, je v opazanju, ki ga je v svoji analizi obravnaval že Rodriguez et al. (2004). Dejansko gre v ribji stezi za dvodimenzionalni tok, ki prav zaradi tega določa linearno zvezo med globino in pretokom. Ker pa v navpični smeri ni bistvenega mešanja toka, vsak prirastek toka v bazen ribje steze pomeni samo dodatno plast višine vode nad prvotno gladino. V tej se turbulentna energija približno neodvisno disipira, kar pomeni, da disipacija energije glede na enoto pretoka ostaja vseskozi konstantna in da pretok ni merilo za stopnjo disipacije. Edina odvisna spremenljivka v našem primeru je vzdolžni padec. Wu et al. (1999) celo podaja enačbo za izračun stopnje disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna za svoje dimenzije ribje steze, ki se poleg padca spreminja še s širino reže.

Dobimo štiri tipične primere za stopnjo turbulence (Slika 36), ki na prvi pogled spominja na približno razporeditev hitrosti (ostali rezultati so v **Prilogi C**). Imamo dve izraziti področji glavnega in stranskega toka z recirkulacijo, ki se za vse štiri primere ločita z ostro mejo pri vrednosti $0,15 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Glavni tok je na vtoku ob manjšem rebro izpostavljen visokim vrednostim k glede na vrednosti v sredini bazena in proti dolvodnemu iztoku. Polje višjih vrednosti od reže proti sredini bazena naprej se nato ne razširja enakomerno, opaziti je večje vrednosti poteka po levi strani glavnega toka v primerjavi z desnim, ki sega do približno polovice širine bazena. Omenjena razslojenost se nato širi prav do spodnje reže, kjer se vrednosti izenačijo. Višje kot na iztoku so vrednosti v neposredni bližini zoba večjega rebra, kjer se del nato širi še v povratni tok v smeri urnega kazalca. Tu lahko jasno vidimo, kako se energija ob bližini desne stene disipira in so vrednosti k močno zmanjšane v primerjavi z začetno vrednostjo na vtočnem delu rebra. Povprečne vrednosti k v glavnem toku so po padcih v zaporedju od 10 cm, 15 cm, 20 cm in 25 cm sledeče: $0,25 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $0,35 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $0,45 \text{ m}^2/\text{s}^2$ in $0,54 \text{ m}^2/\text{s}^2$. V povratnem toku so podobno kot pri hitrostih, ki se malo spreminjajo, tudi vrednosti k zelo podobne od $0,04$ do $0,06 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

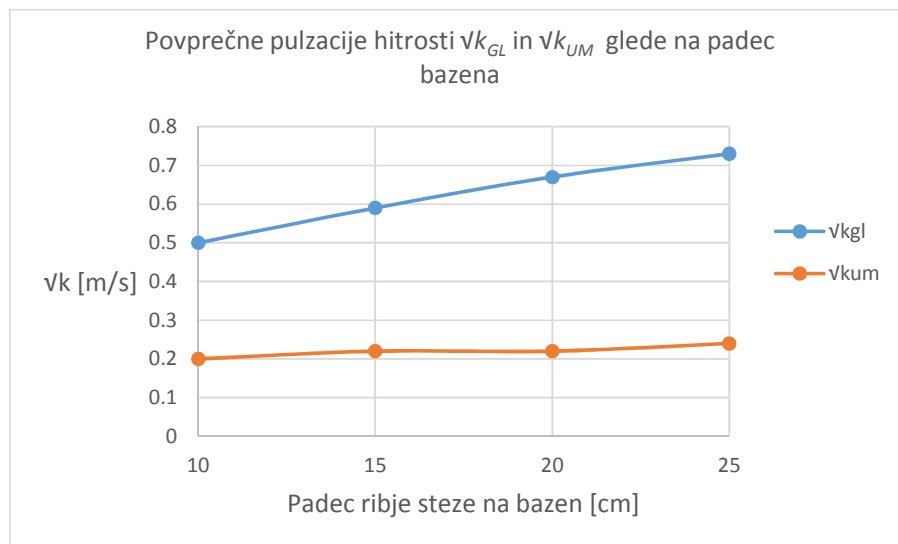


Slika 36: Razporeditev k pri pretoku 1200 l/s za padce a3) 10 cm, b3) 15 cm, c3) 20 cm, d3) 25 cm

Za ribe je še bolj kot turbulentna kinetična energija na enoto mase k pomembnejša stopnja disipacije turbulentne kinetične energije na enoto mase ε . Velike vrednosti ε bodo onemogočile ribam prečkanje ali jih bodo popolnoma odvrnile od poskušanja. Prikazani so rezultati (slika 37) za štiri enake primere kot pred tem za k , enako so vrednosti ε podane samo v odvisnosti od vzdolžnega padca. Povsod so prisotna štiri področja povečane disipacije energije: na ostrih robovih malega in velikega rebra, okoli zoba velikega rebra in v spodnjem povratnem toku ob desni stranski steni. Kot je običajno tudi pri drugih karakteristikah toka so najvišje vrednosti skoncentrirane na ostrem robu manjšega rebra in se dokaj hitro širijo s povečevanjem padca proti polovici bazena na levi strani, podobno, kot smo videli za vrednost k . Disipacija od roba večjega rebra se širi po samem robu med glavnim in umirjenim tokom prav tako nekje do polovice bazena. Na sredini vtočne reže in nato naprej po sredi glavnega toka se vije polje nižje disipacije v primerjavi s prejšnjima dvema in je podobno vrednosti, ki je dosežena za glavni tok na dnu bazena pred iztokom skozi spodnjo režo. Posebej velja omeniti še polje disipacije ob desni steni v povratnem toku. Očitno se tu disipira veliko turbulentne energije, kot smo videli že na primerih izotah za k , kjer vrednosti v tem območju zaradi disipacije posledično hitro upadejo.

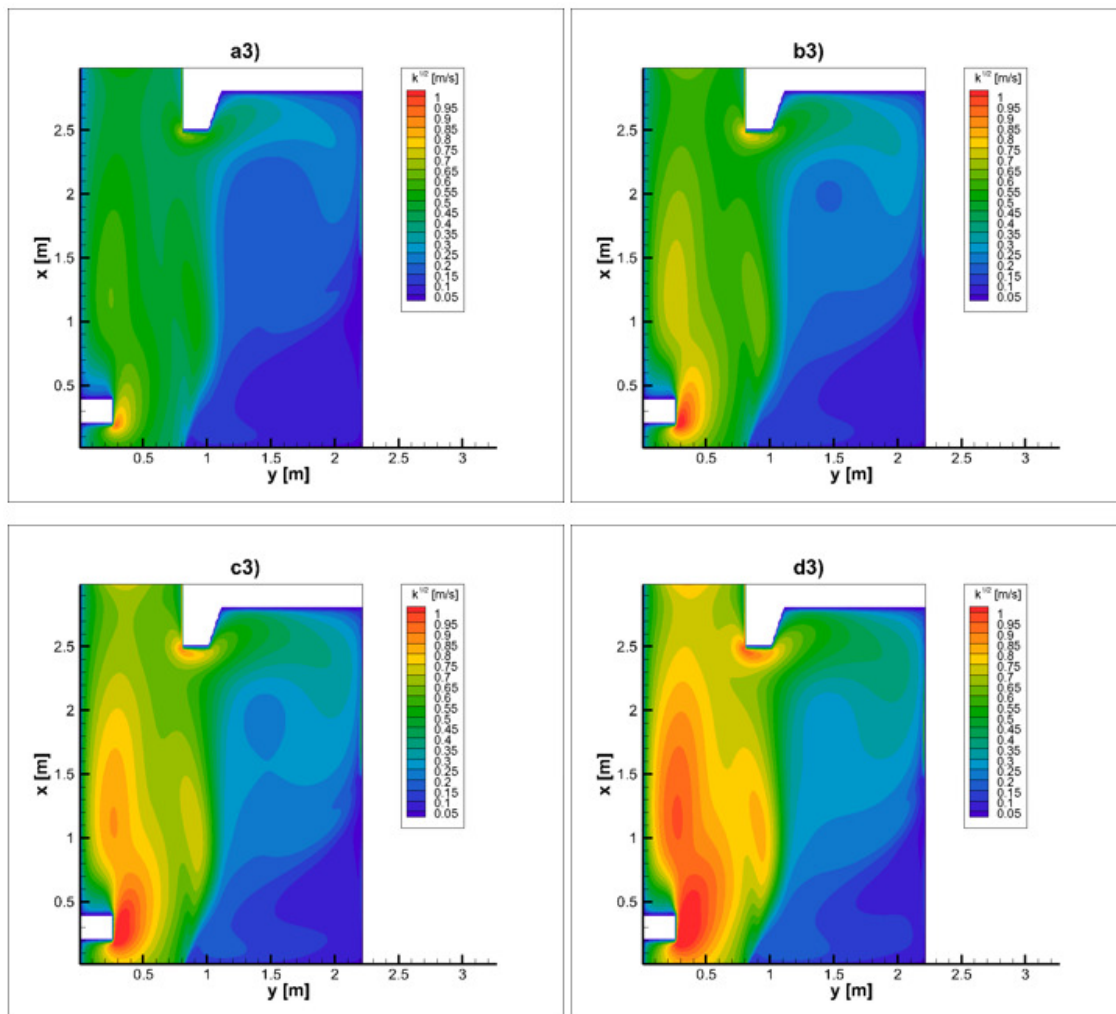
Slika 37: Razporeditev ε pri pretoku 1200 l/s za padce a3) 10 cm, b3) 15 cm, c3) 20 cm, d3) 25 cm

Uporabljene enote koeficienta k in ε morda ne dajejo dovolj jasne slike o dogajanju v samem toku ribje steze, zato je morda primerno, da se predstavi turbulentna kinetična energija še z drugega zornega kota. Za vrednost k vemo, da predstavlja kvadrat nihanj ali pulzacij okoli srednje vrednosti hitrosti v neki točki, zato bi bilo primerneje prikazati rezultate kvadratnih korenov $\sqrt{k}$, ki nastopajo v »domačih enotah« za hitrost. Dobimo graf, na katerem sta prikazani dve znani področji glavnega in umirjenega toka, pri katerih nastanejo jasne razlike (slika 38). Tok v recirkulaciji je vedno kazal stalnejšo strukturo, z majhnimi spremembami v povprečnih hitrostih in stopnjah turbulence, zato so vrednosti $\sqrt{k_{UM}}$ bolj kot ne konstantne, to je od 0,2 do 0,24 m/s. V glavnem toku pride s povečanjem vzdolžnega padca pri določenem pretoku do linearnega naraščanja pulzacij. Te štiri vrednosti $\sqrt{k_{GL}}$ so za pretok $Q = 1200$ l/s 0,5 m/s, 0,59 m/s, 0,67 m/s in 0,73 m/s. Zaključimo lahko, da se intenzivnost turbulence z naraščanjem vzdolžnega padca izraziteje spreminja samo v področju glavnega toka, v povratnem toku ob straneh pa naklon na turbulenco nima opaznejšega vpliva.



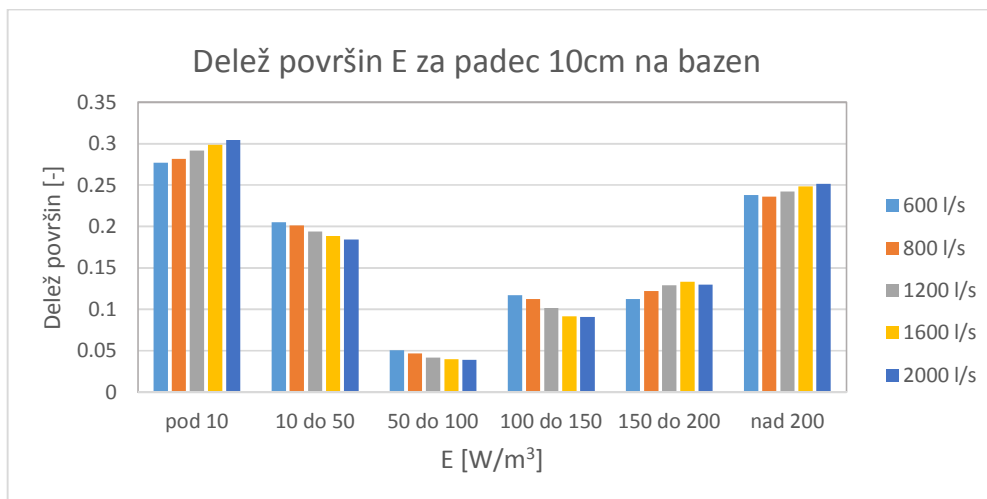
Slika 38: $\sqrt{k}$ glede na padec bazena v glavnem in umirjenem toku

Naslednja slika 39 predstavlja še razporeditev $\sqrt{k}$ po prostoru. Pri padcu dna 10 cm so pulzacije glavnega toka enakomerneje razporejene po prostoru kot pri ostalih treh. Vrednost okoli 0,50 m/s poteka očitno po celotnem delu glavnega toka in je višja edino okoli manjšega rebra. Naslednji padec 15 cm ima že oblikovan jezik s povečanimi vrednostmi do približno 0,70 m/s, ki se širijo že čez polovico dolžine bazena. Enako obliko zavzamejo pulzacije za padec 20 cm, le da tu vrednosti od malega rebra čez sredino bazena dosegajo že 0,85 m/s. Prav take so vrednosti tudi za največji padec, vendar se razprostirajo do nekje dolžine zoba večjega rebra in imajo v svojem jedru v prvi polovici bazena še višje maksimume. Takoj pod manjšim rebrom dosežejo vrednosti preko 1 m/s.

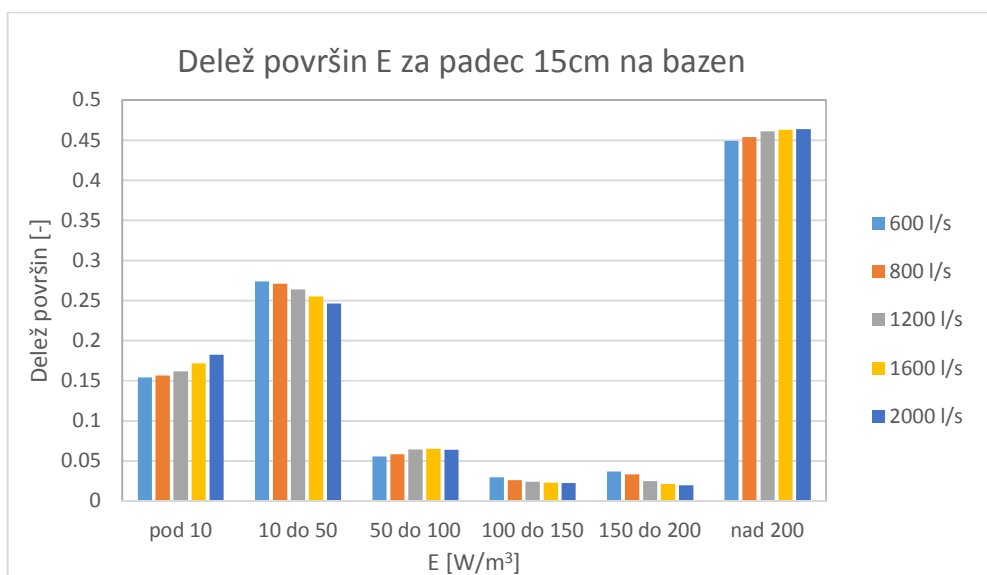
Slika 39: Izotahe $\sqrt{k}$ za primere padcev a3) 10 cm, b3) 15 cm, c3) 20 cm in d3) 25 cm

6.4 Disipacija turbulentne kinetične energije na enoto volumna E

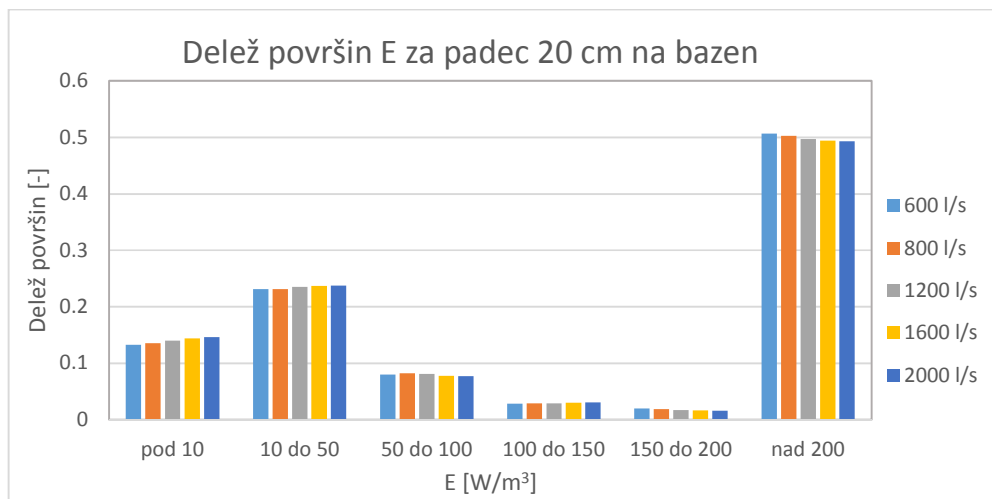
Pri ribjem prehodu nas je najbolj zanimala razporeditev disipacije kinetične energije na enoto volumna E [W/m^3], ki je za ribe najbolj merodajna. Absolutna največja dopustna vrednost je $200 \text{ W}/\text{m}^3$, za salmonide naj bi bila želena pod $150 \text{ W}/\text{m}^3$, za slabše plavalke krapovcev so primerne največje vrednosti med 100 in $150 \text{ W}/\text{m}^3$ (Armstrong, 2010). Vrednosti so prikazane na slikah 40–43 po vzdolžnih padcih skupaj z vsemi zbranimi pretoki, ki kažejo na približno nespremenjenost vrednosti E , če jih spreminjamo pri konstantnem padcu. Ugotovimo lahko veliko razliko med 4 skupinami padcev (Slika 40–43), z najugodnejšo razporeditvijo pri 10 cm, kjer je v več kot 45 % bazena vrednost pod $50 \text{ W}/\text{m}^3$. Pri ostalih treh padcih je ta odstotek 5–15 % nižji, vendar se opazi velika razlika pri najnižjih vrednostih E pod $10 \text{ W}/\text{m}^3$, ki so za primer 10 cm padca na bazen na občutno večjem deležu površine. Ta dosegajo več kot 27 % področja bazena za 10 cm padec na bazen, medtem ko za druge tri primere padcev znašajo približno 16 %, 13 % in 11 %. Poleg zmanjšanja območja pod $10 \text{ W}/\text{m}^3$ opazimo pri večjih treh padcih tudi izrazito povečanje vrednosti preko $200 \text{ W}/\text{m}^3$, ki niso primerne za migracije, in sicer na račun upada področij vrednosti od 100 do $200 \text{ W}/\text{m}^3$. Te so za najstrmejši padec že skoraj neobstoječe z nahajanjem na manj kot 10 % celotnega področja bazena.



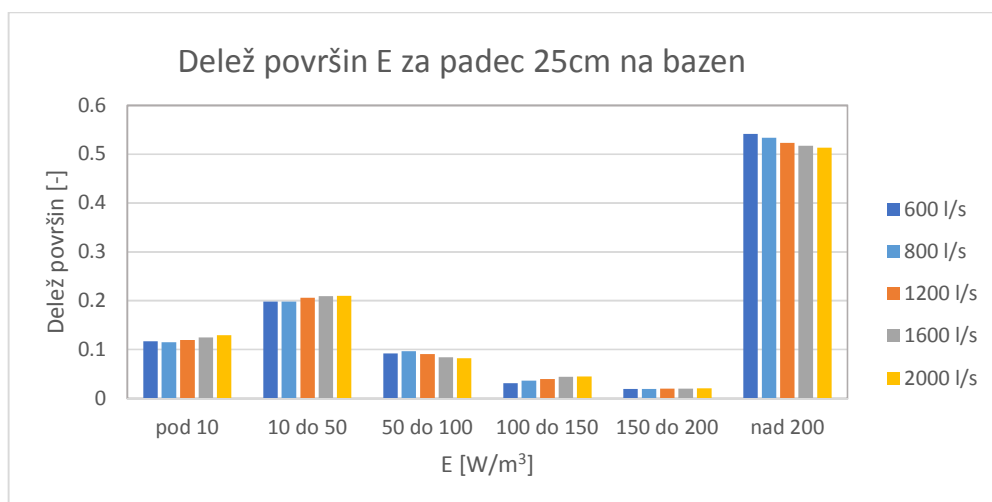
Slika 40: Delež površin E za padec 10 cm na bazen



Slika 41: Delež površin E za padec 15 cm na bazen



Slika 42: Delež površin E za padec 20 cm na bazen



Slika 43: Delež površin E za padec 25 cm na bazen

6.5 Analiza primernosti posameznih primerov za migracije rib

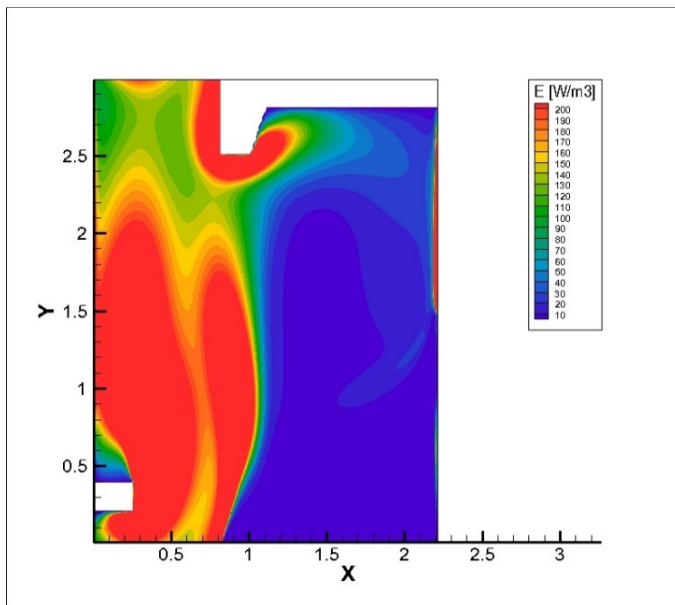
Na koncu velja še enkrat povzeti rezultate glavnih karakteristik toka, ki v največji meri predstavljajo kazalec za poznejšo uspešno migriranje obravnavanih rib (preglednica 7). Po enačbi smo izračunali še $\bar{E}$, ki predstavlja približno povprečno vrednost koeficienta disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna, odvisnega od pretoka skozi režo, vzdolžnega padca ter volumna prekata.

Če najprej preučimo maksimalne hitrosti v primerjavi s plavalnimi sposobnostmi rib vidimo, da pogoji niso izpolnjeni pri vseh primerih. Padec 10 cm na prekat zagotavlja dovolj nizke hitrosti pri vseh možnih pretokih, medtem ko za druge velja to le delno. Za vse ribje vrste je maksimalna hitrost toka primerna le še pri dveh najmanjših pretokih primerov pri padcu 15 cm na prekat, medtem ko drugod del rib ne zmore napredovanja skozi reže. Edina vrsta, ki je sposobna napredovanja v vseh primerih, je sulec, ki ima do svojih maksimalnih zmoglosti še edini nekaj zaloge, druge vrste pa so že pri srednjih pretokih 1200 l/s na robu svojih plavalnih kapacitet.

Povprečni $\bar{E}$ se skozi primere različnih padcev zelo razlikuje in dopustno pod 200 W/m^3 doseže samo za najmanjši padec, za ostale tri so vrednosti previsoke. Pri padcu 10cm na prekat se celo doseže zgornja meja za ribe slabših plavalnih zmožnosti pri 150 W/m^3 . Ob ugodnem deležu vrednosti E nižjih od 100 W/m^3 na več kot 50 % površine, ki se pojavijo v glavnem v protitočnem delu prekata lahko napovemo, da bi bil ta padec dovolj primeren tudi za selitve krapovcev na daljše razdalje. Na sliki 44 je prikazan primer razporeditve E pri predlaganem vzdolžnem padcu bazena ribje steze 10 cm in pretoku 800 l/s.

Preglednica 7: Zbrane karakteristike vseh obravnavanih pretokov in padcev

Primer	Pretok [L/s]	Padec [cm]	V_{MAX} [m/s]	$\bar{E}$ [W/m ³]	Deleži E od celotne površine prekata					
					$E < 10$ [W/m ³]	$10 < E < 50$ [W/m ³]	$50 < E < 100$ [W/m ³]	$100 < E < 150$ [W/m ³]	$150 < E < 200$ [W/m ³]	$E > 200$ [W/m ³]
a1)	600	10	2,29	140	27 %	21 %	5 %	12 %	11 %	24 %
a2)	800	10	2,46	146	28 %	20 %	5 %	11 %	12 %	24 %
a3)	1200	10	2,5	154	29 %	20 %	4 %	10 %	13 %	24 %
a4)	1600	10	2,47	159	30 %	19 %	4 %	9 %	13 %	25 %
a5)	2000	10	2,44	162	30 %	19 %	4 %	9 %	13 %	25 %
b1)	600	15	2,42	238	15 %	27 %	6 %	3 %	4 %	45 %
b2)	800	15	2,6	250	16 %	27 %	6 %	3 %	3 %	45 %
b3)	1200	15	2,87	267	16 %	27 %	7 %	2 %	2 %	46 %
b4)	1600	15	3,09	279	17 %	26 %	7 %	2 %	2 %	46 %
b5)	2000	15	3,12	286	18 %	25 %	6 %	2 %	2 %	47 %
c1)	600	20	2,71	348	13 %	23 %	8 %	3 %	2 %	51 %
c2)	800	20	2,8	364	14 %	23 %	8 %	3 %	2 %	50 %
c3)	1200	20	2,95	389	14 %	23 %	8 %	3 %	2 %	50 %
c4)	1600	20	3,23	409	14 %	24 %	8 %	3 %	2 %	49 %
c5)	2000	20	3,39	424	14 %	24 %	8 %	3 %	2 %	49 %
d1)	600	25	2,95	470	12 %	20 %	9 %	3 %	2 %	54 %
d2)	800	25	3,04	495	11 %	20 %	10 %	4 %	2 %	53 %
d3)	1200	25	3,2	520	12 %	21 %	9 %	4 %	2 %	52 %
d4)	1600	25	3,3	547	13 %	21 %	8 %	4 %	2 %	52 %
d5)	2000	25	3,49	568	13 %	21 %	8 %	5 %	2 %	51 %



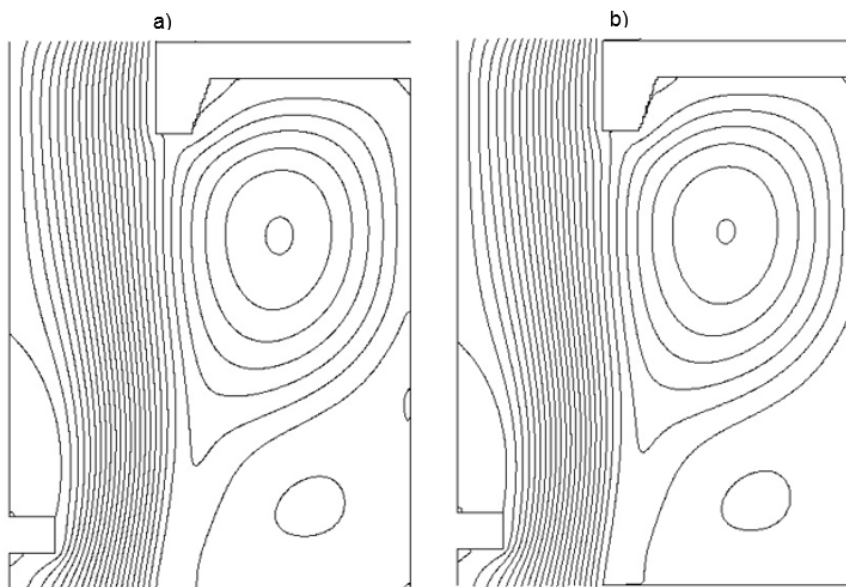
Slika 44: Primer izotah E pri padcu 10 cm in pretoku 800 l/s

6.6 Analiza vpliva velikosti numerične mreže

Za matematične modele dvodimenzijskega toka velja, da se z zgoščevanjem numerične mreže kakovost rezultatov izboljša, a to zahteva močno povečanje časa potrebnega za izračun.

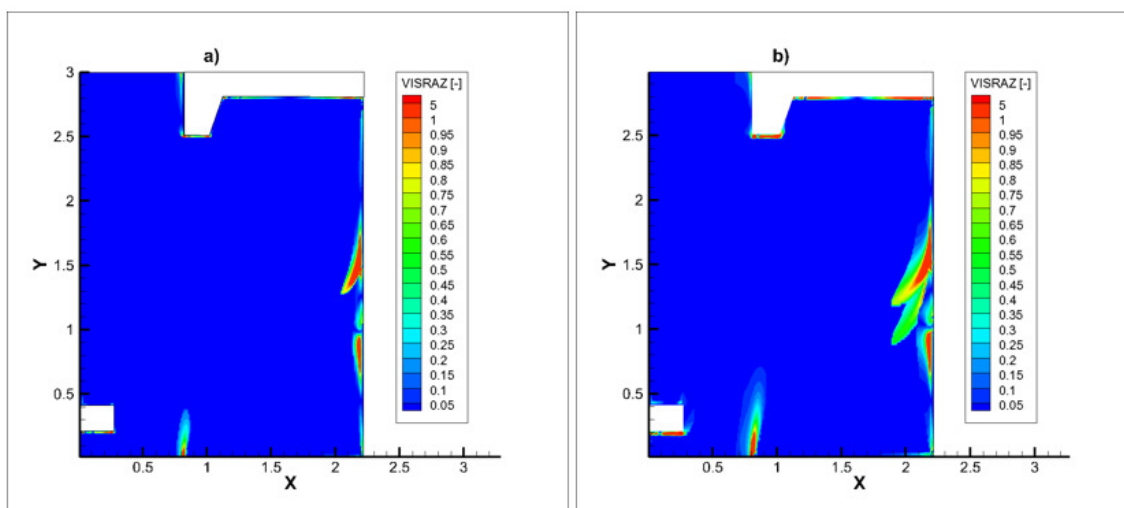
Uporabnik modela mora zato oceniti kako gosto mrežo bo uporabil, da so dobljeni rezultati še dovolj točni za uporabo. Redkejša mreža namreč povzroča numerično difuzijo, ki je posledica uporabe numerične sheme prvega reda. Ta uporabljena numerično shema gorvodnih razlik (UPWIND), ki je del vgrajene hibridne sheme v programu PCFLOW2D. Numerična difuzija se računsko pojavlja kot pribitek h koeficientu efektivne viskoznosti, zato se gibalna količina oziroma onesnažilo širi v večjem obsegu kot je to fizikalno realno. Poleg zgoščevanja numerične mreže lahko za zmanjšanje numerične difuzije uporabimo tudi numerične sheme višjega reda točnosti (Bombač, 2014).

V kolikšni meri numerična difuzija vpliva na rezultate lahko preverimo z razmerjem numerične difuzije v primerjavi s koeficientom turbulentne viskoznosti označenim v programu PCFLOW2D z VISRAZ. Pri vrednosti nad 1 v posamezni točki vpliv numerične difuzije nad koeficientom turbulentne viskoznosti prevlada, kar lahko preveč zmanjša točnost rezultatov.



Slika 45: Tokovnice v srednjem bazenu ribje steze za $k - \epsilon$ model turbulence pri numerični mreži a) 1×1 cm in b) 2×1 cm

Na sliki 45 so prikazane tokovnice pri gostejši mreži a) 1×1 cm in običajni mreži b) 2×1 cm $k - \epsilon$ modela turbulence. Primerjava je bila narejena na primeru ribje steze z vzdolžnim padcem 5 cm na bazen in pretoku 800 l/s. Vidimo lahko, da večjih posebnosti ni, edina očitna razlika je podaljšana recirkulacija spodnjega močnejšega povratnega toka proti vertikalni reži. Za razlago tega podaljšanja je treba prikazati primerjavo razmerja VISRAZ, ki bo pokazal bolj lokalna dogajanja.



Slika 46: Primerjava razmerja VISRAZ za a) gostejšo in b) redkejšo mrežo

Vidimo lahko, da je v veliki večini glavnega in povratnega toka numerična difuzija praktično zanemarljiva v obeh primerih. Večje razlike so na robovih reber na vtoku skozi režo, kjer gostejša mreža skoraj nima prisotne numerične difuzije, pri redkejši pa se pojavi na širšem področju dolvodno od robov. Obenem ima redkejša mreža povečano polje numerične difuzije še na stiku spodnjega povratnega toka s stransko steno v smeri proti zgornji reži, kar nam lahko razloži manjšo razliko tokovnic v tem delu.

7 ZAKLJUČEK

Hidravlično modeliranje z matematičnimi modeli v zadnjih letih pridobiva večji pomen v primerjavi s fizičnimi modeli, ker so rezultati ob uporabi dovolj goste numerične mreže dovolj natančni za oceno dejanskega stanja toka okoli ovir v obravnavanem kanalu ribje steze. S tem orodjem lahko v razmeroma kratkem času ocenimo vpliv spremembe vtočnih razmer ali regulacij dna struge na tokovne razmere.

Za v nalogi obravnavane primere vhodnih spremenljivih parametrov v obliki različnih padcev dna ribje steze v literaturi že obstajajo določene raziskave drugih avtorjev, s katerimi smo lahko potrdili ugotovitve in s tem potrdili zanesljivost izračunov. Ker gre pri ribjih stezah za izrazito dvodimenzijski tok v ravnini x - y , kjer je vertikalna komponenta hitrosti zanemarljiva, smo lahko uporabili program za 2D globinsko povprečen tok. Kot model turbulence smo uporabili naprednejši k - ε model turbulence. Pri tem je bila za kakovost rezultatov pomembna izbira numerične mreže, ki ni povzročala numerične difuzije, tako da so bili dobljeni rezultati dejansko uporabni za prikaz točne slike toka znotraj ribje steze.

V diplomski nalogi smo nato preverili različne rezultate izračunov za 20 obravnavanih primerov z različnimi vzdolžnimi padci in pretoki. Izrisali smo polja hitrosti ter tokovnice vključno s slikami razporeda višinskih polj izotah računskega polja obravnavanega bazena. Dobili smo podobne slike smeri vektorjev hitrosti za vse primere, vidneje se je spreminjala hitrost samo v glavnem kanalu in na delu spodnjega povratnega bazena. Tokovnice so si bile med seboj zelo podobne, zato so najbolj jasno sliko dale izotahe. Izrisali smo tudi povprečne hitrosti v glavnem in umirjenem toku ribje steze in ugotovili rahlo povečevanje vrednosti z naraščanjem tako padca kot pretoka. Padec je imel glede na pretok največji vpliv na povečanje standardnega odklona hitrosti v glavnem kanalu. S prikazom turbulentnih koeficientov k in ε smo dobili logične rezultate glede na podatke v literaturi, kjer je na velikost pojava posameznih vrednosti vplival samo vzdolžni padec, pretoki pa skoraj ne. Tako smo združili rezultate pri različnih pretokih in na posameznih grafih prikazali štiri značilne primere razporeditve za vrednosti k in ε posebej. Za konec smo še izračunali vrednosti disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna E in njeno povprečje $\bar{E}$, ter na tej osnovi ocenili primernost bazenov glede na maksimalne dopustne vrednosti. Izkazalo se je, da so za obravnavane vrste rib v takšni obliki ribjih stezh še primerni vzdolžni nakloni 10 cm na bazen, pri večjih naklonih pa je tok preveč turbulenten. Pri tem največjem še dopustnem naklonu so za obravnavane vrste rib ustrezne tudi maksimalno dosežene hitrosti.

Izračune smo poganjali na večjedrnih procesorjih, ki omogočajo izvajanje po enega procesa na posamezno jedro, zato so bili računski časi še razmeroma dolgi. Za prihodnje delo zato predlagamo uporabo grafičnih kartic, ki bi zaradi dodatnih mikroprocesorjev pohitrile izračune. S tem bi lahko dodatno pospešili razvoj matematičnega modeliranja z uporabljenim programom PCFLOW2D in povečali uporabnost. Dodatno bi si lahko delo s programom olajšali, če bi razvili vmesnik za rokovanje z vhodnimi in izhodnimi podatki. Tako bi lahko trenutne procese priprave podatkov in obdelave rezultatov skrajšali in več časa namenili drugim stvarem, predvsem optimiziranju oblike ribje steze.

VIRI

Armstrong, G.S. Aprahamian, M.W., Fewings, G.A. Gough, P.J. Reader, N.A. Varallo, P.V. 2010. Environment Agency fish pass manual: Guidance notes on the legislation, selection and approval of fish passes in England and Wales. Bristol. Environment Agency: 369 str.

Beach, M.H. 1984. Fisheries research technical report no. 78. Fish pass design-criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fish in rivers. Lowestoft. Ministry of agriculture, fisheries and food directorate of fisheries research: 46 str.

Bell, M.C. 1991. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. Portland, Oregon. U.S. Army corps of engineers: 353 str.

Bermúdez, M., Puertas, J., Cea, L., Balairón, L. 2010. Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways. *Ecological Engineering* 36, 10: 1355–1364.

Bizjak, Aleš. 2008. Vodno načrtovanje in načrti upravljanja voda. Oddelek za geografijo Filozofske fakultete v Ljubljani. *Dela* 30: 101–121

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., 62 pril.

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* 84: 476–484

Bombač, M. 2014. Osebna komunikacija

Breve, N.W.P., Buijse, A.D., Kroes, M.J., Wanningen, H. Vriese, F.T. 2014. Supporting decision-making for improving longitudinal connectivity for diadromous and potamodromous fishes in complex catchments. Steinberg, C.E.W. (ur.). *Science of total environment* 496: 206–218

Brönmark et al. 2014. There and back again: migration in freshwater fishes. *Can.J.Zool.* 92: 467–479

Castro-Santos, T. Cotel, A., Webb, P. 2009. Fishway evaluation for better bioengineering: An integrative approach. *American Fisheries Society symposium* 69: 557–575

Ciuha, D. Povž, M. Kvaternik, K. Brenčič, M. Muck, P. 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 2014, Maribor, 4.12.2014. Aktualni projekti s področja upravljanja z vodami in urejanje voda: 228–236

Clay, C.H. 1995. Design of fishways and other fish facilities. Ottawa, Dept. Of Fisheries of Canada: 248 str.

Collins, G.B. Elling, C.H. Gauley, J.R. Thompson, C.S. 1963. Effect of fishway slope on performance and biochemistry of salmonids. *Fishery bulletin* 63, 1: 221–253

Četina, M. 1988. Matematično modeliranje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Četina): 105 str., 71 pril.

Evenden M. 2000. Remaking Hells gate: Salmon, Science, and the Fraser River, 1938-1948. *Bc studies* 127: 47–82

Fish passage technologies: Protection at hydropower facilities. 1995. Washington DC. U.S. Government Printing Office: 167 str.

Fish passes-design, dimensions and monitoring. 2002. Rim. Food and agriculture organization of the United Nations: 119 str.

Francis, F. 1870. Reports on salmon ladders: with original drawings; plans, and sections. London. Horace Cox: 32 str.

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

Hering et al. 2010. The European Water Framework Directive at the age of 10: A critical review of the achievements with recommendations for the future. *Science of the total environment* 408: 4008–4019

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

Katopodis, C. Williams, J.G. 2012. The development of fish passage research in a historical context. *Ecological Engineering* 48: 8–18

Larinier, M. Travade, F. Porcher, J.P. 2008. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. *Bulletin Français de la pêche et de la pisciculture* no. 364: 208 str.

Lucas, M.S. Baras, E. 2001. Migration of freshwater fishes. Velika Britanija. Blackwell science: 440 str.

McLeod, A.M. Nemenyi, P. 1941. An investigation on fishways. *University of Iowa studies in engineering bulletin* 24: 67 str.

Meyer, J.L. Strayer, D.L. Wallace, J.B. Eggert, S.L. Helfman, G.S. Leonard, N.E. 2007. The contribution of headwater streams to biodiversity in river networks. *Journal of the American Water Resources Association* 43: 86–103

Noonan, M.J. Grant, J.W.A. Jackson C.D. 2012. A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and fisheries* 13: 450–464

Povž, M. Sket, B. 1990. Naše sladkovodne ribe. Ljubljana, Mladinska knjiga: 369 str.

Reyol et al. 2014. Assessing the ecological status in the context of the European Water Framework Directive: Where do we go now?. *Science of total environment* 497-498: 332–344

Rodríguez, T.T. Agudo, J.A. Mosquera, L.P. González, E.P. 2006. Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities. *Ecological engineering* 27: 37–48

Tritico, H.M. 2009 The effects of turbulence on habitat selection and swimming kinematics of fishes. Doktorska disertacija, Michigan, University of Michigan, Civil and Environmental Engineering and Natural Resources and Environment (samozaložba H.M. Tritico): 155 str.

Williams, J.G. Armstrong, G. Katopodis, C. Larinier, M. Travade, F. 2012. Thinking like a fish: A key ingredient for development of effective fish passage facilities at river obstructions. River research applications 28: 407–417

Wardle, C.S. 1975. Limit of fish swimming speed. Nature 255: 725–727

Wu, S. Rajaratnam, N. Katopodis, C. 1999. Structure of flow in a vertical slot fishway. Journal of hydraulic engineering 125, 4: 351–360

Uredba o stanju površinskih voda. Uradni list RS št. 14/2009: 1757–1779

Zitek, A, Schmutz, S. Jungwirth, M. 2008. Assessing the efficiency of connectivity measures with regard to the EU-Water Framework Directive in a Danube-tributary system. Hydrobiologia 609: 139–161

Zabrc, D. Čarf, M. Jenič, A. Puklavec, D. Bric, B. Šantl, S. 2014. Prehodnost je naša prihodnost. V: 25. Mišičev vodarski dan 2014, Maribor, 4.12.2014. Aktualni projekti s področja upravljanja z vodami in urejanje voda: 219–227

Zakon o sladkovodnem ribištvu (ZSRib). Uradni list RS št. 61/2006: 6615–6616

Zakon o vodah. Uradni list RS št. 67/2002: 7577–7650

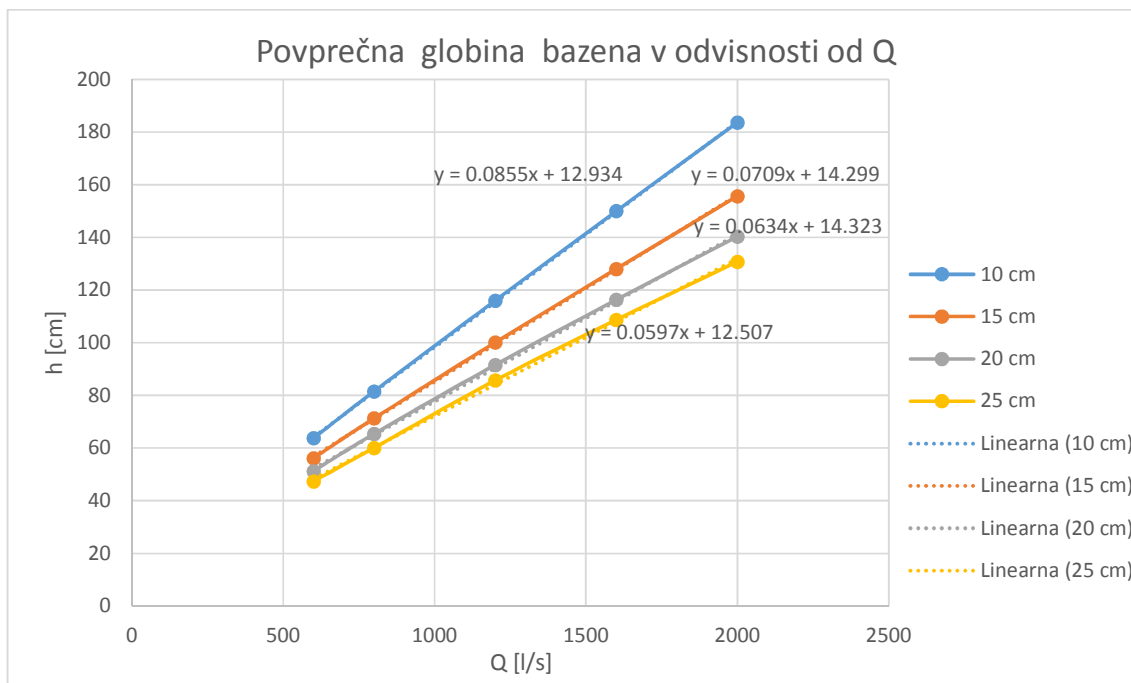
PRILOGE

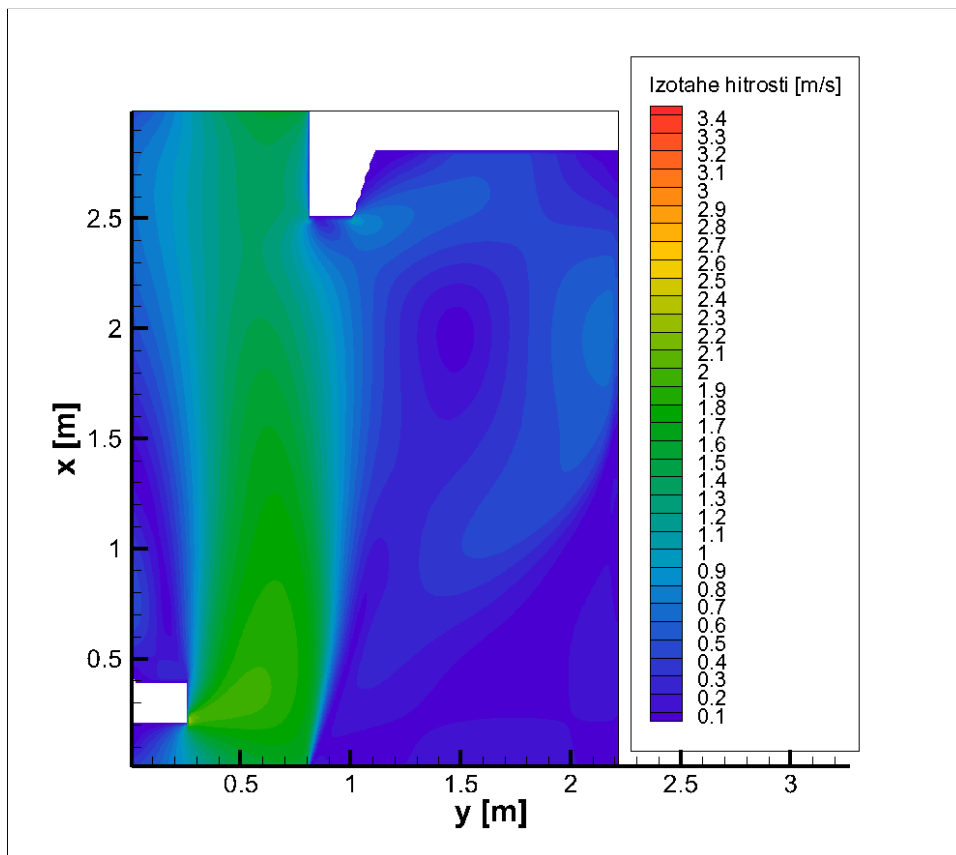
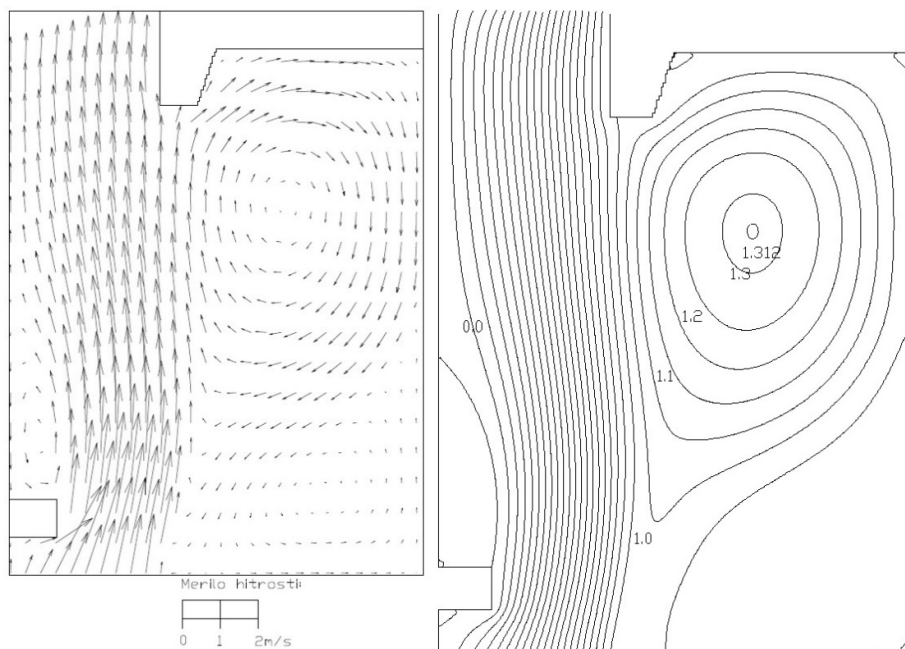
PRILOGA A: ZVEZE MED PRETOKI IN POVPREČNIMI GLOBINAMI BAZENOV MATEMATIČNEGA MODELA RIBJE STEZE

PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV IN IZOTAH HITROSTI TER TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH

PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε PO PRIMERIH

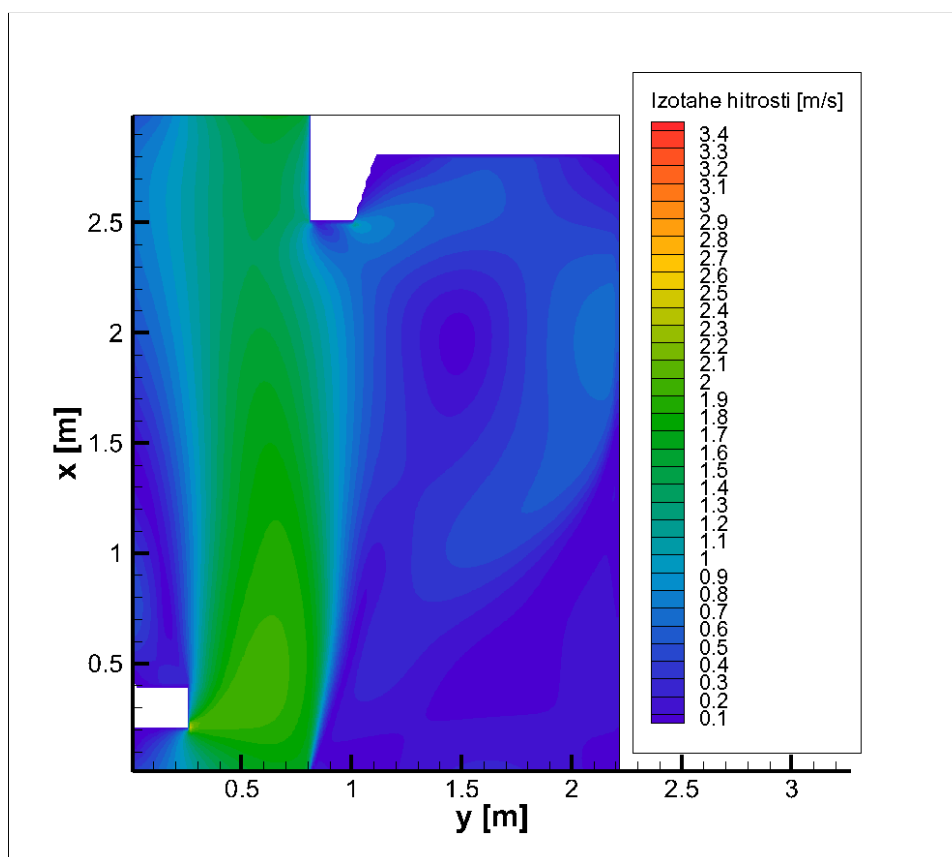
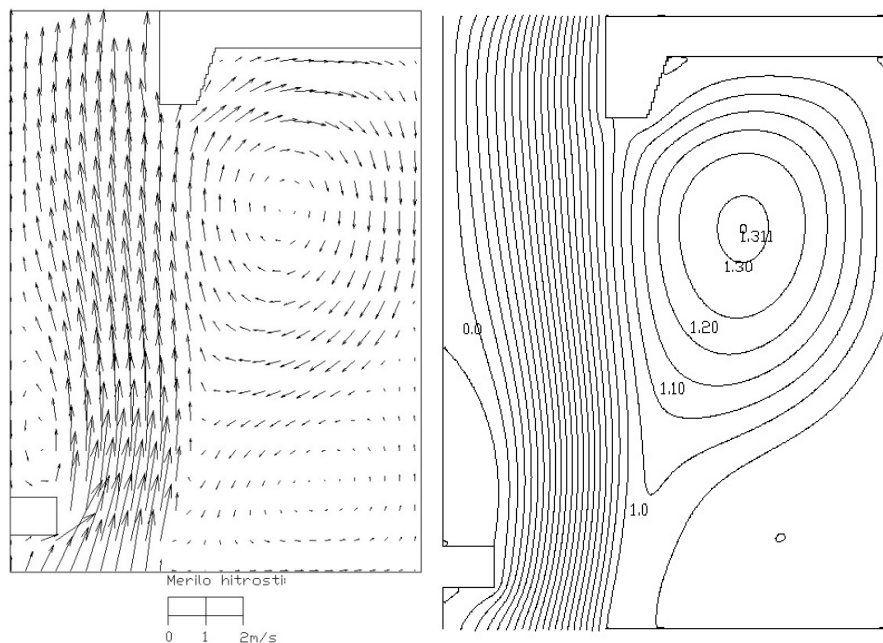
PRILOGA A: ZVEZE MED PRETOKI IN POVPREČNIMI GLOBINAMI BAZENOV MATEMATIČNEGA MODELA RIBJE STEZE

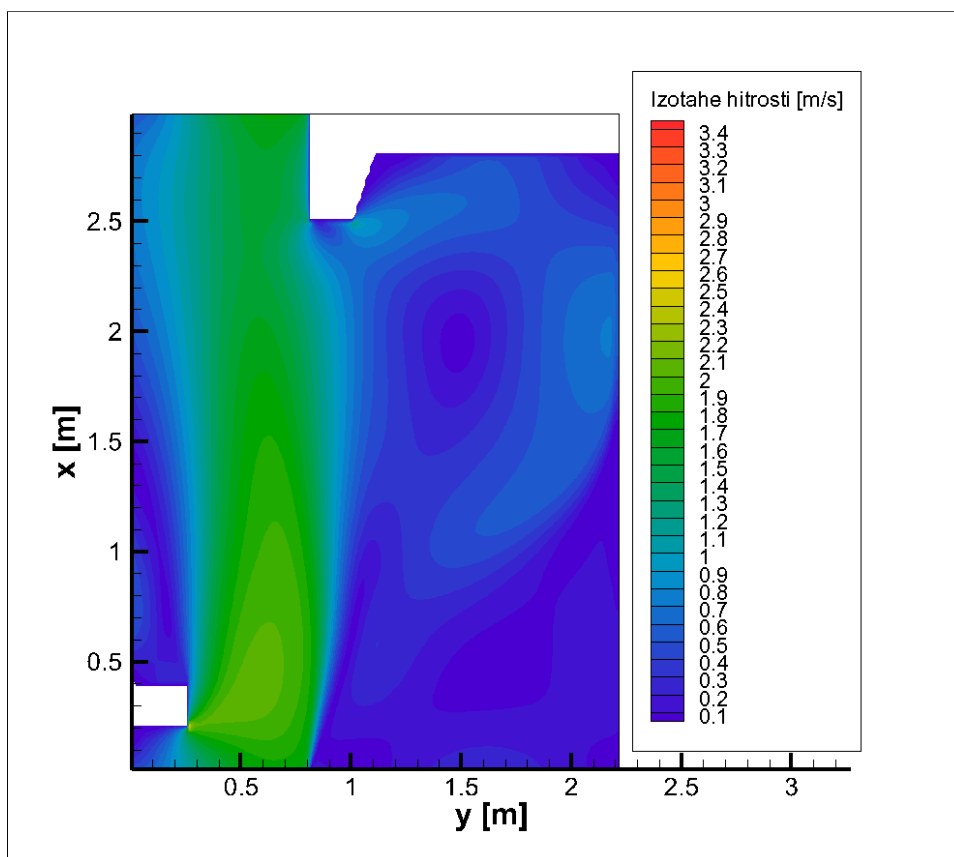
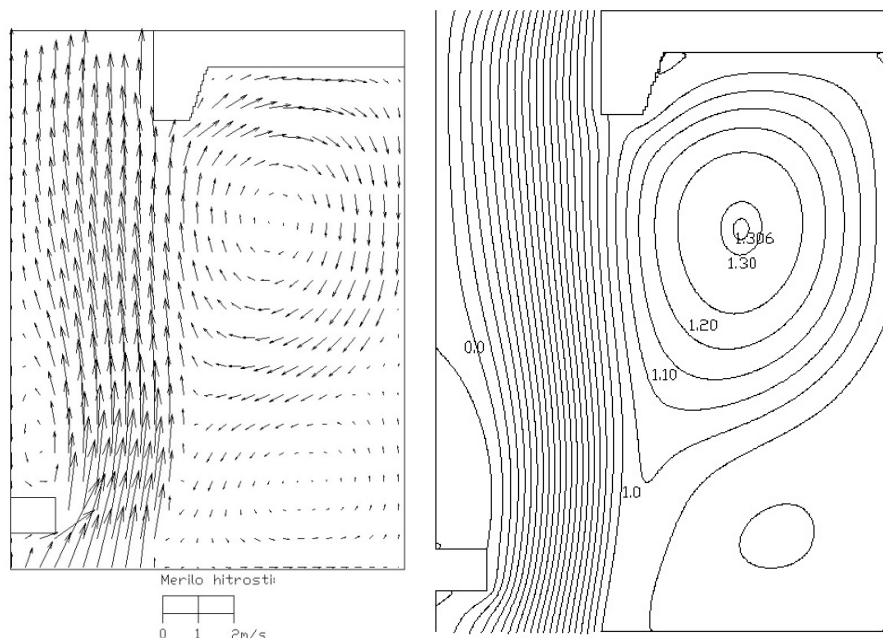


PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH**Priloga B.1: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 10 cm in pretok 600 l/s**

PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH

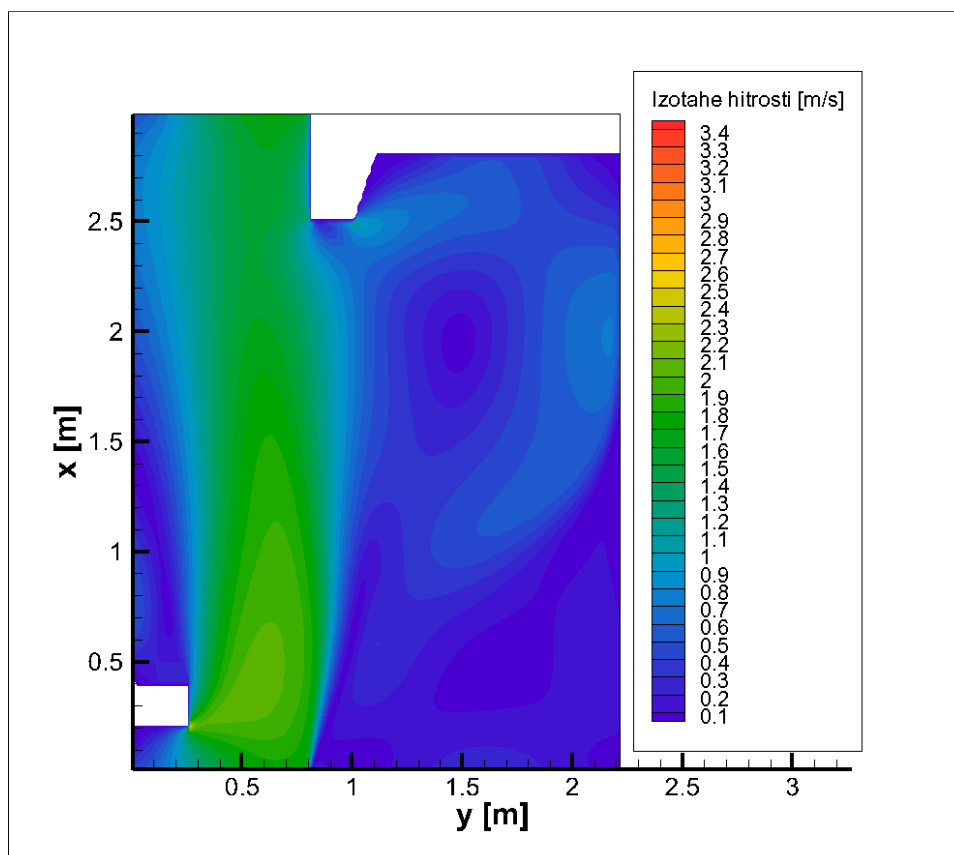
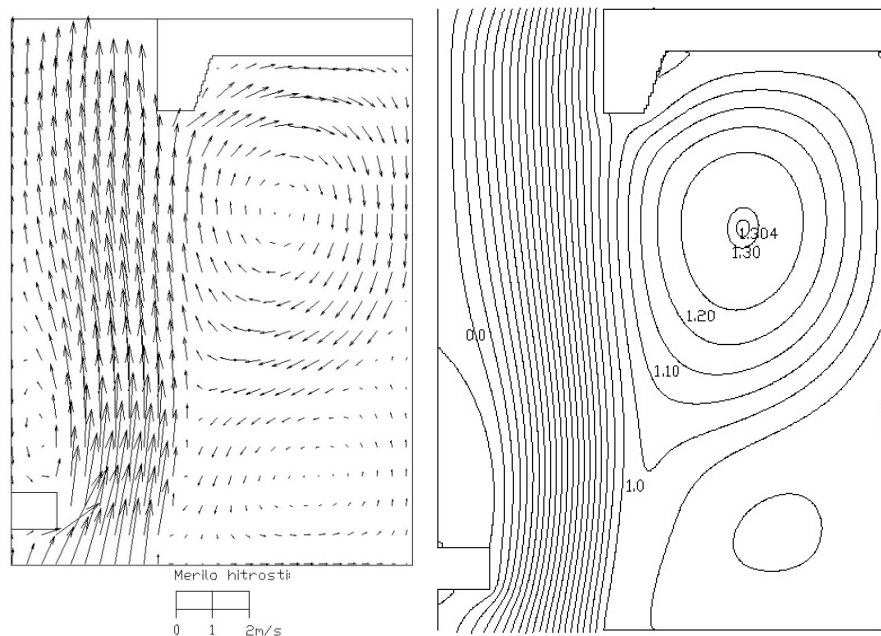
Priloga B.2: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 10 cm in pretok 800 l/s

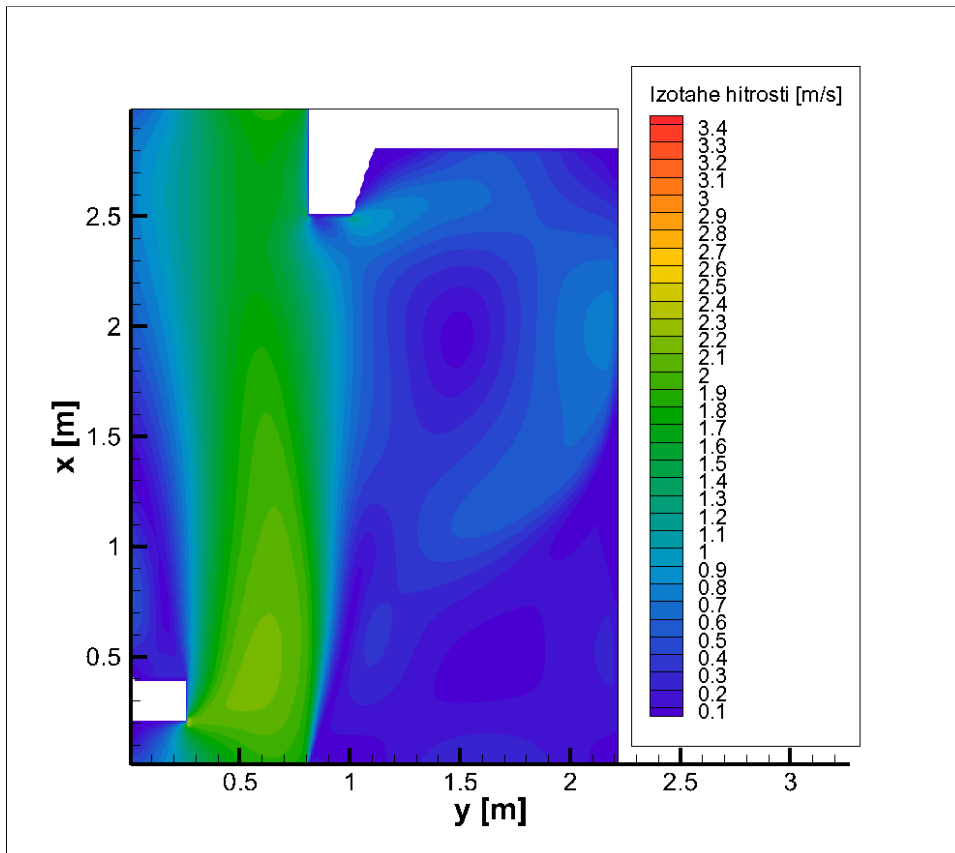
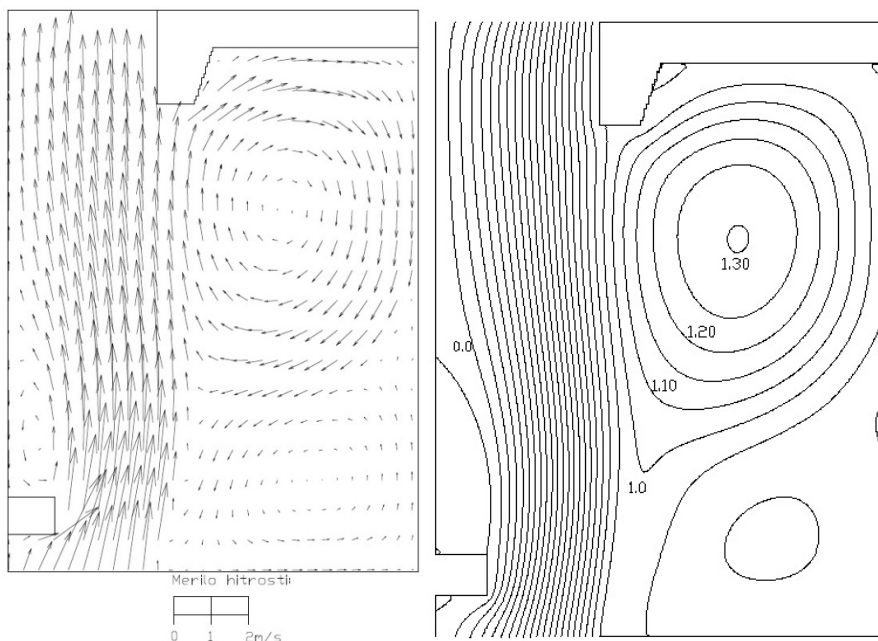


PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH**Priloga B.3: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 10 cm in pretok 1200 l/s**

PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH

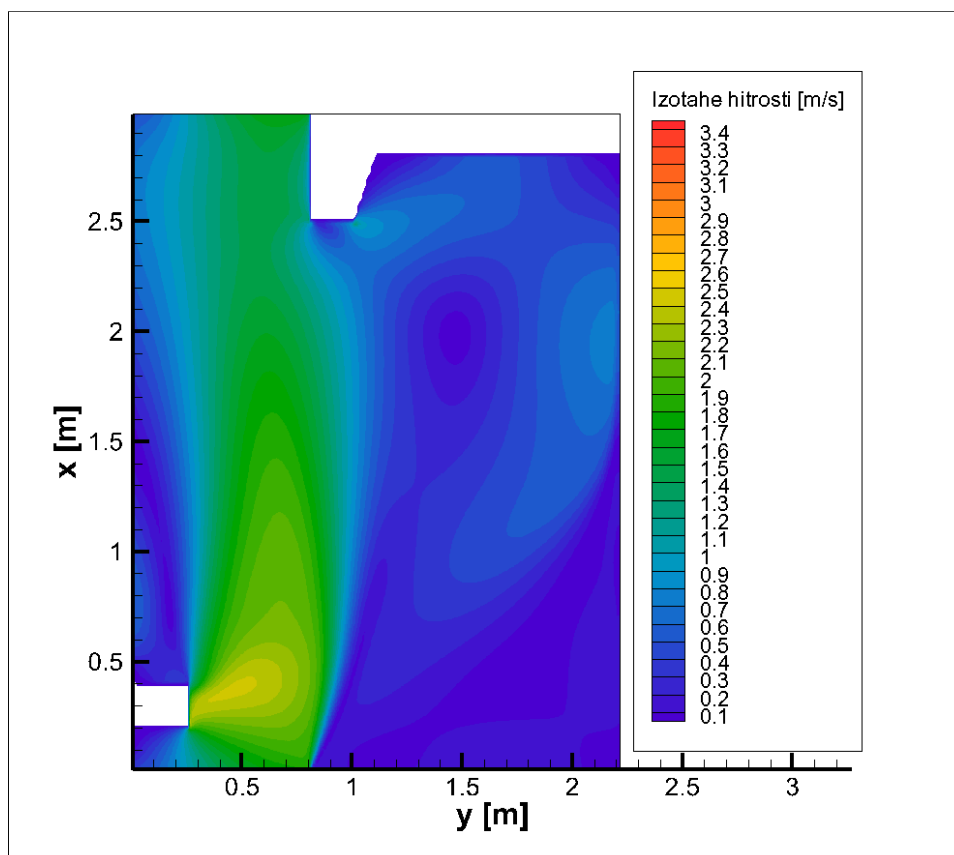
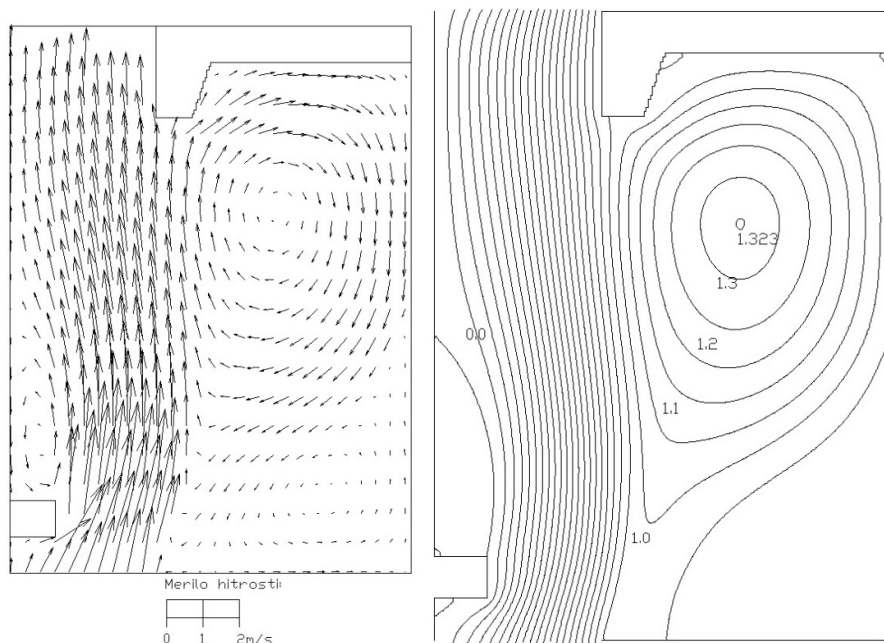
Priloga B.4: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 10 cm in pretok 1600 l/s

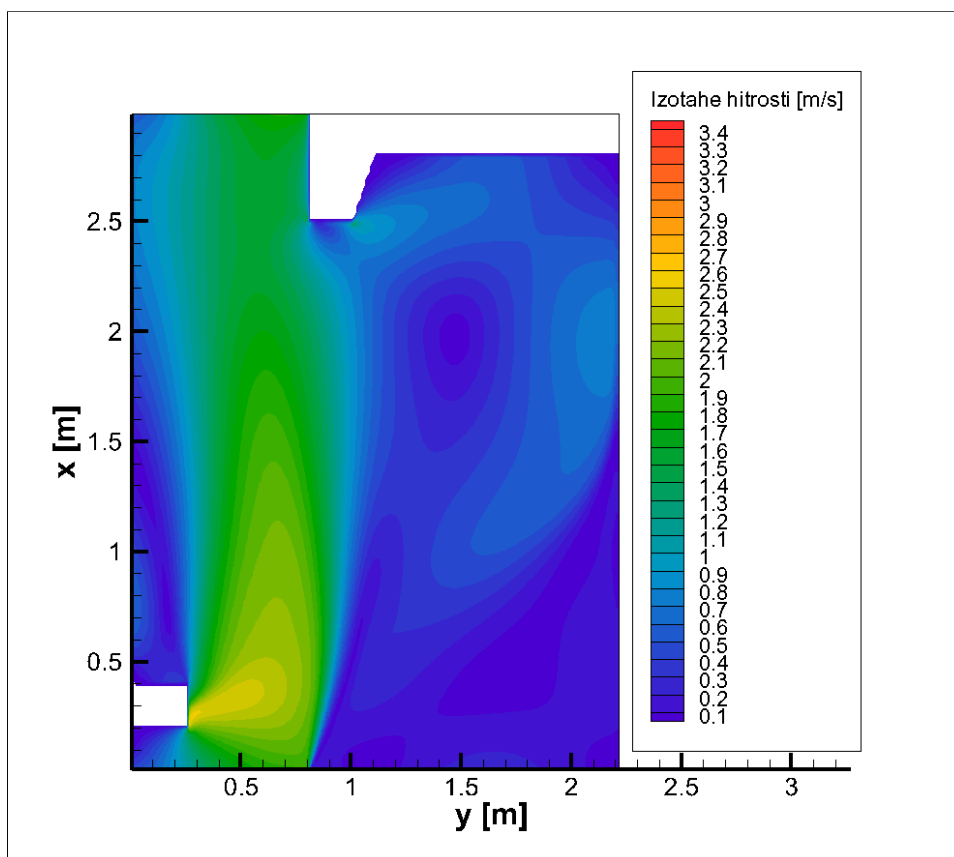
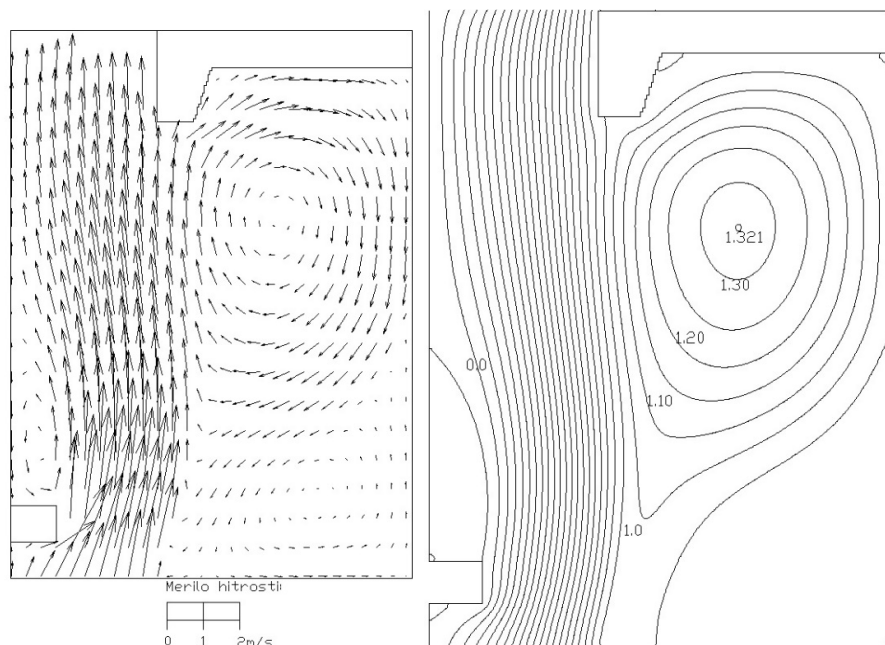


PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH**Priloga B.5: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 10 cm in pretok 2000 l/s**

PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH

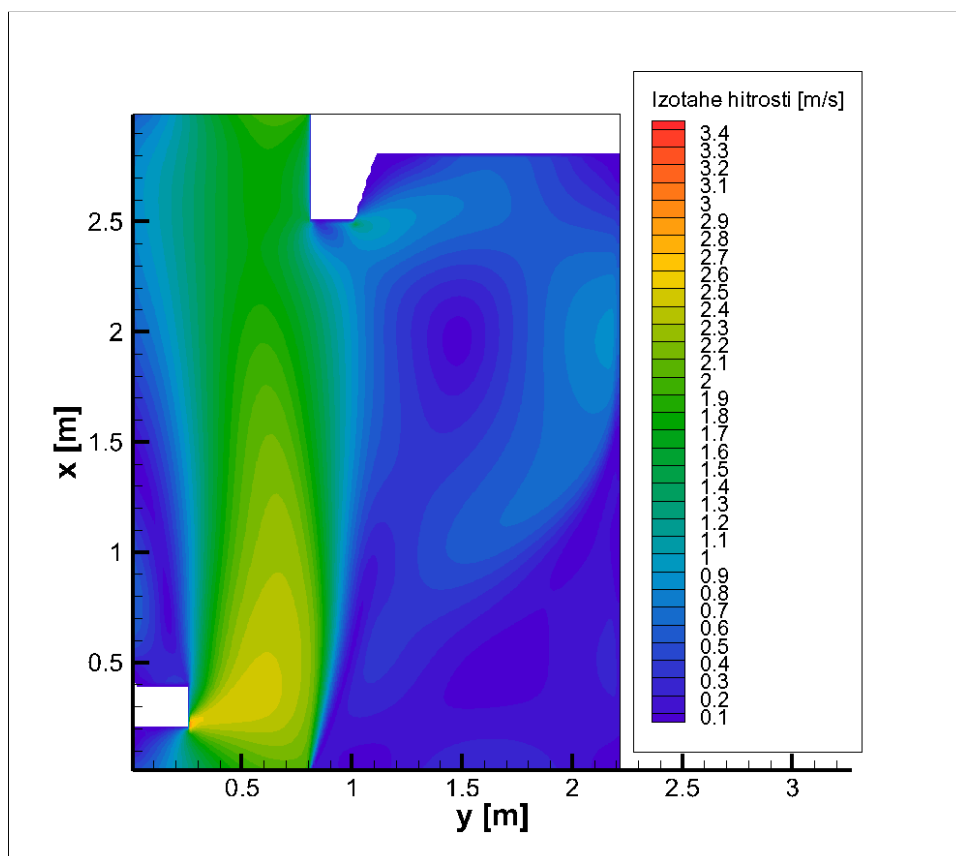
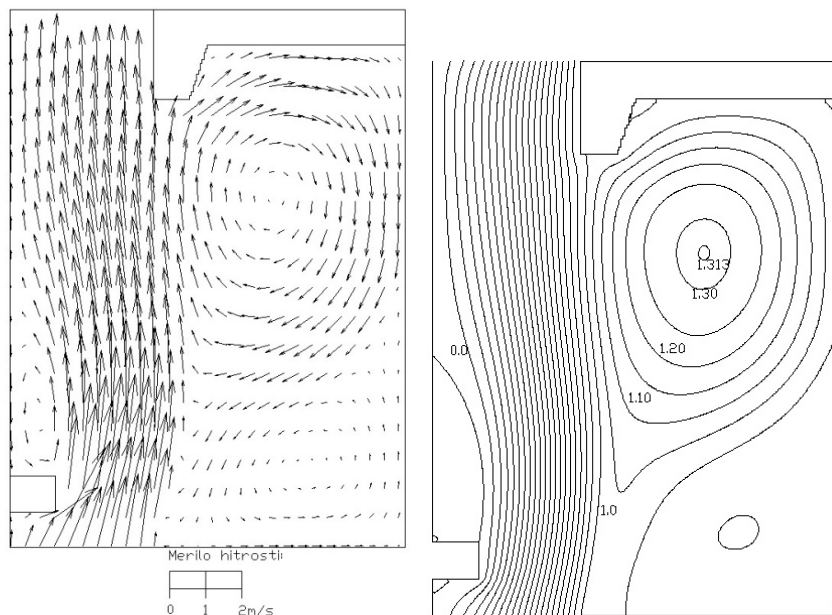
Priloga B.6: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 15 cm in pretok 600 l/s

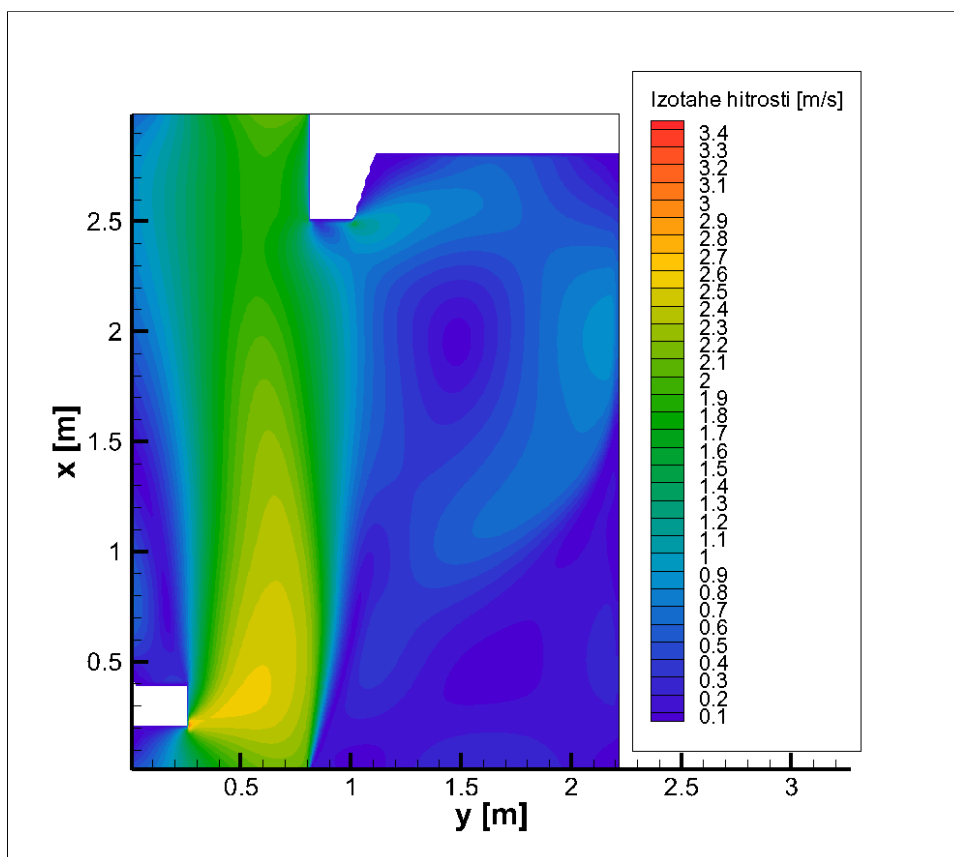
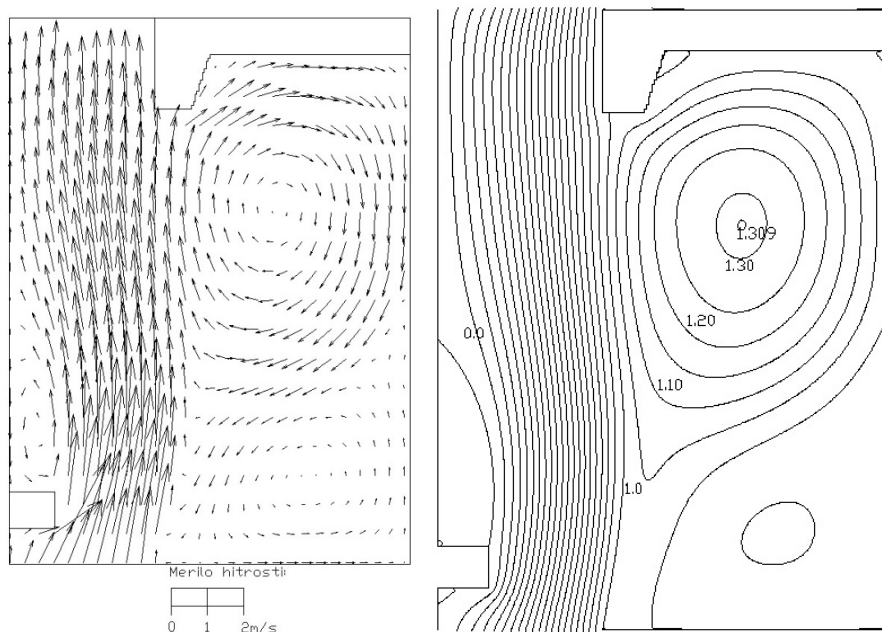


PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH**Priloga B.7: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 15 cm in pretok 800 l/s**

PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH

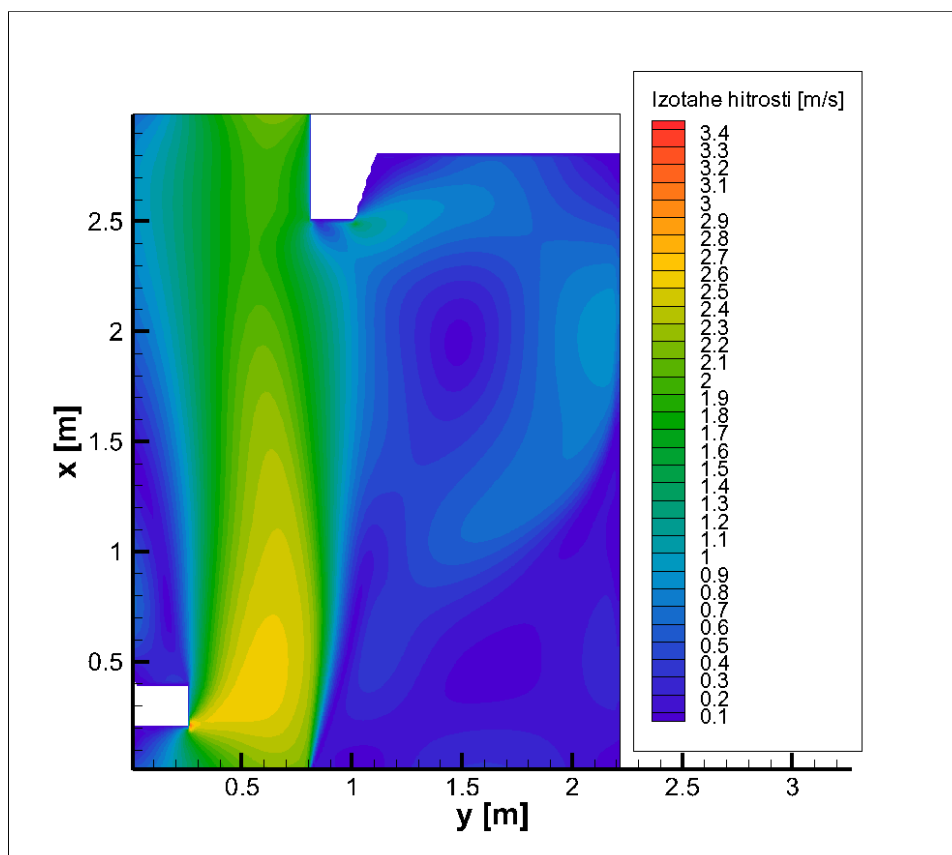
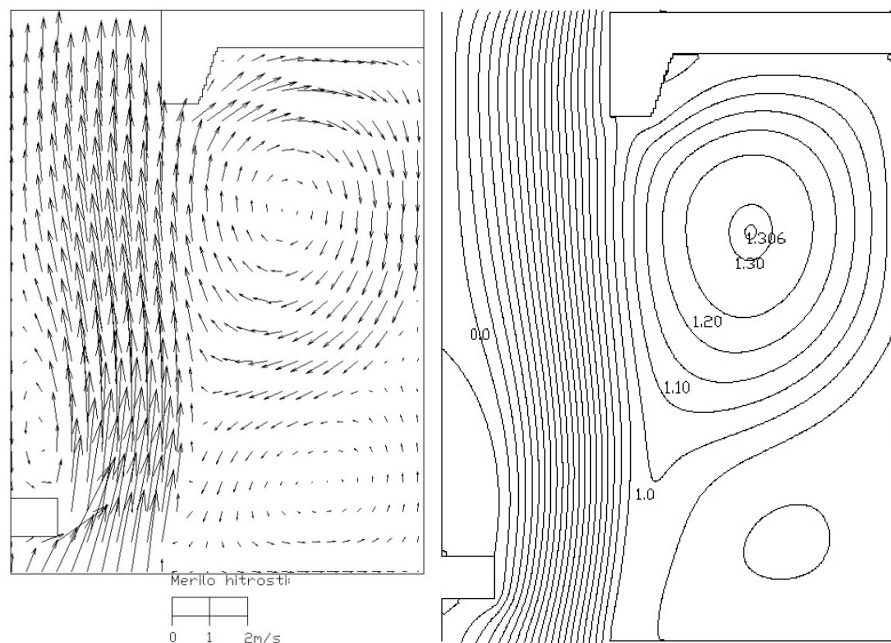
Priloga B.8: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 15 cm in pretok 1200 l/s

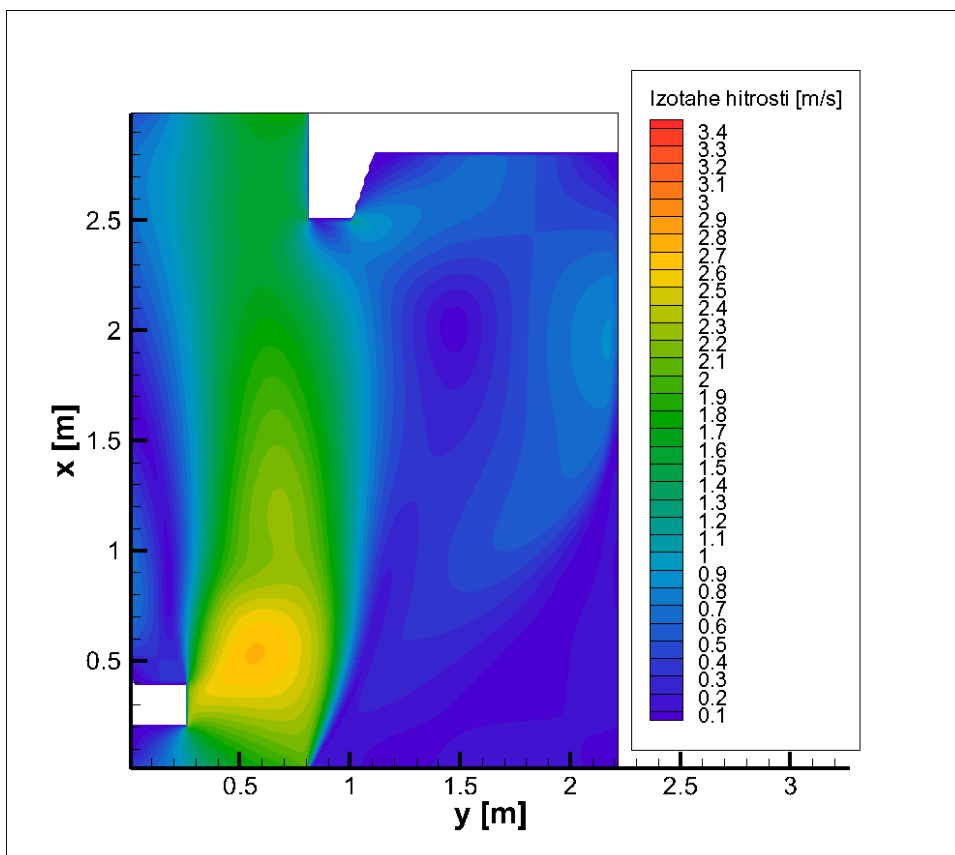
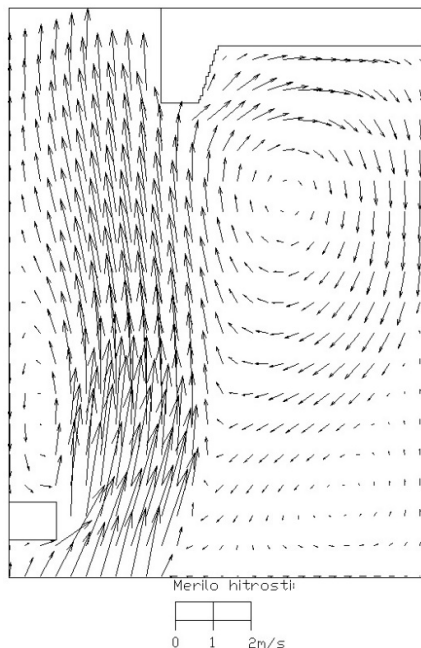


PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH**Priloga B.9: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 15 cm in pretok 1600 l/s**

PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH

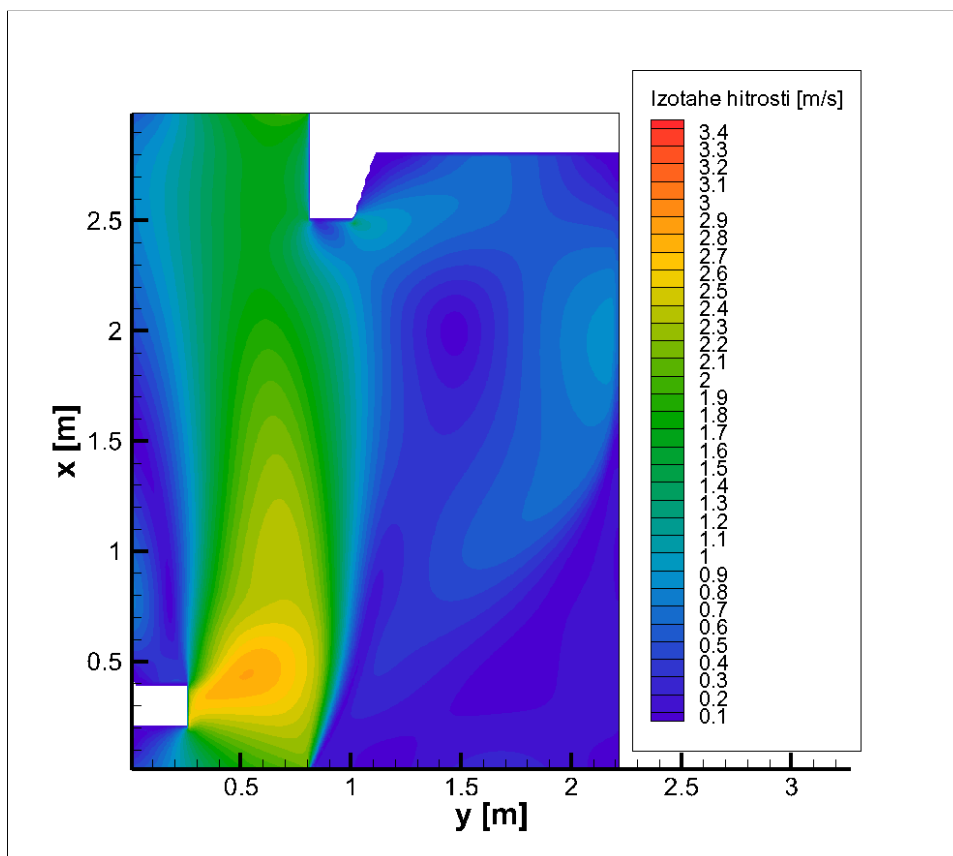
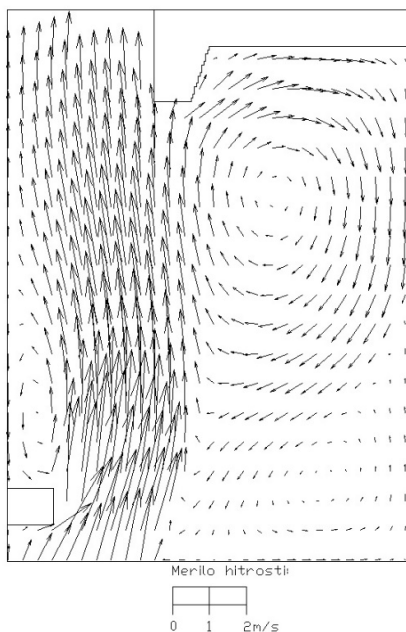
Priloga B.10: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 15 cm in pretok 2000 l/s

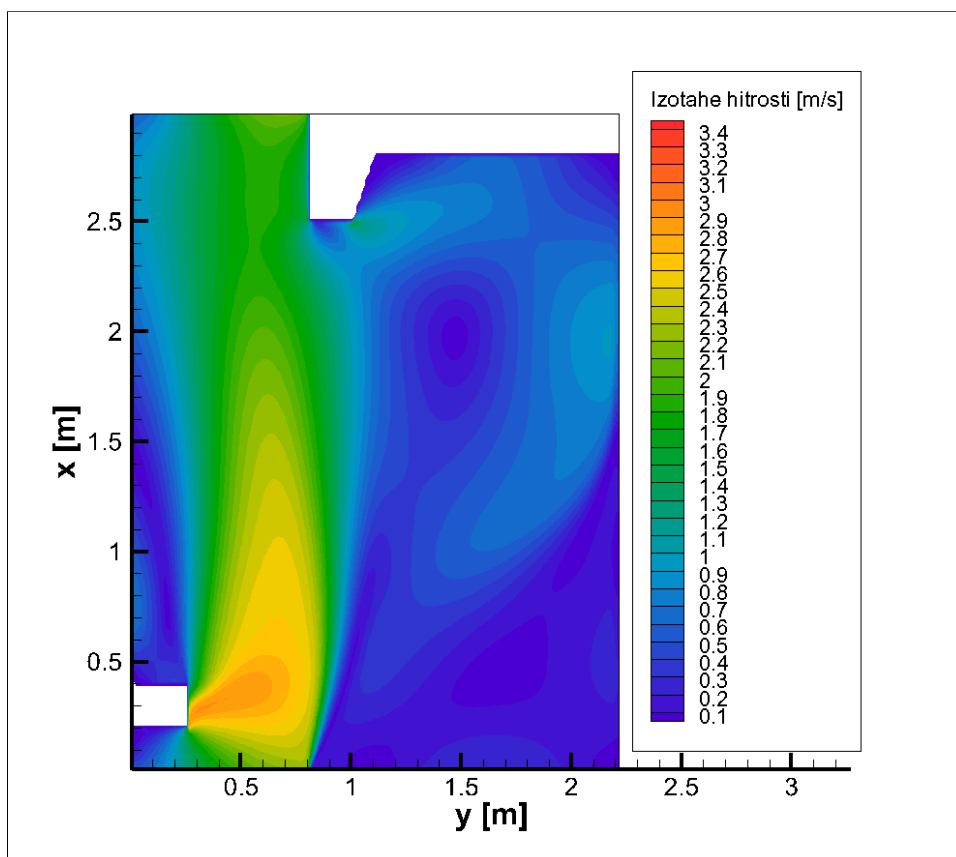
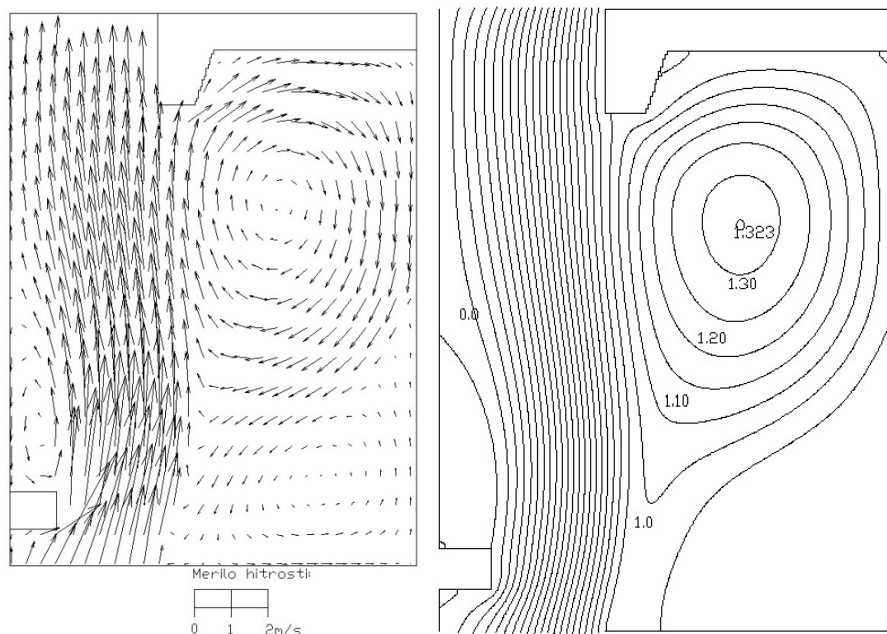


PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH**Priloga B.11: Vektorji in izotahe hitrosti za vzdolžni padec 20 cm in pretok 600 l/s**

PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH

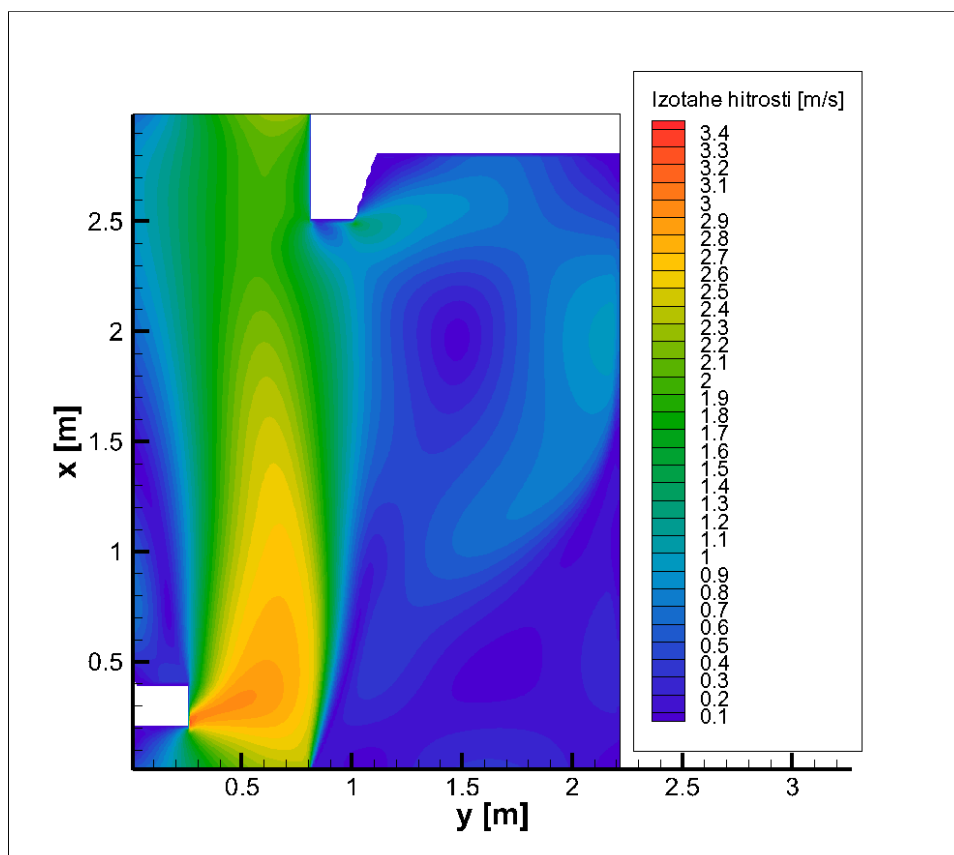
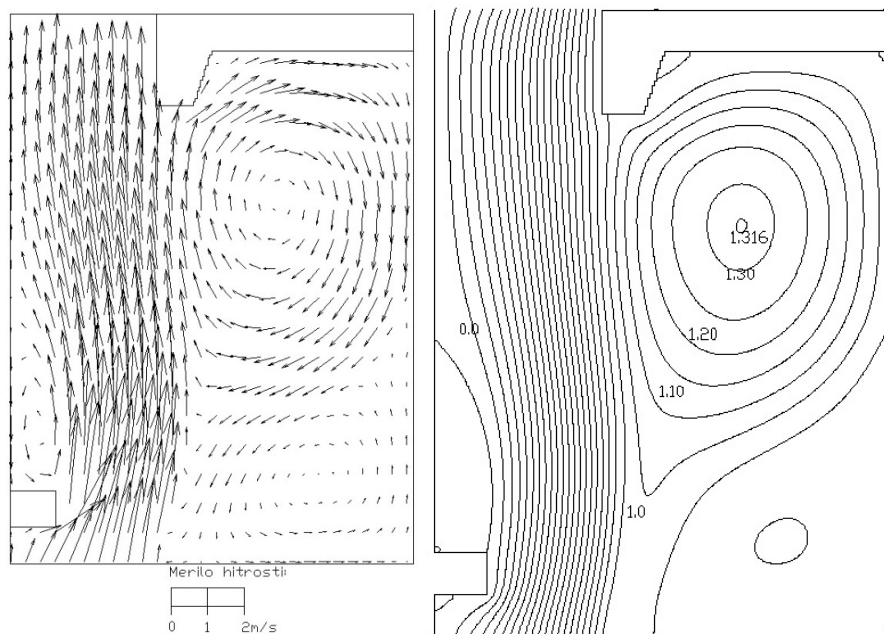
Priloga B.12: Vektorji in izotahe hitrosti za vzdolžni padec 20 cm in pretok 800 l/s

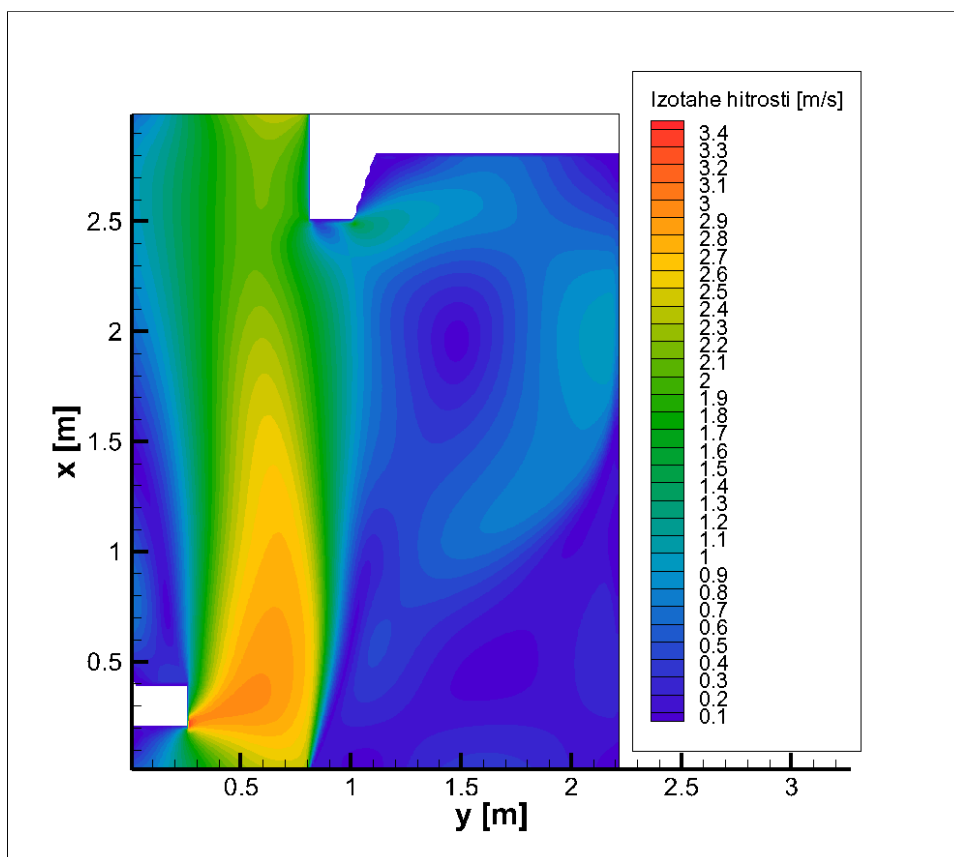
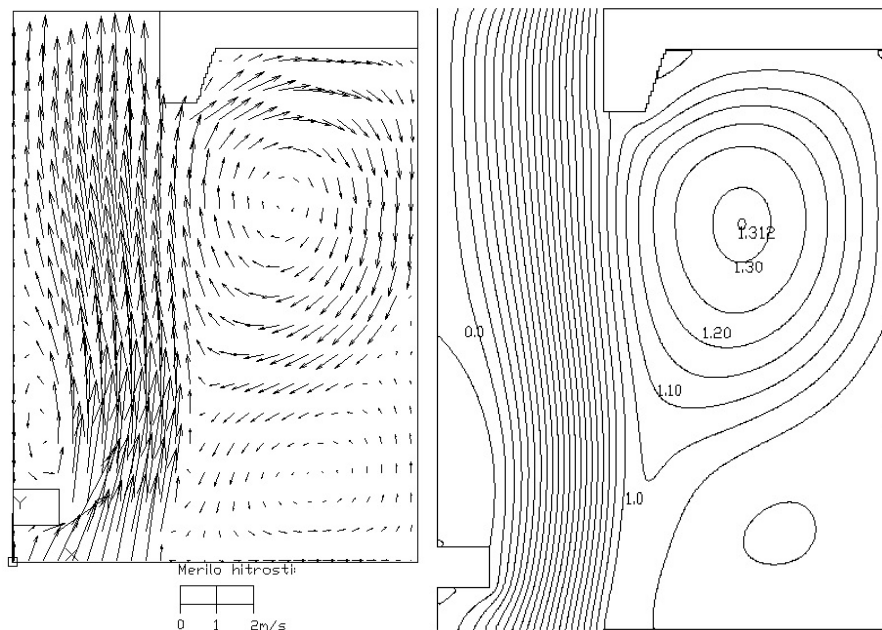


PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH**Priloga B.13: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 20 cm in pretok 1200 l/s**

PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH

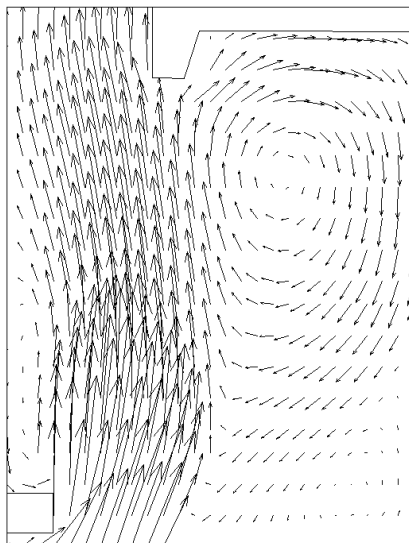
Priloga B.14: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 20 cm in pretok 1600 l/s



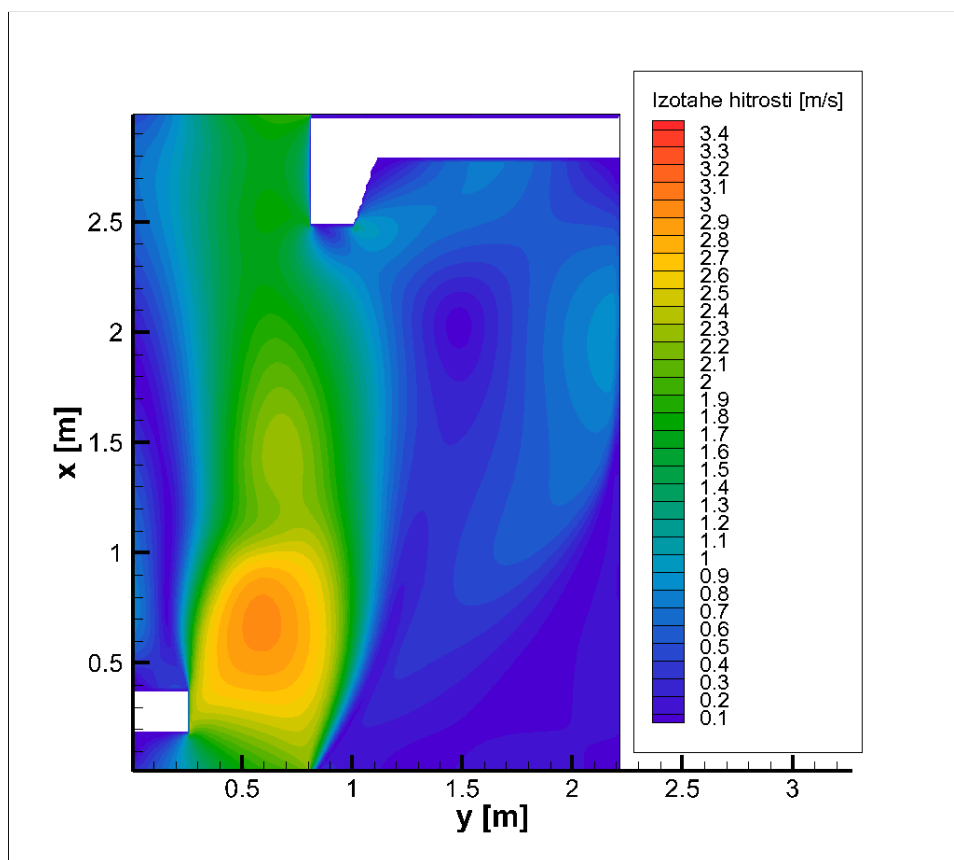
PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH**Priloga B.15: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 20 cm in pretok 2000 l/s**

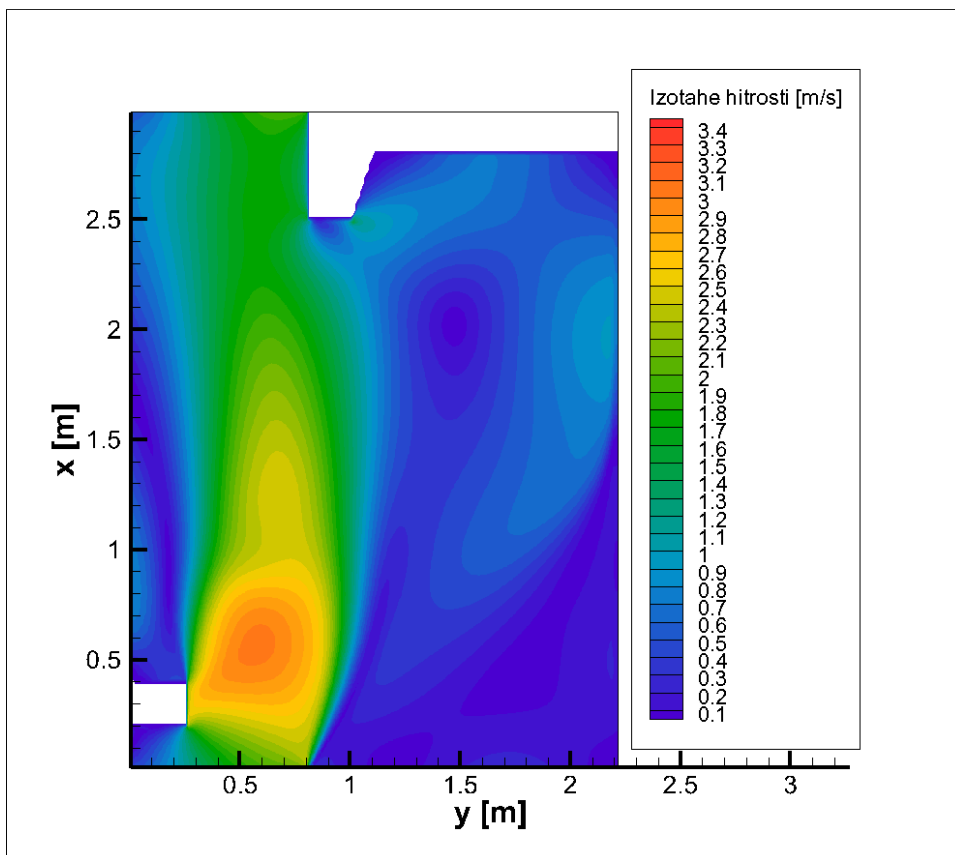
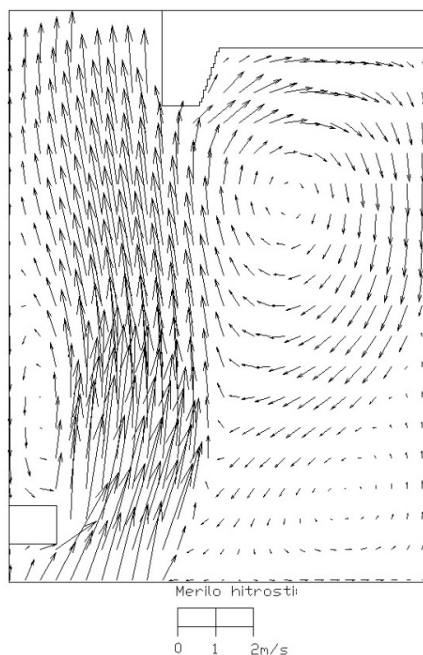
PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH

Priloga B.16: Vektorji in izotahe hitrosti za vzdolžni padec 25 cm in pretok 600 l/s



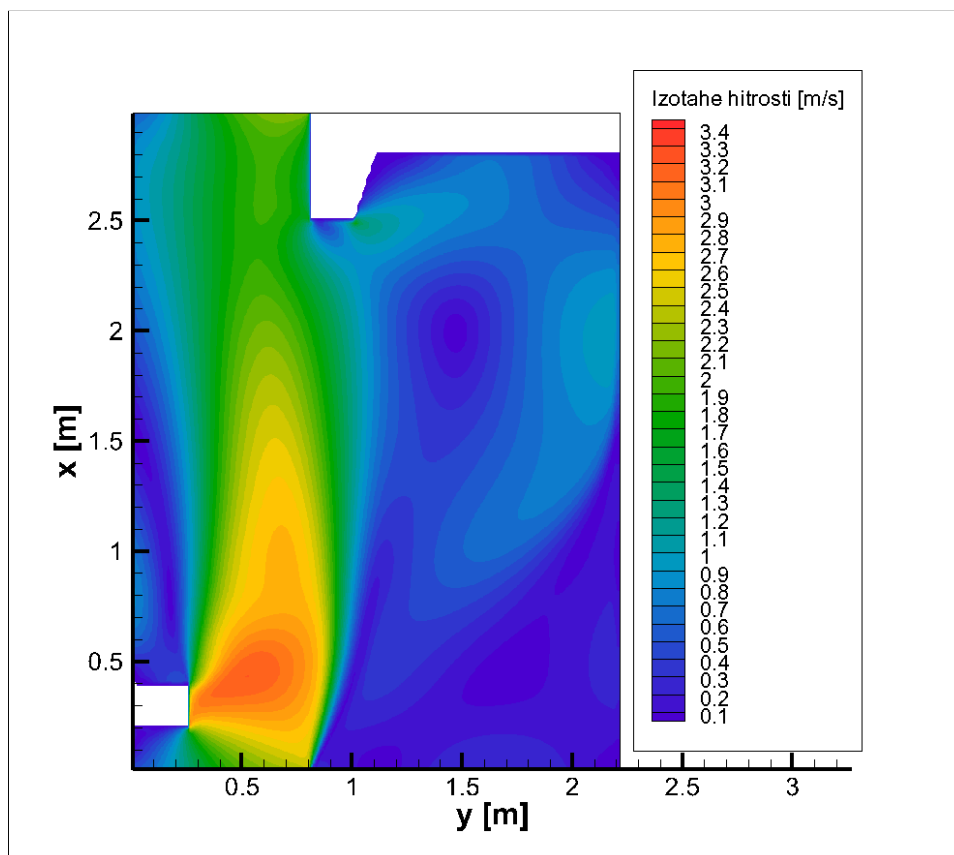
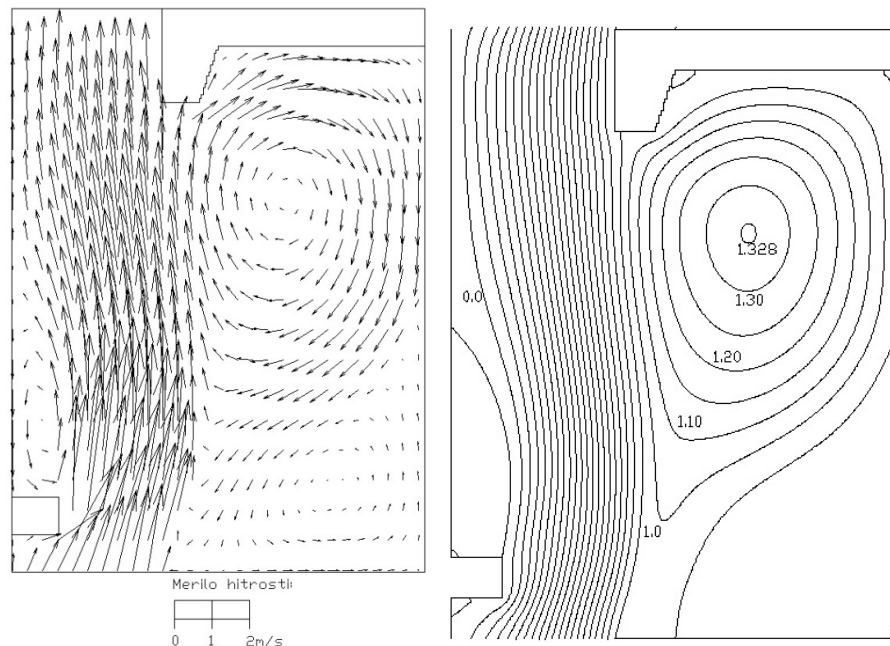
Merilo hitrosti: 1 m/s

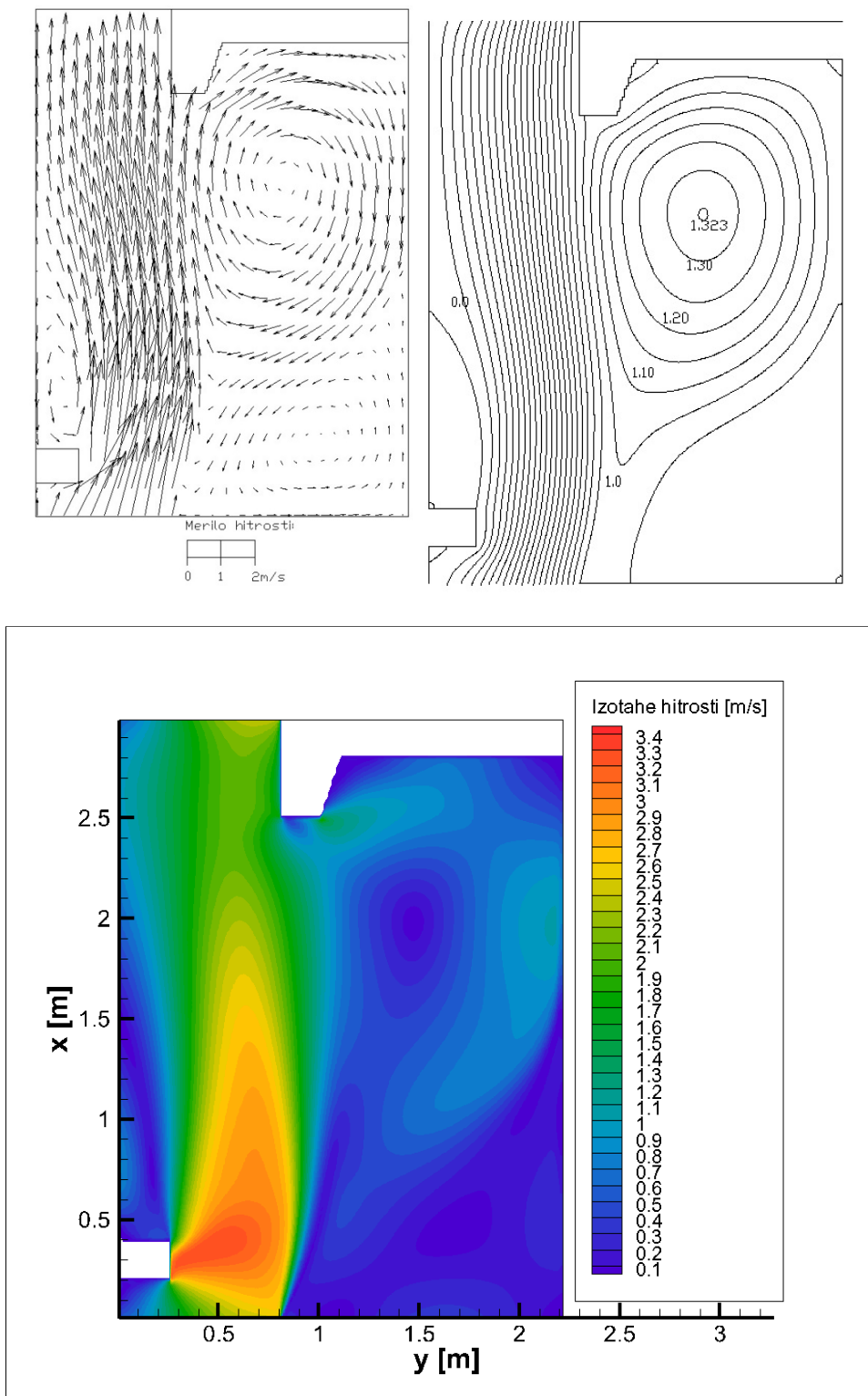


PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH**Priloga B.17: Vektorji in izotahe hitrosti za vzdolžni padec 25 cm in pretok 800 l/s**

PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH

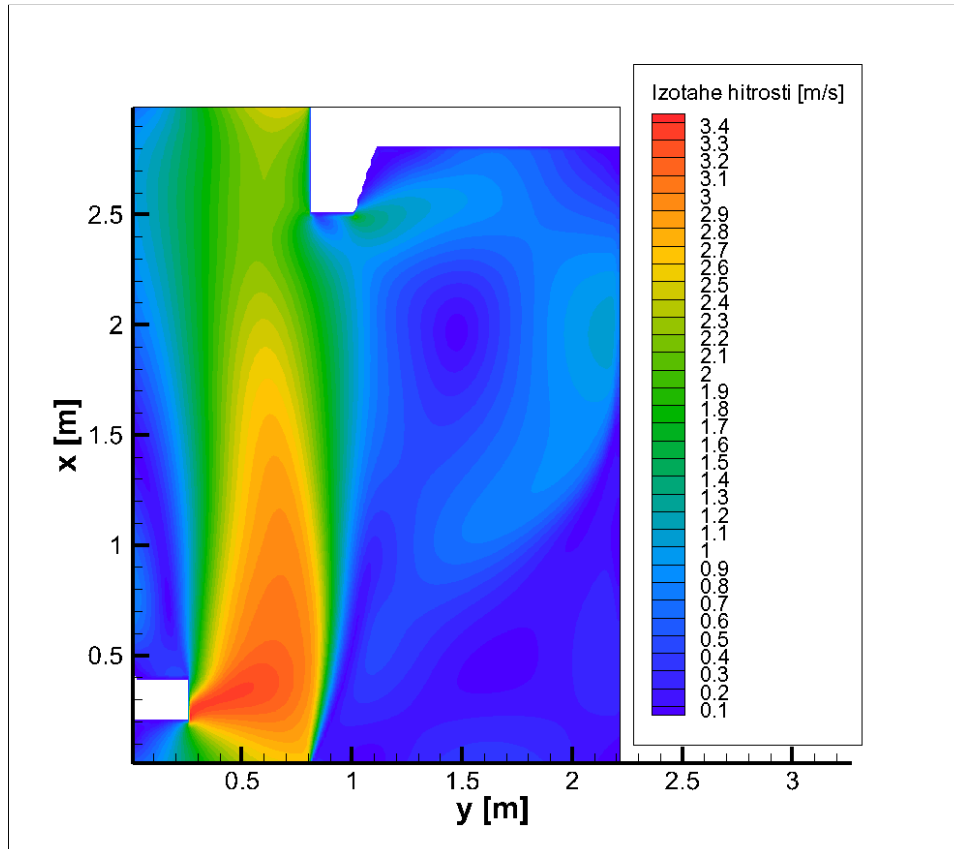
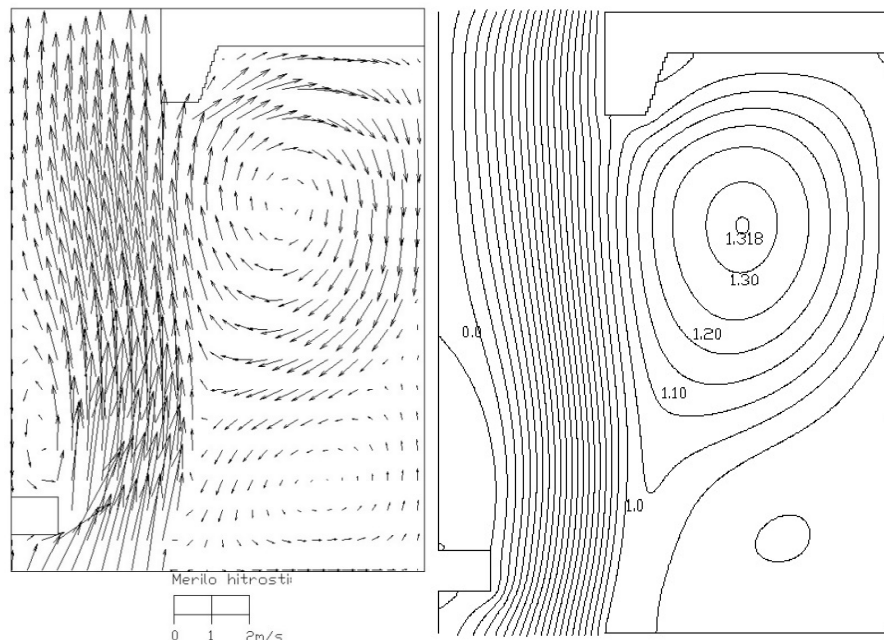
Priloga B.18: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 25 cm in pretok 1200 l/s

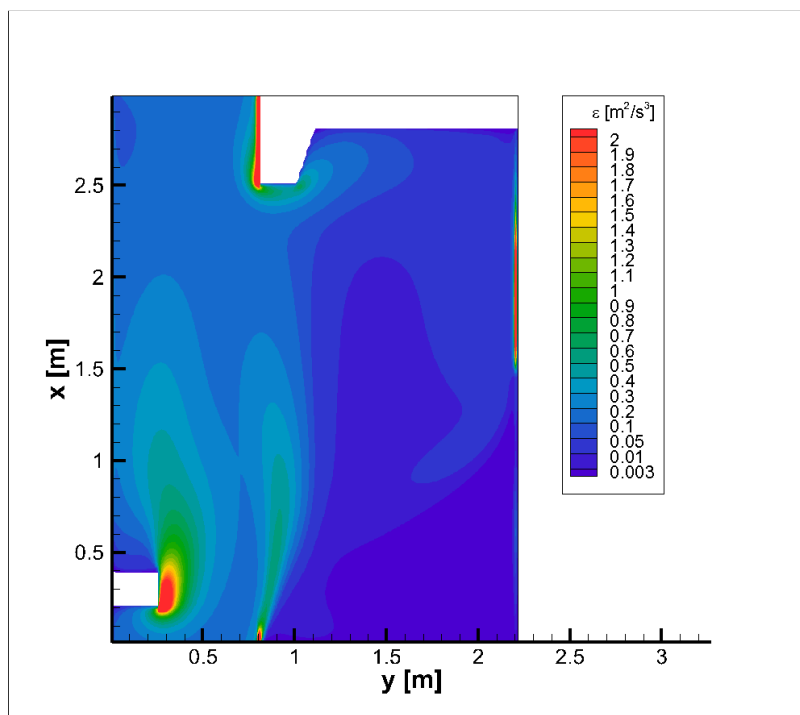
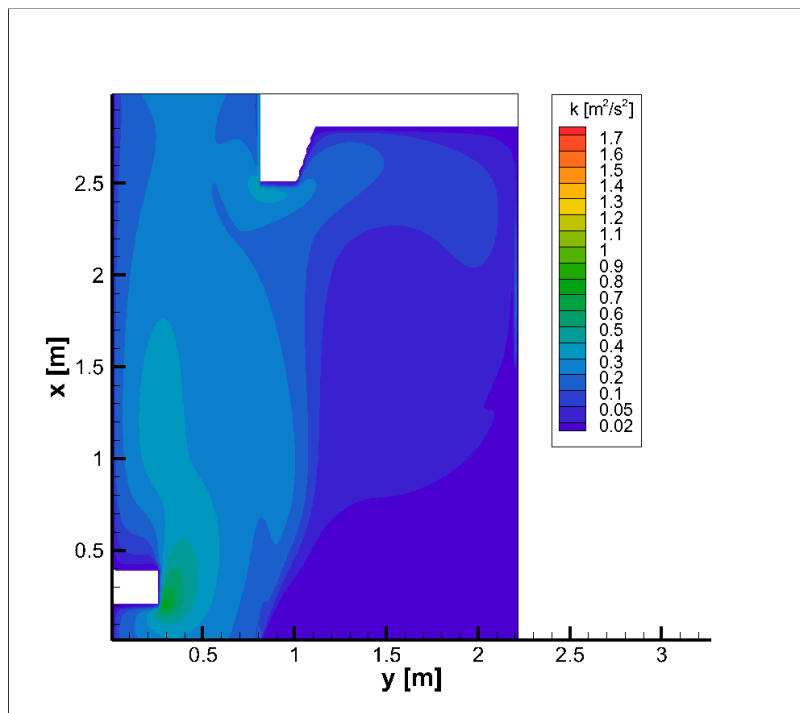


PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH**Priloga B.19: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 25 cm in pretok 1600 l/s**

PRILOGA B: PRIKAZ VEKTORJEV HITROSTI IN TOKOVNIC MATEMATIČNEGA MODELA PO PRIMERIH

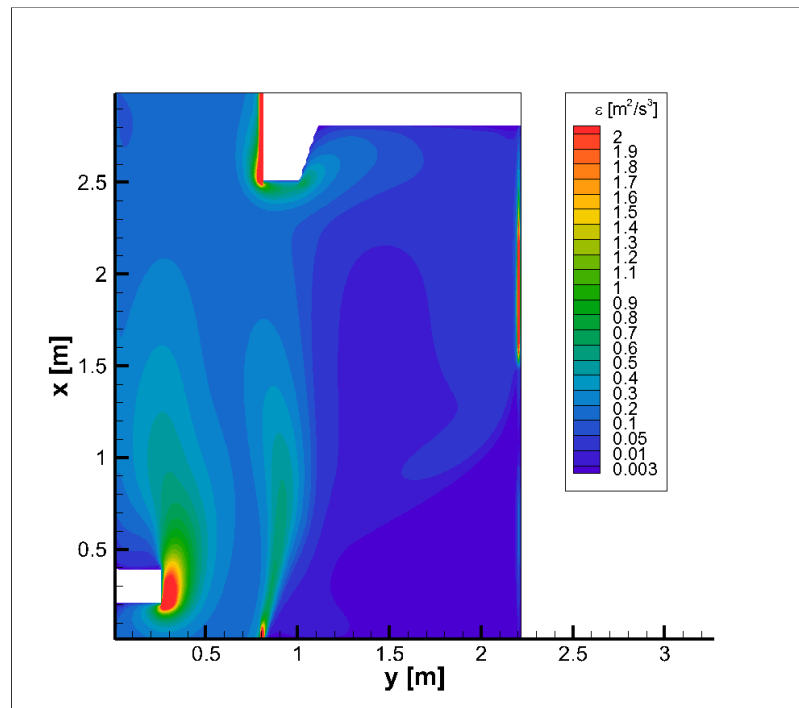
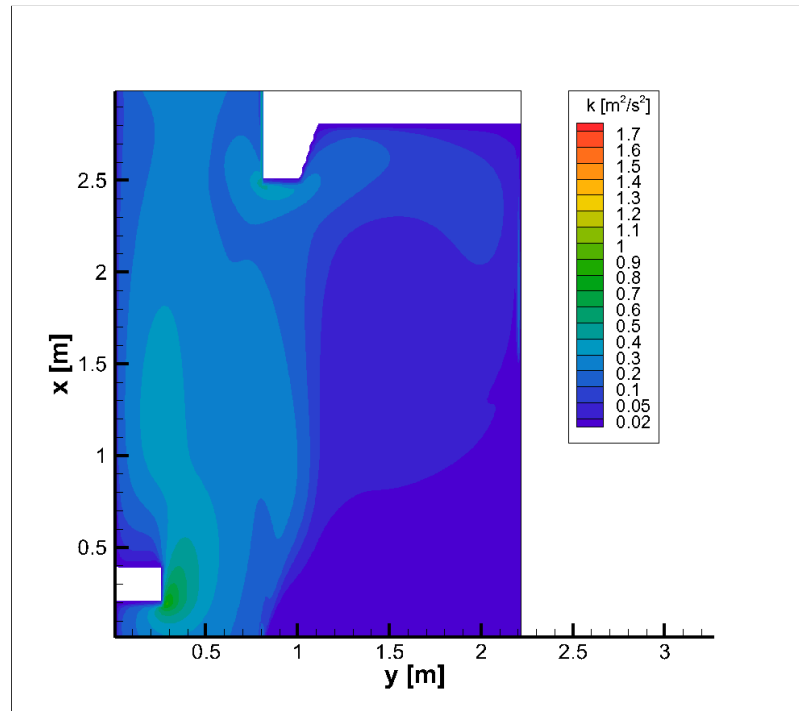
Priloga B.20: Vektorji in izotahe hitrosti ter tokovnice za vzdolžni padec 25 cm in pretok 2000 l/s

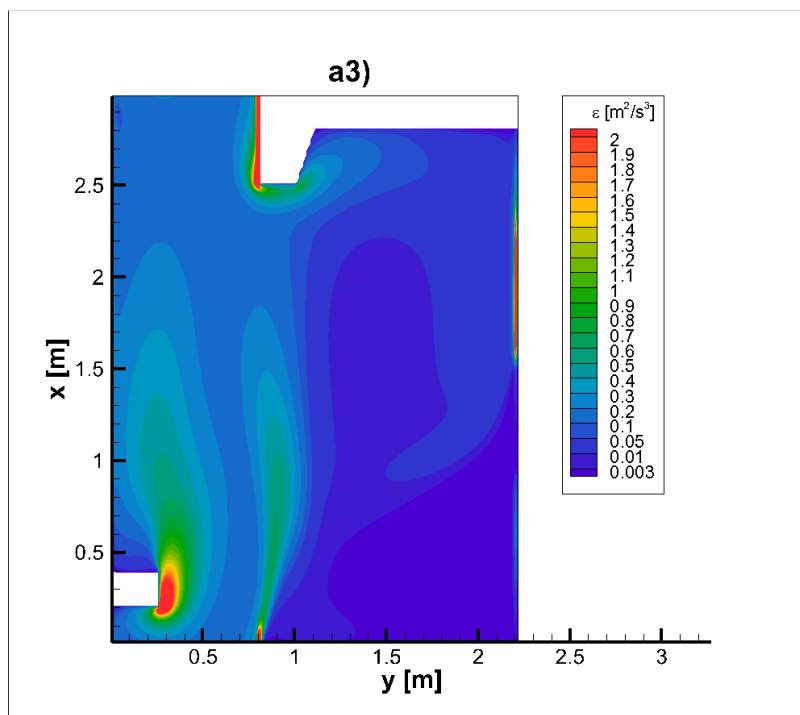
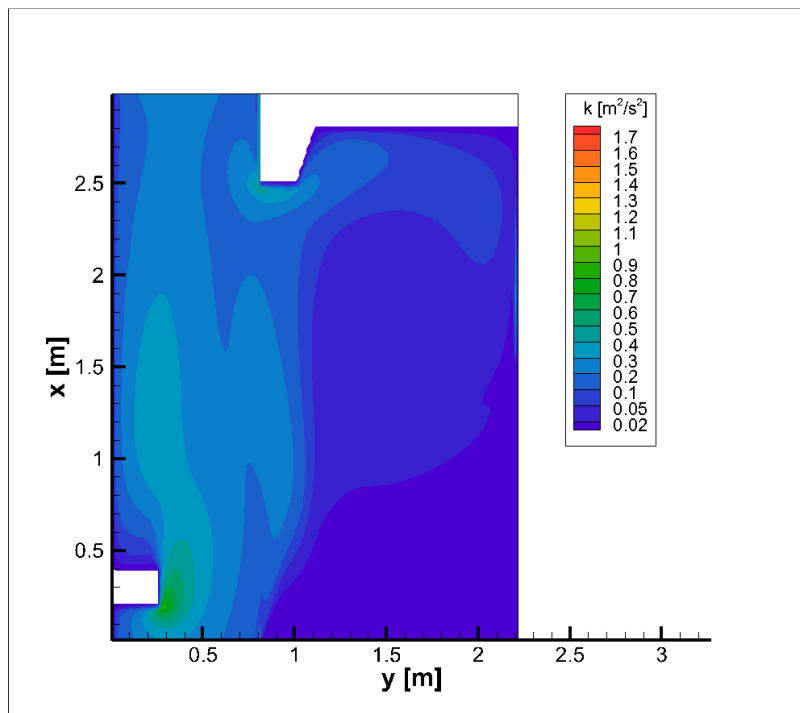


PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε **Priloga C.1: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 10 cm in pretok 600 l/s**

PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε

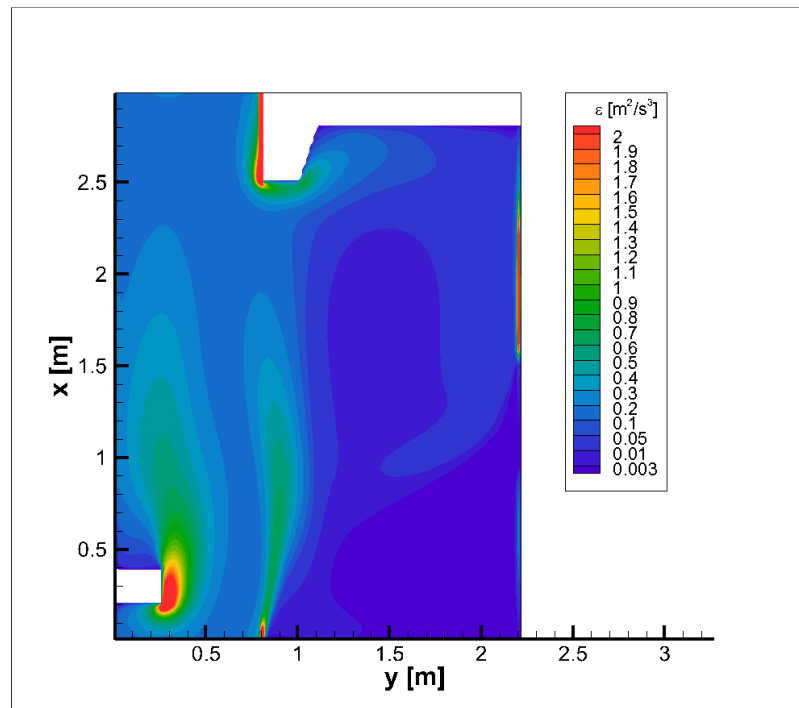
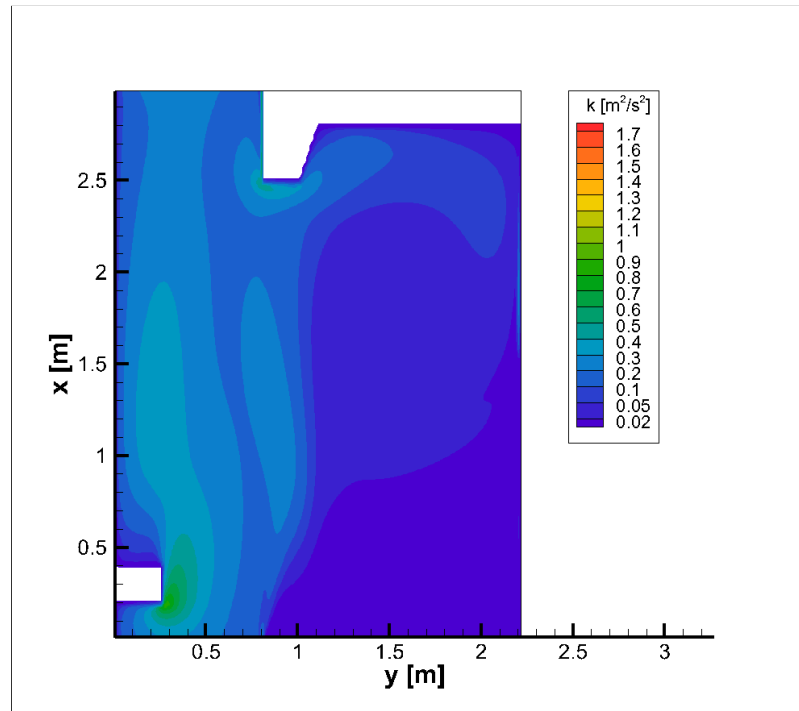
Priloga C.2: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 10 cm in pretok 800 l/s

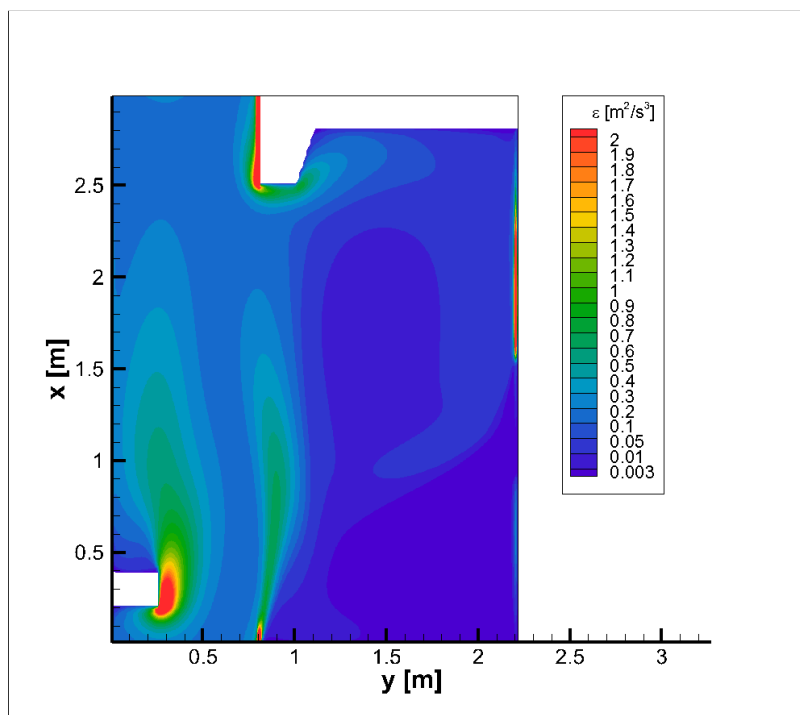
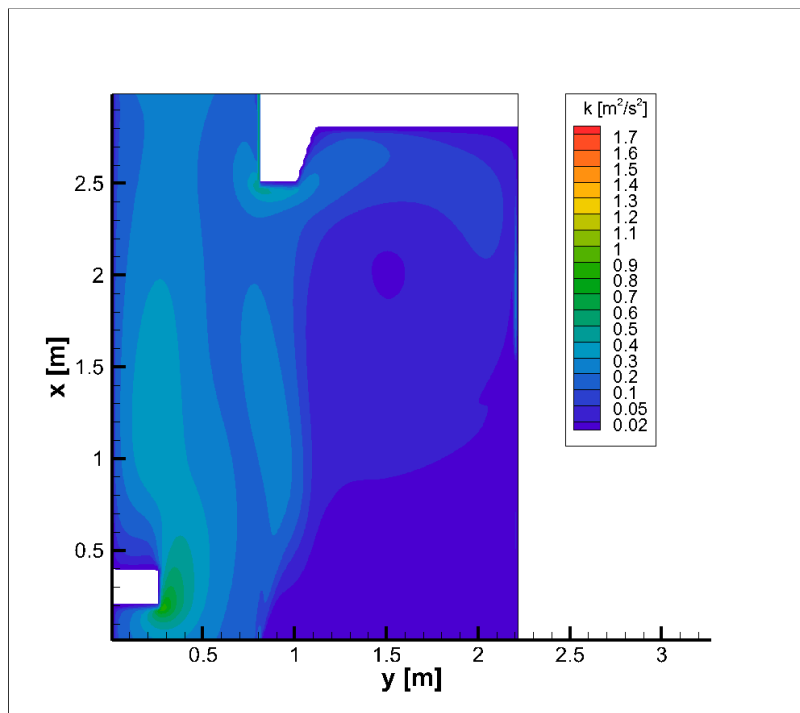


PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε **Priloga C.3: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 10 cm in pretok 1200 l/s**

PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε

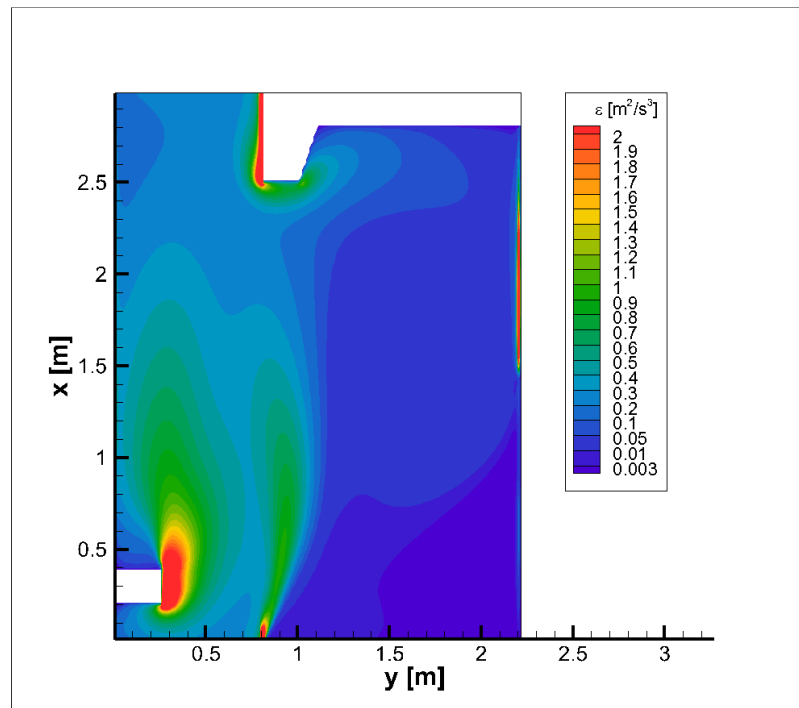
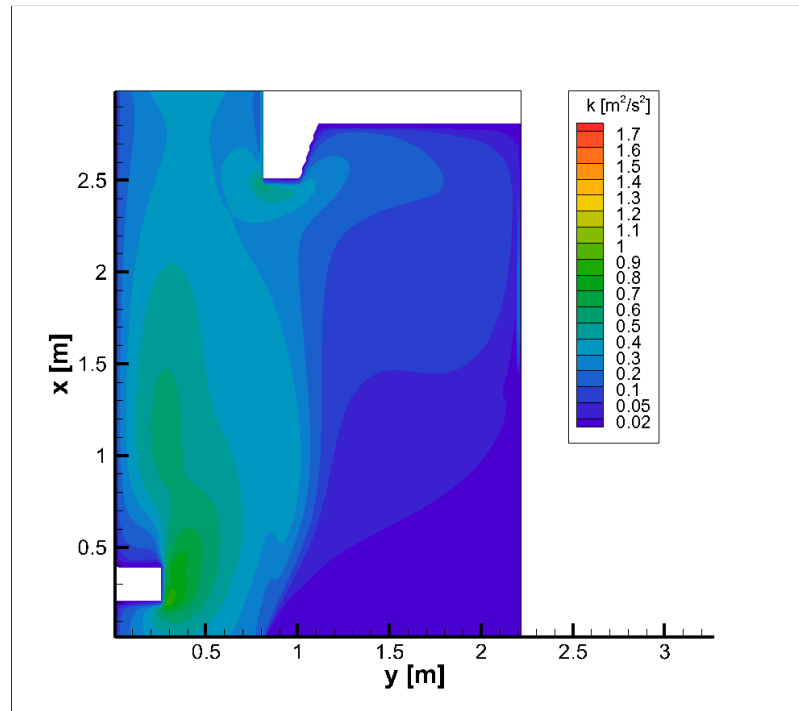
Priloga C.4: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 10 cm in pretok 1600 l/s

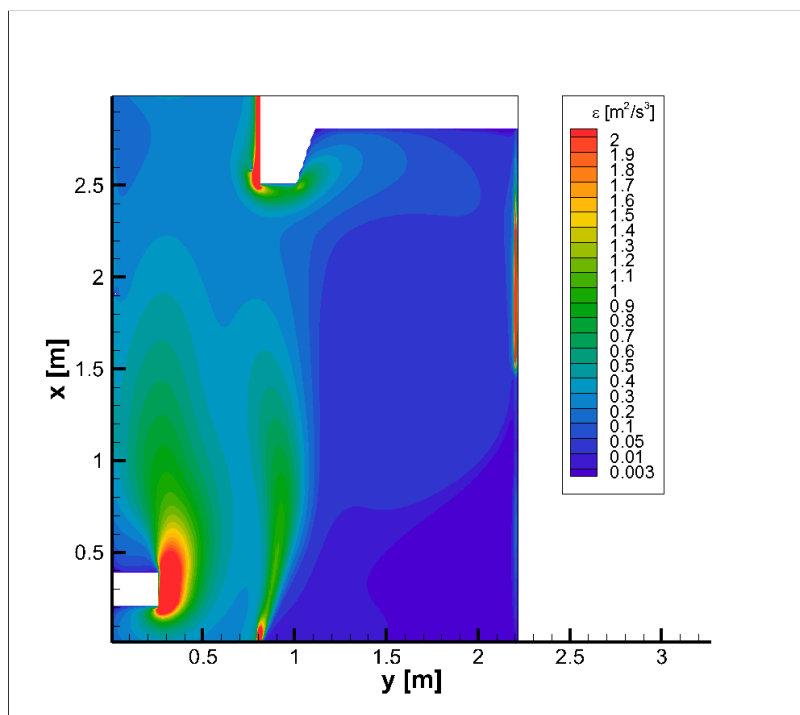
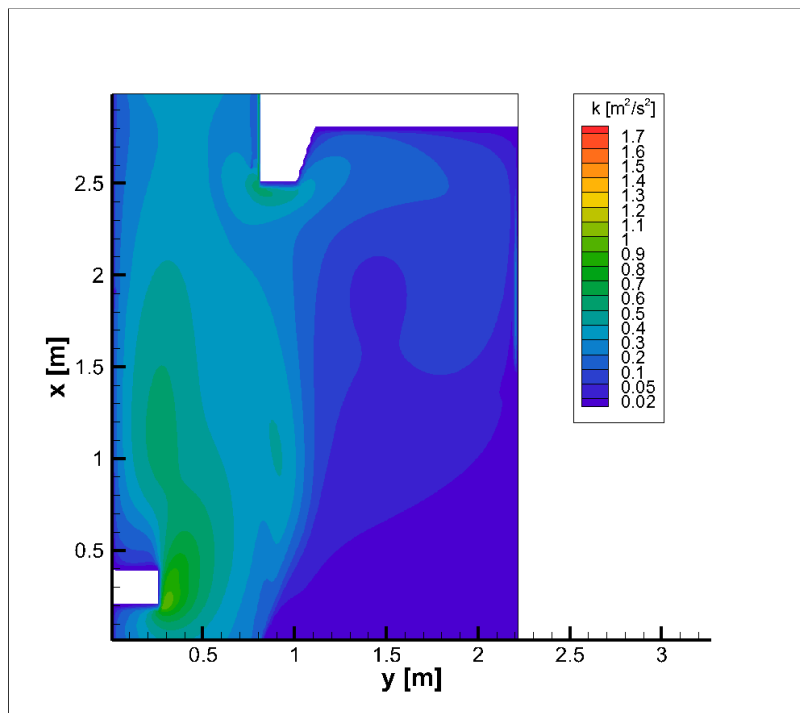


PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε **Priloga C.5: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 10 cm in pretok 2000 l/s**

PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε

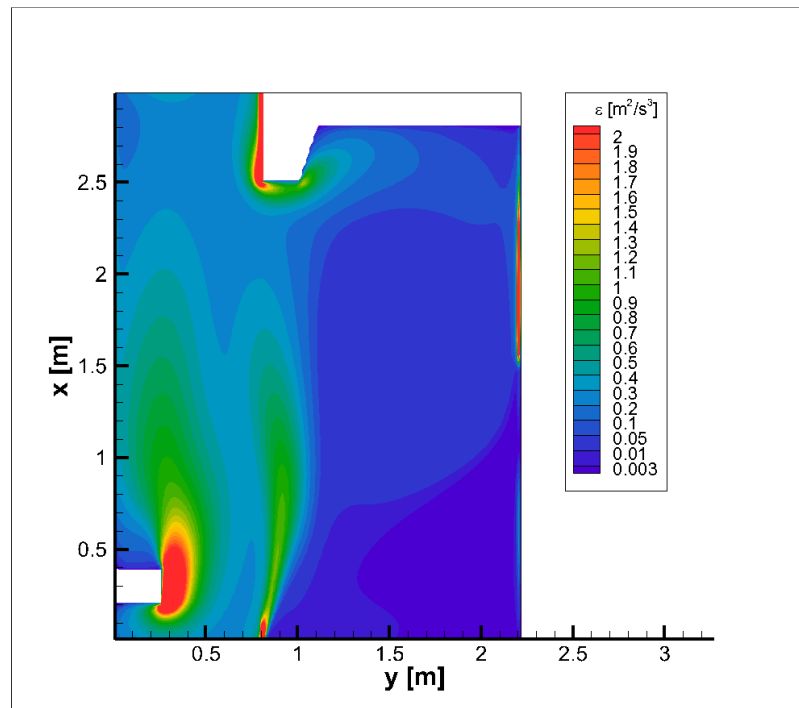
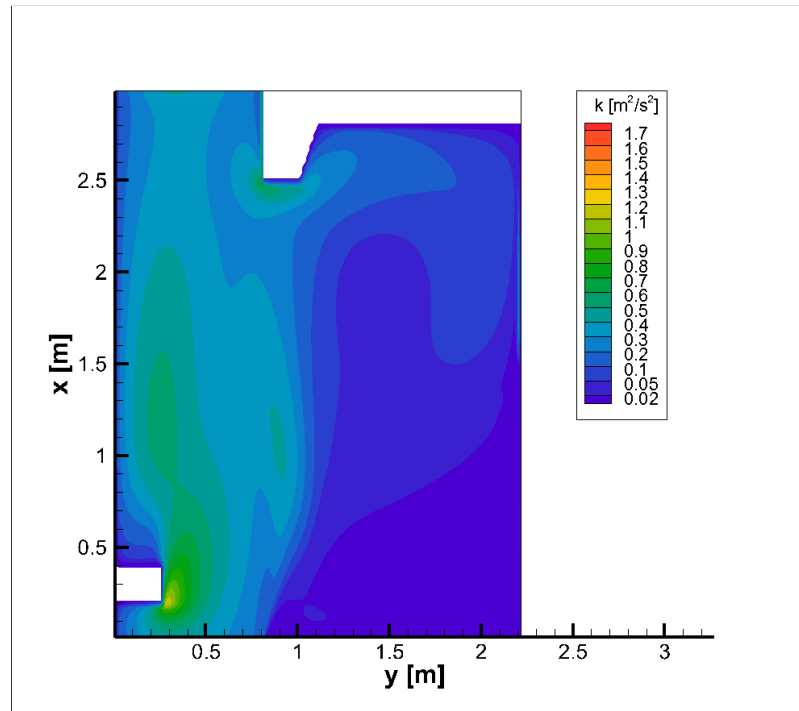
Priloga C.6: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 15 cm in pretok 600 l/s

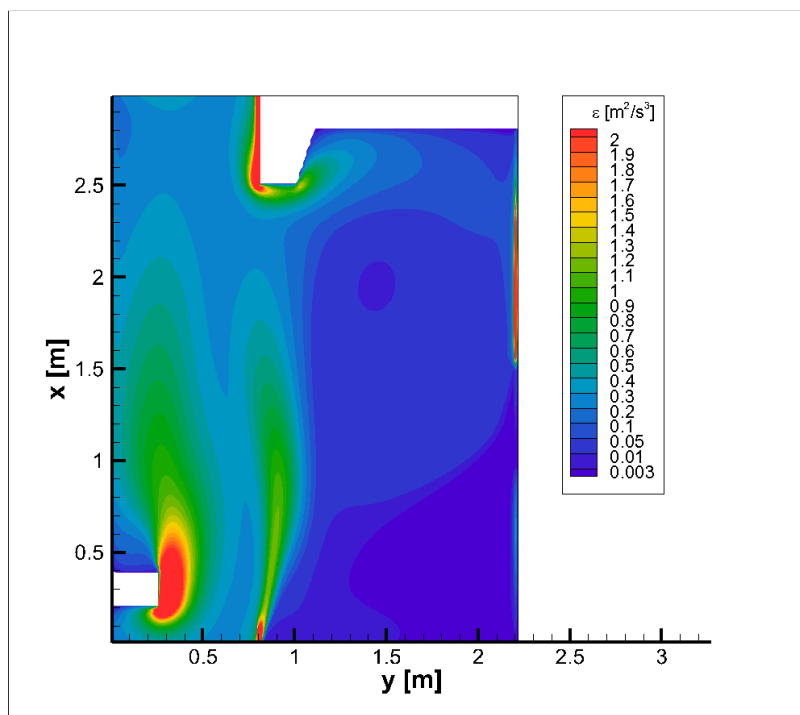
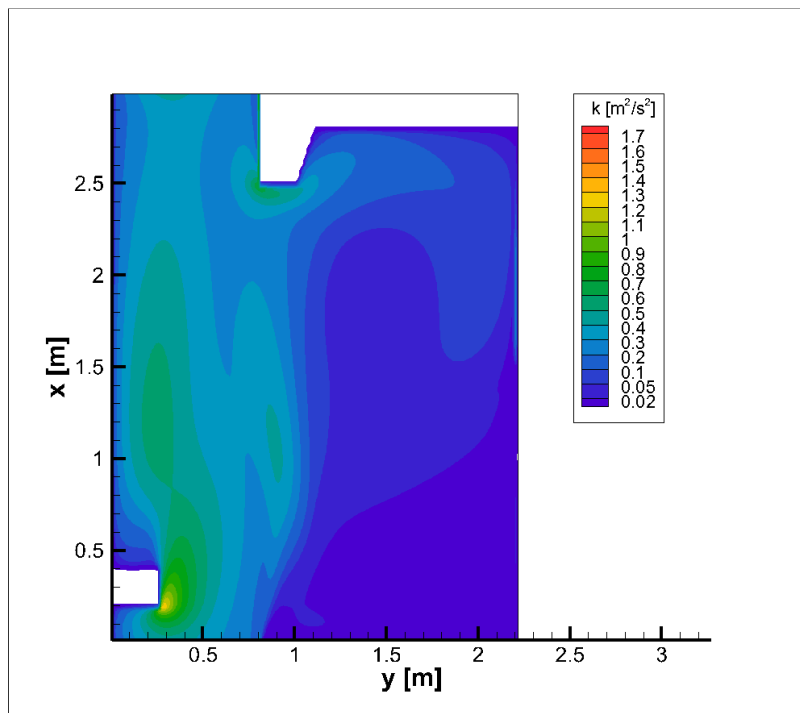


PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε **Priloga C.7: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 15 cm in pretok 800 l/s**

PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε

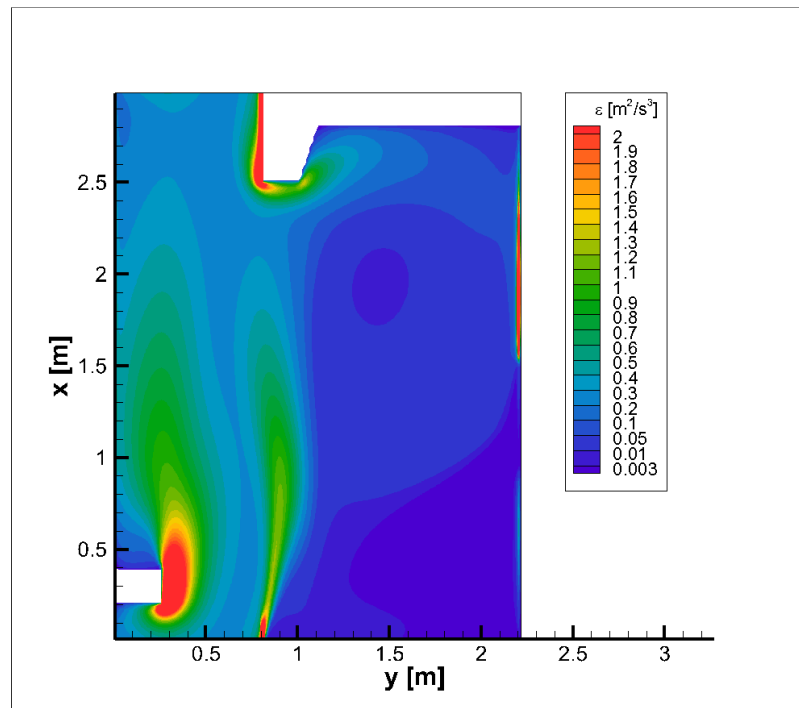
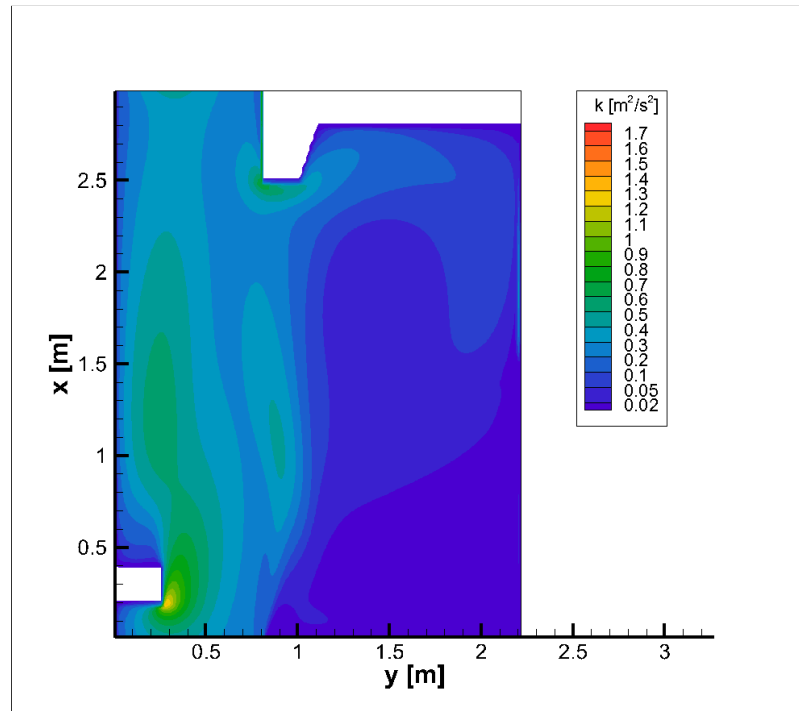
Priloga C.8: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 15 cm in pretok 1200 l/s

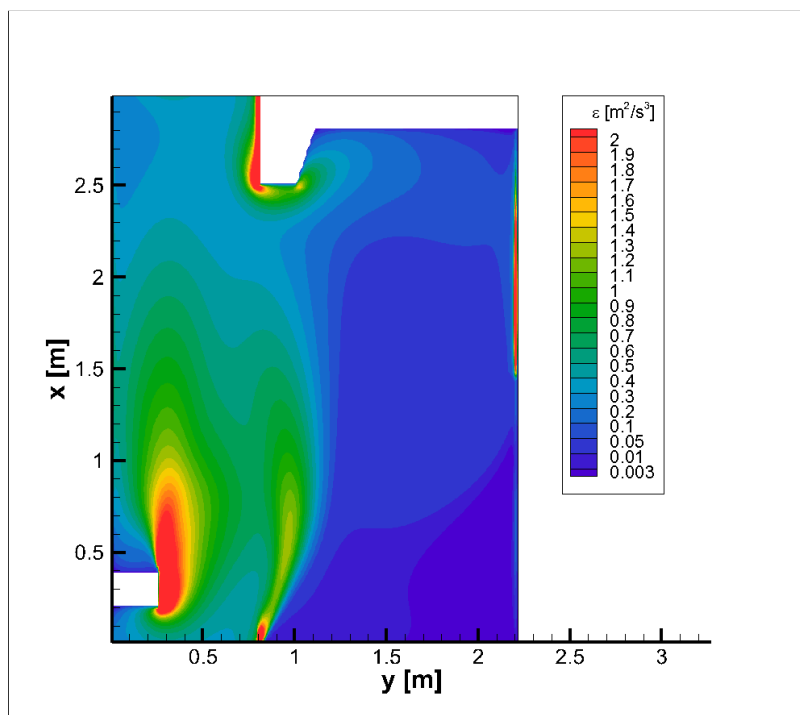
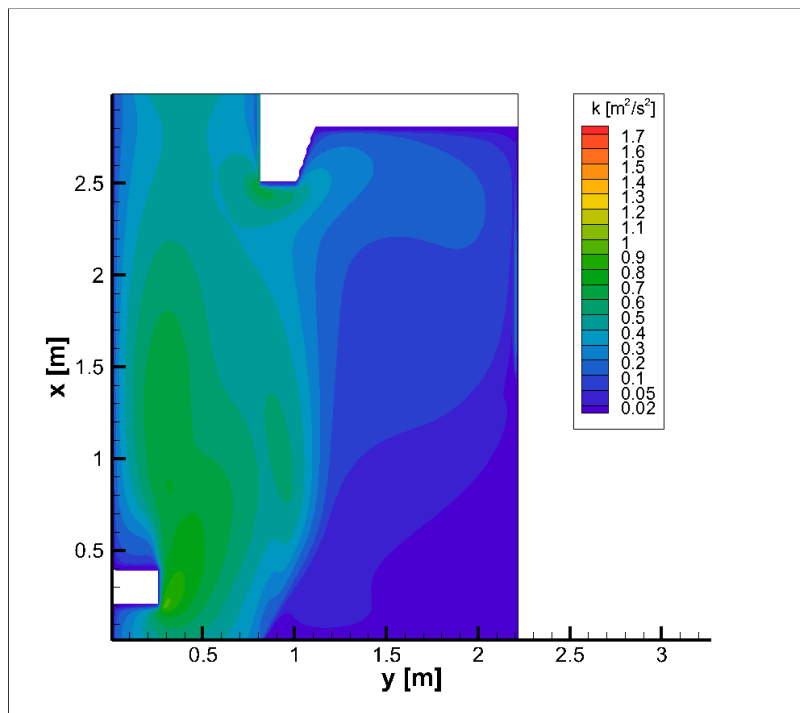


PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε **Priloga C.9: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 15 cm in pretok 1600 l/s**

PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε

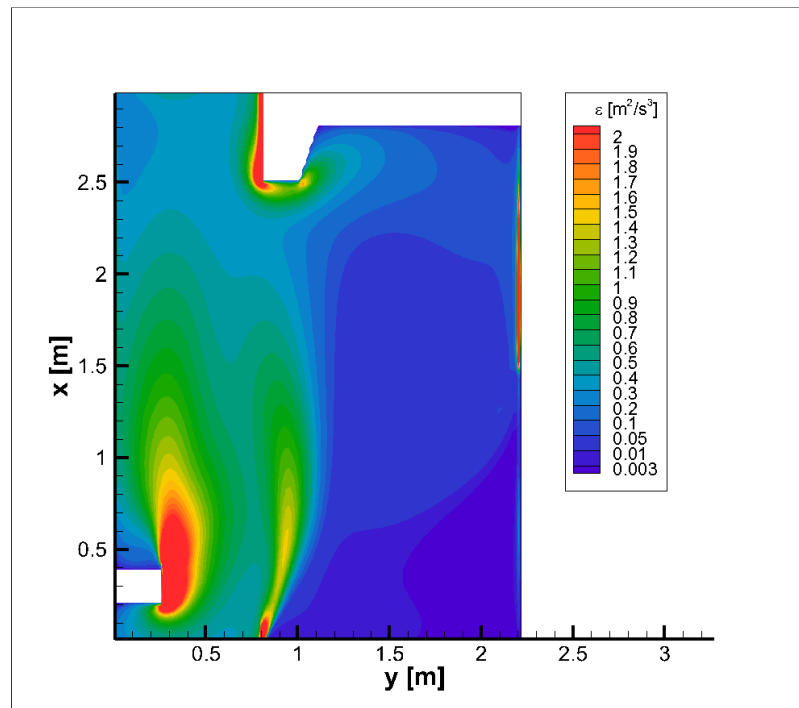
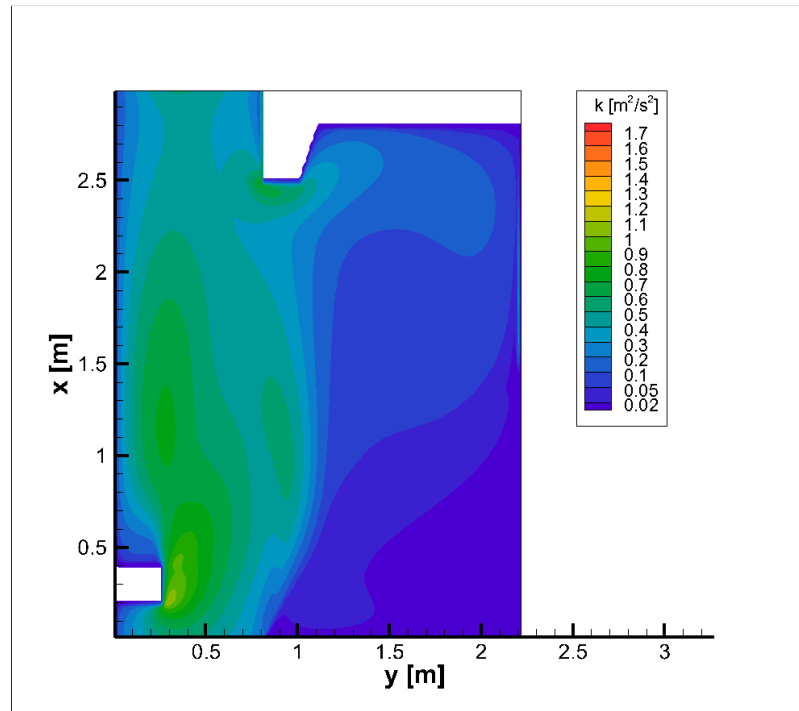
Priloga C.10: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 15 cm in pretok 2000 l/s

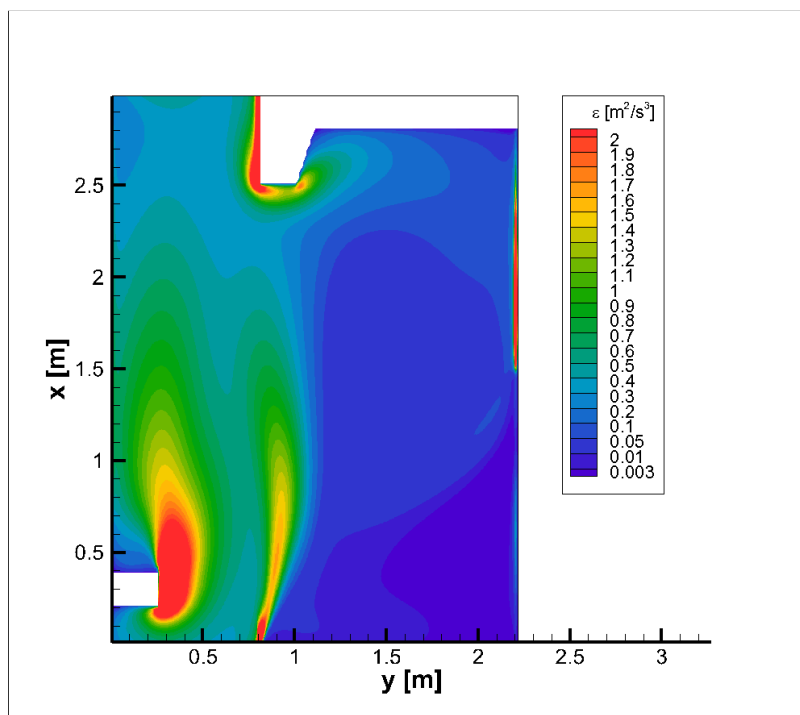
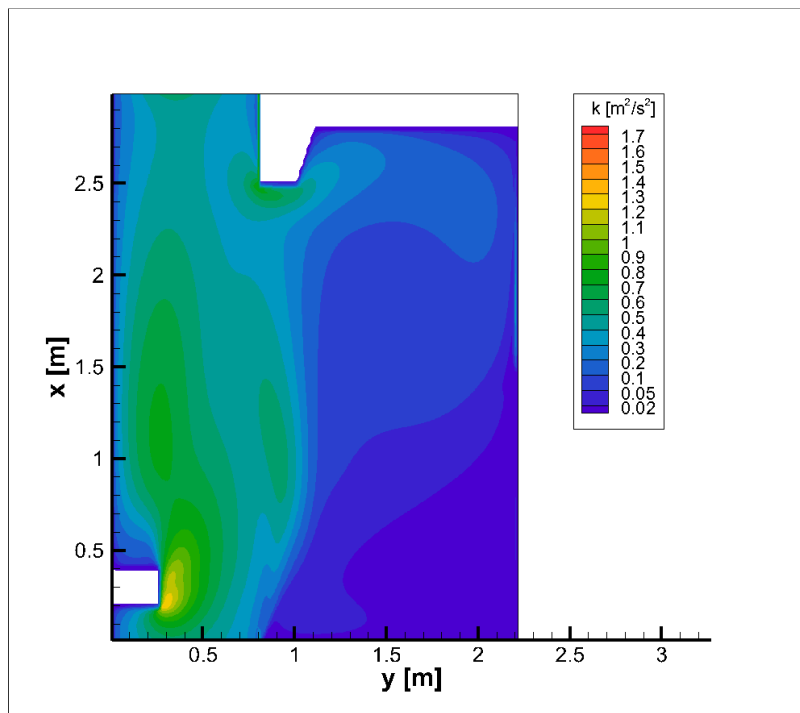


PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε **Priloga C.11: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 20 cm in pretok 600 l/s**

PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε

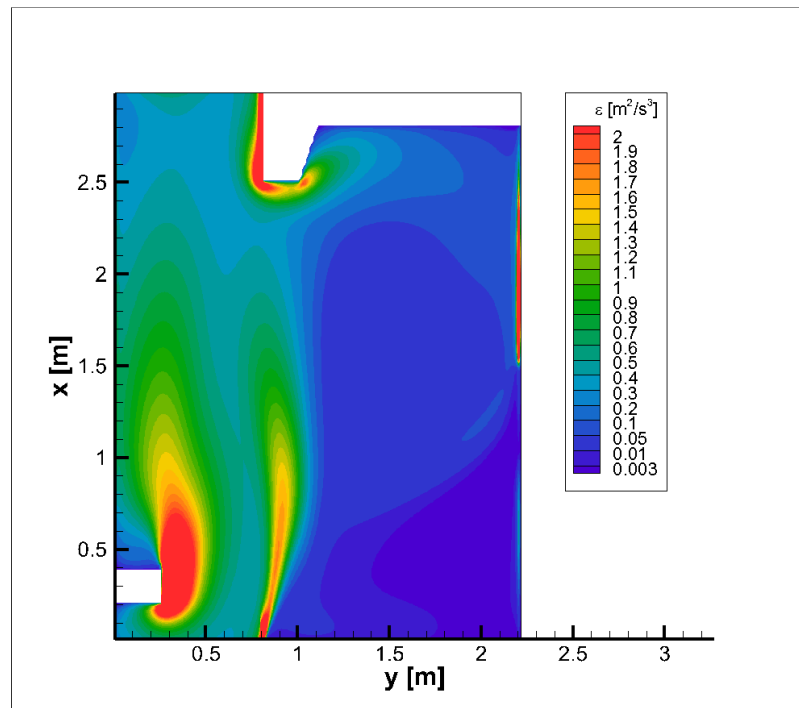
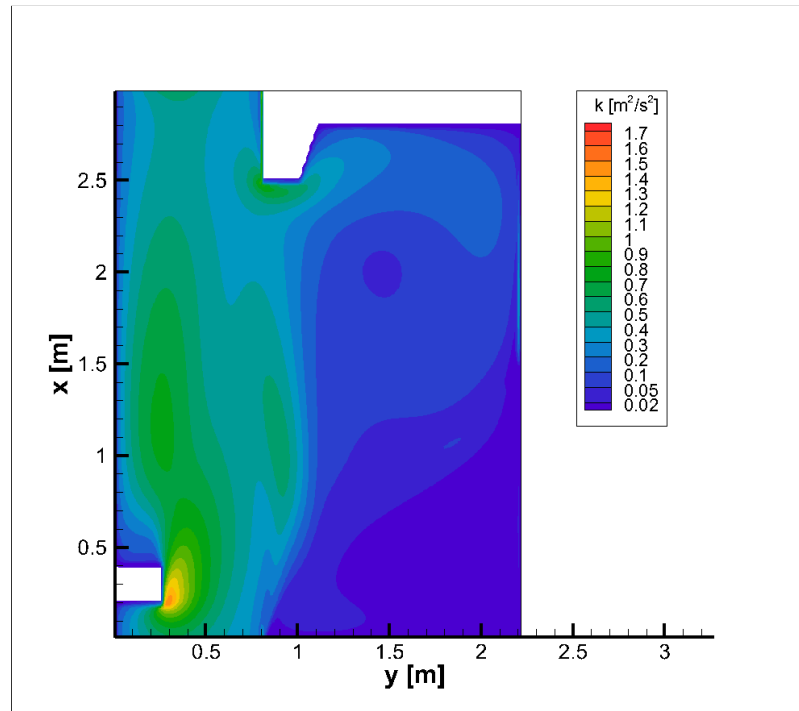
Priloga C.12: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 20 cm in pretok 800 l/s

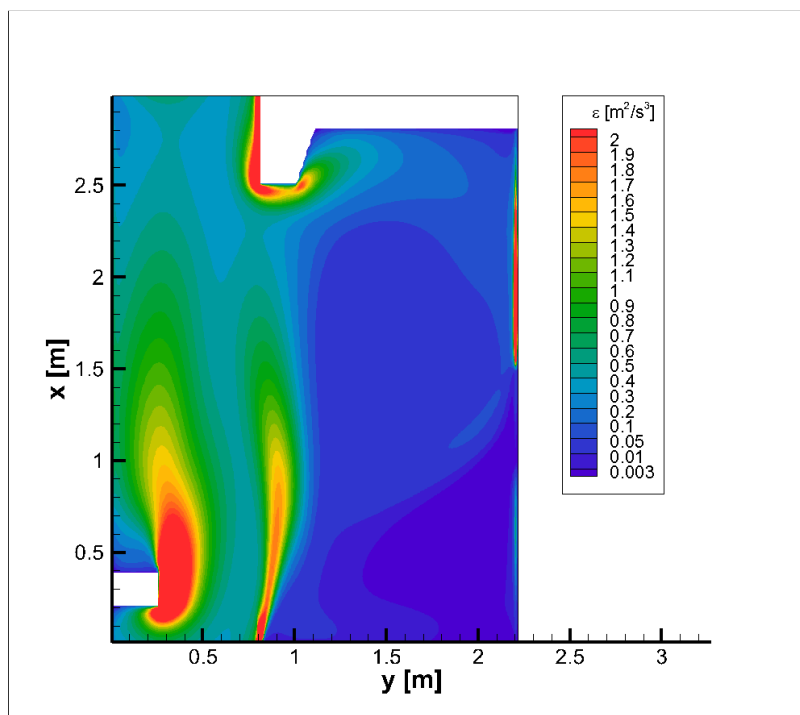
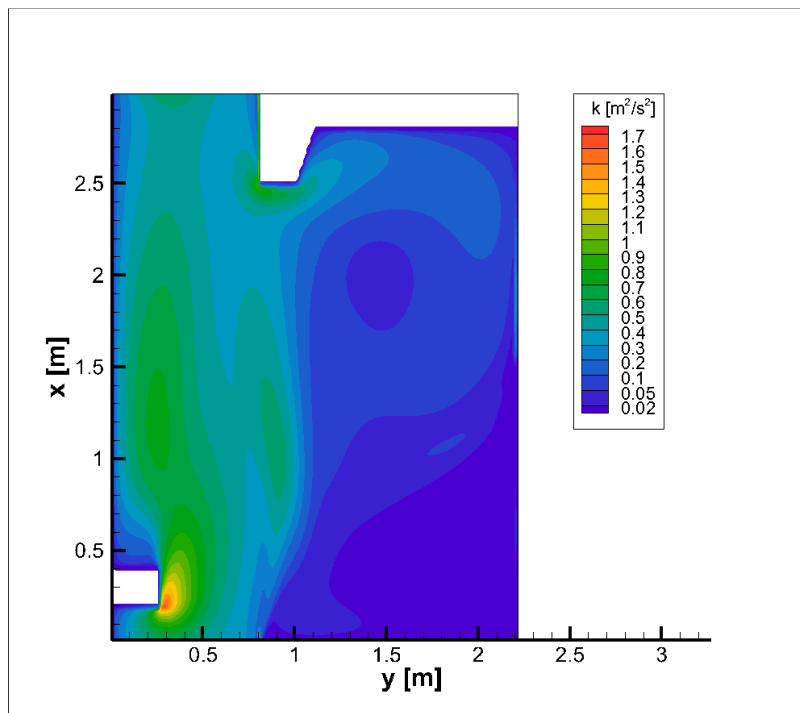


PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε **Priloga C.13: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 20 cm in pretok 1200 l/s**

PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε

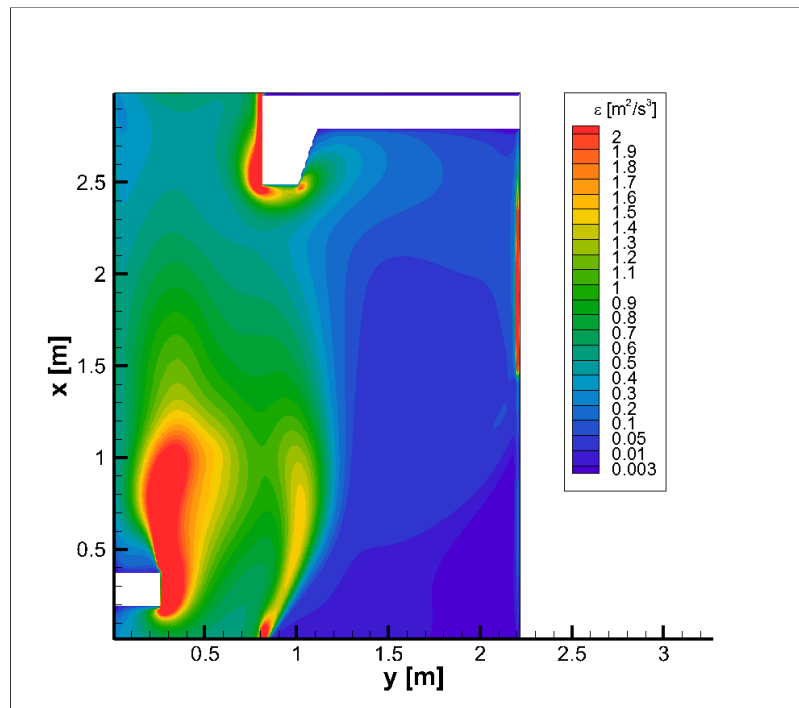
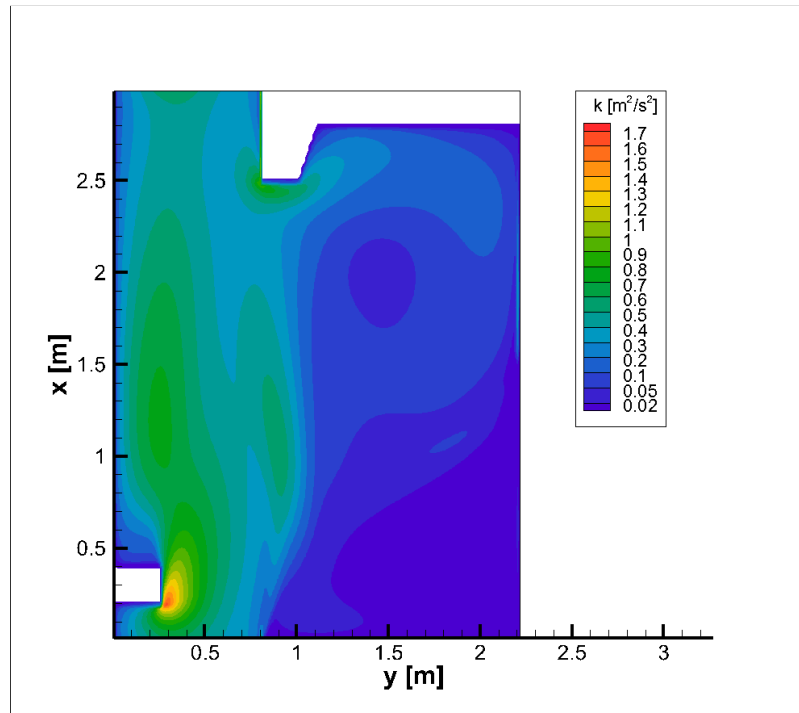
Priloga C.14: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 20 cm in pretok 1600 l/s

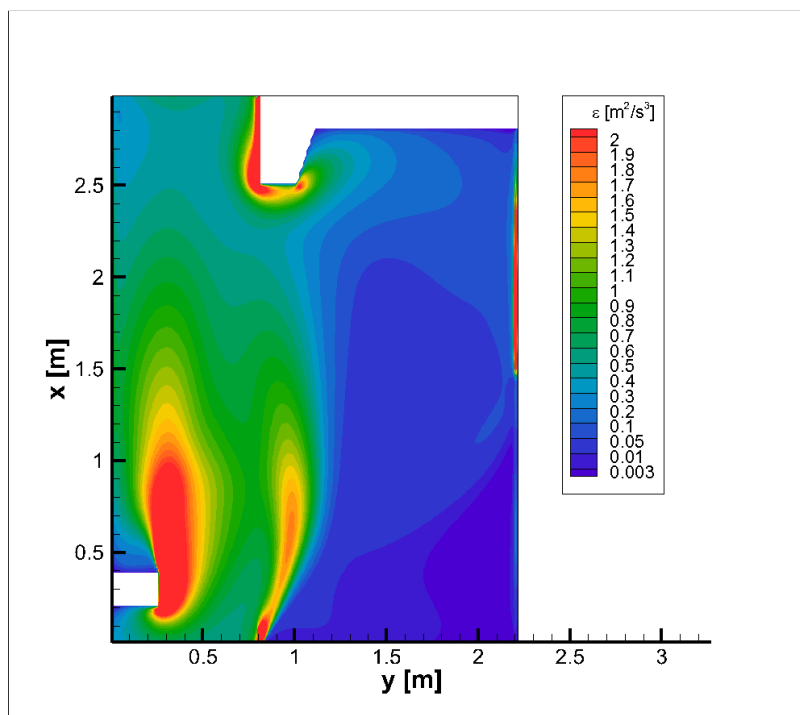
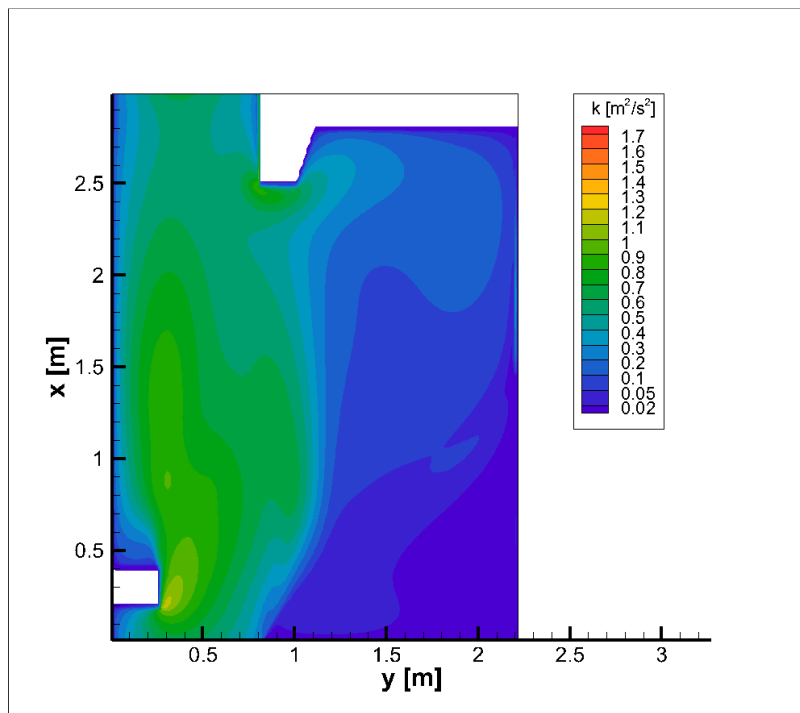


PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε **Priloga C.15: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 20 cm in pretok 2000 l/s**

PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε

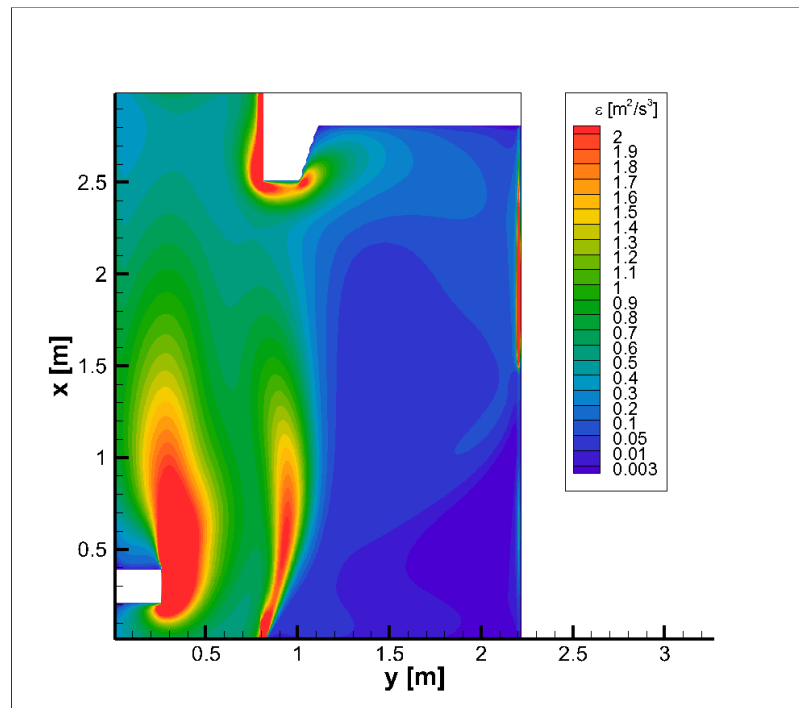
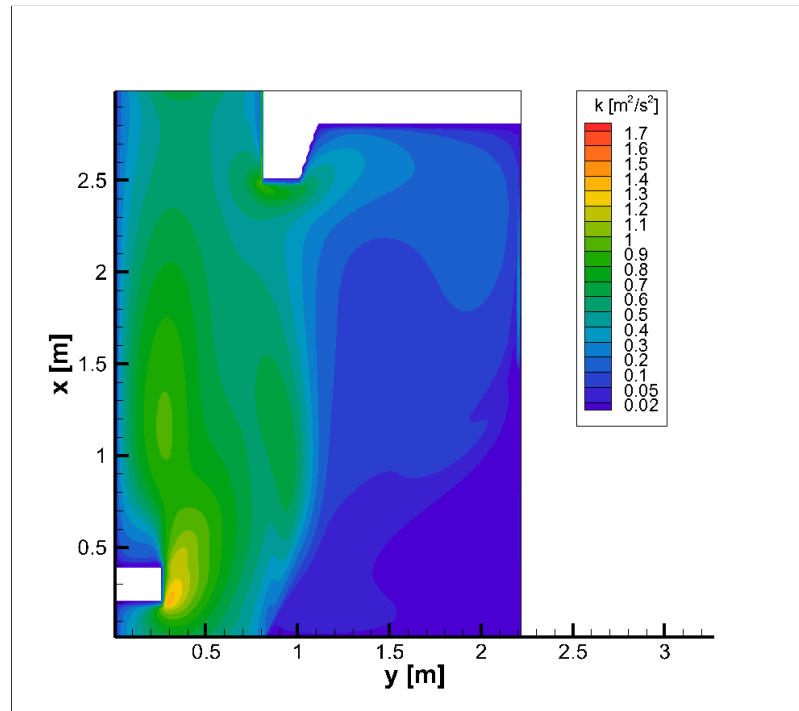
Priloga C.16: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 25 cm in pretok 600 l/s

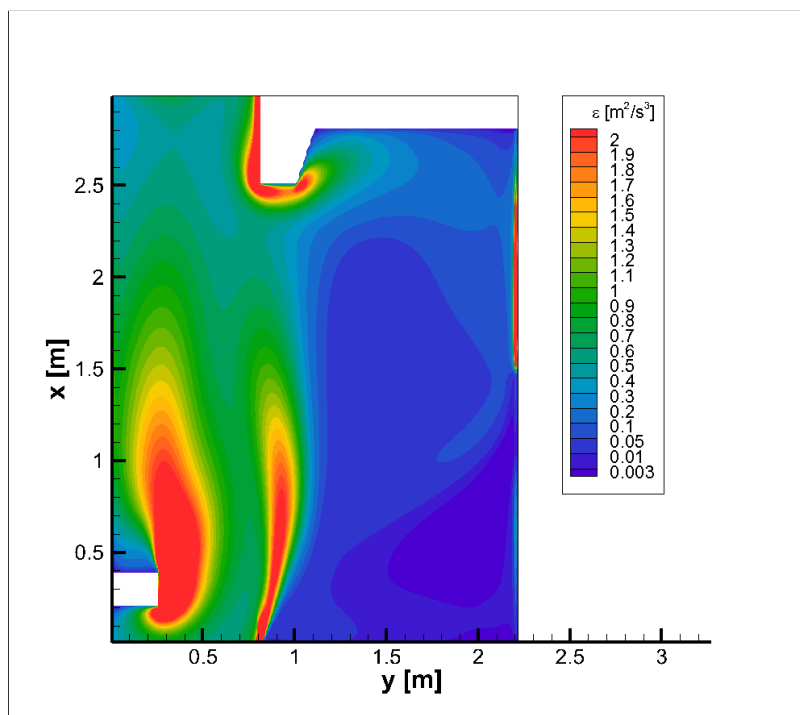
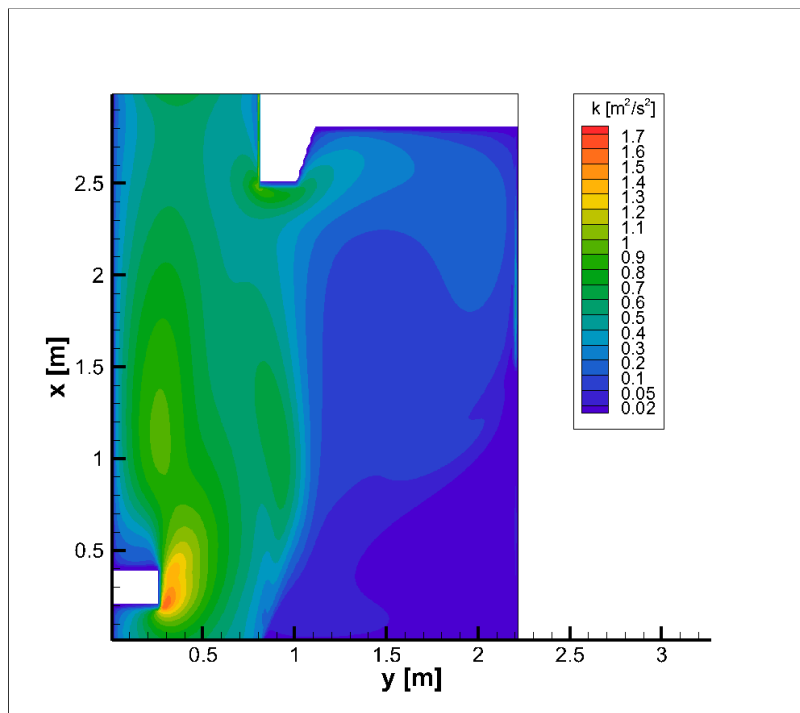


PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε **Priloga C.17: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 25 cm in pretok 800 l/s**

PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε

Priloga C.18: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 25 cm in pretok 1200 l/s



PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε **Priloga C.19: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 25 cm in pretok 1600 l/s**

PRILOGA C: TURBULENTNA KINETIČNA ENERGIJA NA ENOTO MASE k IN NJENA DISIPACIJA ε

Priloga C.20: Turbulentna kinetična energija na enoto mase in njena disipacija za padec 25 cm in pretok 2000 l/s

