

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Vodarstvo in  
komunalno inženirstvo

Kandidat:

**Andrej Cverle**

# **Analiza hidravličnih razmer pri bočnih prelivih**

**Diplomska naloga št.: 117**

**Mentor:**

prof. dr. Franc Steinman

**Somentor:**

doc. dr. Primož Banovec

Ljubljana, 19. 2. 2009

## STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Spodaj podpisani Andrej Cverle izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Analiza hidravličnih razmer pri bočnih prelivih«.

Ljubljana, 12. 2. 2009

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM**

<b>UDK:</b>	<b>627.13(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Andrej Cverle</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Franci Steinman</b>
<b>Somentor:</b>	<b>doc. dr. Primož Banovec</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Analiza hidravličnih razmer pri bočnih prelivih</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>118 str., 33 pregl., 53 sl., 26 graf., 5 pril., 33 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>hidravlika, odprti vodotoki, bočni prelivi, HEC-RAS, AquaDyn</b>

### **Izvleček**

Zaradi hitre urbanizacije in večjega zavedanja o poplavni nevarnosti, narašča potreba po izdelovanju opozorilnih kart poplavnih območij. Za slednje uporabljamo orodja, s katerimi modeliramo proces poplavljanja. Pri modeliranju moramo veliko pozornosti nameniti mestom razlivanja, ker je z vidika pravilnega hidravličnega modela najpomembnejši način razlitja. Nemalokrat se zgodi, da se voda iz kanala na poplavno ravnico razlije kot bočni preliv. Kadar se slednje zgodi, moramo za modeliranje prelivnega mesta izbrati primeren način. V diplomski nalogi so bile obravnavane hidravlične razmere, ki nastopijo pri bočnih prelivih, kadar tok vode po prelitju nima proste poti. V ta namen so bile na nekoliko preoblikovanem, že obstoječem fizičnem modelu bočnega preliva opravljene meritve različnih natočnih razmer. Izvedenih je bilo pet različnih scenarijev, pri katerih smo opazovali vpliv Froudovih števil na prelivne koeficiente  $C_d$  ter ugotavljali vrednosti koeficientov  $C_d$  za posamezne oblike preliva. Pretoke in gladine smo merili pri dveh klasičnih oblikah (široki prag in ostrorobi preliv), pri dveh praktičnih oblikah (hrapava drča in hrapava drča z grbo) ter pri bočnem razbremenjevanju brez preliva. Uporabili smo dve različni obliki rečnega korita – pravokotno in poltrapezno. Pri vseh scenarijih so bile ustvarjene enake natočne razmere, pri čemer smo spreminjali le obliko preliva. Rezultate smo obdelali in z enačbo izrazili odvisnost prelivnega koeficienta  $C_d$  od Froudovega števila. Na koncu sta bila za določene scenarije izvedena še 1D (HEC-RAS) in 2D (AquaDyn) modelna izračuna, s pomočjo katerih smo ocenili kakovost izračuna in pokazali na elemente, ki jih moramo upoštevati pri simulaciji bočnih prelivov, v kolikor želimo doseči čim boljše rezultate.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 627.13(043.2)  
**Author:** Andrej Cverle  
**Supervisor:** Prof. Franci Steinman, PhD  
**Cosupervisor:** Assist. Prof. Primož Banovec, PhD  
**Title:** Hydraulic Analysis for Lateral Weir Flow  
**Notes:** 118 p., 33 tab., 53 fig., 26 graph., 5 ann., 33 eq.  
**Key words:** hydraulic, open-channel, lateral weirs, HEC-RAS, AquaDyn

**Abstract**

Increasing urbanization and the awareness of flood risk promote interest in floodplain mapping. When we are creating such maps we normally use different mathematical models that help us simulate different flood scenarios. When shaping flooded areas we need to pay attention to the spots where water starts flooding. Often we can define this kind of spots as a lateral flow. If we want to take this fact into account, it is necessary to model such spots as a lateral flow. In this work we analyzed hydraulic conditions around lateral weirs. For this purpose we transformed the existing physical model in which we implemented measurements for different hydraulic conditions. Measurements were made for five different scenarios where we explored the impact of Froude number on the discharge coefficient  $C_d$  for different shapes of lateral weirs. Around lateral weirs we observed discharges and water levels for two classical shapes (broad crested and sharp crested), two practical shapes (rough chute and rough chute with hump) and zero height lateral weir. We also used two different channel shapes (rectangular and trapezoid). For each scenario we created the same hydraulic conditions. We only changed the shape of the weir. After processing the results we obtained the equation which shows dependence between changing discharge coefficient  $C_d$  and the Froude number. At the end we simulated some of the scenarios with 1D (HEC-RAS) and 2D (AquaDyn) mathematical programs where we observed the quality of the computation. We also took into account some parameters and the input data that have big influence on the quality of the calculation.

## **ZAHVALA**

Za strokovno vodenje, nasvete in pomoč pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Franciju Steinmanu in somentorju doc. dr. Primožu Banovcu. Posebna zahvala velja tudi vsem zaposlenim na Inštitutu za hidravlične raziskave v Ljubljani in laborantu Lojzetu, ki so mi omogočili in pomagali pri opravljanju praktičnega dela diplomske naloge.

In sploh hvala družini in moji Mateji, ki so mi stali ob strani, me spodbujali in bodrili v času študija.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>BOČNI PRELIVI</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Obravnava bočnega preliva z upoštevanjem mirnega režima toka kot enodimenzijski problem</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Enačbe in predpostavke</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Metode reševanja</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>Obravnava bočnih prelivov kot dvodimenzijski problem</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Enačbe in predpostavke</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Metode reševanja</b> .....	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>HIDRAVLIČNO MODELIRANJE BOČNIH PRELIVOV</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Fizični modeli</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Modelna podobnost pri toku s prosto gladino</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Merilna negotovost</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Merilna oprema</b> .....	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>Matematični modeli</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Matematični model HEC-RAS</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Matematični model AquaDyn</b> .....	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>FIZIČNI MODEL BOČNEGA PRELIVA</b> .....	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Opis modela</b> .....	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Robni pogoji</b> .....	<b>44</b>
<b>4.3</b>	<b>Opisi scenarijev</b> .....	<b>45</b>
<b>4.4</b>	<b>Merilna mesta</b> .....	<b>51</b>
<b>4.5</b>	<b>Priprava numerične mreže za 2D izračun v programu AquaDyn</b> .....	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>PRIMERJAVA REZULTATOV IN KOMENTAR</b> .....	<b>54</b>
<b>5.1</b>	<b>Meritve na fizičnem modelu</b> .....	<b>54</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Meritve za scenarij 1</b> .....	<b>56</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Meritve za scenarij 2</b> .....	<b>57</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Meritve za scenarij 3</b> .....	<b>62</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Meritve za scenarij 4</b> .....	<b>63</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Meritve za scenarij 5</b> .....	<b>69</b>
<b>5.2</b>	<b>Rezultati matematičnih modelov in primerjava z rezultati meritev</b> .....	<b>75</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Scenarij 1</b> .....	<b>76</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Scenarij 2</b> .....	<b>84</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Scenarij 3</b> .....	<b>100</b>
<b>5.3</b>	<b>Glavne ugotovitve</b> .....	<b>104</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK IN MOŽNOSTI NADALJNEGA DELA</b> .....	<b>113</b>
<b>7</b>	<b>VIRI</b> .....	<b>114</b>
<b>8</b>	<b>PRILOGE</b> .....	<b>118</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

<i>Preglednica 1: Prikaz računa koeficienta skupnega bočnega pretoka in meje v katerih enačba velja po različnih avtorjih (António N. Pinheiro, Isabel N. Silva, 1996) .....</i>	<i>6</i>
<i>Preglednica 2: Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 1 .....</i>	<i>56</i>
<i>Preglednica 3: Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 2, primer 1 .....</i>	<i>58</i>
<i>Preglednica 4: Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 2, primer 1 .....</i>	<i>58</i>
<i>Preglednica 5: Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 2, primer 2 .....</i>	<i>59</i>
<i>Preglednica 6: Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 2, primer 2 .....</i>	<i>60</i>
<i>Preglednica 7: Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 3, primer 1 .....</i>	<i>62</i>
<i>Preglednica 8: Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 3, primer 2 .....</i>	<i>63</i>
<i>Preglednica 9: Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 4, primer 1 .....</i>	<i>63</i>
<i>Preglednica 10: Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 4, primer 1 .....</i>	<i>65</i>
<i>Preglednica 11: Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 4, primer 2 .....</i>	<i>65</i>
<i>Preglednica 12: Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 4, primer 2 .....</i>	<i>66</i>
<i>Preglednica 13: Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 4, primer 3 .....</i>	<i>66</i>
<i>Preglednica 14: Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 4, primer 3 .....</i>	<i>67</i>
<i>Preglednica 15: Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 5, primer 1 .....</i>	<i>70</i>
<i>Preglednica 16: Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 5, primer 1 .....</i>	<i>71</i>
<i>Preglednica 17: Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 5, primer 2 .....</i>	<i>72</i>
<i>Preglednica 18: Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 5, primer 2 .....</i>	<i>73</i>
<i>Preglednica 19: Prikaz rezultatov umerjanja Manningovega koeficienta hrupavosti <math>n_G</math> .....</i>	<i>75</i>
<i>Preglednica 20: Izmerjeni pretoki pri scenariju 1 .....</i>	<i>79</i>
<i>Preglednica 21: Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 1 .....</i>	<i>79</i>
<i>Preglednica 22: Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 1 .....</i>	<i>80</i>
<i>Preglednica 23: Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti scenarija 1 .....</i>	<i>81</i>
<i>Preglednica 24: Primerjava izračunanih pretokov za višje prelivne koeficiente <math>C_d</math> za scenarij 1 .....</i>	<i>82</i>
<i>Preglednica 25: Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 2, primer 1 .....</i>	<i>85</i>
<i>Preglednica 26: Primerjava izračunanih pretokov za višje prelivne koeficiente <math>C_d</math> za scenarij 2, primer 1 .....</i>	<i>86</i>
<i>Preglednica 27: Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 2, primer 2 .....</i>	<i>88</i>
<i>Preglednica 28: Primerjava izračunanih pretokov za višje prelivne koeficiente <math>C_d</math> za scenarij 2, primer 2 .....</i>	<i>89</i>
<i>Preglednica 29: Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 3, primer 1 – uporaba metode z vodno gladino .....</i>	<i>101</i>
<i>Preglednica 30: Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 3, primer 1 – uporaba metode z energijo .....</i>	<i>102</i>
<i>Preglednica 31: Primerjava meritev scenarija 3 primer 1 (z poplavno ravnico) in scenarija 2 primer 1 (brez poplavne ravnice) .....</i>	<i>102</i>
<i>Preglednica 32: Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 3, primer 2 – uporaba metode z vodno gladino .....</i>	<i>103</i>
<i>Preglednica 33: Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 2, primer 1 – uporaba višjega SRP .....</i>	<i>109</i>



## KAZALO SLIK

<i>Slika 1: Struktura diplomskega dela</i>	2
<i>Slika 2: Parametri bočnega preliva v mirnem toku</i>	5
<i>Slika 3: Shematični prikaz krivulje najmanjših kvadratov</i> ( <a href="http://www.fkkt.uni-lj.si/attachments/dsk148/numericna_orodja">www.fkkt.uni-lj.si/attachments/dsk148/numericna_orodja</a> )	8
<i>Slika 4: Diskretizacija zvezne domene pri metodi končnih elementov</i> ( <a href="http://lace.uni-mb.si/Num_meth_konst/Praktikum/1%20-%20Uvod.pdf">http://lace.uni-mb.si/Num_meth_konst/Praktikum/1%20-%20Uvod.pdf</a> )	15
<i>Slika 5: Kratek opis metode robnih elementov</i>	15
<i>Slika 6: Kratek opis metode končnih elementov (MKE)</i>	16
<i>Slika 7: Kratek opis metode končnih razlik</i>	16
<i>Slika 8: Thomson-ov preliv</i>	20
<i>Slika 9: Prikaz principa merjenja z elektromagnetnimi merilci</i> ( <a href="http://www.aniton.si/text/13446211-1590.html">http://www.aniton.si/text/13446211-1590.html</a> )	21
<i>Slika 10: Možne postavitve elektromagnetnega merilca pretokov</i> ( <a href="http://www.aniton.si/text/13446211-1590.html">http://www.aniton.si/text/13446211-1590.html</a> )	22
<i>Slika 11: Skala in vpetje ostnega merila</i>	23
<i>Slika 12: Prikaz nagnjenosti gladine in krone preliva pri toku preko bočnega preliva</i> (HEC-RAS, Reference Manual)	25
<i>Slika 13: Prikaz vizualizacije relativne višine vode na poplavnem, poseljenem območju izračunane s programskim paketom AquaDyn</i>	29
<i>Slika 14: Prikaz povezave GIS-ov in simulacijskega okolja AquaDyn za potrebe priprave dobrih vhodnih podatkov (geometrije)</i>	30
<i>Slika 15: Vizualizacija hitrostnega polja</i> ( <a href="http://www.waterengr.com/aquadynd/aquadynd.htm">http://www.waterengr.com/aquadynd/aquadynd.htm</a> )	31
<i>Slika 16: Razdelitev enotskega kvadrata na 76 in 740 trikotnikov po Delaunayev-em kriteriju</i> ( <a href="http://www.fri.uni-lj.si/si/raziskave/doktorska_dela/2421/zagovor.html">http://www.fri.uni-lj.si/si/raziskave/doktorska_dela/2421/zagovor.html</a> )	35
<i>Slika 17: Primer dveh linearnih baznih funkcij v dveh dimenzijah (levo) in primer dvodimenzionalne poskusne funkcije (desno)</i> ( <a href="http://www.fri.uni-lj.si/si/raziskave/doktorska_dela/2421/zagovor.html">http://www.fri.uni-lj.si/si/raziskave/doktorska_dela/2421/zagovor.html</a> )	36
<i>Slika 18: Shematičen prikaz preizkuševališča (zaključen vodni krog)</i>	42
<i>Slika 19: Fizični model bočnega preliva</i>	43
<i>Slika 20: Zbirna posoda za umiritev pulzacij in lesen plošč za zagotovitev nevalovitega natoka na območje modela</i>	43
<i>Slika 21: Elektromagnetni merilec pretoka Promag 50W</i>	43
<i>Slika 22: Zbirnik in cev, ki vodita vodo do merilca</i>	43
<i>Slika 23: Kritična gladina kot SRP na koncu modela</i>	45
<i>Slika 24: Izvedba bočnega preliva</i>	45
<i>Slika 25: Razmere pri scenariju 1</i>	46
<i>Slika 26: Bočni preliv oblike širokega praga</i>	47
<i>Slika 27: Ostrorobi bočni preliv</i>	47
<i>Slika 28: Primer sestavljenega prereza v delno trapeznem koritu</i>	48
<i>Slika 29: Prelivna oblika hrapava drča</i>	49
<i>Slika 30: Poltrapezno korito</i>	49
<i>Slika 31: Prelivna oblika širokega pragu</i>	49
<i>Slika 32: Prelivna oblika ostrorobega preliva</i>	49
<i>Slika 33: Preliv z grbo</i>	50
<i>Slika 34: Preliv brez grbe</i>	50
<i>Slika 35: Grafični prikaz mest meritev za scenarije 1, 2, 4 in 5</i>	52
<i>Slika 36: Grafični prikaz mest meritev za scenarij 3</i>	52
<i>Slika 37: Numerična mreža in uporabljeni robni pogoji</i>	53
<i>Slika 38: Prikaz vnesene batimetrije na območju preliva</i>	53
<i>Slika 39: Prikaz odsekov in prečnih profilov pri izvedbi 1D matematičnega modela scenarija 1</i>	76
<i>Slika 40: Prikaz scenarija 1 v 3D prostoru</i>	78
<i>Slika 41: Tlorisni prikaz bočnega preliva v programu HEC-RAS</i>	81
<i>Slika 42: Prečni presek bočnega preliva v programu HEC-RAS</i>	81

<i>Slika 43: Napačno izračunano vektorsko polje – simulacija 1 (prerez A-A se navezuje na sliko 47)</i>	93
<i>Slika 44: Anomalije izračunanih gladin – simulacija 1 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa relativno gladino v metrih)</i>	93
<i>Slika 45: Dodaten pogoj za simulacijo 2</i>	94
<i>Slika 46: Potek gladin ob dodatnem pogoju – simulacija 2 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa relativno gladino v metrih)</i>	95
<i>Slika 47: Prečni prerez poteka gladin preko bočnega preliva - simulacija 2</i>	96
<i>Slika 48 Vektorsko polje – simulacija 3</i>	96
<i>Slika 49: Potek gladin – simulacija 3 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa relativno gladino v metrih)</i>	97
<i>Slika 50: Razporeditev Froudovih števil – simulacija 3 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa vrednost Froudovih števil)</i>	97
<i>Slika 51: Vektorsko polje – simulacija 4</i>	98
<i>Slika 52: Potek gladin – simulacija 4 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa relativno gladino v metrih)</i>	98
<i>Slika 53 : Razporeditev Froudovih števil – simulacija 4 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa vrednost Froudovih števil)</i>	99

**KAZALO GRAFIKONOV**

<i>Grafikon 1: Regresijska analiza razmerja natočnega in prelitega pretoka za scenarij 1.....</i>	<i>57</i>
<i>Grafikon 2: Regresijska analiza bočnega preliva oblike širokega pragu: scenarij 2, primer 1.....</i>	<i>59</i>
<i>Grafikon 3: Regresijska analiza ostrorobega bočnega preliva: scenarij 2, primer 2.....</i>	<i>61</i>
<i>Grafikon 4: Prelivna sposobnost dveh različnih oblik bočnega preliva – scenarij 2.....</i>	<i>62</i>
<i>Grafikon 5: Regresijska analiza bočnega preliva oblike hrapave drče: scenarij 4, primer 1.....</i>	<i>64</i>
<i>Grafikon 6: Regresijska analiza bočnega preliva oblike širokega praga: scenarij 4, primer 2.....</i>	<i>66</i>
<i>Grafikon 7: Regresijska analiza ostrorobega bočnega preliva: scenarij 4, primer 3.....</i>	<i>67</i>
<i>Grafikon 8: Prelivna sposobnost treh različnih oblik bočnega preliva – scenarij 4.....</i>	<i>69</i>
<i>Grafikon 9: Prelivni koeficienti <math>C_d</math> za tri različne oblike bočnega preliva – scenarij 4.....</i>	<i>70</i>
<i>Grafikon 10: Regresijska analiza bočnega preliva brez grbe: scenarij 5, primer 1.....</i>	<i>71</i>
<i>Grafikon 11: Regresijska analiza bočnega preliva z grbo: scenarij 5, primer 2.....</i>	<i>73</i>
<i>Grafikon 12: Prelivna sposobnost dveh različnih praktičnih oblik bočnega preliva – scenarij 5.....</i>	<i>74</i>
<i>Grafikon 13: Prelivni koeficient <math>C_d</math> za dve različni praktični obliki bočnega preliva – scenarij 5.....</i>	<i>74</i>
<i>Grafikon 14: Regresijska analiza bočnega preliva brez višine: scenarij 1.....</i>	<i>80</i>
<i>Grafikon 15: Prikaz vpliva zastojne točke (razlog za napačen izračun) za scenarij 1, primer 1 (kota preliva je na 35. cm).....</i>	<i>82</i>
<i>Grafikon 16: Vpliv različnih prelivnih koeficientov <math>C_d</math> na napako med izračunanim in izmerjenim bočnim pretokom za scenarij 1.....</i>	<i>84</i>
<i>Grafikon 17: Vpliv različnih prelivnih koeficientov <math>C_d</math> na napako med izračunanim in izmerjenim bočnim pretokom za scenarij 2, primer 1.....</i>	<i>87</i>
<i>Grafikon 18: Vpliv različnih prelivnih koeficientov <math>C_d</math> na napako med izračunanim in izmerjenim bočnim pretokom za scenarij 2, primer 2.....</i>	<i>90</i>
<i>Grafikon 19: Primerjava izračunanih in merjenih gladin (tipa BP in K) za scenarij 2, primer 1 pri razmerju <math>K5/p = 1.036</math> (višina preliva je na 40. cm).....</i>	<i>91</i>
<i>Grafikon 20: Primerjava izračunanih in merjenih gladin (tipa BP in K) za scenarij 2, primer 2 pri razmerju <math>K5/p = 1.08</math> (višina preliva je na 40. cm).....</i>	<i>91</i>
<i>Grafikon 21: Primerjava izračunanih in merjenih gladina za scenarij 3, primer 2 pri razmerju <math>K5/p = 1.22</math> (preliv je na 15 cm.).....</i>	<i>103</i>
<i>Grafikon 22: Primerjava izračunanih in merjenih gladina za scenarij 3, primer 2 pri razmerju <math>K5/p = 1.26</math>.....</i>	<i>104</i>
<i>Grafikon 23: Vpliv zajezbe pri ostrorobem prelivu (primer 2, scenarij 2).....</i>	<i>106</i>
<i>Grafikon 24: Vpliv zajezbe pri širokem pragu (primer 1, scenarij 2).....</i>	<i>106</i>
<i>Grafikon 25 Variacija gladinskega profila: scenarij 2, primer 1 (uporaba višjega SRP) za natočni pretok <math>Q_{55}</math> l/s (višina preliva je na 40. cm).....</i>	<i>110</i>
<i>Grafikon 26: Variacija gladinskega profila: scenarij 2, primer 1 (uporaba višjega SRP) za natočni pretok <math>Q_{65}</math> l/s (višina preliva je na 40. cm).....</i>	<i>111</i>

## **KAZALO PRILOG**

### **Priloga A** Tloris in prereza za primer 1, scenarij 1

**A1** Tloris

**A2** Prereza A-A in B-B (glej A1)

### **Priloga B** Tloris in prerezi uporabljeni pri primeru 1 in 2, scenarij 2

**B1** Tloris

**B2** Prerezi A-A:široki prag, A-A:ostrorobi preliv in B-B (glej B1)

### **Priloga C** Tloris in prereza uporabljena pri primeru 1, scenarij 3

**C1** Tloris

**C2** Prereza A-A in B-B (glej C1)

### **Priloga D** Tloris in prerezi uporabljeni pri primeru 1, 2 in 3, scenarij 4

**D1** Tloris

**D2** Prerezi A-A:hrapava drča, A-A:široki prag, A-A:ostrorobi preliv in B-B (glej D1)

### **Priloga E** Tloris in prerezi uporabljeni pri primeru 1 in 2, scenarij 5

**E1** Tloris

**E2** Prerezi A-A:hrapava drča, A-A:hrapava drča z grbo in B-B (glej E1)

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

### *Simboli:*

m ... masa

b ... širina

$E_1$  ... energija gorvodno od preliva

$I_{dna}$  ... padec dna

$h, h_{pr}$  ... prelivna višina

p ... višina preliva

L, l ... dolžina preliva

Q ... skupni pretok

$Q_{b,p}$  ... bočni pretok

$q_{b,p}$  ... specifični bočni pretok

H ... energija nad prelivom

C ... koeficient preliva ( $C=C_d \cdot (2g)^{0.5}$ )

g ... gravitacijski pospešek

$C_m$  ... koeficient preliva

$C_d$  ... skupni koeficient pretoka oziroma preliva

$Fr_1$  ... Froudovo število gorvodno od bočnega preliva

$\bar{h}$  ... povprečna prelivna višina

$v_1$  ... hitrost gorvodno od profila

$g(x_1)$  ... polinom višje stopnje

f ... funkcija

$x_1, x_2, x_3$  ... neodvisne spremenljivke

$a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}$  ... konstante polinoma

$h_1$  ... gladina vode gorvodno od preliva

$\Psi = \frac{h'}{h}$  ... popravni parameter pri metodi z uporabo prilegajoče se krivulje, kjer je h globina

vode v osi kanala,  $h'$  pa prelivna višina

z ... brezdimenzijska globina toka

$\Phi(z)$  ... negativna vrednost dolžine preliva

$t$  ... čas

$\rho$  ... gostota

$U_i, U_j$  ... trenutne hitrosti v posameznih koordinatnih smereh (x,y,z)

$P_p$  ... trenutni tlak

$u, v, w$  ... hitrosti v smeri koordinatnih smereh

$\nu_{\text{eff}}$  ... efektivna viskoznost

$n, n_G$  ... Manningov koeficient hrapavosti

$f_x, f_y$  ... sila na enoto mase v x oziroma y smeri

$Z_b$  ... kota dna

$\mu$  ... koeficient preliva (Thomsonov preliv)

$\alpha$  ... kot odpiranja preliva

$Y_{ws}$  ... prečni prerez

$Y_w$  ... profil preliva

$a_{ws}$  ... naklon vodne gladine

$a_w$  ... naklon krone preliva

$C_{ws}$  ... začetna višina vodne gladine

$C_w$  ... začetna višina preliva

$\hat{u}(x_i)$  ... poskusna funkcija

$\Phi_j(x)$  ... bazne funkcije

### ***Okrajšave:***

SRP ... spodnji robni pogoj

ZRP ... zgornji robni pogoj

pr ... preliv

b.p ... bočni preliv

min ... minimalen

max ... maksimalen

GIS ... geografski informacijski sistem

MKE ... metoda končnih elementov

na ... natočni

RS ... rečna stacionaža



## 1 UVOD

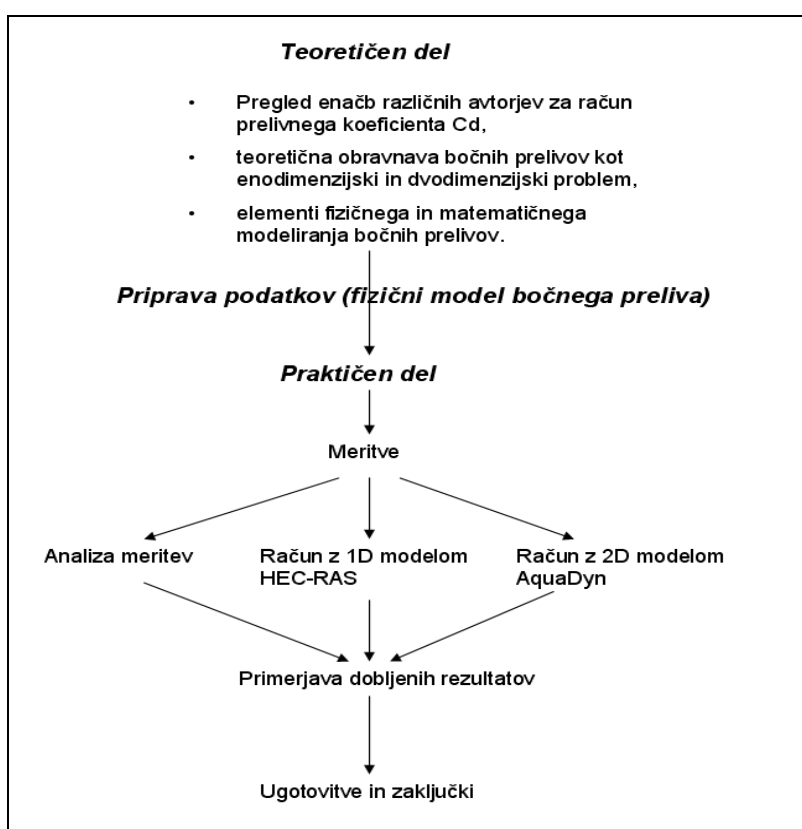
Pri modeliranju, simuliranju in preučevanju poplav ter z razvijanjem sodobnih metod za zajem prostorskih podatkov (LIDAR) se bomo vedno bolj srečevali s problemom bočnega razbremenjevanja. Bočni preliv ne smemo razumeti samo kot hidrotehnični objekt, s katerim želimo izvesti kontrolirano poplavljanje ali kot odzemni objekt, ampak kot pojav, ki je skoraj vedno prisoten v procesu poplavljanja. V želji po čim bolj natančnem napovedovanju poplavnih scenarijev in oblikovanju poplavnih poligonov je treba mesta razlitja bolj podrobno obravnavati in definirati ter najprej ugotoviti način razlitja, ki lahko poteka kot delitev toka ali pa kot bočni preliv. Dobra definicija razlivnega mesta je ključnega pomena in nam bo omogočala dobro simuliranje ter napovedovanje poplavnih scenarijev.

Proučevanje bočnega prelivanja in različne študije le-tega segajo v začetek 19. stoletja. Pomembnejšo prelomnico predstavlja leto 1934, ko je De Marchi podal splošno prelivno enačbo, ki je v uporabi še danes. V tistih časih so se bočni prelive uporabljali predvsem kot hidrotehnični objekti za potrebe namakalnih sistemov, čeprav so bile hidravlične razmere v območju takšnega objekta dokaj nepoznane. Prav slednje je predstavljalo glavni motiv opravljenih študij. Cilj raziskovalcev je bil, podati čim bolj natančno enačbo, s katero bi zajeli vpliv geometrije in natočnih razmer na prelivni koeficient  $C_d$ , ki še danes ostaja ena največjih neznank. Vsem študijam je skupno to, da vsaka podana enačba velja za dane pogoje oziroma znotraj predpisanih vrednosti. Ravno ta kompleksnost je čar bočnih prelivov, saj hitro pridemo do spoznanja, da lahko že majhna sprememba precej vpliva na količino razbremenjene vode in na prelivne gladine. Ker pa je pojav bočnega razbremenjevanja pri procesu poplav tako pogost, in ker je za vsak dotični primer nesmiselno poiskati popolnoma ustrezen prelivni koeficient  $C_d$ , je za dobro modeliranje takšnih pojavov izvesti veliko študij z različnimi vplivnimi pogoji. Tako imamo na voljo pester izbor enačb, med katerimi izberemo tisto, ki jo lahko apliciramo na dotični primer in tako poskušamo najti najbolj pravilen prelivni koeficient  $C_d$ .

Tako smo se v diplomski nalogi lotili obravnave bočnega razbremenjevanja, kjer smo uporabili nekoliko spremenjene razmere od običajnih. Slednje omogočajo doseganje prehoda



preko kritične globine po celotni dolžini bočnega preliva in s pravilnim oblikovanjem krilnih zidov preprečujejo vpliv zastojne točke in posledično zajeze (potopljeni preliv) na razbremenjevanje. V našem primeru pa smo bočno razbremenjevanje oziroma krilne zidove oblikovali tako, da smo dobili vpliv zastojne točke (lokalna motnja) na hidravlične razmere. Takšne razmere se pogostokrat pojavijo v naravi in imajo velik vpliv na proces poplavljanja. Osnovo celotnega dela je predstavljala poznana teorija bočnih prelivov v mirnem tokovnem režimu, na podlagi katere smo oblikovali fizični model in izvedene meritve. Slednje pa so predstavljale osnovo praktičnega dela diplomske naloge (glej sliko 1).



**Slika 1:** Struktura diplomskega dela

Cilj diplomske naloge je bil ugotoviti kako velik vpliv, če sploh, ima izbran položaj krilnih zidov na prelivne gladine, pretoke in prelivne koeficiente  $C_d$ . Namen takšne raziskave pa je bil v izboljšanju kakovosti modeliranja nastalih razmer z enodimenzijskim (HEC-RAS) in dvodimenzijskim (AquaDyn) matematičnim modelom in opozoriti na elemente, ki jih moramo upoštevati pri modeliranju tovrstnih situacij, v kolikor želimo doseči čim boljše rezultate.

## 2 BOČNI PRELIVI

O bočnem prelivu govorimo takrat, ko je konstrukcija preliva izvedena tako, da odteka nekaj vodne količine preko krone, ki je vzporedna (oziroma tvori majhen kot) glede na vzdolžno os glavnega vodnega toka. V splošnem služijo kot odvzemni ali razbremenilni objekti.

Glede na to, da so hidravlične razmere v okolici preliva precej komplicirane, eksaktnega računa praktično ni na voljo. Na sam izračun pretoka in poteka gladin preko bočnega preliva vplivajo različni faktorji in sicer (Steinman 1999):

- Režim toka: mirni, deroči,
- količina odvzema,
- širina glavnega korita:

$$b_{\text{dolvodno}} \leq b_{\text{gorvodno}} \text{ in zato } \frac{E_{\text{gor}}}{E_{\text{dol}}} \geq 1,$$

- relativni padec krone preliva glede na padec glavnega korita ( $i_{\text{preliva}} < \text{oziroma} > I_{\text{dna}}$ ),
- izdelava preliva (oblika krone, robovi preliva),
- razmerje prelivne višine z višino jezu  $\frac{h_{pr}}{p}$ ,
- razmerje prelivne višine s širino gladine vodnega toka ( $\frac{h_{pr}}{b}$ ) in razmerje dolžine bočnega preliva in širine gladine ( $\frac{l}{b}$ ),
- velikost koeficienta preliva.

Upoštevati moramo tudi to, da so lahko naštetih faktorji medsebojno odvisni. V literaturi je možno najti veliko postopkov za izračun razmer pri bočnih prelivih, kjer se različni avtorji ukvarjajo z iskanjem končne enačbe, ki bi zajela čim več zgoraj naštetih faktorjev.

## 2.1 Obravnava bočnega preliva z upoštevanjem mirnega režima toka kot enodimenzijski problem

Glede na to, da bočni preliv predstavlja delitev toka, ga v osnovi ne moremo obravnavati kot 1D problem. Ena izmed rešitev za 1D obravnavo problema je uporaba vejičastega toka - z reševanjem 1D Saint-Venantovih enačb (za nestalni tok) oziroma energijske enačbe (za stalni tok) poskušamo ugotoviti količino pretoka in gladine v vsaki veji (HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic, Reference Manual). Drug možen način pa je z uporabo prilagojene standardne prelivne enačbe za potrebe bočnih prelivov. V tem primeru pa na podlagi prelivnih gladin in znanega koeficienta pretoka izračunamo del pretoka, ki se prelije preko bočnega preliva.

### 2.1.1 Enačbe in predpostavke

Zaradi specifičnosti bočnih prelivov se za izračun pretoka preko bočnega preliva ne more direktno uporabiti standardne enačbe preliva  $Q = CLH^{\frac{3}{2}}$ . Slednja enačba predpostavlja vzporednost gladine in preliva (globina vode je vzdolž preliva konstantna). S predpostavko, da je specifična energija vzdolž bočnega preliva konstantna, je za račun pretoka preko bočnega preliva v pravokotnem koritu leta 1934 De Marchi podal sledečo enačbo:

$$q_{b.p.} = \frac{dQ_{b.p.}}{dx} = \frac{2}{3} C_m \sqrt{2g} (h - p)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

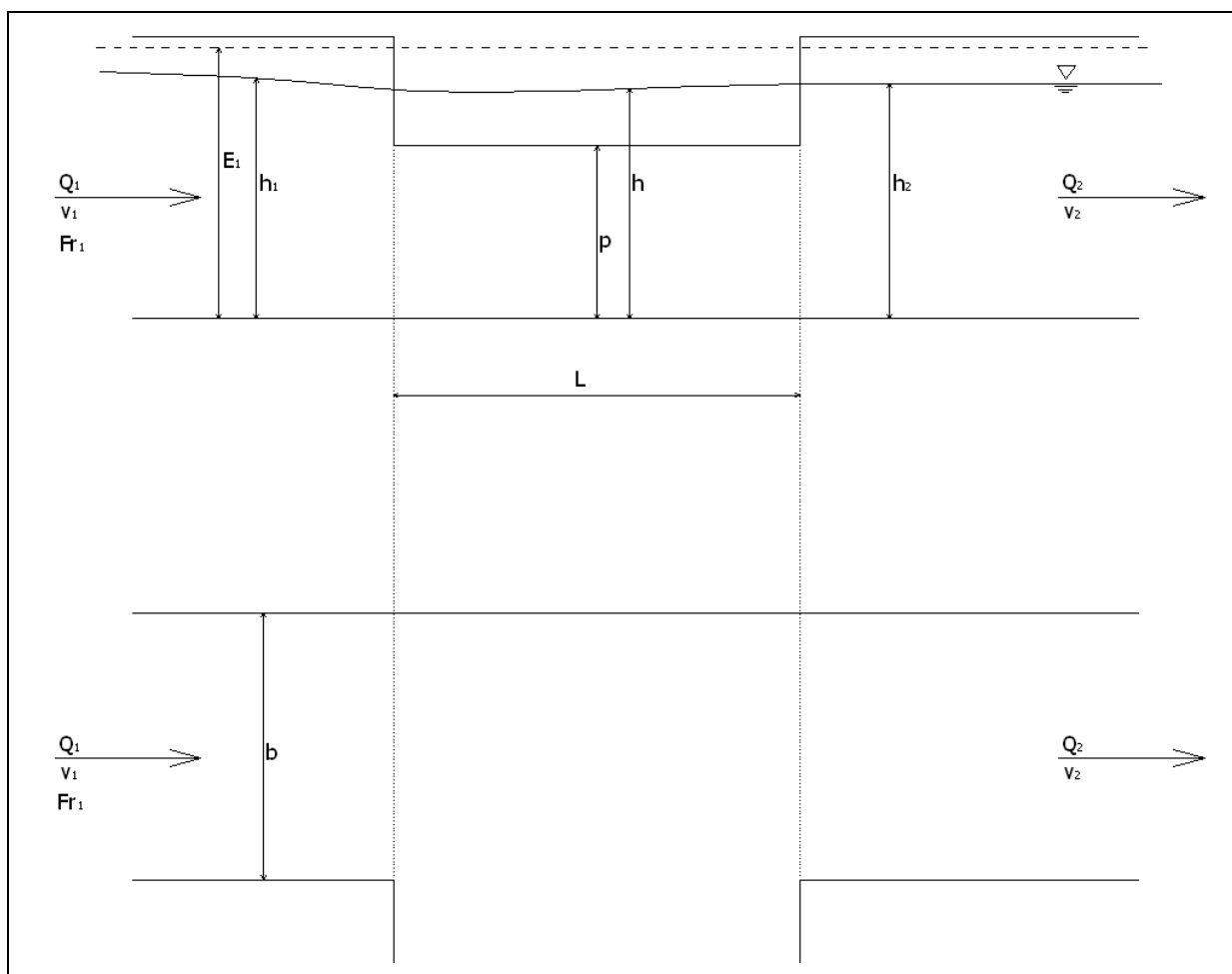
Ponavadi nas zanima skupen pretok preko bočnega preliva dolžine L. Tako lahko enačbo (1) zapišemo v obliki:

$$Q_{b.p.} = C_d L \sqrt{2g} (h - p)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

Problem uporabe enačbe (2) je v pravilni izbiri skupnega koeficienta pretoka  $C_d$ . Kot sem že omenil, gladina vzdolž preliva ni vzporedna s krom preliva, kar pomeni, da se tudi koeficient pretoka  $C_d$  spreminja vzdolž preliva. De Marchi je prvi, ki je podal analitično rešitev računa

bočnega pretoka, vendar z uporabo konstantnega koeficienta pretoka  $C_d$ . Kasnejše numerične analize samega problema pa so nakazovale (El-Khashab 1975), da je koeficient pretoka  $C_d$

funkcija toka ter geometrije, in sicer v naslednjih zvezah  $C_d = f(\text{Fr}_1, \frac{L}{b}, \frac{L}{h}, \frac{p}{h})$ .



Slika 2: Parametri bočnega preliva v mirnem toku

Precej avtorjev (preglednica 1) je z eksperimenti prišlo do spoznanja, da je Froudovo število tista spremenljivka, ki ima največji vpliv na velikost koeficienta, medtem ko geometrijska razmerja nimajo velikega vpliva. Kljub temu pa so nekateri avtorji tudi geometrijska razmerja vpeljali v izračun ustreznega koeficienta skupnega bočnega pretoka.

Avtor	Karakteristike bočnega preliva			Froudovo število [Fr]	Koeficient skupnega bočnega pretoka
	p (m)	L (m)	Q <sub>min</sub> /Q <sub>max</sub>		
Subramanya in Awasty (1972)	0.00-0.51	0.1-0.15	/	0.02-0.80	$C_d = \frac{2}{3} (0.611 \sqrt{1 - \frac{3Fr_1^2}{Fr_1^2 + 2}})$
Raju (1979)	0.05-0.25	0.2-0.5	/	0.1-0.5	$C_d = \frac{2}{3} (0.81 - 0.6Fr_1)K$
Hager (1987)	0.00-0.2	1.00	/	0.3-0.8	$C_d = 0.485 \left[ \frac{(2 + Fr_1^2)}{(2 + 3Fr_1^2)} \right]^{\frac{1}{2}}$
Swamee (1988)	/	/	/		$C_d = \frac{2}{3} \left\{ 1.06 \left[ \left( \frac{14.14p}{8.15p+h} \right)^2 + \left( \frac{h}{h+p} \right)^{15} \right]^{-0.1} \right\}$
Cheong (1991)		0.277-0.97		0.2-0.9	$C_d = 0.45 - 0.22Fr_1^2$
Singh (1994)	0.06-0.12	0.1-0.2	10/14	0.2-0.4	$C_d = 0.33 - 0.18Fr_1 + 0.49 \frac{p}{h}$
Silva (1996)	0.2	1.5 in 2.00	25/150	<1.00	$\frac{1}{C_d} = 1.57 + 0.127 \frac{1}{Fr_1} + 7.45 \frac{v_1^2}{L} + 0.52 \frac{\bar{h}}{p}$

**Preglednica 1:** Prikaz računa koeficienta skupnega bočnega pretoka in meje v katerih enačba velja po različnih avtorjih (António N. Pinheiro, Isabel N. Silva, 1996)

### 2.1.2 Metode reševanja

Kadar obravnavamo bočni preliv kot 1D problem vse sloni na iteracijskem reševanju enačbe 2 oziroma njenih izpeljank. Glavni problem enačbe 2 je v pravilni izbiri prelivnega koeficienta  $C_d$ . Slednji je v splošnem od primera do primera različen in se najbolje definira s pomočjo meritev. Način iskanja povezav med koeficientom bočnega pretoka in vplivnimi spremenljivkami se od avtorja do avtorja razlikuje, vendar pa bomo v nadaljevanju prikazali dve metodi, na podlagi katerih lahko s pomočjo merjenih vrednosti definiramo prelivni koeficient  $C_d$ . To sta nelinearna parcialna metoda najmanjših kvadratov (angl. nonlinear PLS method) in metoda z uporabo prilegajoče se krivulje.

- ***Nelinearna parcialna metoda najmanjših kvadratov (angl. nonlinear PLS method)***

Metoda temelji na iskanju povezav med odvisno spremenljivko in neodvisnimi spremenljivkami. Podrobneje je opisana v članku Nonlinear PLS Method for Side Weir Flows avtorjev A. S. Ramamurthy, Junying Qu in Diep Vo-ja iz leta 2006.

Ker so v splošnem opisane povezave nelinearne, se predpostavlja, da je odvisna spremenljivka nelinearna funkcija neodvisnih spremenljivk. Zaradi tega se izrazi povezava med odvisno in neodvisnimi spremenljivkami s pomočjo prilagajajočih se polinomov višje stopnje, in sicer sledeče:

$$f = g_1(x_1) \times g_2(x_2) \times \dots \times g_n(x_n) = \prod_{i=1}^n g_i(x_i) \quad (3)$$

$$g_i = a_{i0} + a_{i1}x_i + a_{i2}x_i^2 + \dots + a_{im}x_i^m = \sum_{j=0}^m a_{ij}x_i^j$$

Bistvo metode je v tem, da se na podlagi eksperimenta in opravljenih meritev zriše graf odvisne in neodvisne spremenljivke, nakar se za dobljene točke zriše polinom pri katerem bo vsota kvadratov napak (odmikov) minimalna, oziroma se nariše krivuljo najmanjših kvadratov (glej sliko 3).

Konstante polinoma, ki predstavlja krivuljo najmanjših kvadratov, pa lahko dobimo z iteracijskim reševanjem enačbe 4:

$$a_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^s \left\{ (f_k) \left[ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq t}}^n g_i \right] x_i^j - \left[ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq t}}^n g_i \right]^2 \left( \sum_{\substack{p=0 \\ p \neq j}}^m a_{ip} x_i^p \right) x_i^j \right\}}{\sum_{k=1}^s \left[ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq t}}^n g_i \right] x_i^j} \quad (4)$$

kjer je  $t = 1, \dots, n$ ;  $j = 0, 1, \dots, m$

Če se vrnemo h konkretnemu problemu, in sicer bočnemu prelivu, so se iskale odvisnosti koeficienta skupnega preliva  $C_d$  od treh neodvisnih spremenljivk, ki vplivajo na slednji koeficient. Neodvisne spremenljivke

so Froudovo število, razmerje  $\frac{L}{b}$  in

$\frac{p}{h_1}$ . Boljša natančnost se doseže, če za

vsako neodvisno spremenljivko uporabimo polinom višje stopnje.

Eksperiment se je izvajal za mirni

režim toka in razmerje  $\frac{L}{b} \leq 1$ . Ena

izmed ugotovitev je bila (Gerald and

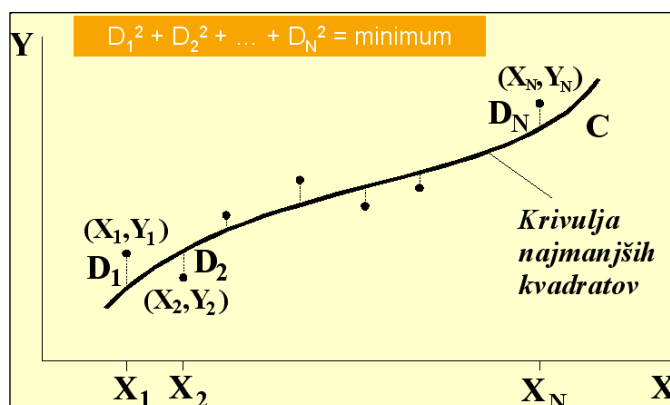
Wheatley 1994), da razpon razmerja  $\frac{L}{b} \leq 1$  nima velikega vpliva na odvisno spremenljivko

$C_d$ . Posledično se je za razmerje  $\frac{L}{b}$  izračunal polinom 2. stopnje, za Froudovo število in

razmerje  $\frac{p}{h_1}$  pa polinom 4. stopnje. Enačba za skupen koeficient pretoka  $C_d$  je sledeča:

$$C_d = \left[ 1.0 + 0.33 \left( \frac{L}{b} \right) - 0.105 \left( \frac{L}{b} \right)^2 \right] \times \left[ 1.0 + 0.034 \left( \frac{p}{h_1} \right) - 0.491 \left( \frac{p}{h_1} \right)^3 + 0.421 \left( \frac{p}{h_1} \right)^4 \right] \times \left[ 0.348 + 0.022(Fr) - 0.203(Fr)^2 + 0.303(Fr)^3 - 0.168(Fr)^4 \right] \quad (5)$$

Enačba (5) je bila testirana tudi na podlagi meritev ostalih avtorjev. Maksimalna napaka med merjenim bočnim pretokom in izračunanim je znašala manj kot 10 %. Rezultati izračunov in eksperimentov se najbolje ujamejo, ko je velikost Froudovega števila med 0.025 in 0.9.



**Slika 3:** Shematični prikaz krivulje najmanjših kvadratov ([www.fkkt.uni-lj.si/attachments/dsk148/numericna\\_orodja](http://www.fkkt.uni-lj.si/attachments/dsk148/numericna_orodja))

- **Metoda z uporabo prilegajoče se krivulje (angl. Curve fitting analysis)**

Kot sem že omenil, enačba De Marchi-ja predpostavlja konstantno vrednost koeficienta skupnega pretoka. Sama metoda, ki je povzeta po članku Lateral Weir Flow Model using a Curve Fitting Analysis (Yilmaz Muslu, 2002) pa temelji na tem, da upošteva nihanje koeficienta pretoka vzdolž preлива. Ker je takšno nihanje skoraj nemogoče upoštevati analitično, je bil uporabljen numerični pristop. V splošnem bi bilo potrebno meriti spreminjanje gladine in hitrosti na prelivni ploskvi ter na takšen način ugotavljati spreminjanje koeficienta pretoka vzdolž preлива. Kljub temu metoda upošteva variacijo gladine in s tem posledično spreminjanje pretočnega koeficienta. V ta namen se je vpeljal popravni parameter  $\psi = \frac{h'}{h}$ , s katerim izrazimo gladino vode na prelivni ploskvi. Tako lahko izraz za koeficient pretoka (Subramanya in Awasthy, 1972), pri upoštevanju elementarne dolžine  $ds$ , zapišemo kot:

$$C_m = 0.611 \sqrt{3 \frac{h'}{E_1} - 2} = 0.611 \sqrt{3\psi z - 2} \quad (6)$$

$$\text{kjer je: } z = \frac{h}{E_1} \text{ in } \psi = \frac{h'}{h}$$

Če sedaj združimo enačbi (1), z upoštevanjem popravnega parametra  $\psi$ , in enačbo za izračun pretoka preko bočnega preлива  $Q = bhv = bh(\sqrt{2g(E_1 - h)})$ , z upoštevanjem razdalje  $x$ , enačba (1) postane diferencialna enačba, ki jo normaliziramo in integriramo z namenom, da najdemo dolžino preлива  $L = x_2 - x_1$ , ki je potrebna za povečanje brezdimenzijske globine toka od  $z_1$  do  $z_2$ . V končni fazi dobimo sledečo enačbo:

$$\Phi(z) = -\frac{3}{2.444} \int_z^1 \frac{2 - 3z}{\sqrt{(1-z)(3\psi z - 2)(\psi z - \frac{P}{E_1})^3}} dz \quad (7)$$



Izraz  $\Phi(z)$  predstavlja negativno vrednost dolžine preliva (zaradi negativnega predznaka) od poljubne vrednosti  $z = z$  do  $z = 1$ . S pomočjo računalniškega programa je bila izvedena rešitev enačbe (7) za različne vrednosti brezdimenzijske globine toka  $z$  pri izbranem razmerju  $\frac{p}{E_1}$ . V želji, da bi se našla splošna povezava med komponentami, pa se je vrednost

$\Phi(z)$  določala še za različne vrednosti  $(1-z)$  pri določenem razmerju  $\frac{p}{E_1}$ . Ko zrišemo graf

$\Phi(z)$  proti  $(1-z)$  na dvojni logaritmični skali za izbrano vrednost  $\frac{p}{E_1}$ , lahko vidimo, da točke

ležijo na ravni črti, opisani z enačbo  $\phi = A(1-z)^m$  za  $(1-z) < 0.1$  oziroma  $z > 0.9$ . Za višje

vrednosti  $(1-z)$  pa je treba dodati še dodatno enačbo, kajti vrednosti  $-\Phi(z)$  v tem primeru ležijo

na enačbi  $\phi = A(1-z)^m + B(1-z)^n$ . Takšna procedura je bila izvedena za večje število

razmerij  $\frac{p}{E_1}$  in ugotovitev je bila, da je naklon (eksponenta  $m$  in  $n$ ) neodvisen od razmerja

$\frac{p}{E_1}$ , in da je  $m$  vedno enak 0.55,  $n$  pa vedno 3. Tako lahko zapišemo splošno enačbo, ki se

glasi:

$$-\phi = A(1-z)^{0.55} + B(1-z)^3 \quad (8)$$

S korelacijo se je še poiskalo povezavo med koeficientoma  $A$  in  $B$  za razmerje  $\frac{p}{E_1}$  in rezultati so sledeči:

$$A = 15 * 10^{1.75\left[\left(\frac{p}{E_1}\right)^{-0.65}\right]} \quad \text{za } \frac{p}{E_1} < 0.65$$

$$A = 15 * 10^{4.142\left(\frac{p}{E_1}\right)^2\left[\left(\frac{p}{E_1}\right)^{-0.65}\right]} \quad \text{za } \frac{p}{E_1} > 0.65$$

$$B = 200 * 10^{6\left[\left(\frac{p}{E_1}\right)^{-0.65}\right]} \quad \text{za } \frac{p}{E_1} < 0.65$$

$$B = 200 * 10^{9.23(\frac{p}{E_1})[(\frac{p}{E_1})^{-0.65}]} \text{ za } \frac{p}{E_1} > 0.65$$

Ugotovili smo, da lahko s to metodo zelo dobro računamo količino bočnega pretoka, če poleg geometrije korita in preliva, poznamo še gladino dolvodno od bočnega preliva ( $h_2$ ) in energijo gorvodno od preliva ( $E_1$ ).

## 2.2 Obravnava bočnih prelivov kot dvodimenzijski problem

Na območju bočnega preliva pride do delitve toka, kjer del vodne količine odteka preko vzporedne krone. Ker gre za spremembo smeri toka, je 2D obravnava čisto na mestu in skoraj potrebna, kljub temu da na mestu preliva pride do vodnega skoka, ki je izrazito tridimenzionalen problem in bi tako lahko uporabili tudi 3D orodje.

### 2.2.1 Enačbe in predpostavke

Če gledamo na bočni preliv kot 2D pojav in ga poskušamo tako tudi matematično obravnavati, moramo razrešiti splošne diferencialne enačbe, ki opisujejo prostorski nestacionarni tok realne nestisljive tekočine. Te enačbe so znane kot splošne Navier-Stokesove enačbe:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial P_p}{\partial x_i} + \nu \left( \frac{\partial^2 U_i^2}{\partial x_j \partial x_j} \right) + \rho f_i \tag{10}$$

Zapisi smo samo kontinuitetno (9) in dinamično (10) enačbo brez konvekcijsko-difuzijske enačbe, ker se bomo pri diplomi omejili samo na račun hidrodinamičnih problemov (turbulentne napetosti so v primerjavi z ostalimi členi v dinamični enačbi zanemarljivi – model konstantne turbulentne viskoznosti). Enačbe veljajo tako za laminarne kot tudi za

turbulentne tokove za štiri neznane odvisne količine (tlak in tri komponente hitrosti). Za te štiri neznanke imamo na voljo štiri diferencialne enačbe. Značilnost slednjih enačb je zvezno opisovanje obnašanja domen, kar v splošnem pomeni neskončno število neznanih vrednosti osnovnih spremenljivk oziroma prostostnih stopenj (angl.: Degrees of Freedom – DOF). Slednje je v praksi nemogoče. Preden se lotimo slednjega problema bomo splošne Navier-Stokesove enačbe zapisali za 2D tok:

- *imamo stalni tok v dvodimenzionalnem prostoru*

Preden zapišemo enačbe moramo zapisati še predpostavke, da iz splošnih enačb (9 in 10) dobimo 2D enačbe za stalni tok:

- Gre za dvodimenzionalen prostor,
- tok je v vertikalni ali horizontalni ravnini,
- upoštevamo stalni tok - veličine se po času ne spreminjajo.

Kontinuitetna enačba:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

Če predpostavimo konstantno temperaturo in nestisljivo tekočino ( $\varphi = \text{konst.}$ ), lahko enačbo (11) zapišemo kot:

$$\nabla v = 0 \quad (12)$$

kjer je:  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$  in vektor  $v = (u, v)$

Zapišimo še dinamično enačbo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x}(v_{ef} \frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(v_{ef} \frac{\partial u}{\partial y}) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x}(v_{ef} \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(v_{ef} \frac{\partial v}{\partial y}) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho f_y \end{aligned} \quad (13)$$

Če predpostavimo konstantno temperaturo in nestisljivo tekočino ( $\varphi = \text{konst.}$ ) lahko enačbo (13) zapišemo kot:

$$(v\nabla)v = f - \nabla P + v_{ef}\nabla^2 v \quad (14)$$

kjer je:  $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$  in vektor  $v = (u, v)$

- imamo nestalni tok v dvodimenzionalnem prostoru

Splošne enačbe, ki opisujejo nestalni tok v dvodimenzionalnem okolju, lahko analogno zapišemo kot enačbe za stalni tok v dvodimenzionalnem prostoru (enačbi 11 in 13) s to razliko, da moramo tema dvema enačbama dodati še časovne komponente veličin  $(\frac{\partial \rho}{\partial t}, \frac{\partial(\rho u)}{\partial t}, \frac{\partial(\rho v)}{\partial t})$ . Zato bomo na tem mestu zapisali osnovne enačbe za globinsko povprečni tok s prosto gladino, do katerih pridemo z integracijo osnovnih tridimenzionalnih enačb (enačbi 9 in 10) po globini. Podrobnejšo izpeljavo lahko najdemo v magistrski nalogi Matjaža Četine z naslovom Matematično modeliranje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov iz leta 1988. Zapišimo še predpostavke:

- Tok je dvodimenzionalen ( $w \equiv 0$ ),
- tekočina je nestisljiva, gostota je konstantna ( $\rho = \text{konst.}$ ),
- dinamična enačba se za vertikalno smer poenostavi v preprosto enačbo za hidrostatično porazdelitev tlakov,
- energijske izgube zaradi trenja ob dno izrazimo z obliko Manningove empirične enačbe,
- upoštevamo model konstantne turbulentne viskoznosti.

Kontinuitetna enačba:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{hu})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{hv})}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

Dinamična enačba

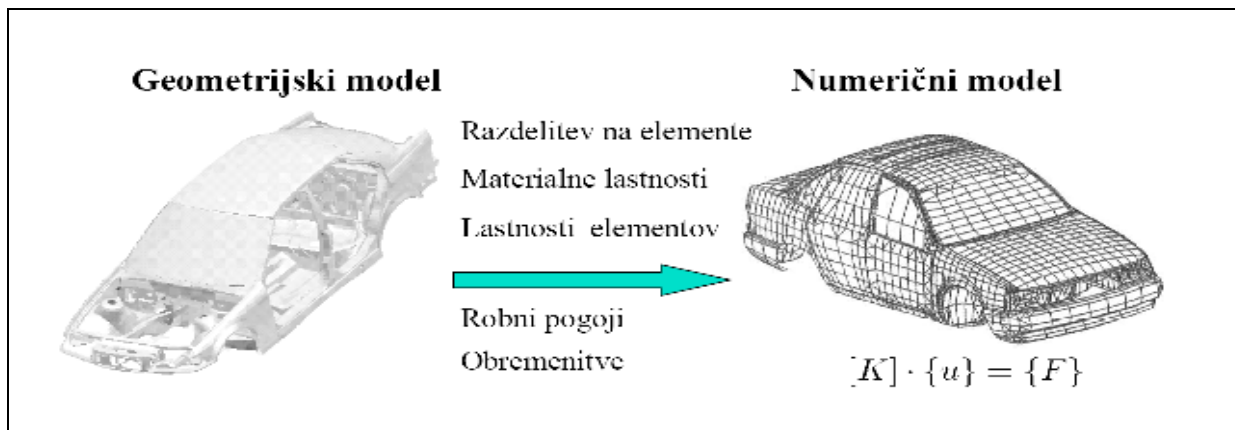
$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{hu})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{hu}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{huv})}{\partial y} &= -gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} - ghn^2 \frac{\bar{u}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x} (h\nu_{ef} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\nu_{ef} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}) \\ \frac{\partial(\bar{hv})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{huv})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{hv}^2)}{\partial y} &= -gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} - ghn^2 \frac{\bar{v}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x} (h\nu_{ef} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\nu_{ef} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}) \end{aligned} \quad (16)$$

Enačbi (15) in (16) sta v inženirski stroki poznani tudi kot St. Venantovi enačbi za dvodimenzionalni tok. Z enačbo (15) in (16) lahko simuliramo tudi globinsko povprečen stalni tok, le da v tem primeru ne upoštevamo časovnih členov  $\frac{\partial h}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial(\bar{hu})}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial(\bar{hv})}{\partial t}$ .

### 2.2.2 Metode reševanja

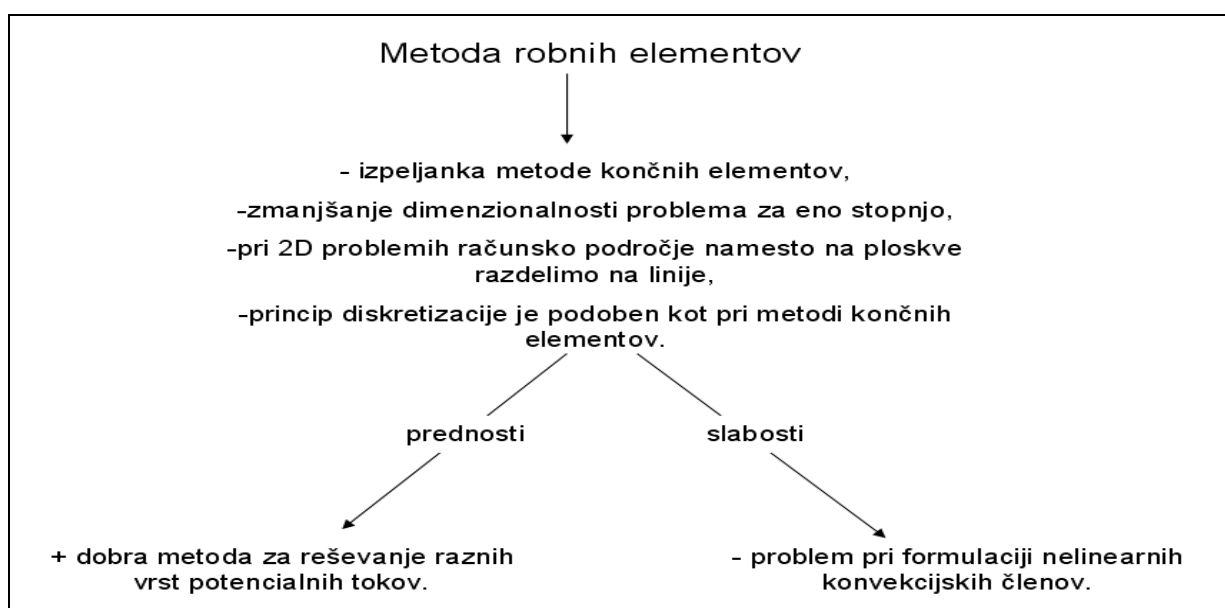
Če hočemo simulirati tok tekočine, moramo rešiti inženirski problem zveznih domen, ki temeljijo na reševanju vodilnih diferencialnih enačb. Slednje opisujejo obnašanje domen pri različnih vplivih. Ker vrednosti neznanih spremenljivk za zahtevnejše probleme ni mogoče določiti tako, da bi v popolnosti zadovoljevale vodilne diferencialne enačbe v celotnem območju obravnavane domene, se v takšnih primerih uporablja približne numerične metode, ki temeljijo na diskretizaciji zvezne domene, pri čemer z ustreznimi matematičnimi postopki pretvorimo vodilne diferencialne enačbe v zbir algebrskih enačb.

Opravka imamo s sistemom nelinearnih parcialnih diferencialnih enačb 2. reda, pri katerem so enačbe stalnega toka v 2D prostoru eliptičnega tipa, enačbe nestalnega toka pa hiperboličnega tipa. Slednje enačbe ob upoštevanju poljubnih robnih pogojev analitično niso rešljive. Zaradi tega se jih lahko lotimo samo numerično (glej sliko 4).

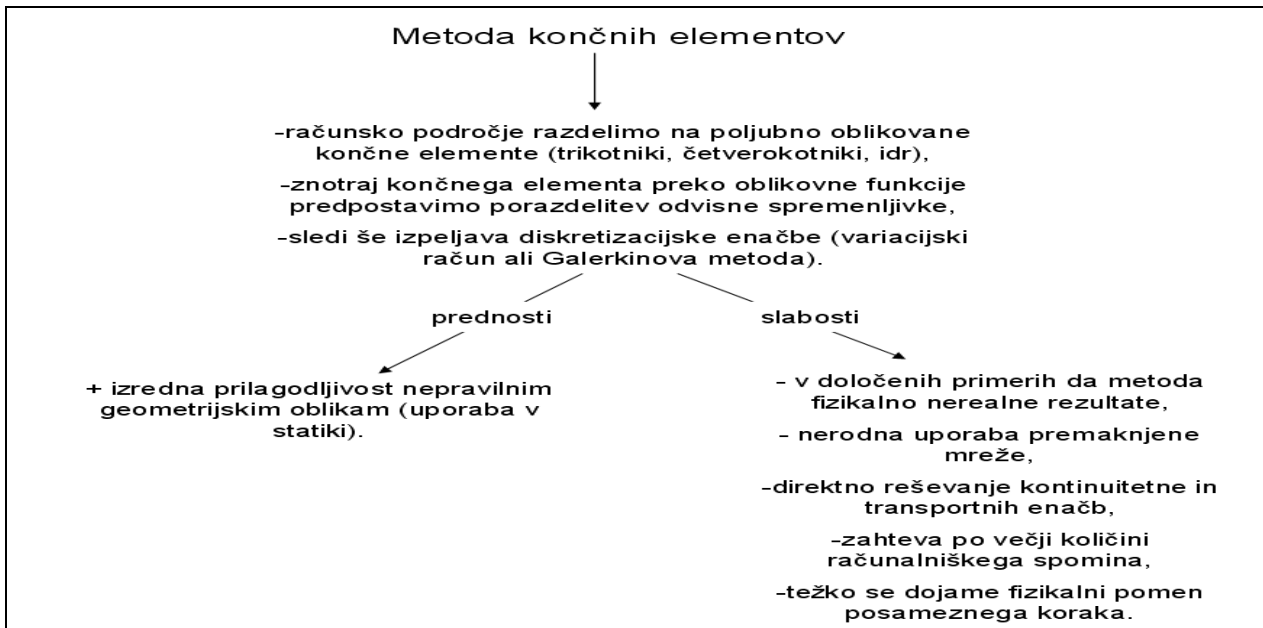


Slika 4: Diskretizacija zvezne domene pri metodi končnih elementov ([http://lace.uni-mb.si/Num\\_meth\\_konst/Praktikum/1%20-%20Uvod.pdf](http://lace.uni-mb.si/Num_meth_konst/Praktikum/1%20-%20Uvod.pdf))

Numerično reševanje bolj ali manj kompleksnih enačb se je z leti zelo razvijalo in tako danes poznamo ogromno metod reševanja. Glede na to, da univerzalne metode ni, je potrebno po definiranju enačb, ki jih želimo razrešiti, izbrati tudi najboljšo metodo. Za primere dvo in tro dimenzionalnih tokov tekočin se najčešče uporabljajo tri velike skupine numeričnih metod, in sicer metoda končnih razlik, metoda kočnih elementov in metoda robnih elementov. Vsaka izmed naštetih metod ima svoje prednosti in slabosti (glej slike 5, 6 in 7). Kratak opis smo na kratko predstavili v grafični obliki (Četina, 1988).

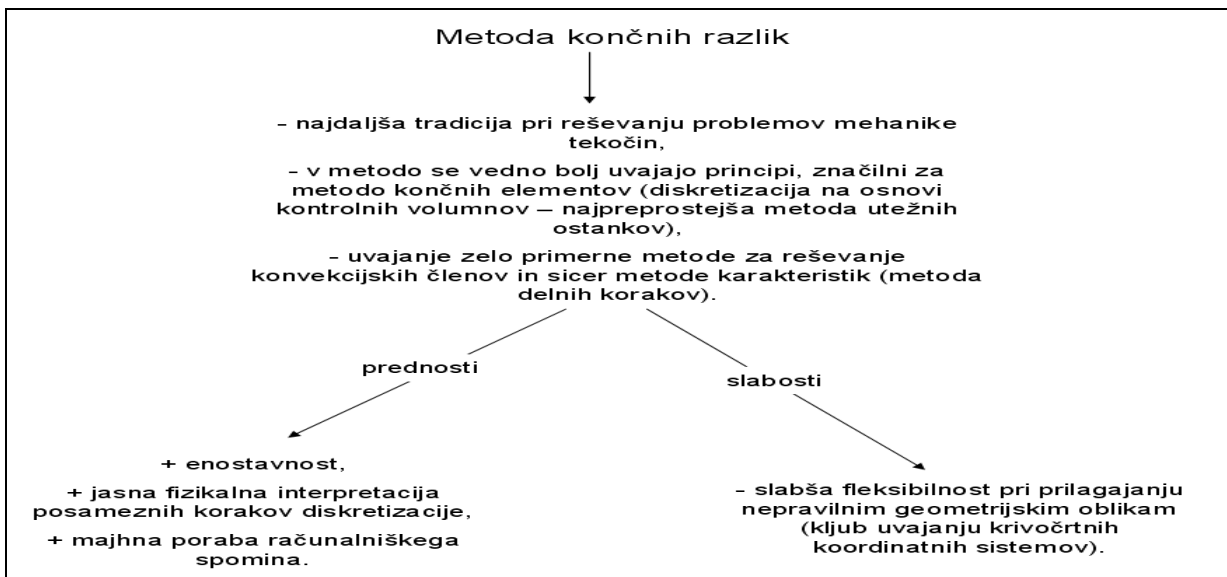


Slika 5: Kratak opis metode robnih elementov



**Slika 6:** Kratak opis metode končnih elementov (MKE)

Glede na to, da ima vsaka metoda določene prednosti in slabosti, je trend v združevanju oziroma dopolnjevanju metod s pozitivnimi elementi drugih metod. Prav tako je računalniška tehnologija v zadnjih letih tako napredovala, da računalniški spomin ni več ovira oziroma zaviralec razvoja določenih kombinacij numeričnih metod. Tako počasi izginjajo ostre meje med osnovnimi skupinami numeričnih metod.



**Slika 7:** Kratak opis metode končnih razlik

### 3 HIDRAVLIČNO MODELIRANJE BOČNIH PRELIVOV

Modele lahko v splošnem razdelimo na fizične in matematične. Slednji pomenijo abstrakten zapis, ki opisuje bistvene značilnosti določenega naravnega pojava, fizični modeli pa modelirajo pojav na materialnem nivoju (prenos pogojev iz narave v laboratorij – Froudova modelna podobnost).

Matematični model je v splošnem sestavljen iz dveh delov, in sicer iz matematičnega, ki predstavlja enačbe, s katerimi opišemo pojav, in numeričnega, ki zajema metode za reševanje teh enačb. Ker pa govorimo o hidravličnem modeliranju, smo pa lahko bolj konkretni in povemo, da gre za transformacijo osnovnih zakonov hidromehanike v ekvivalenten sistem enačb, ki je primeren za reševanje praktičnih problemov v posameznih vejah hidravlike (<http://www.dhd.si/model.html>).

Enačbe, s pomočjo katerih rešujemo praktične probleme, pa lahko izpeljemo na različne načine. Tako poznamo več vrst modelov, in sicer (<http://www.dhd.si/model.html>):

- Konceptualen model: matematični model izpeljan iz osnovnih fizikalnih zakonov (teoretični model, ki vsebuje kakšen empiričen člen, npr. St. Venantova dinamična enačba),
- empiričen model: model, v katerem uporabimo samo izsledke opazovanj v naravi ali laboratoriju (enačba, ki se najboljše prilega izmerjenim vrednostim – regresijska premica),
- glede na značilnost pojava oz. rezultatov modela le-te delimo na deterministične (v modelu ni slučajnih spremenljivk) in stohastične (model vsebuje slučajne spremenljivke) modele,
- glede na časovno komponento ločimo stacionarne (čas je konstanta) in nestacionarne (čas je spremenljivka) modele,
- glede na povprečenje po smereh koordinatnega sistema govorimo o nič, eno, dvo in trodimenzijskih modelih,
- glede na uporabnost oz. namembnost pa delimo modele na posebne (npr. tok vode s prosto gladino) in splošne (npr. gibanje katerekoli tekočine).



Pri matematičnem modeliranju moramo problem najprej dovolj poenostaviti in po končani simulaciji izvesti občutljivostne analize ter kritično presoditi rezultate. Ne smemo pa pozabiti tudi na umerjanje modela, ki je v praksi nujno.

Hidravlični modeli so seveda samo eni izmed modelov, ki obravnavajo določen del vodnega kroga (obravnavajo potek gladin oz. tlakov in hitrosti). Poleg slednjih poznamo tudi meteorološke (razpored in količina padavin, hitrost in smer vetra, stopnja oblačnosti ipd.), hidrološke (modeli površinskega odtoka in propagacije poplavnega vala), idr.

### **3.1 Fizični modeli**

Kot sem že omenili, predstavljajo fizični modeli eno izmed možnosti, s pomočjo katerih lahko simuliramo naravni pojav. V preteklosti so imeli velik pomen, saj zaradi računalniških omejitev matematični modeli niso bili tako razviti. Gradnja fizičnih modelov je ponavadi zelo draga in zamudna, kljub temu pa jih za potrebe hidravlike ne smemo opustiti, kajti kljub vsem slabostim, ti modeli predstavljajo potrditev računskim modelom, poleg tega pa lahko na podlagi rezultatov, ki smo jih dobili s fizičnimi modeli, umerimo določene parametre, potrebne za matematični model.

Za dobro obravnavanje bočnih prelivov so fizični modeli velikega pomena. Tudi če uporabljamo 2D ali 3D matematične modele, so rezultati fizičnih modelov nujni, saj potrebujemo veliko vhodnih podatkov, s katerimi model umerimo. Velika količina dejavnikov, ki vpliva na sam potek bočnega prelivanja, dokazuje, da so razmere v okolici preliva zelo kompleksne, in da nam še tako sodobni matematični modeli brez umerjenih koeficientov ne koristijo prav veliko. Tudi zaradi tega se je za izdelavo diplomske naloge uporabil fizični model, ker imamo le tako primerne rezultate za primerjavo.

#### ***3.1.1 Modelna podobnost pri toku s prosto gladino***

Modelna ali dinamična podobnost pomeni, da uspemo zgraditi takšen fizični model, da bo možno prenašanje vrednosti med parametri v naravi in na modelu, hkrati pa je obdržana tudi

medsebojna koherentnost različnih parametrov. Če nam to uspe, bomo na modelu dobili kinematično in dinamično podoben pojav. To pa pomeni, da bomo lahko izvajali meritve hitrosti, tlakov in sil ter rezultate prenesli iz modela v naravo. Dejstvo je, da je pri uporabi enake tekočine (vode) na modelu kot v naravi enakost obeh števil skoraj nemogoče zagotoviti. Zato modelna podobnost pri toku s prosto gladino največkrat temelji na Froudovi podobnosti (Froudovi številki modela in narave morata biti enaka). Froudova modelna podobnost pa je zadovoljiva in primerna, če sila težnosti prevladuje nad silo viskoznosti – primeri toka s prosto gladino v rekah, jezerih, idr. (Rajar, 1997).

Kadar se fizični model geometrijsko popolnoma ujema s stanjem v naravi (model je v merilu  $1:\lambda$ ), lahko po Froudovi modelni podobnosti uporabimo naslednja merila za prenos količin iz narave na model ([www.ljubljana.si/file/561957/Hidravlicna\\_modelna\\_raziskava2002.pdf](http://www.ljubljana.si/file/561957/Hidravlicna_modelna_raziskava2002.pdf)):

- za dolžino in tlačno višino..... $1:\lambda$
- za površino..... $1:\lambda^2$
- za prostornino..... $1:\lambda^3$
- za hitrost in čas..... $1:\lambda^{1/2}$
- za pretok..... $1:\lambda^{5/2}$
- za silo.....  $1:\lambda^3$

Za primere bočnih prelivov je Froudovo modelno podobnost najpomembneje zagotoviti v gorvodnem profilu od mesta bočnega preliva. V kolikor nimamo identično pomanjšane geometrije (imamo ožje korito, oblika korita ni popolnoma identična), prej opisanega postopka ne moremo uporabiti. Ena od rešitev, s katero delno rešimo problem je, da na podlagi znanih gladin izberemo takšen pretok (ga ugotavljamo), s katerim bomo zagotovili enako Froudovo število kot pa je v naravi. Tako smo sicer zagotovili Froudovo modelno podobnost, vendar rezultate ne moremo popolnoma prenesti v naravo, ker nimamo identične geometrije, ki prav tako vpliva na bočni pretok.

V diplomski nalogi smo uporabili teoretično korito, ki je bilo v tistem trenutku na razpolago zato prenos rezultatov med naravo in modelom ni bistven za namen te naloge.

### 3.1.2 Merilna negotovost

Glede na to, da je rezultat meritev število oziroma izmerjena vrednost, je dejstvo, da ima vsaka meritev določeno negotovost. Negotovost je pravzaprav kvantitativno merilo, s katerim izrazimo večji ali manjši dvom o izmerjenem rezultatu. Vsaka merilna naprava ima določeno natančnost, vendar pa velja, da lahko dvomimo v prav vsako merjenje. Nekatere merilne naprave so bolj točne<sup>1</sup>, druge manj. Če hočemo izraziti merilno negotovost, potrebujemo dva številčna podatka. in sicer interval zaupanja ter nivo zaupanja, ki pove, kako zelo smo prepričani, da se vrednost meritve nahaja znotraj intervala zaupanja. Boljši približek merjenja bi vsekakor dobili, v kolikor bi izvajali isto meritev večkrat, končni rezultat pa bi bila povprečna vrednost.

V hidrotehniko je merilna negotovost zelo pomembna, še posebej takrat, ko meritve uporabljamo v okviru umerjanja (npr. umerjanje koeficienta hrapavosti pri matematičnih modelih), kjer moramo merilno negotovost pripisati rezultatu. Namen diplomske naloge ni bila analiza merilne negotovosti, zato temu vprašanju v nadaljevanju ne bom posvečal posebne pozornosti.

### 3.1.3 Merilna oprema

Izbor merilne opreme, s katero lahko bolj ali manj natančno izmerimo želene hidravlične karakteristike, je izredno pester. Ko se odločamo za posamezno napravo, moramo biti pozorni, da je območje delovanja primerno našim meritvam (intervalu uporabljenih pretokov in



**Slika 8:** Thomson-ov preliv

<sup>1</sup> Paziti moramo, da ne pomešamo izrazov pogrešek, točnost in merilna negotovost. Slednja je kvantitativen pojem (npr. merilna negotovost določene meritve znaša 0.1 l/s), točnost je kvalitativen pojem (npr. meritev je zelo točna), pogrešek pa je razlika med izmerjeno in pravo vrednostjo merjenja.

hitrosti), in da lahko z napravo dosežemo želeno natančnost meritve. Tako bi na tem mestu na kratko predstavili uporabljeno merilno opremo ter opozorili na pravilno uporabo le-te.

### ***Trikotni preliv (Thomson)***

Ena izmed hidravličnih količin, ki smo jo potrebovali, je bila znan dotočni pretok na model. Željen pretok smo določili s pomočjo Thomsonovega preлива (glej sliko 8), ki se uporablja kot standardni merski objekt. Pretok se izračuna po naslednji enačbi (Steinman, 1999):

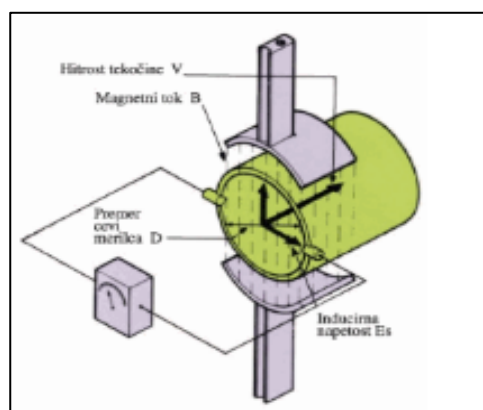
$$Q = \frac{8}{15} \mu \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{2gh_{pr}^{\frac{5}{2}}} \quad (17)$$

Za Thomson-ov trikotni preliv je značilno, da ima kot odpiranja enak  $90^\circ$ . Za takšne prelive pa je Barr ugotovil, da je od neke prelivne višine spreminjanje koeficienta preлива  $\mu$  sprejemljivo majhno, kar pomeni, da je pretok odvisen samo od prelivne višine. Prav zaradi tega so izredno uporabni kot merilni objekti (po standardu ISO so določeni kot merilni objekti za merjenje pretokov z visoko točnostjo). Tako se za želeni pretok poišče pripadajočo prelivno višino (prelivne višine se zaradi lažje uporabe tabelirajo) v preglednicah, ki se jo s pomočjo dotočnega ventila tudi uravnava.

### ***Elektromagnetni merilec pretoka***

Naslednji podatek, ki smo ga morali izmeriti, je pretok preko bočnega preлива. Vsa količina prelite vode se je tako zbrala v zbirniku in svojo pot nadaljevala po cevi preko elektromagnetnega merilca pretoka ter se nato vrnila v skupen rezervoar.

Elektromagnetni merilci delujejo na principu Faradeyevga zakona (glej sliko 9) o elektromagnetni indukciji. Magnetno polje je

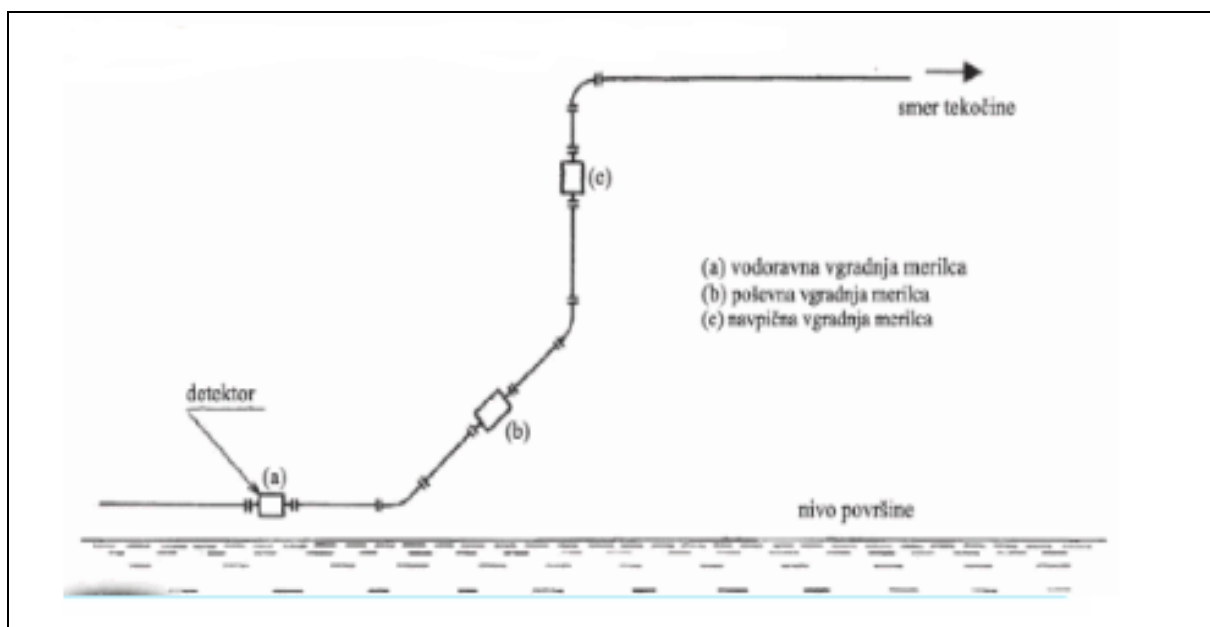


**Slika 9:** Prikaz principa merjenja z elektromagnetnimi merilci (<http://www.aniton.si/text/13446211-1590.html>)

postavljeno v ravnini, ki je pravokotna glede na premikanje prevodne tekočine v izolirani cevi. Inducirana električna napetost je proporcionalna s povprečno hitrostjo tekočine.

Inducirani tok teče pravokotno na tekočino in gre preko elektrod (edinih dveh prevodnih točk, ki sta v stiku s tekočino). Tok gre potem na pretvornik. Ta šibki tok se obdela v ojačevalcu in elementih za obdelavo signala, tako da ima signal na izhodu od 4 do 20 mA. Velikost signala je proporcionalna povprečnemu pretoku. V elektrodah inducirana napetost ( $E_s$ ) se določi po enačbi  $E_s = KBDV$ , kjer je  $B$  = gostota magnetnega polja,  $D$  = premer cevi merilca [m],  $V$  = hitrost tekočine [m/s],  $K$  = brezdimenzijska konstanta (<http://www.aniton.si/text/13446211-1590.html>).

Poleg samega načina delovanja je za uporabnike vsekakor bolj pomembno pravilno nameščanje merilcev v sistem (glej sliko 10). Prvi pogoj, ki mora biti izpolnjen je, da se bo pretok meril na takšnih mestih, kjer je cev vedno polna vode. Priporočljivo je tudi mesto nižje od odzračevalnika, ker s tem preprečimo vstop zraka v cev. Merilce lahko priključimo tudi na večje cevi, vendar moramo pri tem uporabiti dodatne redukcijske cevi, pri katerih mora biti kot  $\alpha$  manjši od 8 stopinj.

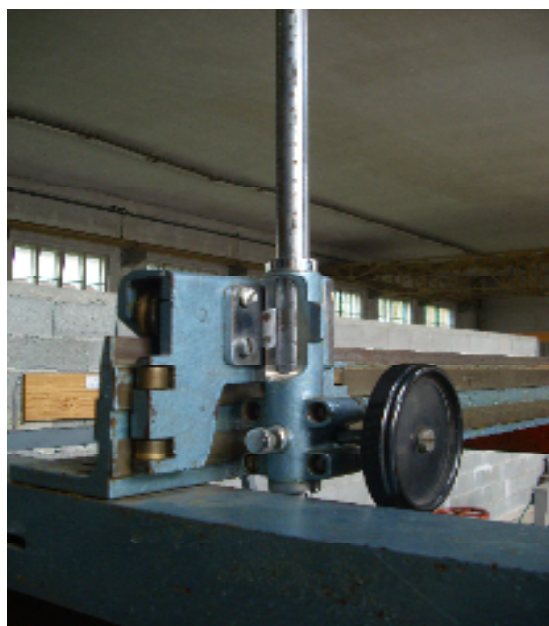


**Slika 10:** Možne postavitve elektromagnetnega merilca pretokov  
(<http://www.aniton.si/text/13446211-1590.html>)

Uporabili smo že inštalirani elektromagnetni merilec pretoka Promag 50W. To je merilec pretoka, ki je primeren za merjenje pretokov čiste in odpadne vode. Primeren je za merjenje pretokov do  $110\,000\text{ m}^3/\text{h}$ , deluje do temperature  $+80\text{ °C}$  in pritiska do 40 bar-ov, kar je več kot dovolj za naš model.

### ***Ostno kljunasto merilo***

Po izmerjenih pretokih smo morali izmeriti še potek gladin. Za meritev slednjih smo uporabili ostna merila (glej sliko 11). Princip merjenja je enak kot pri navadnih kljunastih merilih, le da imamo v tem primeru ost, ki je vpeta na skalo. Natančnost, ki smo jo lahko dosegel, je 0.1 mm. Slednjo se je doseglo s pomikanjem drsnika oziroma osi, ki smo jo nastavili do gladine in na skali odčitali rezultat. Problem je seveda v tem, da vodna gladina ni povsem ravna, kar pomeni, da je bilo samo os precej težko naravnati povsem na vodno gladino. Nenapisano pravilo pravi, da je pri pulzirajoči gladini najbolj



**Slika 11:** Skala in vpetje ostnega merila

optimalno, če se konica osnega merila  $2/3$  časa dotika gladine,  $1/3$  pa je na suhem (tik nad gladino). Slednjega smo se seveda v čim večji meri držali.

## **3.2 Matematični modeli**

Nekaj osnovnih lastnosti matematičnih modelov smo podali že v uvodu poglavja. V diplomski nalogi se bomo bolj podrobno lotili dveh orodij za modeliranje, in sicer programskega paketa HEC-RAS in paketa AquaDyn za hidrodinamično modeliranje. Slednji modelira 2D tok, medtem ko HEC-RAS sodi med 1D matematične modele. Glede na to, da bomo imeli na razpolago rezultate meritev, bomo lahko na koncu podali primerjavo kakovosti rezultatov. Pri primerjavi rezultatov se moramo zavedati, da imamo na eni strani 1D izračun,

na drugi pa veliko zahtevnejši 2D model, kar pomeni, da k primerjavi sodi tudi čas izračuna, čas potreben za umerjanje modela, občutljivost modelov na posamezne parametre.

### **3.2.1 Matematični model HEC-RAS**

HEC-RAS je eden najbolj razširjenih 1D računalniških programov za račun gladin mirnega, deročega in mešanega toka ter drugih karakteristik v odprtih vodotokih (tako stalnega kot nestalnega toka). Velika prednost programa je, da si ga lahko vsak brezplačno naloži na svoj osebni računalnik. Poleg tega je program dokaj preprost za uporabo, s kopico hidrotehničnih objektov, ki so na voljo uporabniku. Vsebuje stabilen algoritem, prikazovanje rezultatov pa je izredno pregleden. Za program sicer ni dostopne kode, vendar sta postopek in način izračuna izredno dobro dokumentirana. Ponujene hidrotehnične objekte lahko v splošnem razdelimo na tiste, ki so pravokotni na tok (angl. Inline Structures), in na tiste, ki so vzporedni na tok (angl. Lateral Structures). Glede na naslov diplomske naloge se bomo bolj podrobneje posvetili objektom, ki so vzporedni toku. Med slednjimi objekti tako lahko modeliramo bočne prelive, iztoke iz odprtih, prepuste, mešanico le-teh.

#### ***Metode izračuna bočnih prelivov s pomočjo programskega paketa HEC-RAS***

Narava bočnih prelivov je takšna, da pride do delitev toka. Kot omenjeno, program omogoča 1D izračun, kar pomeni, da imamo na voljo dve možnosti kako modelirati takšen pojav, ki pa smo jih že opisali v poglavju 2.1. V tem poglavju bomo tako podali način izračuna pretoka preko bočnega preliva s pomočjo prirejene standardne prelivne enačbe.

Prvi korak, ki ga je potrebno storiti, je umestitev bočnega preliva v obravnavano situacijo. Bočni preliv mora biti lociran med dvema profiloma, vendar program dopušča, da lahko imamo znotraj samega preliva poljubno število dodatnih profilov. Ena izmed glavnih značilnosti tovrstnih prelivov je ta, da gladina vzdolž preliva ni ravna (glej sliko 12), prav tako pa je pod kotom lahko tudi krona preliva (pretok se vzdolž preliva spreminja). Zaradi tega dejstva ne moremo neposredno uporabiti standardne prelivne enačbe, ki predpostavlja, da sta krona preliva in vodna gladina vzporedni. V želji, da upoštevamo nagnjenost gladine, moramo standardno prelivno enačbo sledeče integrirati (HEC-RAS, Reference Manual):

$$Q = CLH^{\frac{3}{2}}$$

$$dQ = C(y_{ws} - y_w)^{\frac{3}{2}} dx$$

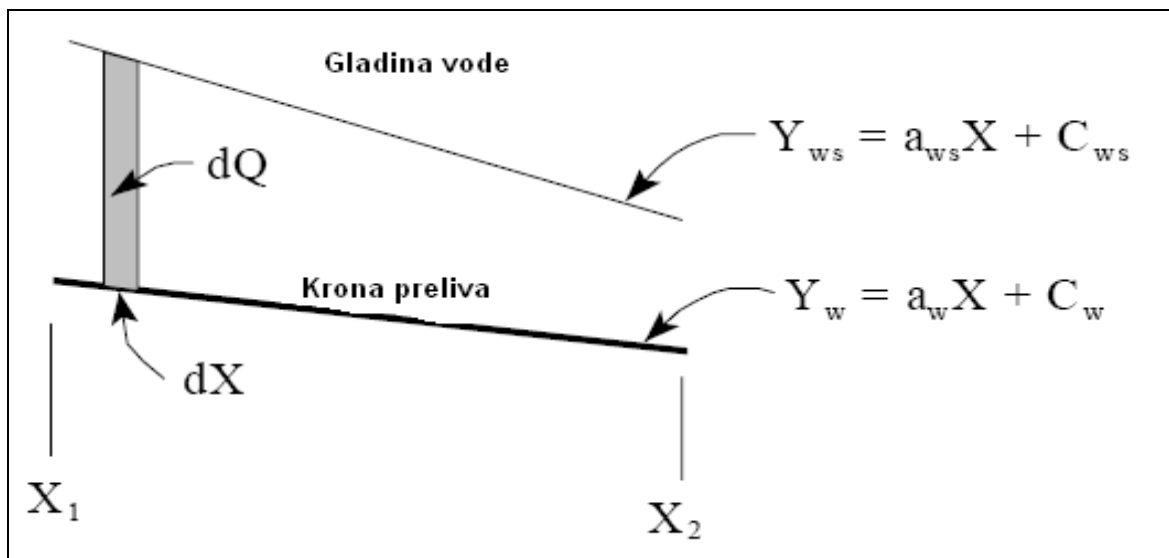
$$dQ = C(a_{ws}x + C_{ws} - a_w x - C_w)^{\frac{3}{2}} dx$$

$$dQ = C((a_{ws} - a_w)x + C_{ws} - C_w)^{\frac{3}{2}} dx$$

vpeljemo:  $a_1 = a_{ws} - a_w$  in  $C_1 = C_{ws} - C_w$  in izraz integriramo od  $x_1$  do  $x_2$

$$\int_{x_1}^{x_2} dQ = C \int_{x_1}^{x_2} (a_1 x + C_1)^{\frac{3}{2}} dx$$

$$Q_{x_1-x_2} = \frac{2C}{5a_1} ((a_1 x_2 + C_1)^{\frac{5}{2}} - (a_1 x_1 + C_1)^{\frac{5}{2}}) \quad (18)$$



Slika 12: Prikaz nagnjenosti gladine in krona preliva pri toku preko bočnega preliva  
 (HEC-RAS, Reference Manual)

Če pogledamo enačbo (18) lahko vidimo, da enačba velja vse dokler  $a_1$  ni enako 0, kar v naravi pomeni, da sta gladina in krona preliva vzporedna. V takšnem primeru program za izračun pretoka  $Q$  uporabi standardno prelivno enačbo.

Enačbo, ki jo program uporablja za izračun toka preko preliva, smo prikazali in predstavili, vendar se nam na tem mestu pojavi vprašanje ali za tok preko preliva uporabimo energijsko črto ali gladino? Uporaba vodne gladine v kanalu za izračun toka preko bočnega preliva je



najprimernejša takrat, ko imamo bočni preliv lociran v bližini glavnega toka. Razlog za to izhaja iz dejstva, da je pri takšnih situacijah smer toka paralelna smeri prelivne krone in je posledično energijska višina nad prelivom bližje gladini vode kot višini energije v kanalu. Če pa imamo preliv odmaknjen od glavne struge, pa se hitrost toka na območju preliva precej zmanjša in tudi smer toka je usmerjena proti prelivu in ne paralelno z njim. Posledično je v tem primeru bolj primerna uporaba energijske višine. Kljub temu pa program dopušča, da si uporabnik sam izbere metodo (ali uporaba energijske črte ali pa uporaba gladine v vodotoku), ki se mu zdi primernejša za dano situacijo.

Poleg prilagojene standardne prelivne enačbe, kjer je glavna neznanka pretočni koeficient  $C_d$ , pa program dopušča tudi možnost izračuna toka preko bočnega preliva s pomočjo Hager-jeve enačbe, ki je praktično enaka kot prilagojena standardna prelivna enačba, le da se v tem primeru pretočni koeficient  $C_d$  izračuna s pomočjo enačbe, ki bazira na fizičnih in hidravličnih lastnostih (Hager, 1987):

$$C_d = \frac{3}{5} C_0 \sqrt{g} \left[ \frac{1-W}{3-2y-W} \right]^{0.5} \left\{ 1 - (\beta + S_0) \left[ \frac{3(1-y)}{y-W} \right]^{0.5} \right\} \quad (19)$$

kjer je:  $W = \frac{h_w}{H_t + h_w}$ ;  $y = \frac{H + h_w}{H_t + h_w}$ ;  $H$  = prelivna višina;  $h_w$  = višina preliva;  $H_t$  =

energija nad prelivom;  $S_0$  = povprečen padec kanala;  $\beta$  = kot bočnega preliva glede na glavni kanal ( $\beta = 0$ , če je preliv vzporeden s kanalom)

V enačbi (19) se pojavi koeficient  $C_0$ , ki je funkcija oblike preliva in je enak 1 za ostrorobe prelive, oziroma  $8/7$ , če imamo preliv brez višine. Za prelive, ki imajo obliko širokega pragu, se koeficient  $C_0$  izračuna po sledeči enačbi:

$$C_0 = 1 - \frac{2}{9 \left[ 1 + \left( \frac{H_t}{b} \right)^4 \right]} \quad (20)$$

V primeru okroglega preliva pa se koeficient  $C_0$  izračuna sledeče:

$$C_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ 1 + \frac{\frac{22}{81} \left( \frac{H_t}{r} \right)^2}{1 + \frac{1}{2} \left( \frac{H_t}{r} \right)^2} \right] \quad (21)$$

kjer je:  $r$  = radij krone preliva

Enačbe, s katerimi lahko opišemo hidravlične karakteristike pri toku preko bočnega preliva, ki jih praktično vsebujejo skoraj vsi 1D računalniški programi, smo opisali in bi tako na tem mestu na kratko še opisali uporabo standardne prelivne enačbe na način, kot jo uporablja program HEC-RAS.

Ko smo želen bočni preliv umestili v prostor in ga v celoti definirali (kako ga definiramo, bomo predstavil v poglavju Vnos vhodnih podatkov in način prikaza rezultatov), sledi, da poženemo izračun modela. Postopek izračuna temelji na uporabi enačbe (18), ki se računa med posameznima profiloma, v kolikor smo definirali profile znotraj samega bočnega preliva. Preden se simulacija začne je uporabniku na voljo možnost predpostavljanja bočnih pretokov za vsak začetni oziroma natočni pretok (v programu se okence, kjer lahko to storimo imenuje »Initial Split Flow Optimization table« in ga najdemo v meniju »Steady Flow Data«). Če te možnosti ne izrabimo, bo program sam predpostavil začetno razdelitev pretokov, kar pa lahko vodi k daljšemu izračunu. Kakorkoli se že odločimo, program najprej s predpostavljenim pretokom po standardnem koraku (HEC-RAS, Reference Manual) izračuna gladino do profila dolvodno od prelivnega mesta. Nakar s pomočjo enačbe (18), kjer za začetek uporabi preostali predpostavljeni pretok, in balansiranja energije med profili izračuna potek vodne gladine nad prelivom in posledično tudi končni bočni pretok med posameznima profiloma. V kolikor imamo več profilov znotraj prelivnega objekta, se izračun prestavi za en profil gorvodno in se postopek ponavlja skozi vse profile. V primeru ravne prelivne krone glede na enačbo (18), dobimo potek gladine, ki od SRP pada, naklon energije pa je ravno obraten (drugače voda ne bi tekla v pravo smer).

### ***Vnos vhodnih podatkov in način prikaza rezultatov***

Ko smo definirali položaj bočnega preliva (položaj definiramo z reko, odsekom in rečno stacionažo »RS« - ta lokacija predstavlja gorvodni konec preliva), se nam aktivirajo vsa potrebna okna za vnos podatkov. Najprej je potrebno vnesti lokacijo preliva. Za slednjo program dopušča štiri možnosti, in sicer:

- Bočni preliv se nahaja na koncu leve poplavne ravnice profila,
- bočni preliv se nahaja na koncu desne poplavne ravnice profila,
- bočni profil se nahaja takoj za desno brežino,
- bočni profil se nahaja takoj za levo brežino.

Po izboru ene izmed naštetih možnosti je pred konkretnim vnosom bočnega preliva potrebno vnesti še, kam se bo voda prelivala. Tokrat imamo na voljo tri izbore, in sicer:

- Vode gre ven iz sistema,
- voda gre na retenzijsko površino,
- voda se steče v profil druge veje.

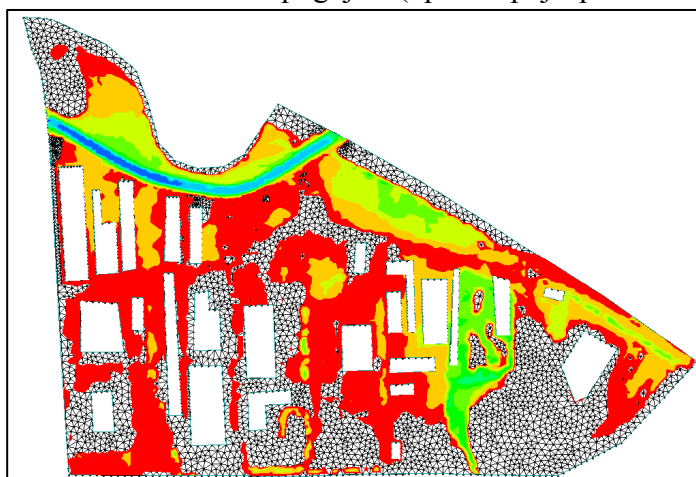
V prvem pogovornem oknu še označimo ali želimo tok optimizirati in podamo strukturo preliva. Prvi del definiranja preliva smo opravili, sedaj pa moramo vnesti še geometrijo preliva in podatke za izračun.

Geometrijo vnesemo preko preglednice stacionaža/višina (angl. Station/Elevation) in tako definiramo krono preliva ter stacionažo, do katere bo preliv segal. Program začetek preliva postavi na stacionažo 0, po vnosu vseh ostalih vrednosti pa se poleg samega prikaza krone preliva prikažejo tudi vsi vmesni profili. Vmesni profili so na razdaljah, ki smo jih vnesli kot razdalje do dolvodnega profila (angl. Downstream Reach Lengths), in sicer če je bočni preliv lociran takoj za desno ali levo brežino, program za razdaljo med profili vzame dolvodno razdaljo po kanalu posameznega preliva, če pa je preliv lociran na koncu poplavne ravnice, pa program vzame za razdaljo med profili dolvodno razdaljo po levi oziroma desni poplavni ravnici (odvisno, na kateri strani imamo preliv) posameznega profila. Tako imamo definirano lokacijo in krono preliva, sedaj pa potrebujemo še širino preliva in metodo, po kateri bo program računal. Slednjo določimo sami, vendar pa za sam izračun nima večjega pomena. Na

koncu nas čaka še izbira metode izračuna. Kot že napisano, lahko izbiramo med standardno prelivno enačbo (angl. Standard Weir Equation) ali pa med Hager-jevo formulo. Razlike med njima in potrebne podatke za izračun smo opisali v prejšnjem poglavju. Program dopušča tudi možnost izbora oblike preliva. Izbiramo lahko med valovito obliko, obliko širokega praga in ostrorobega preliva. Račun vseh treh oblik poteka po enaki proceduri, edina razlika je v vrednosti prelivnega koeficienta  $C_d$ , ki pa ga tako ali tako mora vnesti uporabnik sam.

### 3.2.2 Matematični model AquaDyn

AquaDyn je močan in enostaven hidrodinamični paket za obravnavo toka v dveh dimenzijah. Uporablja se za popoln opis in analizo hidrodinamičnih pogojev (npr. stopnje pretoka in vodostaja) v odprtih vodotokih, kot so reke, jezera in rečna ustja (glej sliko 13). Z različnimi moduli, ki jih program ponuja, lahko z dobljenimi rezultati strokovnjaki in inženirji povežejo pojma nevarnosti in ranljivosti/občutljivosti v karte ogroženosti (človeka, dejavnosti in objektov), ki pa jim naprej služijo za določitev tveganja (privzeto in preostalo tveganje). Splošno povedano lahko z orodjem



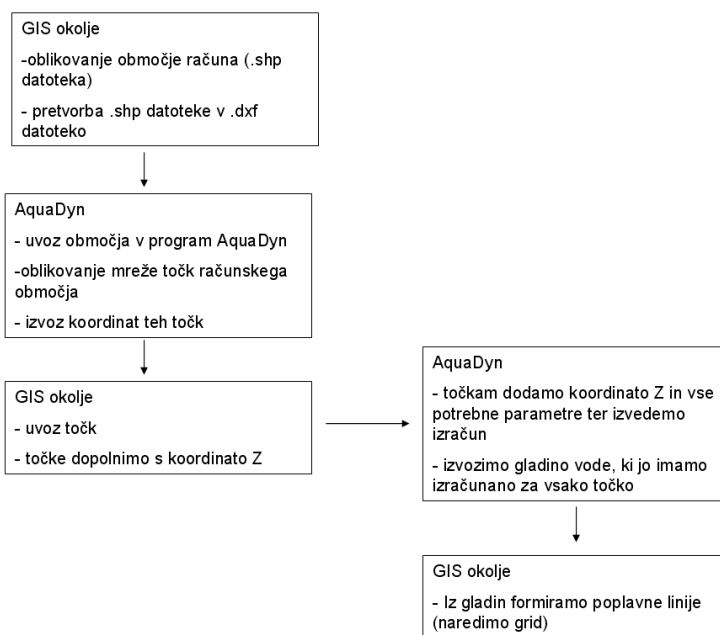
**Slika 13:** Prikaz vizualizacije relativne višine vode na poplavljenem, poseljenem območju izračunane s programskim paketom AquaDyn

AquaDyn predvidimo vpliv vode na človeka, dejavnosti in objekte. In obratno, program AquaDyn zagotavlja zanesljiv način napovedi posledic različnih dejavnosti, kot so gradnja nasipov, mostov, mostnih opornikov in raznih ovir na razmere v vodotoku. Orodje se lahko uporabi tako za modeliranje stalnega kot nestalnega toka v mirnem in deročem režimu, kar omogoča hidravlično obravnavo zožitev toka (angl. »contractions«), plimnih valov in različnih prelivov (prehod v deroči tj. preko kritične globine). Slednja možnost je vsekakor najpomembnejša za mojo diplomsko delo.

### Splošne značilnosti oziroma možnosti matematičnega programa AquaDyn

Okolje prilagojeno modeliranju površinskih voda:

- Vhodni parametri in rezultati simulacije so na voljo v eni projektni datoteki (.hyd), ki jo lahko po že opravljeni simulaciji spreminjamo, dopolnjujemo in na novo vizualiziramo (imamo možnost, da račun teče od zadnje rešitve naprej),
- uvoz in izvoz tekstovnih ASCII datotek sta kompatibilna z ostalimi programskimi orodji,
- priprava podatkov, obdelava rezultatov in izvrševanje simulacije je integrirano v enem programskem paketu in ni potrebno prenašati podatkovnih datotek med enim in drugim programom,<sup>2</sup>
- okensko oblikovana grafična podoba programa (vnos podatkov in analiza rezultatov preko okenskih menijev),
- pomoč je uporabniku na voljo tako v obliki navodil za uporabo, ki so del programskega paketa, kot tudi pomoč preko spleta,
- različen izbor vizualizacijskih možnosti:
  - prikaz različnih parametrov (iz različne ali iste simulacije) v odvisnosti od časa,



**Slika 14:** Prikaz povezave GIS-ov in simulacijskega okolja AquaDyn za potrebe priprave dobrih vhodnih podatkov (geometrije)

<sup>2</sup> Kadar imamo dobre podatke o geometriji (npr. LIDAR), je za pripravo vhodnih podatkov (geometrija) zaželen povezava z GIS-i, za kar orodje za modeliranje AquaDyn omogoča (glej sliko 14)

- omogočen izvoz podatkov in tiskanje le-teh,
- vsako vizualizacijsko okno ima možnost zoomiranja ter merjenja razdalj in površine.

*Enostavno urejanje vhodnih podatkov:*

- Avtomatska in hitra generacija računske mreže (podamo samo maksimalno oddaljenost med točkami v okolici robov domene), ki se lahko zelo prilagaja nepravilnim robovom domene,
- okence za vnos geometrije (x, y, z koordinat v točkah računa), Manningovega koeficienta hrapavosti, robnih in začetnih pogojev, vpliv vetra, idr.,
- razveljavitev zadnje vnesene spremembe.

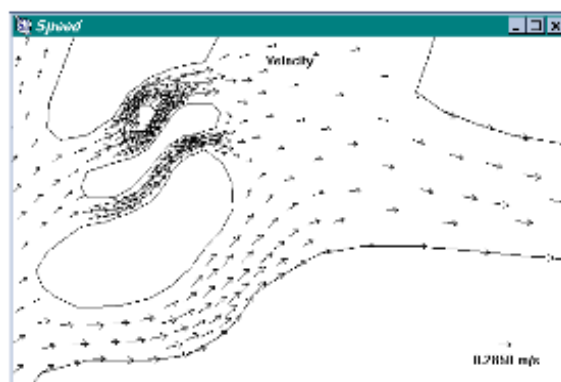
*Pester izbor vizualizacije dobljenih rezultatov:*

Prikaz rezultatov katerega koli parametra ali izračunane spremenljivke v odvisnosti od časa v obliki:

- Barvne gradacije,
- ovojnic,
- pretok vzdolž definirane linije,
- časovnih krivulj,
- polj hitrosti, ki so prikazana s puščicami.

Parametri, ki jih lahko prikazujemo so:

- Višina (geometrija območja – batimetrija),
- absolutno ( $H$ ) in relativno ( $h = H - Z$  višino vode) višino vode,
- hitrostna polja (glej sliko 15),
- Manningov in Stricklerjev koeficient,
- potek energijske črte,
- potek kritične gladine,
- Pecletovo število (razmerje med



**Slika 15:** Vizualizacija hitrostnega polja  
(<http://www.waterengr.com/aquadyn/aquadyn.htm>)

konvekcijskim in difuzijskim transportom).

*Popoln nadzor nad simulacijo:*

- Sledenje procesu konvergence in časovnemu poteku simulacije preko preglednice ali grafa,
- simulacijo lahko kadarkoli prekinemo in jo nadaljujemo od točke ustavitve,
- če po končani simulaciji dobimo samo delne rezultate, lahko spremenimo enega izmed vstavljenih parametrov (npr. robni pogoj) in nato simulacijo nadaljujemo do končnega rezultata,
- iteracija poteka z Newton-Raphson-ovo metodo<sup>3</sup>.

To je na kratko kaj vse ponuja simulacijski paket AquaDyn (opis pozitivnih strani programa). Uporaba in način računa je sicer do določene mere dokumentiran, vendar ko beremo publikacijo izdano s strani razvijalcev programskega paketa, lahko opazimo, da je sam način izračuna precej zamegljen. Kar se tiče same uporabe programa, je dokumentacija na dokaj visoki ravni. Solidno so opisani postopki od oblikovanja računske mreže pa do vnosa vseh potrebnih parametrov, začetnih vrednosti in robnih pogojev. Nekaj najdemo tudi na temo pregledovanja rezultatov. V navodilih za uporabo programa je mogoče nekoliko premalo besed na temo parametrov (npr. parameter viskoznosti) in primerne tolerance. Kljub temu, da program vsebuje numerično metodo končnih elementov, kar pomeni da lahko računsko področje diskretiziramo s trikotniki in tako zelo dobro pokrijemo še tako nepravilno domeno, pa, kot smo že opisali v poglavju 2.2 (opis numeričnih metod), predstavljajo velik problem začetni pogoji, ki morajo zaradi narave izračuna po MKE biti precej blizu pravih vrednostim. Značilnost slednje metode je, da dobimo rešitev glavnih enačb (kontinuitetne in transportnih enačb) direktno (Četina, 1988). To pomeni, da program rešuje sistem nelinearnih algebrskih enačb rešuje direktno z Newton-Raphson-ovo, kjer išče boljše vrednosti od začetnih, in če

---

<sup>3</sup> Če imamo sistem nelinearnih enačb, ga ne moremo rešiti z matrično algebro (Gauss-Jordan). Uporabiti moramo metodo zaporedne substitucije, kamor spada tudi Newton – Raphsonova metoda. Značilnost te metode je, da uporablja parcialne odvode, s katerimi lahko močno zmanjšamo število iteracij za dosego konvergence. Metoda je zelo uporabna za reševanje nelinearnih problemov (nujna uporaba računalnika), vendar pa moramo paziti, da so začetni pogoji čim bližje pravih vrednostim, ker v nasprotnem primeru lahko dobimo napačne rešitve ali pa pride do zazankanja in prezasedenosti računalniškega spomina.

mu damo slabe začetne pogoje do rešitve ne bo prišel. To zna bit velik problem, ki otežuje in daljša izračun.

To je bil nekako tudi glavni problem oziroma slabost programa. Poleg tega je račun možen z le do 20 000 točkami, kar pomeni, da program ni namenjen za izračun velikih področij. V nadaljevanju bomo še na kratko predstavili način izračuna.

### **Metoda izračuna s programskim paketom AquaDyn**

Program hidrodinamične probleme rešuje z numeričnim reševanjem St. Venantovih enačb v dveh smereh. Ti dve enačbi smo že zapisali in sicer sta to enačbi (15) in (16). Program omogoča upoštevanje tudi Coriolis-ove sile in vpliv zunanje sile vetra. Upošteva ju na sledeči način:

- člen, ki opisuje vpliv Coriolis-ove sile

$$F_{\text{cor}} = f\bar{v} \text{ oziroma } f\bar{u}$$

kjer je:  $f$  Coriolisov koeficient, ki je enak  $2\Omega \sin \ell$ ,

kjer je:  $\Omega$  krožna frekvenca,  $\sin \ell$  pa kot med smerjo gibanja in vrtilno osjo

- vpliv vetra pa se upošteva z naslednjima enačbama:

$$F_x = D\bar{U} \frac{\sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2}}{h} \text{ in } F_y = D\bar{V} \frac{\sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2}}{h}$$

kjer je:  $\bar{U}$  in  $\bar{V}$  hitrosti vetra,  $h$  predstavlja globino vode (relativno),  $D$  pa je trenjski koeficient, ki je odvisen od višine merjenja hitrosti vetra nad vodno gladino

V dinamični enačbi (enačba (16)) se pojavlja tudi koeficient efektivne kinematične viskoznosti  $\nu_{ef}$  (v programu je označena kot totalna kinematična viskoznost  $\nu_t$ ), ki je vsota molekularne in turbulentne kinematične viskoznosti:

$$\nu_t = \nu + gA \sqrt{2 \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2}$$



kjer je:  $\nu$  molekularna viskoznost,  $A$  površina trianguliranega elementa in  $g$  koeficient turbulence, ki dopušča umerjanje modela (npr. opazovana oziroma poznana izguba energije vzdolž razširitve ali zožitve kanala, ali pa je znano nihanje gladine na dani geometriji)

Ko izraze za Coriolis-ovo silo, vpliv vetra in končni izraz za kinematično viskoznost vstavimo v enačbi (15) in (16) dobimo končni enačbi, ki ju nato program numerično izračuna in sicer po MKE z Galerkinovo metodo. Glede na to, da je sam podroben postopek izračuna precej zahteven in tudi zamegljen ter niti ni glavni predmet diplome, bomo v nadaljevanju podali samo nekaj osnovnih značilnosti postopka.

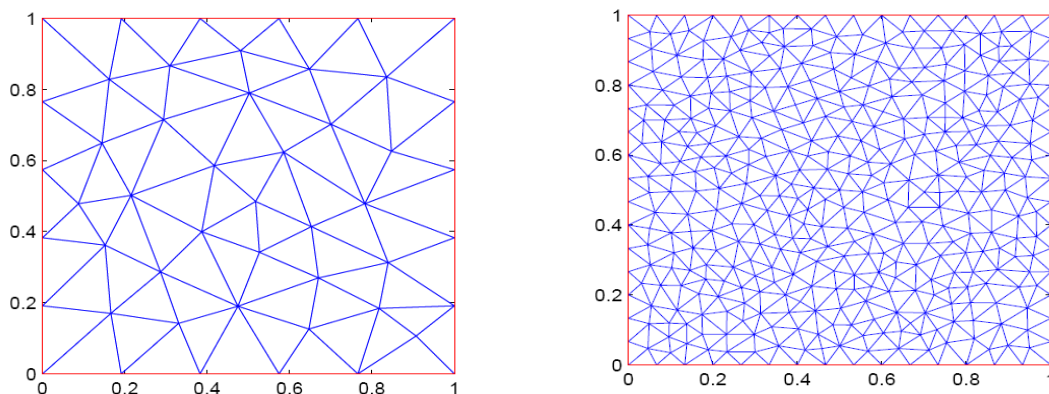
#### *Metoda končnih elementov (MKE)*

MKE so prvo začeli uporabljati v strojništvu, zanj pa je značilno, da domeno razdeli na enostavne elemente. Ti elementi zapolnijo prostor in so v eni dimenziji daljice, trikotniki ali četverokotniki v dveh in nepravilni tetraedri ali heksaedri v treh dimenzijah. Oglišča likov predstavljajo vozlišča, ki so postavljeni tako, da se vedno stikajo s celo stranico ali pa le z ogliščem in ne na primer s polovico stranice. Zaželeno je tudi, da se v posameznem vozlišču ne stika preveliko število elementov.

Ker je MKE numerična metoda, je rešitev PDE približek oziroma poskusna funkcija  $\hat{u}$ , ostanek pa je linearna kombinacija baznih funkcij. Ostanek se minimizira s sestavo enačb bodisi s kolokacijo ali Galerkinovo metodo. Slednjo uporablja tudi matematični program AquaDyn.

#### *Izdelava mreže*

Kljub množici postopkov, ki zagotovijo, da dobljena mreža ustreza določenemu kriteriju, se ponavadi uporablja Delaunayev kriterij (B. N. Delaunay, 1934), ki pravi, da če skozi tri vozlišča, ki tvorijo trikotni element, potegnemo krožnico, ne sme znotraj nje ležati nobeno drugo vozlišče (glej sliko 16).



**Slika 16:** Razdelitev enotskega kvadrata na 76 in 740 trikotnikov po Delaunayev-em kriteriju ([http://www.fri.uni-lj.si/si/raziskave/doktorska\\_dela/2421/zagovor.html](http://www.fri.uni-lj.si/si/raziskave/doktorska_dela/2421/zagovor.html))

### *Utežni ostanek*

Je posledica diskretizacije, kjer je  $\mathbf{u}$  vektor koeficientov linearne kombinacije baznih funkcij<sup>4</sup>.

$$\hat{u}(x_i) = \sum_j u_j \phi_j(x) \quad (22)$$

Definirali smo približno rešitev, ki ji pravimo tudi poskusna funkcija. Za odvajanje  $\hat{u}$  – ja moramo poznati odvode baznih funkcij:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \hat{\mathbf{u}} = \sum_j u_j \frac{\partial \phi_j}{\partial x_i} \quad (23)$$

Dobro je, če so bazne funkcije dovoljkrat odvedljive, zaradi pojavljanja višjih in mešanih odvodov. Če niso dovoljkrat odvedljive, zapis postane matematično smiselno šele, ko na dobljenih integralih uporabimo integracijo po delih (Šterk, 2005).

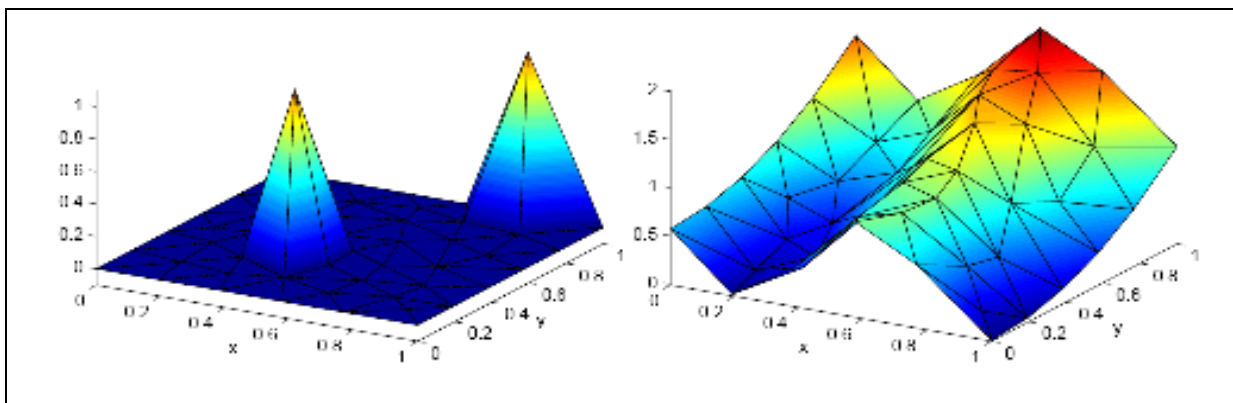
<sup>4</sup> Bazne funkcije lahko razumemo podobno kot bazne vektorje, ki jih uporabljamo zato, da z njimi (baznimi vektorji) izrazimo ostale vektorje. V našem primeru pa iščemo približek funkcije  $u$  ( $\hat{u}$ ), ki jo bomo izrazili z baznimi funkcijami in jo bomo pomnožili z vektorjem koeficientov, ki pravzaprav predstavlja rešitev problema. Da pa bi problem rešili kar se da točno, poskušamo vektor koeficientov izračunati z zahtevo, da naj bo ostanek  $R$  minimalen. Če pa hočemo to doseči mora biti ostanek  $R$  ortogonalen na bazne funkcije.

### Bazne funkcije

Kot že rečeno, iščemo rešitev poskusne funkcije  $\hat{u}$ , ki jo sestavimo iz baznih funkcij (znane analitične funkcije), ki imajo vrhove v vozliščih in v vseh straneh padajo proti 0 (so različne od 0 na omejenem območju okrog točk  $i$ ):

$$\phi_i(x_j) = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

Najenostavneje je, če so bazne funkcije linearne (prve stopnje), ker je z njimi izračun skalarnih produktov bistveno enostavnejši (glej sliko 17).



**Slika 17:** Primer dveh linearnih baznih funkcij v dveh dimenzijah (levo) in primer dvodimenzionalne poskusne funkcije (desno)  
([http://www.fri.uni-lj.si/si/raziskave/doktorska\\_dela/2421/zagovor.html](http://www.fri.uni-lj.si/si/raziskave/doktorska_dela/2421/zagovor.html))

Da bi dobili poskusno funkcijo, moramo bazne funkcije pomnožiti z vozliščnimi parametri (koeficienti), kar je hkrati predpostavka MKE za diskretizacijo iskanega polja oziroma poskusne funkcije:

$$\hat{u}(x_i) = \sum_j u_j \phi_j(x_i) = u_i \quad (24)$$

Enačba (24) ima zelo pomembno lastnost, in sicer da je mogoče enostavno vsiljevanje robnih pogojev, kar pomeni, da lahko parameter  $u_i$  kar izenačimo z vrednostjo, predpisano v robnem vozlišču  $x_i$ .

### *Galerkinova metoda*

Način diskretizacije podaja enačba (24), ampak kot smo že omenili, je rešitev poskusna funkcija. Z drugimi besedami povedano – rešitev aproksimiramo z enačbo (24), in če to naredimo, enačba ne bo točno izpolnjena (imamo opravljenost z ostankom  $R$ ). Galerkinova metoda pa ustvari sistem enačb, ki zahtevajo, da je ostanek ortogonalen baznim funkcijam, oziroma da je ostanek minimalen. Glede na to, da smo domeno razbili na več pravilnih likov, in da smo povedali, da so bazne funkcije  $\phi_i$  različne od 0 le v okolici  $i$ -tega vozlišča, lahko za  $i$ -to notranje vozlišče zapišemo:

$$\int_{\Omega_{Q_i}} R(x, u) \phi_i(x) d\Omega = 0 \quad (25)$$

Integrirali smo samo po okolici vozlišča ( $\Omega_{Q_i}$ ), kar lahko poimenujemo tudi integracijska ali kvadraturna domena vozlišča  $x_i$  (Šterk, 2005).

### *Kratek postopek izračuna z Galerkinovo metodo za realen primer*

Glede na to, da gre za precej zapleten in zahteven postopek, bomo na kratko predstavili primer transformacije osnovnih enačb. Za primer bomo vzeli Navier-Stokes-ovo enačbo in kontinuitetno enačbo za stalni tok – enačbi (12) in (14) transformirane v Galerkinovo enačbo, ki jo bomo naprej spisali do matričnega zapisa, ki se rešuje po različnih postopkih. V enačbah (12) in (14) nastopata člena za volumnske sile ( $f$ ) in viskoznosti ( $v_{\text{eff}}$ ). Kot primer izračuna bomo vzeli kapljo, ki se nahaja v kotu, kjer se spodnja plošča premika s konstantno hitrostjo  $u_0$ . Posledično lahko pri poenostavitvi enačb, ki opisujejo gibanje tekočine v gravitacijskem polju, vidimo, da so stacionarne oblike kaplje odvisne le od dveh parametrov

( $\text{Re} = \frac{\rho u_0 L_0}{\eta}$ ,  $\frac{1}{\text{Fr}^2} = \frac{g_0 L_0}{u_0^2}$ , kjer je  $L_0$  dolžina,  $u_0$  karakteristična hitrost za katero vzamemo

hitrost spodnje plošče,  $g_0$  težni pospešek in  $\frac{\eta}{\rho}$  kinematična viskoznost). Froudovo število ( $\text{Fr}$ )

se navezuje na parameter, v katerem nastopa težnostni pospešek  $g_0$ . Tako lahko člena  $f$  in  $v_{\text{eff}}$

v enačbah (12) in (14) zamenjamo z  $\frac{1}{Fr^2}$  in  $\frac{1}{Re}$ . Izbrati si moramo še sklop robnih pogojev (Berkopec, 1994).

Pri Galerkinovem pristopu predpostavimo, da lahko iskano polje  $U$  diskretiziramo z:

$$U = \sum_{j=1}^N u_j \psi_j \quad (26)$$

kjer so:  $u_j$  koeficienti,  $\psi_j$  pa znane analitične funkcije (testne oziroma bazne funkcije)

Glede na to, da smo problem diskretizirali, enačba (26) ne bo v celoti izpolnjena, ampak bo na koncu računa ostal določen ostanek  $R$ . Ker gre za 2D problem, lahko rešitev polja  $U$  iščemo po naslednji enačbi:

$$\iint_{\Omega} f(U) \varphi_i d\Omega = 0 \quad (27)$$

kjer je:  $\varphi_i$  utežna funkcija,  $\Omega$  pa domena

Točke, kjer računamo neznane vrednosti spremenljivk je  $M$  in jih imenujemo aktivne točke, vseh točk pa je  $N$ , kjer velja, da je  $M \leq N$ . Za Galerkinovo metodo pa je značilno, da so utežne funkcije enake testnim ( $\varphi_i \equiv \psi_i$ ).

V nadaljevanju stacionarno Navier-Stokes-ovo enačbo in divergenčni stavek (enačbi (12) in (14)) formuliramo po metodi Galerkina. To storimo tako, da enačbo pomnožimo z utežnimi funkcijami in jo integriramo po domeni:

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \{u_x + v_y\} \psi_i dS &= 0 \\ \iint_{\Omega} \left\{ (u^2)_x + (uv)_y + p_x - \frac{1}{Re} (u_{xx} + u_{yy}) \right\} \psi_i dS &= 0 \\ \iint_{\Omega} \left\{ (v^2)_y + (uv)_x + p_y - \frac{1}{Re} (u_{xx} + u_{yy}) \right\} \psi_i dS &= \frac{1}{Fr^2} \iint_{\Omega} \psi_i dS \end{aligned} \quad (28)$$

Vidimo lahko, da se nam v enačbi (28) pojavljajo spremenljivke, prav tako pa tudi njihovi odvodi, ki jih lahko s testnimi funkcijami diskretiziramo npr.:

$$u = \sum_j u_j \psi_j$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \sum_j \frac{\partial(u_j \psi_j)}{\partial x} = \sum_j u_j \frac{\partial \psi_j}{\partial x} = \sum_j u_j \psi_{jx}$$
(29)

Že prej smo omenili, da so pri linearnih testnih funkcijah definirani le prvi odvodi (nezveznost), višji pa so enaki 0. Ker pa imamo opravka z drugimi odvodi, si kot rečeno pomagamo z Greenovo formulo:

$$\iint_{\Omega} (P_x + Q_y) \psi dS = \int_{\partial\Omega} (P, Q) n \psi ds - \iint_{\Omega} (P_x \psi_x + Q_y \psi_y) dS$$
(30)

kjer je:  $\Omega$  domena,  $\partial\Omega$  njen rob,  $n = (n^x, n^y)$  pa normalni vektor na  $\partial\Omega$  v smeri navzven  $\Omega$

Ker bomo kot vmesni del dobili matrični sistem  $Ax = b$  ( $A =$  deli enačb, ki so odvisni od vrednosti v aktivnih točkah,  $b =$  znane vrednosti in robni pogoji ter  $x =$  vrednosti spremenljivk v aktivnih točkah), lahko sistem točno nastavimo samo za linearne probleme, za nelinearne si pomagamo z linearizacijo (npr.  $v' \approx v^0 + v$ ). Ko osnovni enačbi lineariziramo po postopku, ki smo ga zapisali v prejšnjem odstavku, lahko enačbo (28) zapišemo v Galerkinovo obliko:

$$\iint_{\Omega} \left\{ uu_x^0 + vu_y^0 + u^0 u_x + v^0 u_y + p_x - \frac{1}{\text{Re}} (u_{xx} + u_{yy}) \right\} \psi dS =$$

$$= \iint_{\Omega} \left\{ -u^0 u_x^0 - v^0 u_y^0 - p_x^0 + \frac{1}{\text{Re}} (u_{xx}^0 + u_{yy}^0) \right\} \psi dS$$

$$\iint_{\Omega} \left\{ uv_x^0 + vv_y^0 + u^0 v_x + v^0 v_y + p_y - \frac{1}{\text{Re}} (v_{xx} + v_{yy}) \right\} \psi dS =$$

$$= \iint_{\Omega} \left\{ \frac{1}{Fr^2} - u^0 v_x^0 - v^0 v_y^0 - p_y^0 + \frac{1}{\text{Re}} (v_{xx}^0 + v_{yy}^0) \right\} \psi dS$$
(31)

V enačbi (31) nekajkrat naletimo na drugi odvod ( $u_{xx} + u_{yy}$  in  $p_x$ , če uporabljamo penalno metodo, kjer povežemo tlak s hitrostnim poljem – Berkopec, 1994) in zato moramo ustrezne člene integrirati per partes (enačba (30)). Iz slednje enačbe lahko vidimo, da integriramo tudi po robu domene. Ta člen odpade, ker za vsako notranje vozlišče  $x_i$  velja  $\psi_i = 0$ , vendar pa lahko v ta člen vključimo robne pogoje.

V nadaljevanju enačbo (31) razpišemo z upoštevanjem enačbe (30), nakar nas še čaka, da dobljeno enačbo razvijemo (diskretizacija spremenljivk in njihovih odvodov – enačba (29)). Po razvijanju leve strani enačbe (31) dobimo za vsako točko skalarni produkt baznih funkcij, pomnožen z začetno vrednostjo določene spremenljivke (npr.  $u_k^0$ ), in iskano boljšo vrednost spremenljivke  $u$ . Slednje lahko zapišemo v matričnem zapisu  $Ax$ , ta metrični zapis pa enačimo z vektorjem  $b$  (vsebuje znane vrednosti), ki ga dobimo z razvijanjem desne strani enačbe (31). Ker obravnavamo 2D problem, razpadeta vektorja  $x$  in  $b$  v dva bloka, matrika  $A$  pa v štiri. Razpad v matričnem zapisu upoštevamo tako, da v zgornji del matrike zapišemo enačbo za komponento  $x$ , v spodnji del pa enačbo za komponento  $y$ . To zapišemo za vsako točko, kar pomeni, da če imamo neznanih vektorjev hitrosti  $N$ , je dimenzija vektorjev  $x$  in  $b$   $2N$ , matrike  $A$  pa  $2N * 2N$ . Na koncu je potrebno izračunati skalarne produkte linearnih testnih funkcij in samo matriko, ki je zelo redka (ima malo neničelnih elementov). Matrika je redka, ker ima vsaka od točk največ šest sosed. Za slednjo se uporabljajo programi za reševanje redkih matrik (npr. program `sparse.pas`).

Oblike razvijanja enačbe in matričnega zapisa ne bomo zapisovali, ker to ni namen diplomskega dela, hkrati pa je celoten postopek izračuna, ki smo ga predstavili zelo na kratko, lepo predstavljen v diplomski nalogi Aleša Berkopca z naslovom Problem proste površine v toku viskozne tekočine iz leta 1994.

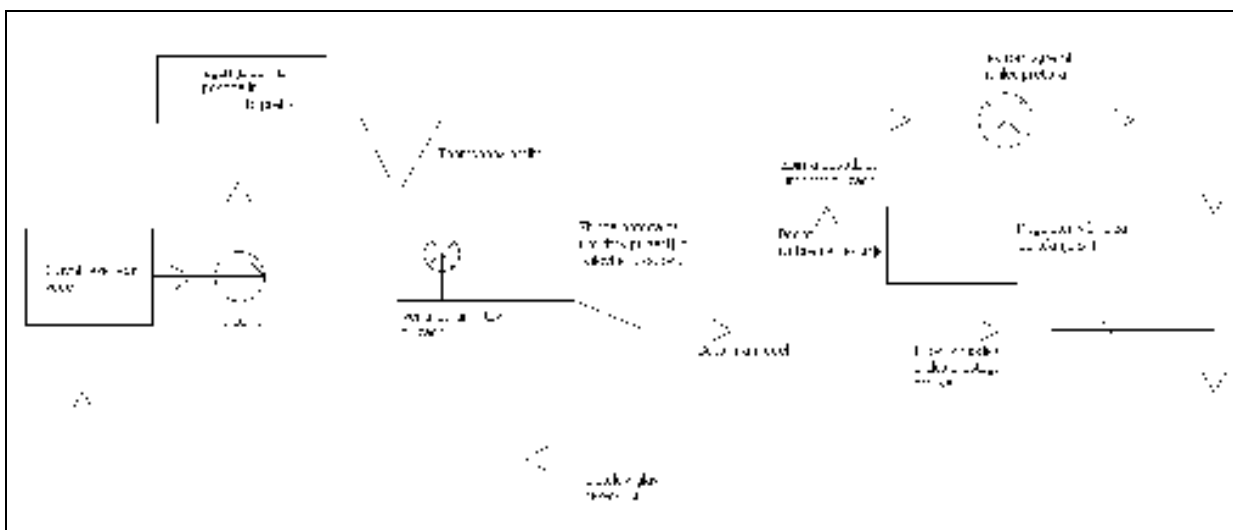
Program AquaDyn enačbe rešuje po zelo podobnem principu, le da uporablja enačbe za globinsko povprečen tok (enačbi (15) in (16)). Neznane hitrosti  $\bar{u}$  in  $\bar{v}$  v posameznih točkah se rešujejo kot vsota baznih funkcij, pomnoženih z vozliščnimi parametri (koeficienti) glede na šest sosednjih vozlišč. Slednje bazne funkcije so kvadratne in ne linearne kot smo prikazali v primeru. Ker program ne uporablja linearnih baznih funkcij, je skalarni produkt med njimi

težje izračunati (sistem enačb ni več linearen kot v prej predstavljenem primeru, zato program uporablja Newton-Raphson-ovo iteracijsko metodo za reševanje nelinearnega sistema enačb). Gladina vode pa se določa glede na tri vozlišča, in sicer z linearnimi baznimi funkcijami. Program računa tudi različne parametre posameznega vozlišča, kot je Reynoldsovo in Froudovo število.



## 4 FIZIČNI MODEL BOČNEGA PRELIVA

V poglavju 4 bomo predstavili uporabljeni fizični model. Hidravlične razmere (pretoke in gladine) smo opazovali in merili pri različnih natočnih razmerah na bočni preliv. Glede na to, da smo fizični model vodtoka imeli že izdelan, poleg tega pa smo bili omejeni s časom, kakšnih posebnih geometrijskih sprememb nismo izvajali. Posledično smo se odločili, da se bomo posvetili predvsem vplivu oblike na pretočni koeficient in posledično na pretok, ki se prelije preko bočnega preliva. To pomeni, da vpliva geometrijskih sprememb, kot so npr. različna dolžina in višina preliva, širina kanala, nismo obravnavali. Drugače povedano – za enake natočne razmere (enaka gladina in pretok na dotočnem profilu – Froudova podobnost) smo opazovali spremembe pri različnih oblikah bočnih prelivov (ostrorobi, široki prag, hrapava drča, hrapava drča z grbo). Meritve pri scenariju 1 in 3 pa smo opravili za preverbo določenih metod izračuna v programskem paketu HEC-RAS.



Slika 18: Shematičen prikaz preizkuševališča (zaključen vodni krog)

### 4.1 Opis modela

V našem primeru je fizični model vodotoka predstavljal korito pravokotne oblike. Korito je bilo 0.5 metra široko in prav tako 0.5 m visoko, po dolžini pa je merilo dobrih 5.86 m (glej sliko 19).



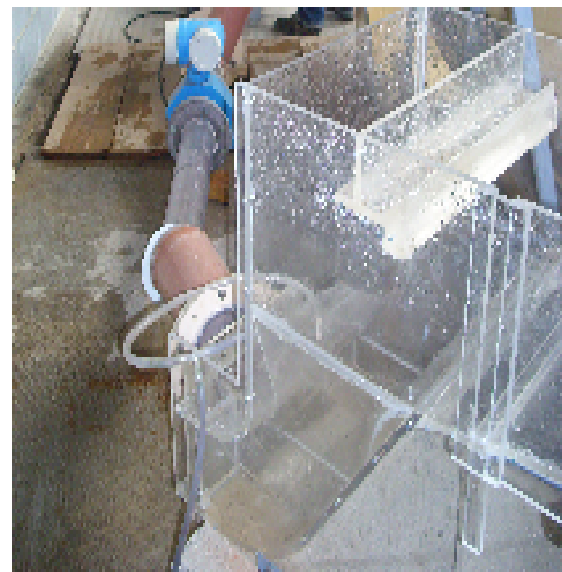
**Slika 19:** Fizični model bočnega preliva



**Slika 20:** Zbirna posoda za umiritev pulzacij in lesen plošč za zagotovitev nevalovitega natoka na območje modela



**Slika 21:** Elektromagnetni merilec pretoka Promag 50W



**Slika 22:** Zbirnik in cev, ki vodita vodo do merilca

Na 2.29 metru je bil postavljen bočni preliv dolžine 1.38 metra in osnovne višine<sup>5</sup> 35 cm, kjer so krilni zidovi ovirali prost odtok vode (glej sliko 19). Zbrana vodna količina se po žlebu (glej sliko 22) spelje v cev, kjer je lociran merilec pretoka Promag 50W (glej sliko 21). Na

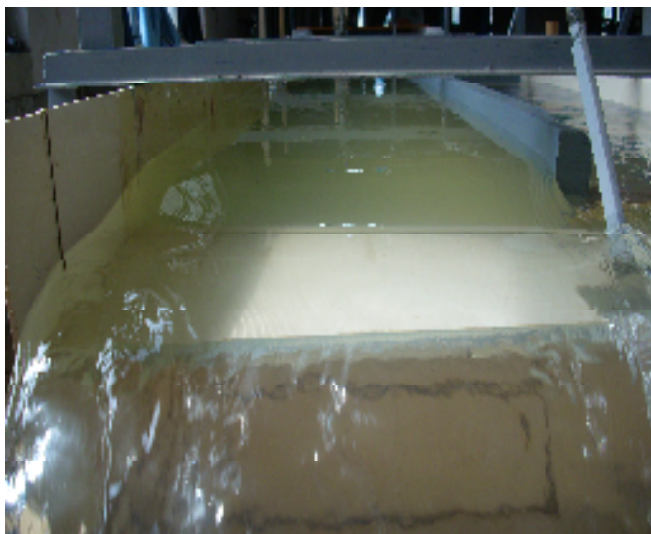
<sup>5</sup> To je višina preliva brez dodatnih prelivnih oblik, ki smo jih pri vseh, razen pri scenariju 1, nalepili nad krono osnovne višine (angl. »zero height weir«).

vtoku v model je zbirna posoda za umiritev pulzacij in lesen plošč za zagotovitev nevalovitega odtoka (glej sliko 20). Na koncu modela pa je regulator višine, s pomočjo katerega lahko nastavimo željen spodnji robni pogoj. Na iztoku bočnega preлива so bili postavljeni trije mostni oporniki, ki po nobenem scenariju niso imeli vpliva.

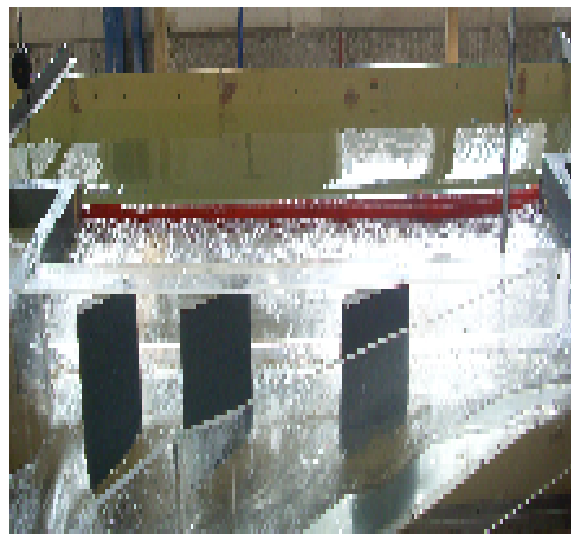
Na osnovnem modelu smo izvedli več vrst simulacij (več scenarijev), ki pa so opisani v poglavju 4.3..

## 4.2 Robni pogoji

Glede na to, da diplomska naloga sloni na raziskovalni ravni, so bili robni pogoji določeni glede na dva ciljna parametra. Prvi parameter se nanaša na Froudova števila, drugi pa na spreminjanje prelivne višine. Slednja parametra smo zadostili s spreminjanjem vodostaja z regulatorjem višine na dolvodnem koncu modela, kjer je bil SRP kritična gladina (glej sliko 23). Regulator smo spreminjali toliko časa, da je bila prelivna gladina vedno višja od 5 mm (izločen vpliv površinskih napetosti) in nižja od 5 cm (izločena preplavitev krilnih zidov). Za predvidene višine smo izbrali takšne natočne pretoke, da vrednost Froudovih števil ni preseglo vrednosti 0.6 (mirni režim). Ker nismo modelirali celotnega fizičnega modela, smo poleg vseh meritev znotraj bočnega preлива izvedli tudi meritve gladin in pretokov na gorvodni in dolvodni strani preлива, ki so nam služili kot robni pogoji. Drug robni pogoj je bila kritična gladina na vtoku v žleb, ki pa zaradi izvedbe bočnega preлива (krilni zidovi, ki preprečujejo prost iztok vode) ni bila povsod v celoti izpolnjena. Dani pogoji in rezultati kažejo na vpliv zastoje točke. V ta namen se je izvedla meritev gladin pred mostnimi oporniki oziroma iztokom v žleb, ki se je uporabila kot robni pogoj in kot eden izmed kazalcev vpliva zastoje točke.



Slika 23: Kritična gladina kot SRP na koncu modela



Slika 24: Izvedba bočnega preliva

### 4.3 Opisi scenarijev

Meritve smo izvajali na dveh geometrijskih oblikah vodotoka, in sicer v pravokotnem koritu in delno trapeznem koritu. Pravokotno korito smo že opisali pri opisu fizičnega modela, delno trapezna oblika pa se je izvedla na že obstoječi pravokotni obliki, tako da smo dno dvignili za 25 cm in naredili levo brežino pod kotom  $26.56^\circ$ . Desna brežina je ostala pravokotna. Zaščitni zidovi na levi brežini so se prav tako izvedli pod kotom  $26.56^\circ$ . Za trapezno obliko smo se odločili, ker je v naravi pogostejša. Tlorisi in prerezi prelivnih robov vseh scenarijev so v prilogah A, B, C, D, E.

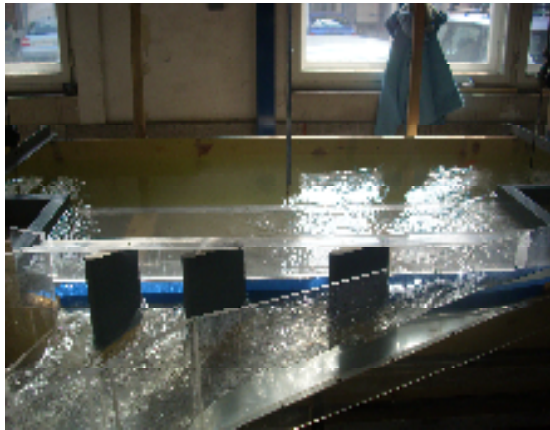
#### *Scenarij 1 - tok v pravokotnem koritu: bočni preliv brez višine*

V tem primeru je šlo za bočni preliv brez višine, kar pomeni, da se voda praktično ni prelila<sup>6</sup> preko vzdolžne bariere, ampak je le del vode spremenil smer. To je pravzaprav primer delitve toka preko inundacijske površine. V tem primeru je bil karakteristični profil oziroma profil, ki je narekoval gladine in pretoke v stranski veji oziroma rokavu, zadnji profil stranske veje<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> O prostem prelivu govorimo takrat, ko je na prelivu dosežen prehod v deroči tok oziroma prehod preko kritične globine.

<sup>7</sup> Scenarij, ki smo ga opazovali je bil takšen kot na sliki 25, ampak brez modre letvice, ki je vidna na sliki.

Poskus se je izvedel za 4 pretoke, in sicer za 40, 50, 55 in 65 l/s. Zaradi precej velikega korita in posledično višje gladine vode, so bila Froudova števila nizka. Kljub temu so rezultati izredno uporabni, saj jih bomo lahko primerjali z matematičnimi modeli in tako dobili sliko o natančnosti matematičnih orodij v primeru delitve toka.



**Slika 25:** Razmere pri scenariju 1

Odločili smo se, da rezultate meritev primerjamo z naslednjimi matematičnimi modeli:

- Izračun s HEC-RAS-om z uporabo delitve toka
  - o uporaba energijske enačbe,
  - o uporaba dinamične enačbe,
  
- Izračun s HEC-RAS-om z uporabo bočnega preлива (bočni preliv »zero heights«).

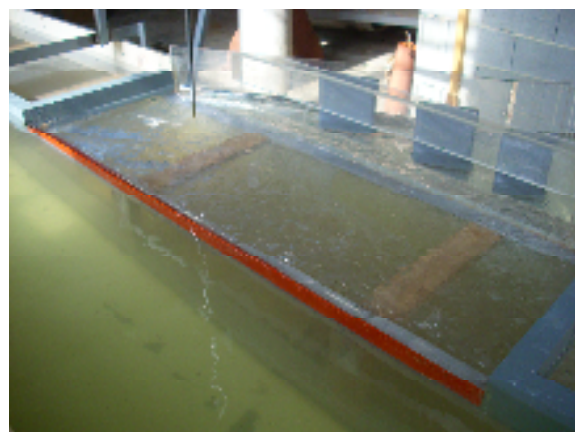
Pri prvem izračunu bomo lahko primerjali ustreznost uporabe energijske oziroma dinamične enačbe. Publikacije, ki so del programskega paketa HEC-RAS, kar nekaj besed namenijo temu, kdaj uporabiti energijsko in kdaj dinamično enačbo. Glavni razlog, kdaj uporabiti dinamično enačbo in ne privzete energijske enačbe, publikacije navajajo kot, pod katerim se tokovni veji razdelita. Če kot bistveno vpliva na samo razdelitev toka, potem je bolje uporabiti dinamično enačbo, ki v svojem izračunu uporablja kot delitve in obratno. Glede na to, da gre v našem primeru za  $90^\circ$  je mogoče pričakovati, da bi nam morala dinamična enačba dati boljše rezultate.

Prva dva izračuna bomo primerjal s tretjim, ki bo vsekakor zanimiv z vidika samega načina izračuna programa HEC-RAS, saj program vsebuje tudi možnost izračuna toka preko preлива brez višine (»zero heights weirs«). Pri tretjem izračunu bo tako kakovost izračuna odvisna od pravilne izbire pretočnega koeficienta  $C_d$ .

V prilogi A so prikazani tloris in prereza uporabljena pri primeru 1, scenarij 1.

### ***Scenarij 2 - tok v pravokotnem koritu: vpliv dveh oblik bočnega preliva na pretok***

V tem primeru je šlo za osnovno pravokotno obliko korita, kjer so se najprej izvedle meritve preko bočnega preliva (glej sliki 26 in 27), ki ima obliko širokega praga (dolžina = 1.38 m, širina = 0.1 m in višina = 0.05 m), nato pa za enake natočne razmere (enak pretok in gladina gorvodno od bočnega preliva) še meritve za ostrorobi bočni preliv (dolžina = 1.38 m, širina<sub>zgoraj</sub> = 0.005 m, širina<sub>spodaj</sub> = 0.01 m, višina = 0.05 m in z ostrim prelivnim robom pod kotom 60°). Pomembno je bilo, da smo za vsak obravnavan pretok vzdrževali enako globino gorvodno od preliva pri obeh vrstah preliva. Posledično to pomeni, da smo opazovali vpliv oblike na tok preko preliva v odvisnosti od Froudovega števila. Poskus se je izvedel za 6 pretokov, ki so znašali 45, 48, 50, 55, 60 in 65 l/s. Glede na velikost korita in globino vode smo zopet dobili precej nizka Froudova števila, ki so znašala od 0.1041 do 0.1425.



**Slika 26:** Bočni preliv oblike širokega praga

**Slika 27:** Ostrorobi bočni preliv

Na podlagi meritev bomo s pomočjo trendne črte poskušal izluščiti najprimernejšo enačbo za izračun pretočnega koeficienta  $C_d$  v odvisnosti od Froudovega števila za vsako obliko posebej. Pretočni koeficient  $C_d$  se bo uporabil pri modeliranju merjenega primera s programskim paketom HEC-RAS. Poleg simulacije z 1D programom, bomo izvedeli tudi simulacijo z 2D matematičnim paketom AquaDyn.

V prilogi B so prikazani tloris in prerezi uporabljeni pri primeru 1 in 2, scenarij 2.

### ***Scenarij 3 - tok v pravokotnem in trapeznem koritu s sestavljenim prerezom (oblika bočnega preliva – široki prag)***

Scenarij 3 bi tako kot scenarij 1 lahko uvrstili v tematsko podoben sklop. Meritve so bile izvedene z namenom preverbe dveh metod izračuna preko bočnega preliva, ki jih vsebuje matematični model HEC-RAS. Gre za to ali za izračun bočnega pretoka uporabimo gladino ali energijsko črto. Katera metoda je primernejša za kateri primer, bomo bolj podrobno opisali v podpoglavju poglavja 3.2.1. z naslovom Metode izračuna bočnih prelivov s pomočjo programskega paketa HEC-RAS. Meritve so bile izvedene v dveh sklopih, in sicer smo en sklop meritev opravili pri sestavljenem pravokotnem koritu, drugi sklop pa pri sestavljenem trapeznem koritu (delno trapezno korito – ena stranica je bila pravokotna).

Poplavno ravnico oziroma sestavljen prerez smo oblikovali tako, da smo zaščitne zidove z bočnim prelivom pomaknili za 30 cm v notranjost (glej sliko 28). Meritve smo izvajali za dva pretoka za vsako geometrijsko obliko, in sicer za 55 in 65 l/s za pravokotno korito ter 50 in 60 l/s za trapezno korito.



**Slika 28:** Primer sestavljenega prereza v delno trapeznem koritu

Izračun s programom HEC-RAS bomo izvedeli po obeh metodah, rezultate pa primerjali z izmerjenimi vrednostmi.

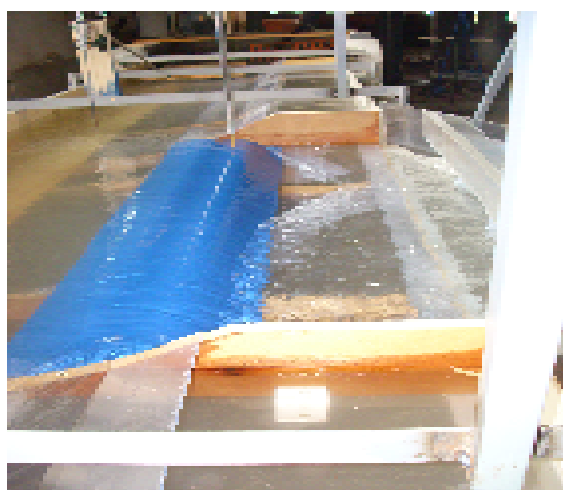
V prilogi C so prikazani tloris in prereza uporabljena pri primeru 1, scenarij 3.

### ***Scenarij 4 - tok v poltrapeznem koritu<sup>8</sup>: vpliv treh oblik bočnega preliva na pretok***

Podobno kot v scenariju 2, smo tudi tukaj opazovali vpliv različnih oblik (v tem primeru smo obravnavali tri oblike), vendar v poltrapeznem koritu (glej sliko 30). V ta namen smo

<sup>8</sup> Poltrapezno korito v našem primeru pomeni korito, ki ima stranico, kjer se nahaja bočni preliv pod kotom 26.565°, druga stranica pa pod kotom 90°.

spremenili obliko korita (dvignjeno dno, nagnjena leva stranica) in tako zagotovili spremenjene hidravlične razmere (spremenili smo tudi obliko krilnih zidov – glej prilogo D2). Meritve smo opravljali za prelivno obliko hrapave drče (glej sliko 29) in za primerjavo izvedli še meritve za široki prag (glej sliko 31) in ostrorobi preliv (glej sliko 32). Račun smo izvedli za 6 pretokov, ki so znašali 35, 40, 45, 50, 55 in 60 l/s. Gladine pa smo zopet izbrali na način, da smo se izognili površinskim napetostim. Da smo dobili primerljive rezultate, smo za vsako obliko posebej zagotovili enake natočne razmere (gorvodno od bočnega preliva smo za vse tri oblike pri določenem pretoku imeli enako gladino). Razpon Froudovih števil, znotraj katerih so bile izvedene meritve pa je bil v tem primeru večji, in sicer od 0.38 do 0.59.



**Slika 29:** Prelivna oblika hrapava drča



**Slika 30:** Poltrapezno korito



**Slika 31:** Prelivna oblika širokega pragu



**Slika 32:** Prelivna oblika ostrorobega preliva

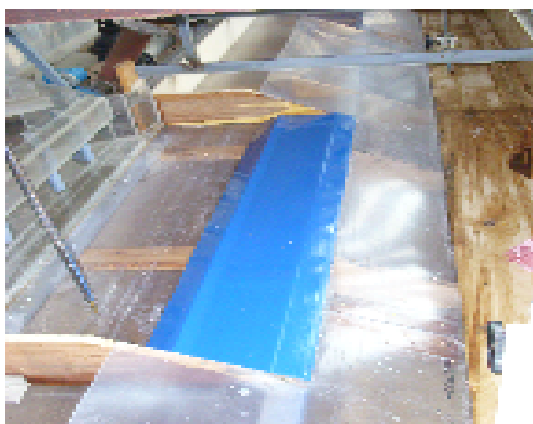


Glede na dobljene rezultate meritev bomo poskušali ugotoviti najprimernejši pretočni koeficient  $C_d$  (trendna črta), ki ga lahko uporabimo za različne namene. Razmere scenarija 4 ne bomo simulirali ne z 1D ne z 2D matematičnim modelom, ker bomo primerjavo med kakovostjo izračuna 1D in 2D modela podali pri scenariju 2. Scenarija 4 in 5 sta bolj namenjena obravnavi vpliva različnih oblik na hidravlične razmere v okolici bočnega preliva. Vsekakor bi bilo v prihodnje zanimivo narediti 2D izračun tudi za scenarija 4 in 5.

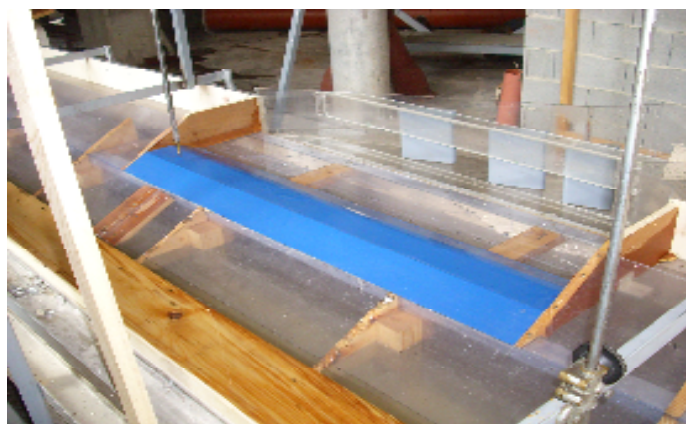
V prilogi D so prikazani tloris in prerezi uporabljeni pri primeru 1, 2 in 3, scenarij 4.

### ***Scenarij 5 - tok v poltrapeznem koritu: vpliv dveh praktičnih bočnih oblik na pretok***

Scenarij 5 je bil hkrati tudi zadnja varianta, ki smo se je lotili. Posebnost slednjega scenarija je bila v obravnavi posebne izvedbe hrapave drče in sicer hrapave drče z grbo. Slednjo obliko smo primerjali z navadno hrapavo drčo, ki smo jo uporabili tudi pri scenariju 4 (glej sliki 33 in 34). Hrapavo drčo z grbo smo izvedli tako, da se je višina grbe ujemala z višino navadne hrapave drče. Meritve so se izvedle za sklop petih pretokov ( $Q = 41, 38.5, 36, 33.5$  in  $31.5$  l/s) s pripadajočimi gladinami. Oblika krilnih zidov je bila enaka kot pri scenariju 4 (glej prilogo E2) Razpon Froudovih števil je znašal od 0.48 do 0.56. Po izvedenih meritvah in predstavljenih rezultatih bomo poskušali komentirati zakaj, če sploh, je prišlo do razlik. Poskušali bomo tudi ugotoviti kar najbolj natančno enačbo za izračun prelivnega koeficienta  $C_d$ .



**Slika 33:** Preliv z grbo



**Slika 34:** Preliv brez grbe

Prelivna oblika hrapava drča z grbo naj bi zaradi svoje specifičnosti in oblike pri enakih natočnih razmerah prevajala višji pretok od prelivne oblike navadne hrapave drče. Slednje bomo z analizami meritev poskušali tudi potrditi.

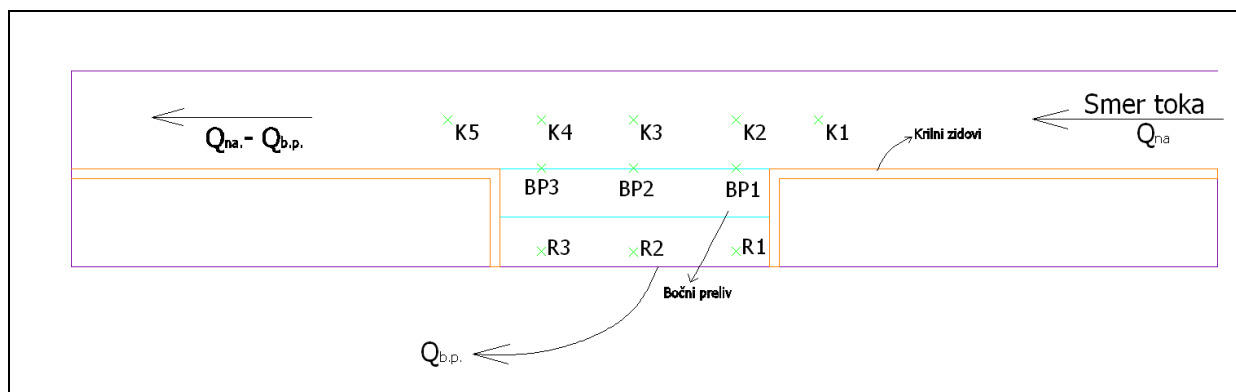
V prilogi E so prikazani tloris in prerezi uporabljeni pri primeru 1 in 2, scenarij 5.

#### 4.4 Merilna mesta

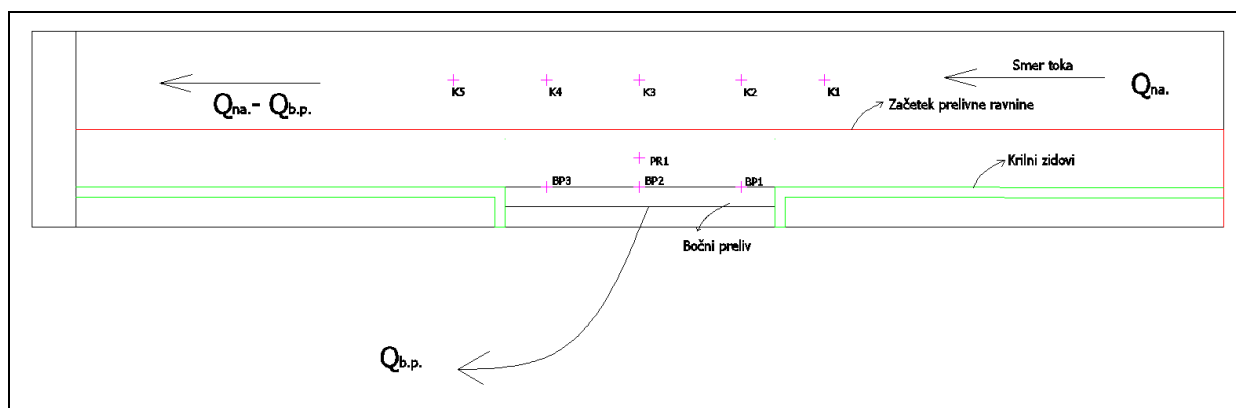
Izbor merilnih mest na preizkuševališču smo določili na podlagi potrebe po identifikaciji robnih pogojev, modeliranja in primerjav vrednosti na fizičnem in matematičnem modelu. Tako smo se glede na specifičnost bočnih prelivov odločili za 11 merilnih mest nivoja gladin in dva merilna mesta pretokov. Merilna mesta so bila identična za scenarije 1, 2, 4 in 5, za scenarij številka 3 pa so bila nekoliko spremenjena (glej sliki 35 in 36). Zaradi lažje identifikacije ima vsaka meritev oznako sklopa meritev in zaporedne številke. Sklopi meritev so naslednji:

- K ... meritve nivojev gladin v kanalu
- BP ... meritve nivojev gladin na bočnem prelivu (prelivna višina)
- PR ... meritve nivojev gladin na prelivni ravnini
- R ... meritve nivojev gladin v rokavu, kamor se preli material steka
- $Q_{na}$  ... natočni pretok
- $Q_{b,p}$  ... pretok, ki se prelije preko bočnega preliva

Na sliki 35 so z oranžno označeni zaščitno-krilni zidovi, s turkizno položaj bočnega preliva, zeleni x predstavlja mesto merjenja, vijolična pa rob fizičnega modela, črna puščica pa nakazuje smer toka vode. Na sliki 36 pa so z zeleno označeni zaščitno krilni zidovi, s črno položaj bočnega preliva, vijolični + predstavlja mesto merjenja, rdeča pa začetek prelivne ravnine, črne puščice pa nakazuje smer toka vode.



Slika 35: Grafični prikaz mest meritev za scenarije 1, 2, 4 in 5

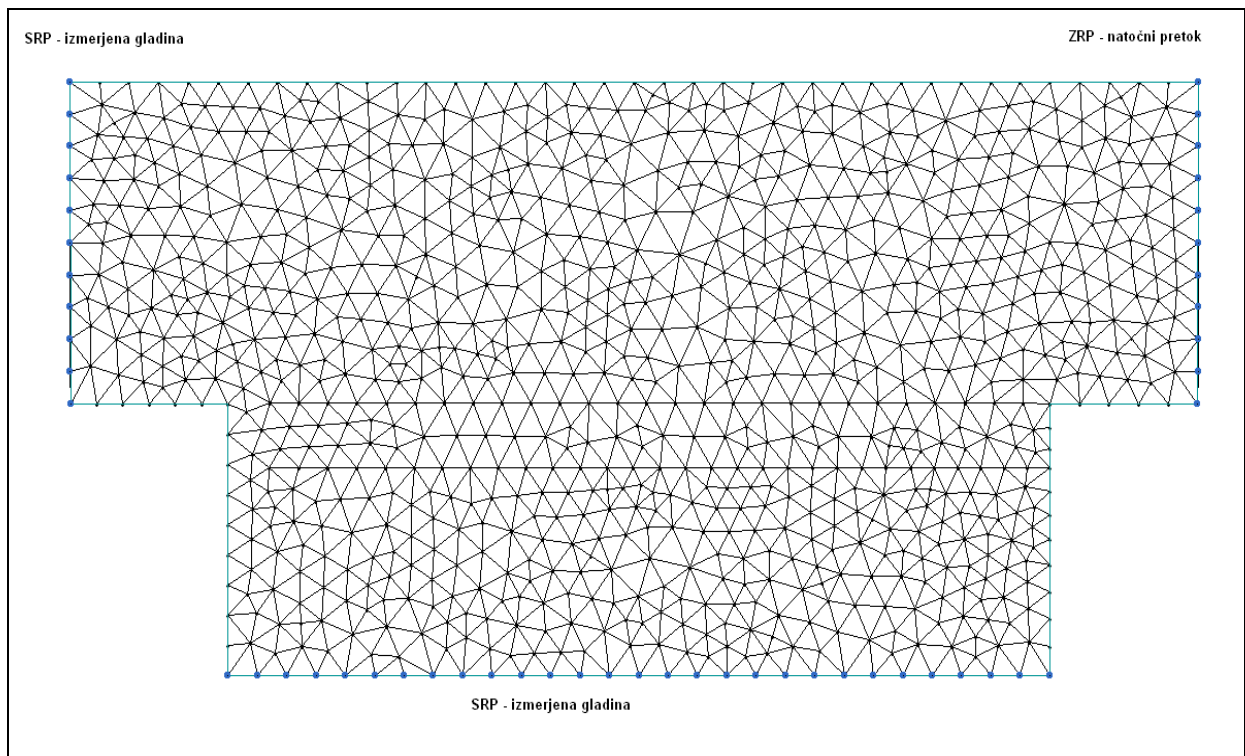


Slika 36: Grafični prikaz mest meritev za scenarij 3

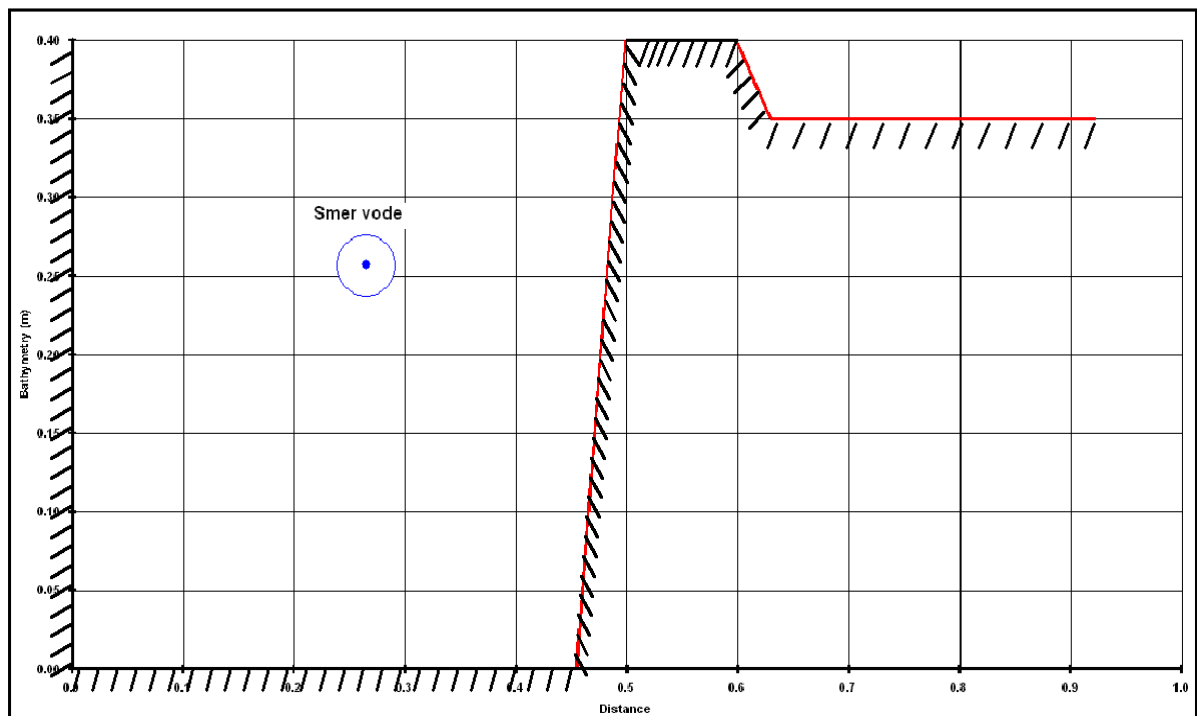
#### 4.5 Priprava numerične mreže za 2D izračun v programu AquaDyn

Območje, kjer so se izvajale meritve, se je definiralo kot zunanji robni pogoj, na območju preliva pa sta se definirala še dva dodatna notranja pogoja, ki sem ju vnesli kot linijo (da smo dobili točke na robovih preliva). Območje se je pokrilo z 915 točkami, kar pomeni, da je bila maksimalna razdalja med njimi 5 cm (glej sliko 37). Tako smo dobili numerično mrežo, preko katere smo lahko za vsako vozlišče vnesli potrebne parametre in po vnosu robnih pogojev izvedli izračun.

Največji problem vsekakor predstavlja vnos podatkov o geometriji (glej sliko 38), ki zahteva gostenje točk na samem prelivu. Ker program AquaDyn uporablja MKE, je gostenje mreže na zelenih mestih precej enostavno.



Slika 37: Numerična mreža in uporabljeni robni pogoji



Slika 38: Prikaz vnesene batimetrije na območju preliva

## 5 PRIMERJAVA REZULTATOV IN KOMENTAR

V tem poglavju so podani rezultati, ki smo jih dobili z meritvami in z matematičnim modeliranjem. Sklop meritev bomo poleg predstavitve rezultatov in komentarjev izmerjenih razlik, v kolikor do njih pride, še s trendno črto obdelali, v želji po iskanju primernega prelivnega koeficienta  $C_d$ . Po predstavitvi rezultatov obeh matematičnih modelov (pri tistih scenarijih, kjer smo izvedli matematično simulacijo), bomo podali še glavne ugotovitve in zaključke.

### 5.1 Meritve na fizičnem modelu

Rezultate meritev bomo obdelal v želji, da bi dobil enačbo, po kateri se za posamezen primer spreminja koeficient pretoka  $C_d$ . Slednji način je zelo primeren takrat, ko vemo od česa je odvisen neznani koeficient. V našem primeru, in na splošno za bočne prelive, so dokaj dobro poznani glavni faktorji, ki vplivajo na koeficient preлива. Vplivne faktorje smo že opisali v poglavju 2.1. Če za obravnavani primer ne vemo od česa je veličina odvisna, zelo težko iščemo povezave med odvisno in neodvisno spremenljivko in je izvajanje modelov s trendno črto precej težko. V našem primeru pa poznamo odvisne in neodvisne spremenljivke in bomo tako lahko izvajali regresijske analize za posamezen primer. Glede na meritve bomo tako lahko iskali povezavo med koeficientom bočnega preлива v odvisnosti od Froudovega števila in oblike bočnega preлива.

Na tem mestu bomo podali opis postopka, po katerem smo iz meritev dobili najprimernejši koeficient pretoka  $C_d$ . Glede na to, da same geometrije vodotoka nismo spreminjali, je iskani koeficient  $C_d$  tako odvisen le od natočnih razmer in od oblike preлива. V kolikor hočemo raziskovati vpliv posameznega faktorja, moramo ostale vplivne faktorje eliminirati. To storimo tako, da jih tekom meritev ne spreminjamo. Za potrebe diplomske naloge so bili scenariji nastavljeni tako, da lahko na eni strani primerjamo vpliv oblike na bočni preliv in posledično na koeficient pretoka (v tem primeru smo eliminirali tako vpliv geometrije kot tudi natočne razmere, saj so bila Froudova števila za različno obliko preлива enaka), na drugi strani pa lahko analiziramo tudi spreminjanje prelivnega koeficienta za posamezne oblike bočnega

preliva. Slednji je bil odvisen od Froudovega števila. Na tem mestu je potrebno opozoriti, da je Froudovo število funkcija hitrosti in globine. Višina slednje pa prav tako vpliva na koeficient bočnega preliva. Če bi hoteli eliminirati tudi natančno višino vode, bi morali za vsak pretok na gorvodnem profilu vzdrževati konstantno gladino in tako Froudovo število spreminjati samo na račun spremembe pretoka oziroma hitrosti. Ker tega nismo izvajali, je potrebno dobljene rezultate pravilno tolmačiti, kar pomeni, da regresije prelivnega koeficienta  $C_d$  in Froudovega števila »veljajo<sup>9</sup>« za geometrijsko podobna razmerja, za interval gorvodnih oziroma prelivnih višin (KT1 oziroma BP1, BP2 in BP3), za katere so se izvedle meritve, in za območje Froudovih števil, ki smo jih za posamezen scenarij dobili.

Če še enkrat zapišemo enačbo za račun bočnega pretoka (enačba (2)):

$$Q_{b.p.} = C_d L \sqrt{2g} (h - p)^{\frac{3}{2}}$$

lahko iz nje izrazimo koeficient pretoka  $C_d$ :

$$C_d = \frac{Q_{b.p.}}{L \sqrt{2g} (h - p)^{\frac{3}{2}}} \quad (32)$$

Vidimo, da imamo desno stran popolnoma znano (rezultati meritev), edino vprašanje je, kako izračunati člen  $(h - p)^{\frac{3}{2}}$ . Višina  $h$  predstavlja višino vode nad prelivom, ki pa se vzdolž preliva spreminja. Ena možnost je, da kot višino prelivanja vzamemo višino izmerjeno v profilu gorvodno od bočnega preliva (v našem primeru gre za merilno mesto z oznako K1). Vendar se nismo odločili za to možnost, ampak smo prelivno višino izračunali iz treh merjenih vrednosti prelivnih višin BP1, BP2 in BP3<sup>10</sup> po naslednji enačbi (Silva, 1997):

---

<sup>9</sup> Izraz »veljajo« je pod navednicami, ker gre za analize z majhnim vzorcem. Trendne linije, s katerimi iščemo povezavo med odvisnim in neodvisnimi spremenljivkami, so v glavnem nelinearne in je potek med samimi izmerjenimi vrednostmi vprašljiv (še posebno je problematičen polinom 4. stopnje). Zaradi tega je treba rezultate jemati z rezervo in jih v prihodnosti korigirati z dodatnimi meritvami oziroma matematičnimi izračuni.

<sup>10</sup> Meritve pod oznako BP že pomenijo prelivno višino, ki je v enačbi (2) označena kot  $(h - p)$

$$\overline{(h-p)} = \left[ \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} \left( \frac{BP_i + BP_{i+1}}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \Delta x_i \right]^{\frac{2}{3}} \quad (33)$$

Sedaj imamo celotno desno stran enačbe (32) znano in lahko za vsako obliko in za vse merjene pretoke izračunamo spreminjanje prelivnega koeficienta  $C_d$ . Slednjega na grafu prikažemo v odvisnosti od Froudovega števila in s pomočjo najprimernejšega trenda oblikujemo enačbo, ki povezuje spreminjanje prelivnega koeficienta  $C_d$  v odvisnosti od Froudovega števila za določeno obliko (široki prag, ostrorobi preliv, hrapava drča, hrapava drča z grbo). Enačba bo seveda veljala za merjene geometrijske razmere, ki se od scenarija do scenarija razlikujejo, in obravnavan razpon Froudovih števil, ki je bil zopet različen od scenarija do scenarija.

### 5.1.1 Meritve za scenarij 1

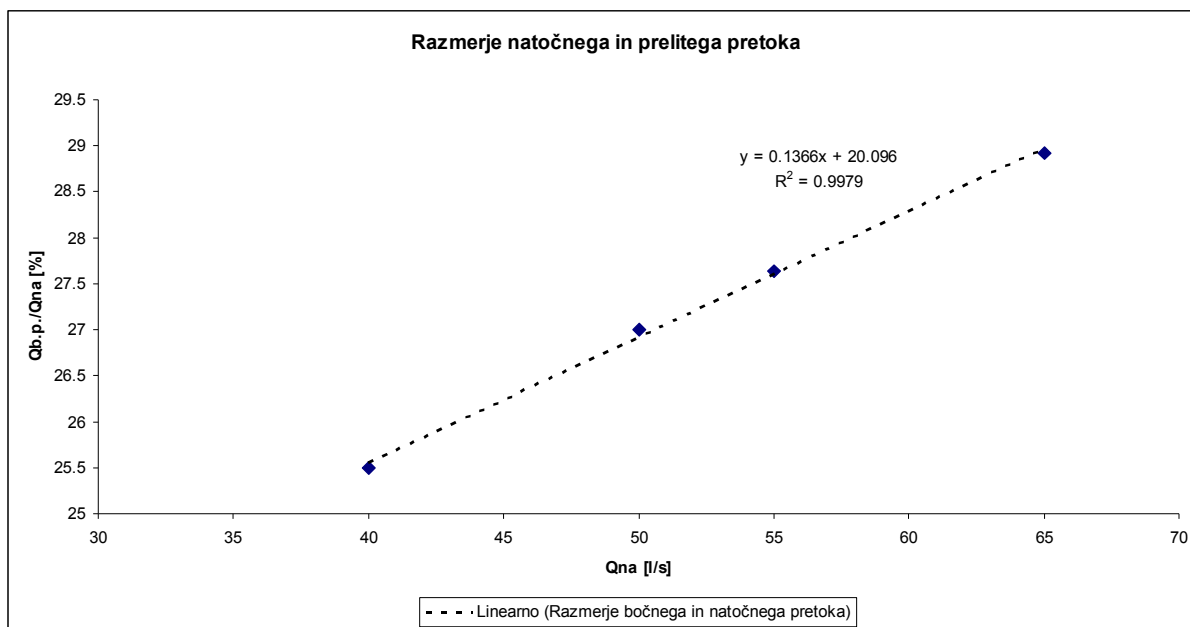
Znotraj samega scenarija je praktično samo primer 1, kar pomeni, da neposrednih primerjav ne moremo izvajati in zaradi tega posebnih regresijskih analiz ne bomo izvajali. Pomembnost tovrstne meritve je opisano že v poglavju 3.1.3 Opisi scenarijev.

**Preglednica 2:** Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 1

Q <sub>na</sub> [l/s]	K1 [cm]	K2 [cm]	K3 [cm]	K4 [cm]	K5 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]
40	39.19	38.74	38.59	38.36	38.32	3.7	3.81	4.24
50	40.18	39.72	39.51	39.4	39.27	4.58	4.74	5.23
55	40.6	40.18	40	39.75	39.8	4.95	5.2	5.75
65	41.5	41.13	40.97	40.83	40.73	5.83	6.06	6.76

R1 [cm]	R2 [cm]	R3 [cm]	Q <sub>b,p.</sub> [l/s]	Q <sub>b,p./Q<sub>na</sub></sub> [%]
3.65	3.95	4.24	10.2	25.5
4.34	4.84	5.23	13.5	27
4.6	5.34	5.7	15.2	27.63636364
5.37	6.26	6.66	18.8	28.92307692

Opravili smo eno analizo, ki je prikazana na grafikonu grafikonom 1, kjer se lepo vidi skoraj linearno naraščanje bočnega pretoka glede na naraščanje natočnega pretoka. Niz podatkov lahko precej dobro opišemo z linearnim trendom ( $R^2 = 0.9979$ ).



**Grafikon 1:** Regresijska analiza razmerja natočnega in prelitega pretoka za scenarij 1

Dobljena enačba linearne trendne črte nam omogoča računanje približnih količin bočnega preliva glede na nemerjeni natočni pretok (naredimo določeno napako). Vsekakor pa se moramo zavedati, da ta enačba velja za dani primer in za dani razpon Froudovih števil ter je kot takšne ne moremo in ne smemo aplicirati na katerikoli drugi primer.

### 5.1.2 Meritve za scenarij 2

#### Primer 1: široki prag

Preglednica 3 poleg izmerjenih vrednosti, prikazuje tudi izračunan prelivni koeficient  $C_d$ , ki hkrati predstavlja zelo pomemben člen v hidravlični analizi bočnih prelivov. Rezultat kažejo, da je vrednost koeficienta med 0.378 in 0.392. Vidimo lahko tudi, da je razpon Froudovih števil precej majhen (uporabnost rezultatov se zmanjša).



**Preglednica 3:** Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 2, primer 1

Qna [l/s]	K1 [cm]	K2 [cm]	K3 [cm]	K4 [cm]	K5 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]
45.0000	42.4000	41.9600	41.7000	41.4900	41.4600	1.9500	2.0600	2.1000
48.0000	42.7200	42.2100	42.0200	41.8300	41.8600	2.1200	2.2600	2.3000
50.0000	42.8600	42.3800	42.1600	41.9800	41.8900	2.3200	2.4200	2.4600
55.0000	43.2000	42.7600	42.5100	42.3300	42.2400	2.6500	2.7900	2.8200
60.0000	43.5800	43.1100	42.9600	42.7400	42.7500	2.9400	3.1000	3.1700
65.0000	43.9400	43.4900	43.2700	43.1600	43.1200	3.2700	3.3600	3.5100

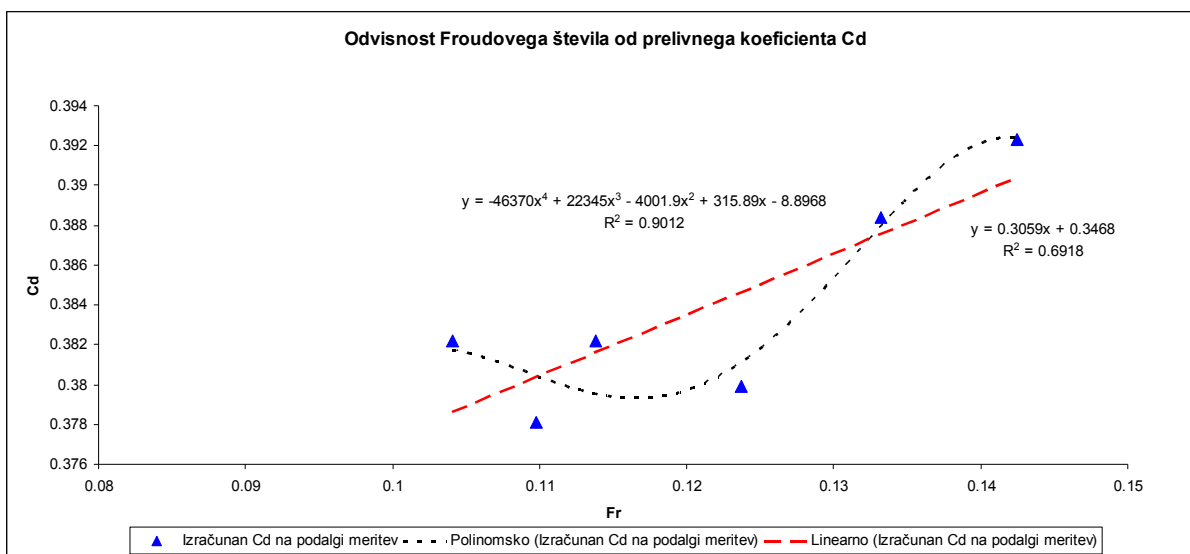
R1 [cm]	R2 [cm]	R3 [cm]	Qb.p. [l/s]	Qb.p. [m <sup>3</sup> /s]	Qb.p./Qna [%]	(h-p)povp [cm]	(h-p)povp [m]
2.0700	3.0600	3.2500	6.6500	0.0067	14.7778	2.0086	0.0201
2.4000	3.3400	3.8600	7.5300	0.0075	15.6875	2.1977	0.0220
2.5000	3.5600	4.0600	8.5000	0.0085	17.0000	2.3654	0.0237
2.7400	4.1000	4.7500	10.4000	0.0104	18.9091	2.7170	0.0272
2.9000	4.6300	5.2800	12.5000	0.0125	20.8333	3.0263	0.0303
2.9600	5.2100	5.8300	14.5000	0.0145	22.3077	3.3190	0.0332

(h-p)povp-ar.sr. [cm]	(h-p)povp-ar.sr. [m]	Cd	v	Fr
2.0367	0.0204	<b>0.3822</b>	0.2123	<b>0.1041</b>
2.2267	0.0223	<b>0.3781</b>	0.2247	<b>0.1098</b>
2.4000	0.0240	<b>0.3822</b>	0.2333	<b>0.1138</b>
2.7533	0.0275	<b>0.3799</b>	0.2546	<b>0.1237</b>
3.0700	0.0307	<b>0.3884</b>	0.2754	<b>0.1332</b>
3.3800	0.0338	<b>0.3923</b>	0.2959	<b>0.1425</b>

Izračunane vrednosti prelivnega koeficienta nam nadalje služijo za izvajanje regresijske analize. Tako je iz grafikona 2 razvidna trendna črta oziroma polinom, ki se najbolj prilagaja izmerjenim vrednostim. Z dobljeno enačbo lahko računamo spreminjanje prelivnega koeficienta v odvisnosti od Froudovega števila ( $y = Cd$ ,  $x = Fr$ ). Raztros podatkov lahko opazujemo glede na linearen trend (ocenujemo, da je raztros v mejah pričakovanega).

**Preglednica 4:** Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 2, primer 1

Izračunan Cd na podlagi meritev	Fr	Izračunan Cd glede na enačbo trendne črte	Napaka [%]
0.3822	0.1041	0.3817	0.1435
0.3781	0.1098	0.3803	0.5896
0.3822	0.1138	0.3794	0.7348
0.3799	0.1237	0.3809	0.2501
0.3884	0.1332	0.3876	0.2091
0.3923	0.1425	0.3920	0.0863



**Grafikon 2:** Regresijska analiza bočnega preliva oblike širokega pragu: scenarij 2, primer 1

Primer 2: Ostrorobi preliv

Podobno kot za primer 1, se je tudi za primer 2 izvedel enak račun prelivnega koeficienta Cd in analiza z regresijo (glej grafikon 3).

**Preglednica 5:** Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 2, primer 2

Qna [l/s]	K1 [cm]	K2 [cm]	K3 [cm]	K4 [cm]	K5 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]
45.0000	42.4000	42.0400	41.8000	41.6400	41.6200	1.8100	1.9500	1.9900
48.0000	42.7200	42.2500	42.0000	41.9000	41.8200	2.1100	2.2200	2.2500
50.0000	42.8600	42.4200	42.1700	42.0000	41.9900	2.2100	2.3100	2.3600
55.0000	43.2000	42.7700	42.6000	42.4500	42.4100	2.5400	2.6500	2.7500
60.0000	43.5800	43.1200	42.9300	42.8000	42.7300	2.8400	2.9300	3.0900
65.0000	43.9400	43.5100	43.3000	43.1800	43.1500	3.1700	3.2600	3.4600

R1 [cm]	R2 [cm]	R3 [cm]	Qb.p. [l/s]	Qb.p. [m <sup>3</sup> /s]	Qb.p./Qna [%]	(h-p)povp [cm]	(h-p)povp [m]
3.1800	4.1300	4.6900	10.2000	0.0102	22.6667	1.8926	0.0189
3.4000	4.5300	5.0400	11.7000	0.0117	24.3750	2.1637	0.0216
3.5900	4.8400	5.2900	12.6000	0.0126	25.2000	2.2595	0.0226
3.9000	5.4900	6.0600	14.8000	0.0148	26.9091	2.6034	0.0260
4.3700	6.0000	6.6100	17.0000	0.0170	28.3333	2.8982	0.0290
4.4900	6.5400	7.1400	19.1500	0.0192	29.4615	3.2324	0.0323

(h-p)povp-ar.sr. [cm]	(h-p)povp-ar.sr. [m]	Cd	v	Fr
1.9167	0.0192	<b>0.6409</b>	0.2123	<b>0.1041</b>
2.1933	0.0219	<b>0.6014</b>	0.2247	<b>0.1098</b>

2.2933	0.0229	<b>0.6069</b>	0.2333	<b>0.1138</b>
2.6467	0.0265	<b>0.5764</b>	0.2546	<b>0.1237</b>
2.9533	0.0295	<b>0.5637</b>	0.2754	<b>0.1332</b>
3.2967	0.0330	<b>0.5391</b>	0.2959	<b>0.1425</b>

V tem primeru smo dobili boljše ujemanje rezultatov meritev (iz njih izračunan koeficient  $C_d$ ) in regresijske oziroma trendne črte ( $R^2 = 0.9733$ ) kot pri vzorcu meritev, ki so se nanašale na široki prag (scenarij 2, primer 1).

**Preglednica 6:** Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 2, primer 2

Izračunan $C_d$ na podlagi meritev	Fr	Izračunan $C_d$ glede na enačbo trendne črte	Napaka [%]
0.6409	0.1041	0.6392	0.2647
0.6014	0.1098	0.6094	1.3383
0.6069	0.1138	0.5976	1.5277
0.5764	0.1237	0.5804	0.6932
0.5637	0.1332	0.5619	0.3215
0.5391	0.1425	0.5393	0.0362

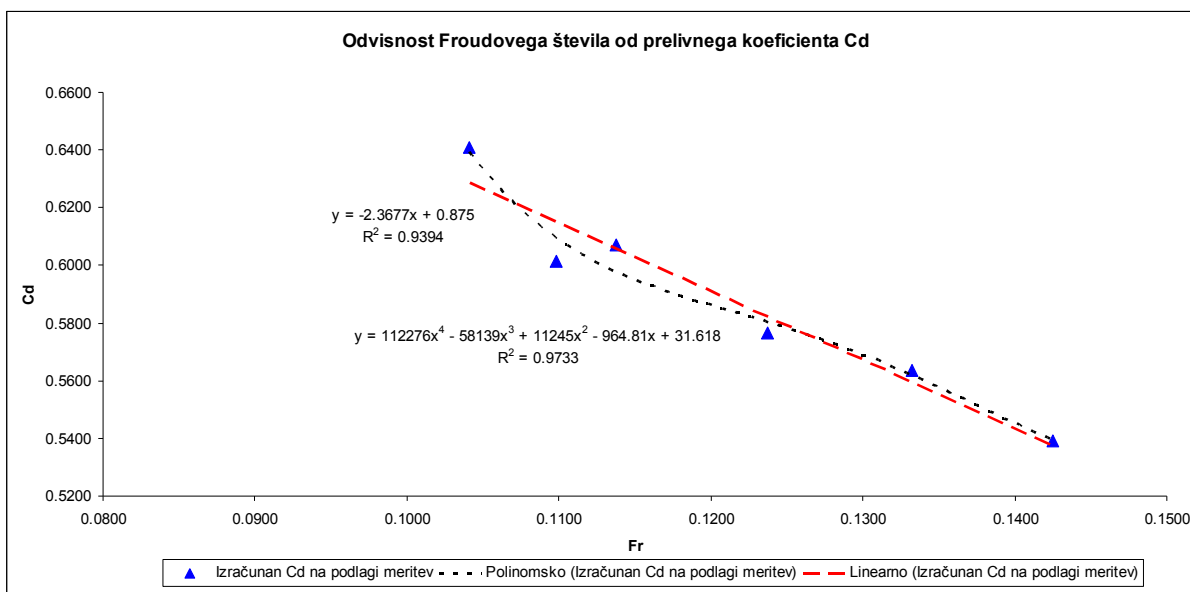
### Primerjava rezultatov:

Glede na dobljene rezultate lahko primerjamo naslednja parametra:

- vrednost prelivnega koeficienta  $C_d$
- trend naraščanja prelivnega koeficienta  $C_d$  v odvisnosti od Froudovega števila

Prelivni koeficient  $C_d$ , in posledično količina bočnega prelivanja je za bočne prelive z obliko ostrorobega preliva višji, in sicer za 0.1 do 0.2 (približno za 20 %). To pomeni, da se pri enakih geometrijskih in natočnih razmerah pri bočnem prelivu, ki ima obliko širokega pragu, prelije manjša količina vode kot preko bočnega preliva z obliko ostrorobega preliva. Na tem mestu ugotavljamo, da je oblika prelivne krone pomembna in predstavlja enega izmed glavnih faktorjev pri obravnavi bočnih prelivov. V splošnem velja kot najugodnejša tista oblika preliva, kjer se pojavlja najmanjše odlepljanje toka od konstrukcije oziroma vrtinčenje (Steinman, 1999). Slednje povzroča dodatne energijske izgube in posledično se prelivna sposobnost preliva oziroma koeficient preliva zmanjša. Zakaj je v konkretnem primeru prišlo do razlik, si lahko razlagamo z različno pretočno površino (široki prag  $0.138 \text{ m}^2$ , ostrorobi

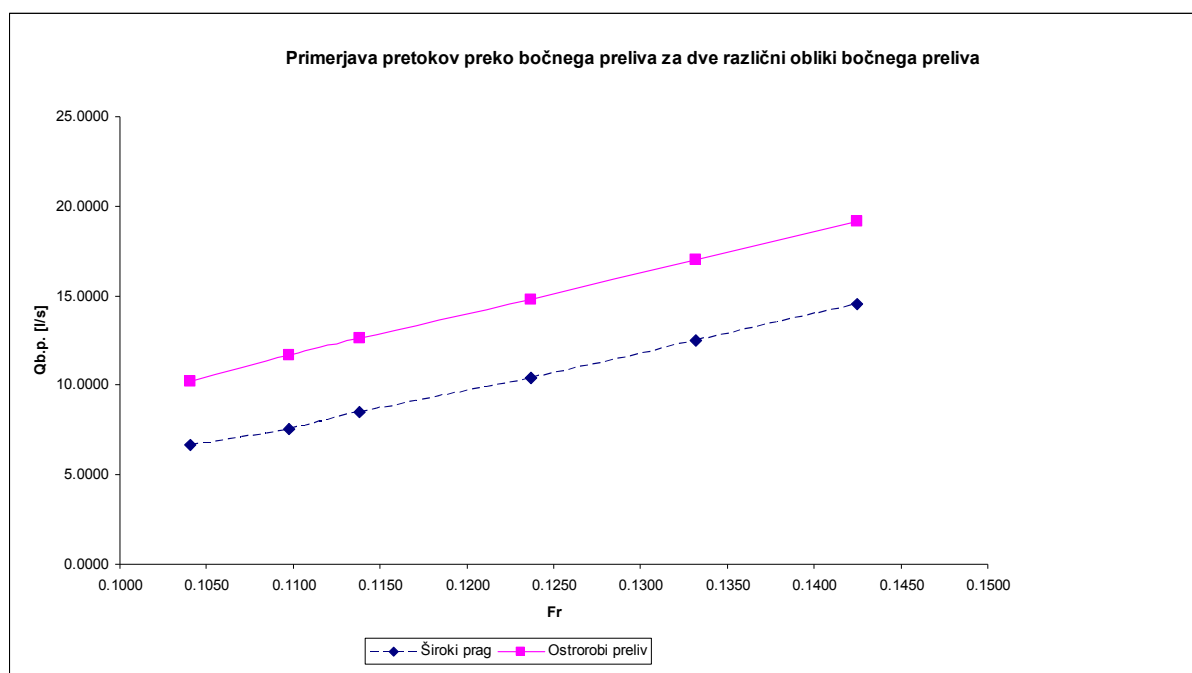
preliv  $0.0069 \text{ m}^2$ ). Kljub temu, da prihaja do odlepljanja toka (kontrakcija) pri obeh oblika (pri ostrorobem prelivu je kontrakcija še bolj izrazita), ker tekočinski delec ne more slediti ostremu robu prelivne stene, je prelivna površina pri širokem pragu precej večja, kar posledično vodi k dodatnim energijskim izgubam in prelivna sposobnost takšnega preliva se zmanjša (glej grafikon 4).



**Grafikon 3:** Regresijska analiza ostrorobega bočnega preliva: scenarij 2, primer 2

Tako bi za enako količino pretoka pri širokem pragu potrebovali višjo prelivno višino (v našem primeru K1 in posledično BP1, BP2 in BP3).

Druga razlika, ki smo jo opazili pri obdelavi podatkov, pa je trend. Tako lahko pri širokem pragu opazimo pozitiven trend, kar pomeni, da se z večanjem Froudeovega števila viša tudi vrednost prelivnega koeficienta Cd, pri ostrorobem prelivu pa je ravno obratno (negativen trend). Pojav smo opazovali tudi kasneje (scenarija 4 in 5), ko bo razpon Froudeovih števil večji, in ko se bosta oblikam iz scenarija 2 pridružili še hrapava drča in hrapava drča z grbo.



**Grafikon 4:** Prelivna sposobnost dveh različnih oblik bočnega preliva – scenarij 2

### 5.1.3 Meritve za scenarij 3

Podobno kot pri scenariju 1, je tudi pri scenariju 3 namen preverba določenih metod izračuna, zato analiz z izmerjenimi vrednostmi ne bomo izvajali. Znotraj scenarija 3 sta se izvedli dve varianti, in sicer za pravokotno in trapezno korito. Medsebojno meritve niso neposredno primerljive, ker poleg oblike na količino bočnega preliva vpliva tudi Froudovo število, ki pa je bilo pri trapezni obliki precej višje.

#### Primer 1: Pravokotno korito

**Preglednica 7:** Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 3, primer 1

Qna [l/s]	K1 [cm]	K2 [cm]	K3 [cm]	K4 [cm]	K5 [cm]	PR1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]
55	43.17	42.75	42.57	42.34	42.24	8.32	2.57	2.75	2.89
65	43.89	43.44	43.21	43	43	8.96	3.13	3.32	3.53

Qb.p. [l/s]	Qb.p./Qna [%]	Qb.p. [m <sup>3</sup> /s]	(h-p)povp [cm]	(h-p)povp [m]	(h-p)povp-ar.sr. [cm]	(h-p)povp-ar.sr. [m]	Cd
10.45	19	0.01045	2.693344691	0.026933447	2.736666667	0.027366667	0.386767
14.35	22.07692308	0.01435	3.268278854	0.032682789	3.326666667	0.033266667	0.397324

*Primer 2: Trapezno korito*

**Preglednica 8:** Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 3, primer 2

Qna [l/s]	K1 [cm]	K2 [cm]	K3 [cm]	K4 [cm]	K5 [cm]	PR1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]
50	17.66	17.28	17.59	17.98	18.28	7.3	1.82	1.9	2.08
60	18.12	17.61	18.03	18.54	18.86	7.69	2.12	2.34	2.53

Qb.p. [l/s]	Qb.p./Qna [%]	Qb.p. [m <sup>3</sup> /s]	(h-p)povp [cm]	(h-p)povp [m]	(h-p)povp-ar.sr. [cm]	(h-p)povp-ar.sr. [m]	Cd
5.85	11.7	0.00585	1.891914498	0.018919145	1.933333333	0.019333333	0.367769
8.25	13.75	0.00825	2.291666691	0.022916667	2.33	0.0233	0.389044

Dobljene rezultate bomo kasneje primerjali z rezultati matematičnih modelov, kjer bo najbolj zanimiva primerjava izračuna po različnih metodah znotraj programskega paketa HEC-RAS. Izračunali smo tudi prelivni koeficient Cd, ki nam bo prišel prav pri simulaciji z 1D matematičnim modelom HEC-RAS.

**5.1.4 Meritve za scenarij 4**

*Primer 1: Preliv praktične oblike – hrapava drča*

Postopek analize izmerjenih podatkov je enak kot pri scenariju 2. Ta scenarij oziroma njegovi rezultati regresijske analize so vsekakor bolj uporabni kot pri scenariju 2, saj imamo opraviti z večjim razponom Froudovih števil (interval med 0.38 in 0.59). Vpeljali smo tudi novo obliko in sicer hrapavo drčo, ki naj bi zaradi svoje oblike povzročila, da bi prišlo do manjšega odlepljanja toka od konstrukcije kot pri oblikah širokega pragu in ostrorobega preliva. Posledično bi bile izgube manjše (manjše vrtinčenje) in prelivna sposobnost bi se naj povečala. Slednje bomo komentirali po predstavitvah rezultatov ostalih dveh primerov (scenarij 4, primer 2 in 3).

**Preglednica 9:** Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 4, primer 1

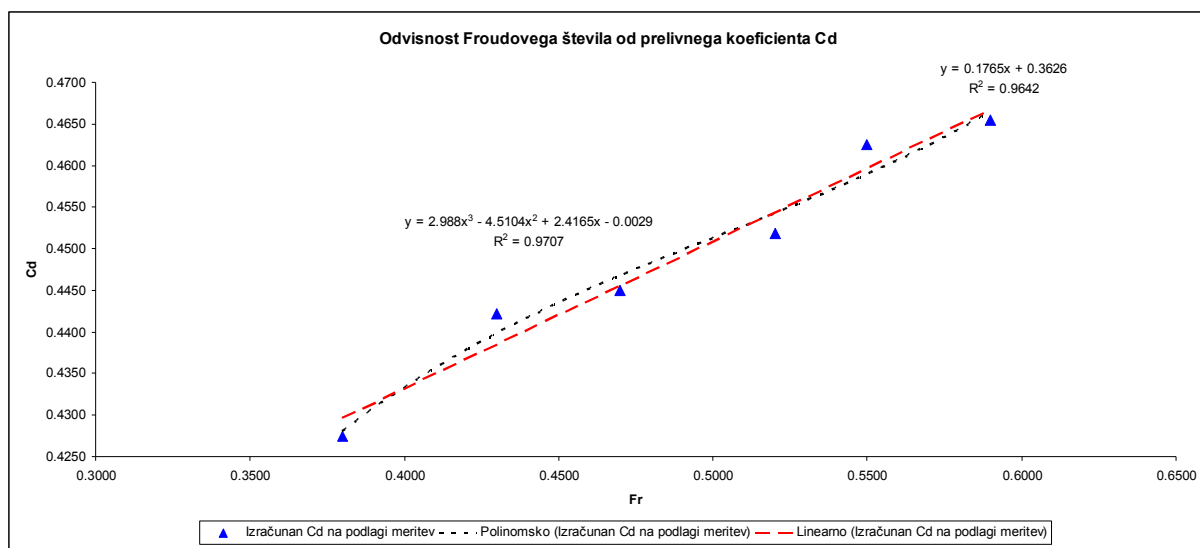
Qna [l/s]	K1 [cm]	K2 [cm]	K3 [cm]	K4 [cm]	K5 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]
35.0000	17.2300	17.1500	17.4500	18.0200	18.3800	2.1100	2.3600	2.6300
40.0000	17.4800	17.3400	17.7500	18.3200	18.7500	2.2700	2.5600	2.9100
45.0000	17.6500	17.5800	18.0400	18.6800	19.1500	2.3400	2.8000	3.1400
50.0000	17.8000	17.7100	18.1900	18.9500	19.4800	2.4500	2.9900	3.4200

55.0000	18.0600	17.9100	18.4400	19.2400	19.7100	2.4100	3.2100	3.6200
60.0000	18.2000	18.1600	18.6300	19.4900	20.1400	2.4800	3.3700	3.8800

R1 [cm]	R2 [cm]	R3 [cm]	Qb.p. [l/s]	Qb.p. [m <sup>3</sup> /s]	Qb.p./Qna [%]	(h-p)povp [cm]	(h-p)povp [m]
2.3200	3.5900	4.7300	9.2500	0.0093	26.4286	2.3229	0.0232
2.7200	4.1100	5.2400	10.8700	0.0109	27.1750	2.5288	0.0253
3.2400	4.4300	5.8600	12.2000	0.0122	27.1111	2.7198	0.0272
3.5300	5.0600	6.3400	13.7000	0.0137	27.4000	2.9085	0.0291
3.7200	5.3000	6.9700	15.1000	0.0151	27.4545	3.0554	0.0306
4.3200	5.7500	7.6500	16.4000	0.0164	27.3333	3.2149	0.0321

(h-p)povp-ar.sr. [cm]	(h-p)povp-ar.sr. [m]	Cd	Fr - HEC
2.3667	0.0237	<b>0.4274</b>	<b>0.3800</b>
2.5800	0.0258	<b>0.4422</b>	<b>0.4300</b>
2.7600	0.0276	<b>0.4450</b>	<b>0.4700</b>
2.9533	0.0295	<b>0.4519</b>	<b>0.5200</b>
3.0800	0.0308	<b>0.4625</b>	<b>0.5500</b>
3.2433	0.0324	<b>0.4654</b>	<b>0.5900</b>

V tem primeru je bilo ujemanje rezultatov meritev (iz njih izračunan koeficient Cd) in regresijske oziroma trendne črte ( $R^2 = 0.9707$ ) zadovoljivo, kar pomeni, da napaka izračunana s pomočjo dobljene enačbe trendne črte ne bi presegla 1 % (glej preglednico 10). V nadaljevanju bomo podali regresijsko analizo obravnavanega primera (glej grafikon 5).



**Grafikon 5:** Regresijska analiza bočnega preliva oblike hrapave drče: scenarij 4, primer 1

**Preglednica 10:** Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 4, primer 1

Izračunan Cd na podlagi meritev	Fr - HEC	Izračunan Cd glede na enačbo trendne črte	Napaka [%]
0.427427657	0.38	0.428025776	0.139934625
0.442215641	0.43	0.439788956	0.548755997
0.444965718	0.47	0.446730764	0.39667017
0.451855334	0.52	0.454204544	0.519903149
0.462533766	0.55	0.4589075	0.784000241
0.465434004	0.59	0.466437212	0.215542482

*Primer 2: Široki prag*

Na podlagi izmerjenih vrednosti se je podobno kot za primer 2 izvedla regresijska analiza (glej grafikon 6), kjer smo sicer dobili nekoliko slabše rezultate kot v primeru 1, a so bili kljub temu zadovoljivi ( $R^2 = 0.9291$ ).

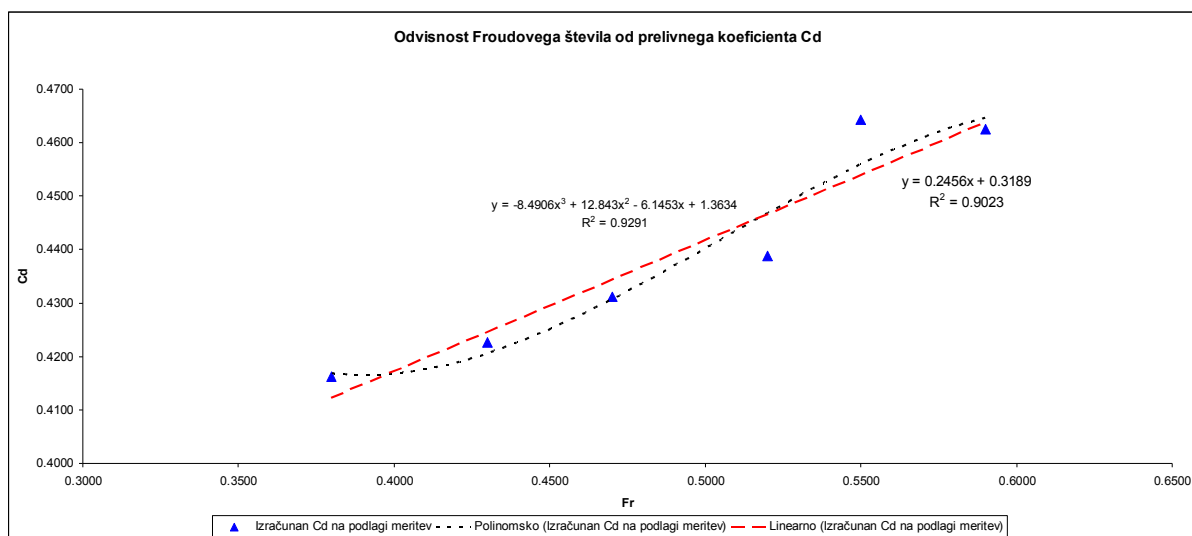
**Preglednica 11:** Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 4, primer 2

Qna [l/s]	K1 [cm]	K2 [cm]	K3 [cm]	K4 [cm]	K5 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]
35.0000	17.2300	17.1800	17.4900	18.0700	18.4400	2.1600	2.4000	2.6700
40.0000	17.4800	17.4300	17.7900	18.3800	18.8500	2.3000	2.6600	2.9700
45.0000	17.6500	17.6000	18.0500	18.7400	19.2300	2.4200	2.8900	3.2700
50.0000	17.8000	17.8300	18.3600	19.0600	19.5600	2.5100	3.1100	3.5300
55.0000	18.0600	18.0700	18.7000	19.5300	20.0300	2.5600	3.3500	3.9400
60.0000	18.2000	18.2800	18.8900	19.7200	20.2700	2.5700	3.5700	4.2100

R1 [cm]	R2 [cm]	R3 [cm]	Qb.p. [l/s]	Qb.p. [m <sup>3</sup> /s]	Qb.p./Qna [%]	(h-p)povp [cm]	(h-p)povp [m]
2.3200	3.8400	4.6700	9.2500	0.0093	26.4286	2.3648	0.0236
2.4500	4.1700	5.3900	10.8300	0.0108	27.0750	2.5999	0.0260
2.7400	4.8200	5.8500	12.4500	0.0125	27.6667	2.8155	0.0282
3.1900	5.2100	6.6100	14.0000	0.0140	28.0000	3.0090	0.0301
3.5200	5.7700	7.1300	16.5500	0.0166	30.0909	3.2395	0.0324
3.9400	6.1200	7.6600	17.8500	0.0179	29.7500	3.4164	0.0342

(h-p)povp-ar.sr. [cm]	(h-p)povp-ar.sr. [m]	Cd	Fr - HEC
2.4100	0.0241	<b>0.4161</b>	<b>0.3800</b>
2.6433	0.0264	<b>0.4226</b>	<b>0.4300</b>
2.8600	0.0286	<b>0.4311</b>	<b>0.4700</b>
3.0500	0.0305	<b>0.4388</b>	<b>0.5200</b>
3.2833	0.0328	<b>0.4644</b>	<b>0.5500</b>
3.4500	0.0345	<b>0.4624</b>	<b>0.5900</b>





**Grafikon 6:** Regresijska analiza bočnega preliva oblike širokega praga: scenarij 4, primer 2

**Preglednica 12:** Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 4, primer 2

Izračunan Cd na podlagi meritev	Fr - HEC	Izračunan Cd glede na enačbo trendne črte	Napaka [%]
0.416129082	0.38	0.416818997	0.165793505
0.422629295	0.43	0.420529566	0.496825395
0.431140468	0.47	0.430608136	0.123470554
0.43879068	0.52	0.446744915	1.812763018
0.464366581	0.55	0.455868925	1.829945548
0.462449341	0.59	0.464530363	0.449999805

### Primer 3: Ostrorobi preliv

Regresijska analiza (glej grafikon 7) nam je dala boljše rezultate od obeh prejšnjih primerov. Tako znaša  $R^2 = 0.9926$  in napaka, glede na izračunan Cd na podlagi enačbe trendne črte, je manjša od 0.5 %.

**Preglednica 13:** Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 4, primer 3

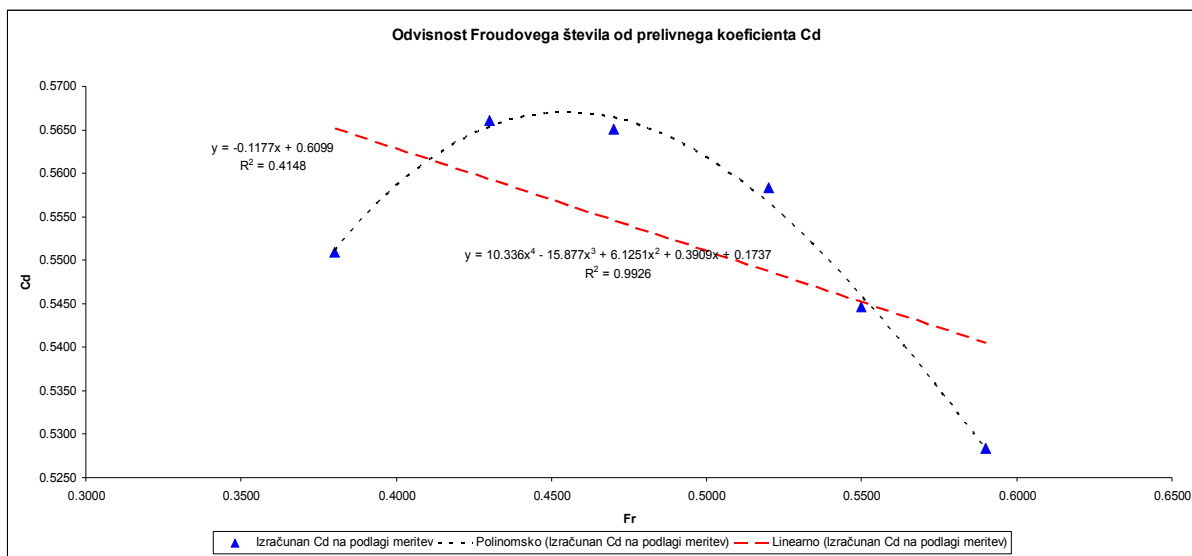
Qna [l/s]	K1 [cm]	K2 [cm]	K3 [cm]	K4 [cm]	K5 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]
35.0000	17.2300	17.1400	17.5300	18.1200	18.5700	2.0400	2.3200	2.6100
40.0000	17.4800	17.4000	17.7800	18.4900	18.9400	2.2100	2.5000	2.8600
45.0000	17.6500	17.6300	18.0700	18.8200	19.2800	2.2700	2.7100	3.1800
50.0000	17.8000	17.8200	18.3600	19.0800	19.5600	2.2700	2.9500	3.4800
55.0000	18.0600	18.0400	18.6700	19.5000	20.0900	2.4400	3.2300	3.9300
60.0000	18.2000	18.1800	19.1000	19.8300	20.0700	2.6500	3.4300	4.2300

R1 [cm]	R2 [cm]	R3 [cm]	Qb.p. [l/s]	Qb.p. [m <sup>3</sup> /s]	Qb.p./Qna [%]	(h-p)povp [cm]	(h-p)povp [m]
3.3500	4.4800	5.6400	11.6000	0.0116	33.1429	2.2808	0.0228
3.4700	5.0300	6.1600	13.4500	0.0135	33.6250	2.4722	0.0247
3.5900	5.4600	6.6900	15.0500	0.0151	33.4444	2.6679	0.0267
3.8500	6.0000	7.3200	16.5000	0.0165	33.0000	2.8591	0.0286
4.3500	6.2700	7.9600	18.6000	0.0186	33.8182	3.1488	0.0315
5.0200	6.4100	8.2600	20.0000	0.0200	33.3333	3.3721	0.0337

(h-p)povp-ar.sr. [cm]	(h-p)povp-ar.sr. [m]	Cd	Fr - HEC
2.3233	0.0232	<b>0.5509</b>	<b>0.3800</b>
2.5233	0.0252	<b>0.5661</b>	<b>0.4300</b>
2.7200	0.0272	<b>0.5650</b>	<b>0.4700</b>
2.9000	0.0290	<b>0.5584</b>	<b>0.5200</b>
3.2000	0.0320	<b>0.5446</b>	<b>0.5500</b>
3.4367	0.0344	<b>0.5284</b>	<b>0.5900</b>

Preglednica 14: Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 4, primer 3

Izračunan Cd na podlagi meritev	Fr - HEC	Izračunan Cd glede na enačbo trendne črte	Napaka [%]
0.550914805	0.38	0.551023353	0.019703185
0.566068888	0.43	0.565352622	0.126533242
0.565015622	0.47	0.566423647	0.249201125
0.558366498	0.52	0.556490454	0.335987899
0.544585306	0.55	0.545810475	0.224972777
0.528381816	0.59	0.52812636	0.048346905



Grafikon 7: Regresijska analiza ostrorobega bočnega preliva: scenarij 4, primer 3

**Primerjava rezultatov:**

Podobno kot pri scenariju 2 lahko tudi tukaj primerjamo dve stvari, in sicer:

- vrednost prelivnega koeficienta  $C_d$
- trend naraščanja prelivnega koeficienta  $C_d$  v odvisnosti od Froudovega števila

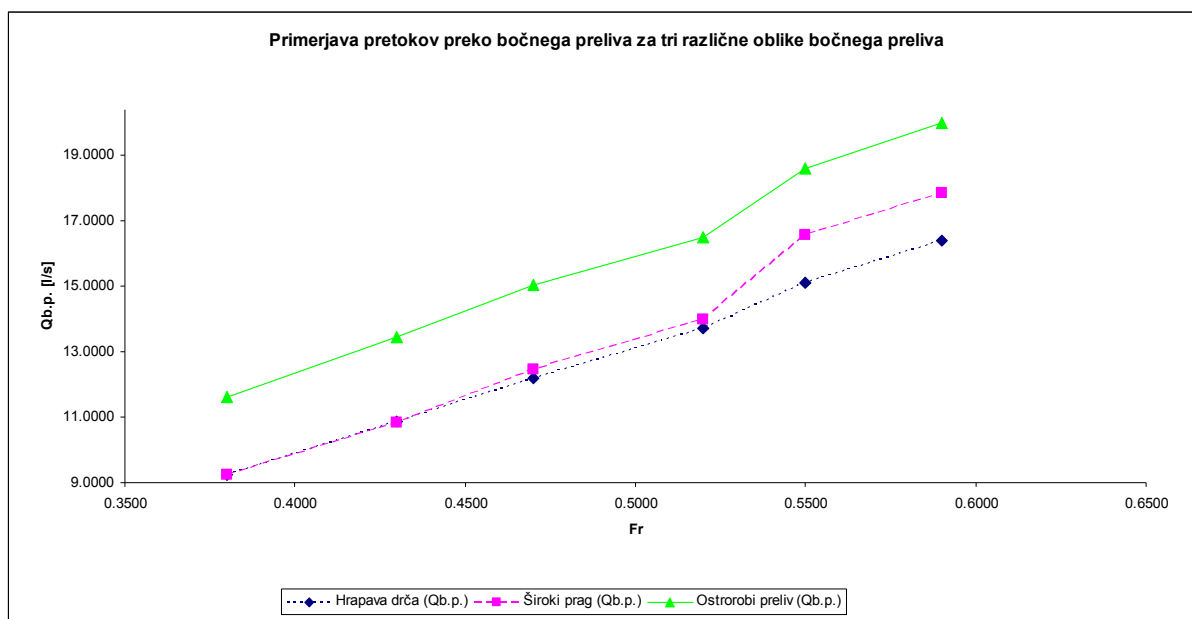
Kot smo že prej napisali o bolj in manj primernih oblikah bočnih prelivov, so se pri scenariju 4 izvedle meritve tudi na praktični obliki (hrapava drča). Hrapava drča, za razliko od ostrorobega preliva in širokega praga, ni odrezana na mestu, kjer pride do prelivanja, ampak je izvedena pod kotom  $27.9^\circ$  z zaobljenim prelivnim območjem. Ta izvedba je vsekakor bolj ugodna z vidika manjšega odlepljanja toka od konstrukcije in posledično bi to pomenilo višje prelivne koeficiente.

Če pogledamo rezultate meritev lahko opazimo, da se je zopet ostrorobi preliv izkazal kot preliv z najvišjimi prelivnimi koeficienti. Torej kljub temu, da smo imeli praktično obliko (hrapava drča – primer 1), preko katere bi se naj prelil največji pretok, je očitno majhna površina ostrorobega preliva bolj ugodno vplivala na količino prelite tekočine kot pa kontrakcija curka, ki je pri ostrorobem prelivu večja. Če pa primerjamo široki prag in hrapavo drčo, med katerima je bila manjša razlika v površini (hrapava drča je imela vseeno višjo površino), pa lahko opazimo, da je bila količina prelite tekočine sicer višja pri širokem pragu, vendar pa se je na račun nižje prelivne gladine pri hrapavi drči izkazalo, da so prelivni koeficienti  $C_d$  kljub temu višji pri hrapavi drči. Iz tega lahko sklepamo, kako pomembno je poznavanje prelivnih višin oziroma vedenje, katera višina je vzeta za račun prelivnega koeficienta  $C_d$  (ali višina gorvodno od preliva, ali pa povprečna prelivna višina, ki se ustvari na samem prelivu). Drugače povedano, za hrapavo drčo smo dobili sicer višje prelivne koeficiente, vendar se je preko preliva prelila manjša količina vode, za enako višino vode gorvodno od preliva. Če bi tako v enačbi za bočni preliv (enačba (2)) upoštevali dobljene koeficiente in prelivno višino dobljeno z višino vode gorvodno od preliva (v našem primeru bi za obe obliki dobili enako prelivno višino), bi dobili višje bočne pretoke pri praktični obliki kot pri širokem pragu, kar pa smo na podlagi meritev videli, da ni res. Pri uporabi prelivnih koeficientov, ki smo jih izračunali v drugih primerih, je tako trebna povedati, da so izračunani

na podlagi povprečnih prelivnih višin, ki se ustvarijo na samem prelivu in ne na podlagi višine gorvodno od preliva.

Druga razlika pa se nanaša na trend. Tako lahko tukaj samo potrdimo ugotovitev, ki smo jo zapisal pri primerjavi rezultatov iz scenarija 2. Tudi pri višjih Froudovih številih in delno trapeznem koritu se tako pri širokem pragu kot tudi pri hrapavi drči pojavi pozitiven trend (z večanjem Froudovega števila se viša tudi vrednost prelivnega koeficienta  $C_d$ ), pri ostrorobem prelivu pa negativen trend. Očitno je, da se pri prelivih, ki izkazujejo višjo vrednost prelivnega koeficienta  $C_d$  (glede na meritve nad 0.5), pojavi negativen trend in obratno pri prelivih z nižjimi prelivnimi koeficienti  $C_d$  (glede na meritve pod 0.5).

Vse povedano boljše vidi na grafikonih 8 in 9.

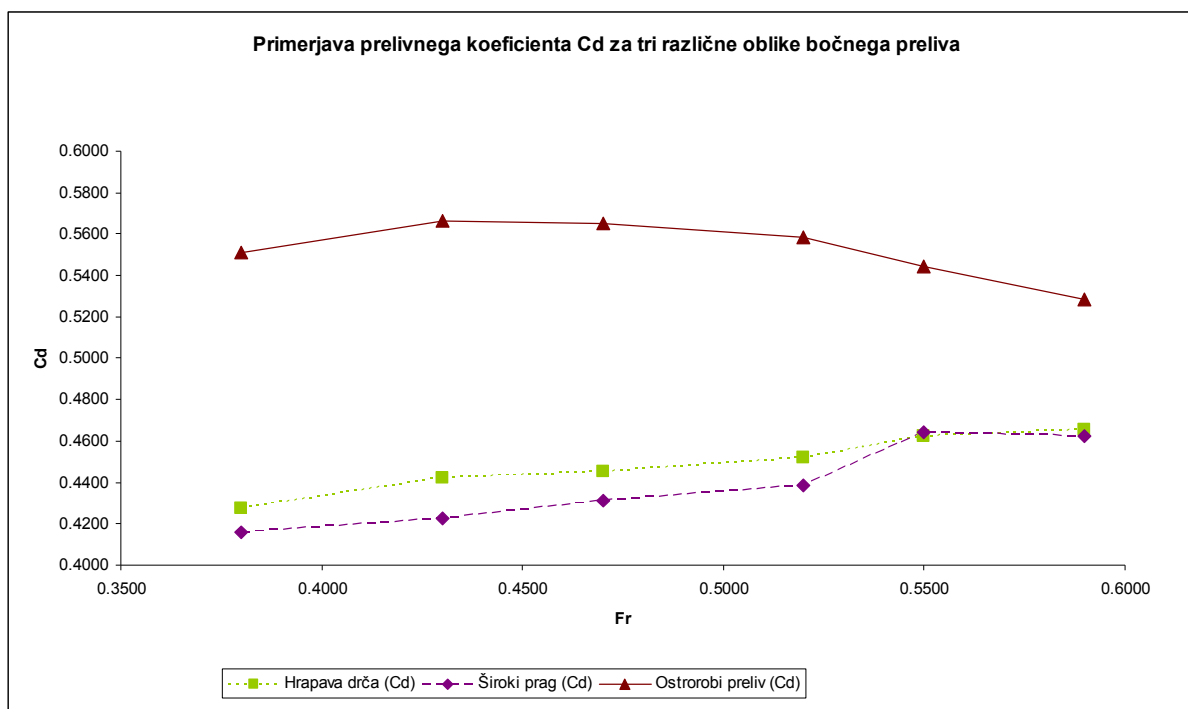


**Grafikon 8:** Prelivna sposobnost treh različnih oblik bočnega preliva – scenarij 4

### 5.1.5 Meritve za scenarij 5

#### Primer 1: Preliv praktične oblike – hrapava drča

Primer 1 pri scenariju 5 je preliv z obliko hrapave drče in je po obliki identičen primeru 1 iz scenarija 4. Edina razlika med njima je samo v višini preliva.



**Grafikon 9:** Prelivni koeficienti Cd za tri različne oblike bočnega preliva – scenarij 4

**Preglednica 15:** Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 5, primer 1

Qna [l/s]	K1 [cm]	K2 [cm]	K3 [cm]	K4 [cm]	K5 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]
33.5000	14.4500	14.3600	14.5600	14.9700	15.2700	0.6500	0.8300	0.8800
36.0000	14.7500	14.6100	14.8500	15.3100	15.7200	0.8300	1.0900	1.1400
38.5000	14.9300	14.7800	15.1200	15.5400	15.9800	1.0000	1.2600	1.2900
41.0000	15.1900	15.1000	15.4400	15.8900	16.3300	1.0800	1.5300	1.6000

R1 [cm]	R2 [cm]	R3 [cm]	Qb.p. [l/s]	Qb.p. [m <sup>3</sup> /s]	Qb.p./Qna [%]	(h-p)povp [cm]	(h-p)povp [m]
0.7900	1.2800	1.7200	1.8000	0.0018	5.3731	0.7830	0.0078
1.0500	1.6500	2.3500	2.7500	0.0028	7.6389	1.0187	0.0102
1.3100	1.9100	2.9100	3.6000	0.0036	9.3506	1.1810	0.0118
1.6300	2.5600	3.6600	4.7600	0.0048	11.6098	1.4087	0.0141

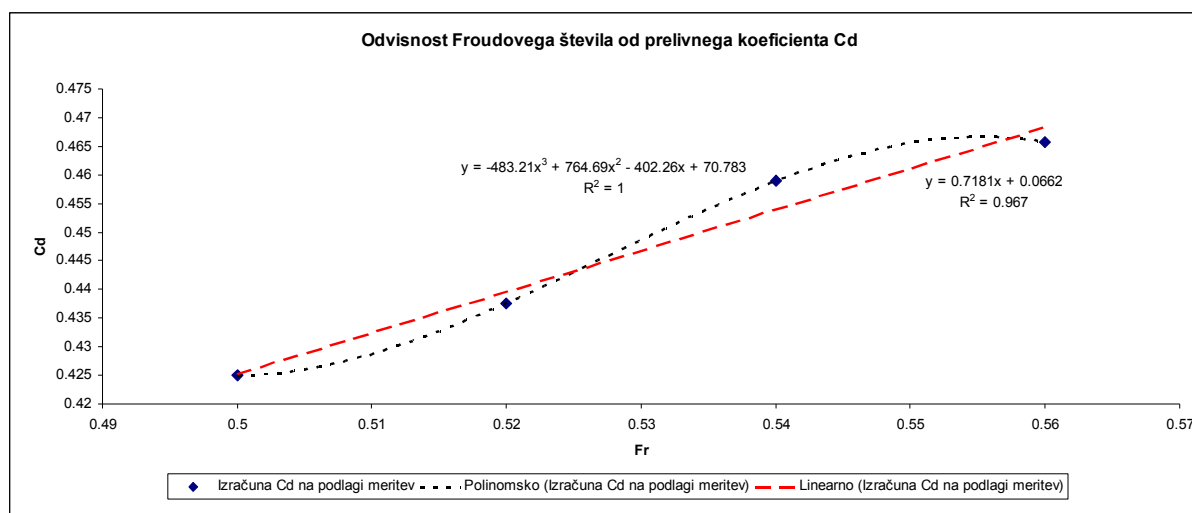
(h-p)povp-ar.sr. [cm]	(h-p)povp-ar.sr. [m]	Cd	Fr - HEC
0.7867	0.0079	<b>0.4250</b>	<b>0.5000</b>
1.0200	0.0102	<b>0.4376</b>	<b>0.5200</b>
1.1833	0.0118	<b>0.4589</b>	<b>0.5400</b>
1.4033	0.0140	<b>0.4657</b>	<b>0.5600</b>

V tem primeru smo imeli samo 4 meritve, kar je še manj kot pri prejšnjih scenarijih in še bolj postavi pod vprašaj regresijske analize (majhnost vzorca). Analize so se vseeno izvedle in

rezultati so zelo zadovoljivi (glej grafikon 10), saj lahko s polinomom 3. stopnje popolnoma opišemo vzorec meritev ( $R^2 = 1$  z upoštevanjem napake, ki jo naredi Excel).

**Preglednica 16:** Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 5, primer 1

Izračunan Cd na podlagi meritev	Fr - HEC	Izračunan Cd glede na enačbo trendne črte	Napaka [%]
0.424973486	0.5	0.42425	0.170242653
0.437583092	0.52	0.43678432	0.182541872
0.458902502	0.54	0.45802456	0.191313394
0.465737822	0.56	0.46477664	0.206378246



**Grafikon 10:** Regresijska analiza bočnega preliva brez grbe: scenarij 5, primer 1

Na tem primeru lahko opozorimo še na eno stvar, ki smo jo že omenili nekoliko prej, in sicer da je uporabnost rezultatov poleg intervala Froudovih števil in podobnosti geometrije odvisna tudi od prelivne višine oziroma razmerja  $h_1/p$ , ki pa je bilo v našem primeru različno (pri scenariju 4 je bilo razmerje  $h_1/p$  od 1.17 do 1.23, pri scenariju 5 pa od 1.05 pa do 1.1). Če sedaj pogledamo primer 1 iz scenarija 4 in obravnavan primer, ki imata enako geometrijo in zelo podobne intervale Froudovih števil (če bi samo geometrija in Froudovo števila bila vplivna faktorja bočnega preliva, bi dobljeno enačbo trendne črte iz scenarija 4, primer 1 za prelivni koeficient Cd lahko aplicirali na scenarij 5, primer 1) ugotovimo, da vseeno pride do razlik v prelivnih koeficientih (primer 1, scenarij 4 je za  $Fr = 0.52$  pripadajoči  $Cd = 0.4519$ , pri primeru 1, scenariju 5 pa je za  $Fr = 0.52$  pripadajoči Cd enak 0.437). Slednje razlike gredo seveda na račun nižjih razmerja  $h_1/p$  pri scenariju 5, primer 1. Sedaj lahko vidimo, kako

pomembno je pravilno tolmačenje rezultatov oziroma upoštevanje vseh vplivnih pogojev pri uporabi določene enačbe za podobne primere.

Primer 2: Preliv praktične oblike – hrapava drča z grbo

Pri tem sklopu meritev, ki je bil pravzaprav tudi zadnji sklop je potrebno opozoriti na dve stvari. Prva stvar je gladina gorvodno od preliva (KT1), ki je, kot lahko opazite, za 2.5 mm nižja od gladine pri primeru 1 za enak pretok. To se je storilo zato, ker smo tekom meritev opazili, da je preliv z grbo za približno 2.5 mm nižji od preliva brez grbe. Tako smo kljub enakim Froudovim številom pri prelivu z grbo zaradi višje natočne oziroma gorvodne gladine dobili precej višje bočne pretoke (razmerje  $h_1/p$  je bilo višje). Vpliv višje gorvodne gladine smo eliminirali z znižanjem natočne gladine za 2.5 mm. S tem posegom smo seveda spremenili Froudova števila, ki pa prav tako vplivajo na bočni pretok (če bi hoteli dobiti enaka Froudova števila, bi morali poleg gladin znižati tudi natočne pretoke). Vendar glede na to, da so se gladine znižale zgolj za 2.5 mm, se interval Froudovih števil ni bistveno spremenil (pri scenariju 5 primer 1 je razpon med 0.5 in 0.56, pri scenariju 5 primeru 2 pa med 0.51 in 0.58).

**Preglednica 17:** Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 5, primer 2

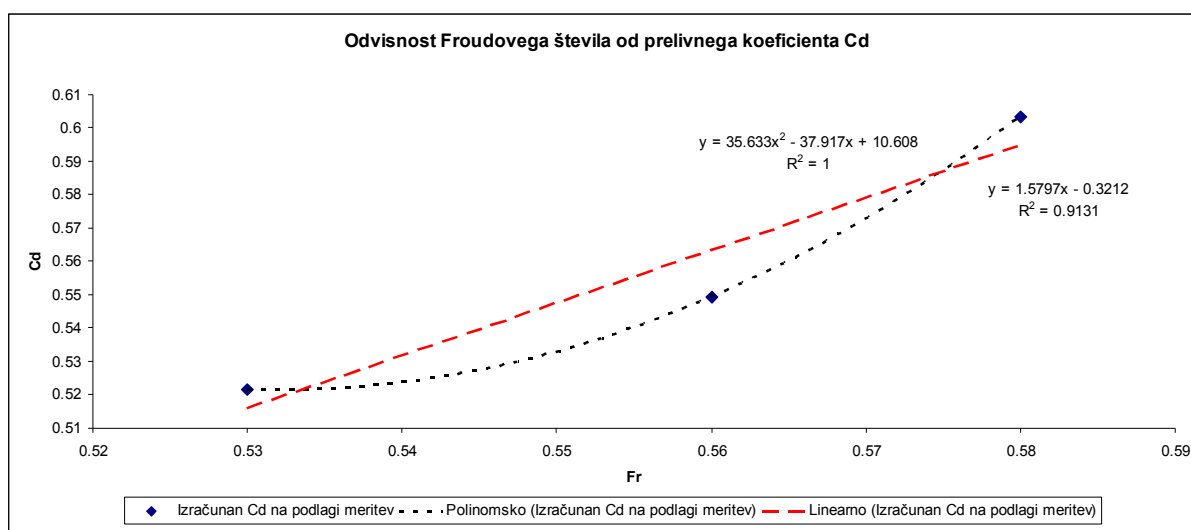
Qna [l/s]	K1 [cm]	K2 [cm]	K3 [cm]	K4 [cm]	K5 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]
33.5000	14.2000	13.9800	14.2000	14.6600	14.8800	0.5200	0.8700	1.0500
36.0000	14.5000	14.3200	14.6200	15.1700	15.5000	0.8300	1.0100	1.3100
38.5000	14.6800	14.5200	14.8500	15.4500	15.7800	0.9300	1.1700	1.4600
41.0000	14.9400	14.7700	15.1900	15.8900	16.3200	1.1300	1.4200	1.6400

R1 [cm]	R2 [cm]	R3 [cm]	Qb.p. [l/s]	Qb.p. [m <sup>3</sup> /s]	Qb.p./Qna [%]	(h-p)povp [cm]	(h-p)povp [m]
0.4000	0.9700	1.2600	1.3500	0.0014	4.0299	0.8130	0.0081
1.0900	1.8800	2.6500	3.2900	0.0033	9.1389	1.0210	0.0102
1.3900	2.3200	3.1100	4.2000	0.0042	10.9091	1.1608	0.0116
1.8000	2.8600	3.9600	5.9600	0.0060	14.5366	1.3768	0.0138

(h-p)povp-ar.sr. [cm]	(h-p)povp-ar.sr. [m]	Cd	Fr - HEC
0.8133	0.0081	<b>0.3013</b>	<b>0.5100</b>
1.0500	0.0105	<b>0.5217</b>	<b>0.5300</b>
1.1867	0.0119	<b>0.5494</b>	<b>0.5600</b>
1.3967	0.0140	<b>0.6035</b>	<b>0.5800</b>

Če meritev, kjer je Froudovo število enako 0.58, pri prelivu z grbo ne upoštevamo (pri regresijski analizi smo ga zaradi uporabnosti rezultatov vseeno upoštevali), dobimo praktično

enak interval Froudovih števil med obema primeroma scenarija 5 in tako tudi primerljivost rezultatov. Druga stvar pa je meritev pri pretoku 33.5 l/s, ki je pri prelivu z grbo dal nelogične rezultate, ki pa so posledica površinskih napetosti, ki smo jih dobili zaradi znižanja gladine. Tako slednje meritve nismo upoštevali pri regresijskih analizah (glej grafikon 11), ki so dale zelo zadovoljive rezultate ( $R^2 = 1$ , upoštevanje napake Excela), tudi na račun majhnega vzorca podatkov (lahko »dvorezen meč«).



**Grafikon 11:** Regresijska analiza bočnega preliva z grbo: scenarij 5, primer 2

**Preglednica 18:** Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 5, primer 2

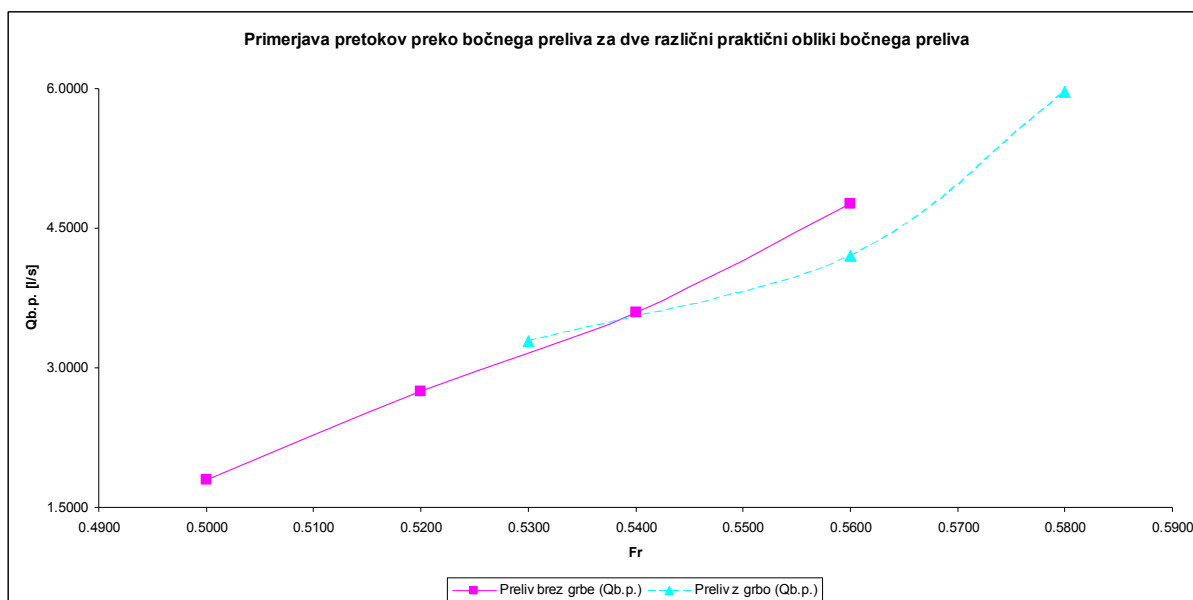
Izračunan Cd na podlagi meritev	Fr - HEC	Izračunan Cd glede na enačbo trendne črte	Napaka [%]
0.5217	0.53	0.5212997	0.076729921
0.5494	0.56	0.5489888	0.074845286
0.6035	0.58	0.6030812	0.069395195

### **Primerjava rezultatov:**

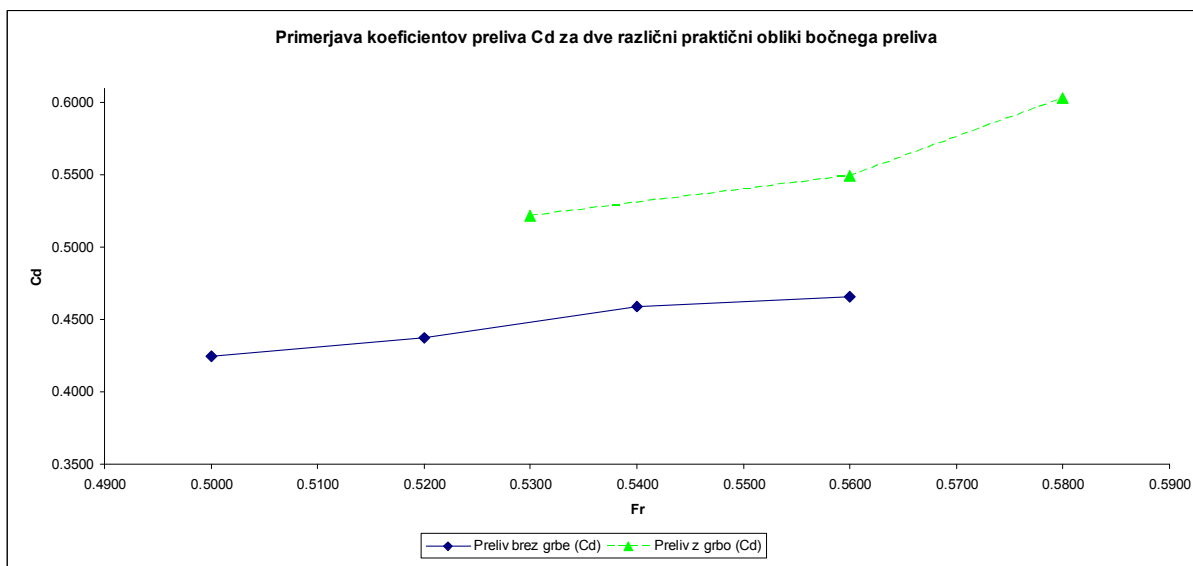
Če primerjamo prelivne koeficiente ugotovimo, da so za preliv z grbo višji. V obeh primerih gre za preliv podobne površine, tako da grba očitno zelo ugodno vpliva na količino pretoka preko preliva. Glede na potek meritev lahko komentiramo, da grba količino vode, ki se prelije, najprej nekoliko zajezi in se nato prelije preko grbe. V splošnem pa lahko rečemo, da pride do razlik, ker je grba dvignjena nad ostalo višino preliva, preliv brez grbe pa je celoten na enaki višini kot je grba. To pomeni, da je na začetku preliv z grbo nižji od preliva brez nje



in je tudi prelivna višina vode višja, kar posledično vodi do višjih pretokov, ki so usmerjeni proti grbi, kjer se prihajajoča voda še malo zajezi in se nato na koncu prelije preko grbe.



**Grafikon 12:** Prelivna sposobnost dveh različnih praktičnih oblik bočnega preliva – scenarij 5



**Grafikon 13:** Prelivni koeficient Cd za dve različni praktični obliki bočnega preliva – scenarij 5

Zanimivo bi bilo izvesti še meritve preliva brez grbe, vendar z enako višino kot jo je imelo prelivno območje pred grbo (znižan preliv brez grbe iz scenarija 5, primer 1). Količina pretoka ni čisto primerljiva zaradi manjših prelivnih višin pri prelivu z grbo. Trend prelivnega

koeficienta  $C_d$  v odvisnosti od Froudovega števila pa je v obeh primerih pozitiven. Vse napisano je veliko bolj razvidno na grafikonih 12 in 13.

## 5.2 Rezultati matematičnih modelov in primerjava z rezultati meritev

V tem poglavju se bodo predstavili rezultati, ki smo jih pri isti geometriji in analognih natočnih razmerah dobili z modeliranjem 1D in 2D toka.

Še preden smo se lotili samega izračuna smo najprej umerili Manningov koeficient hrapavosti. V ta namen smo izvedli še dodatno meritev, kjer smo vodo v vodotoku spustili do višine, ki še ne preliwa, nato pa ob znanem pretoku ( $Q = 20$  l/s) izmerili gladine. V računalniškem modelu smo pri enakih geometrijskih pogojih in znanemu spodnjemu robnemu pogoju (SRP) toliko časa spreminjali  $n_G$ , da smo dobili izmerjene gladine. Zaradi uporabe precej gladkih materialov (vekaplan plošče), smo pričakovali dokaj nizke vrednosti koeficientov hrapavosti (0.01).

**Preglednica 19:** Prikaz rezultatov umerjanja Manningovega koeficienta hrapavosti  $n_G$

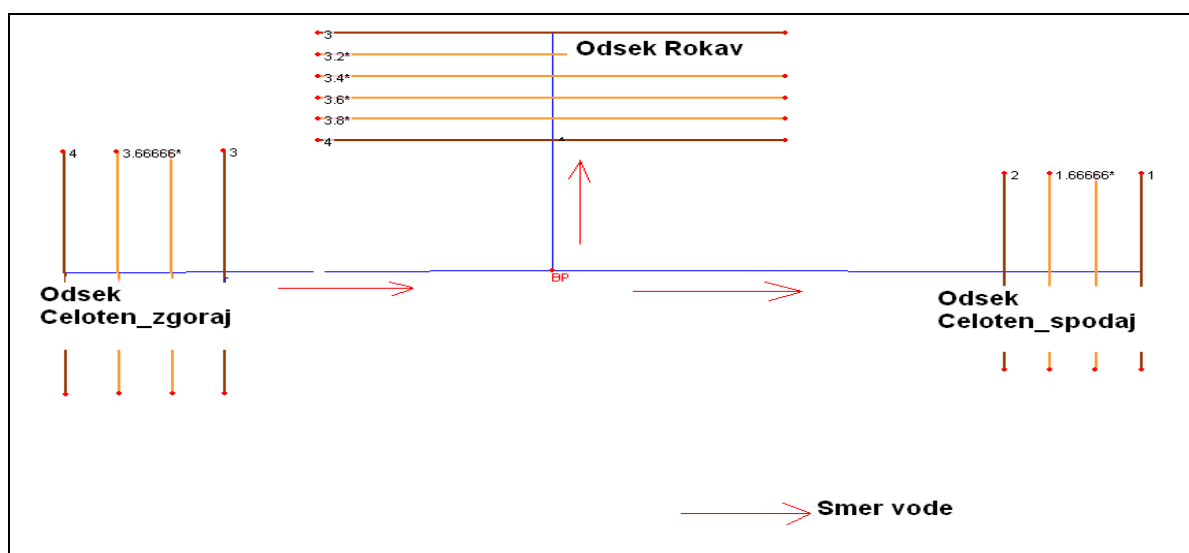
Odsek	Profil	Totalni pretok (m <sup>3</sup> /s)	Izračunana gladina vode (m)	Opazovana gladina vode (m)	Manningov koeficient hrapavosti $n_g$
Celoten	5	0.2	0.3352	0.3365	0.03
Celoten	4	0.2	0.3329	0.3313	0.009
Celoten	3	0.2	0.3296	0.3295	0.025
Celoten	2	0.2	0.3267	0.3267	0.013
Celoten	1	0.2	0.3264	0.3264	0.003

Preglednica 19 prikazuje dobljene rezultate, iz katerih je razvidno, da vrednosti koeficientov niso ravno v skladu s pričakovanji (višje vrednosti od pričakovanih). To lahko pojasnimo s tem, da smo z višjimi vrednostmi koeficienta zajeli tudi vpliv drugih dejavnikov, med katerimi ima največji vpliv neravno dno ( $\pm 2$ -3 mm), ki je posledica tehničnih omejitev. Če primerjamo izračunane in opazovane gladine lahko vidimo, da je ujemanje zelo dobro in odstopanje ni višje od 1.6 mm. Z dobljenimi rezultati smo zadovoljni. Ugotovljene oziroma umerjene vrednosti koeficienta hrapavosti se je uporabilo v nadaljnjih izračunih.

### 5.2.1 Scenarij 1

#### Simulacija s HEC-RAS-om: delitev toka.

V tem primeru je bilo potrebno poznati oba robna pogoja in začetne pretoke v obeh stranskih vejah (odseka Celoten\_spodaj in Rokav – glej sliki 39 in 40). Kot robna pogoja smo vzeli izmerjene gladine, kjer se je v odseku Rokav vzela povprečna izmerjena gladina  $((R1 + R2 + R3)/3)$ , v odseku Celoten\_spodaj pa je SRP predstavljala izmerjena gladina K5. Za prvi izračun smo predpostavili, da gre v vsak odsek po 50 % dotočne količine  $Q_{na}$ . Račun smo izvedli najprej z uporabo energijske, nato pa še z uporabo dinamične enačbe.



**Slika 39:** Prikaz odsekov in prečnih profilov pri izvedbi 1D matematičnega modela scenarija 1

Izračun z 1D modelom nam da naslednje rezultate

- Uporaba energijske enačbe

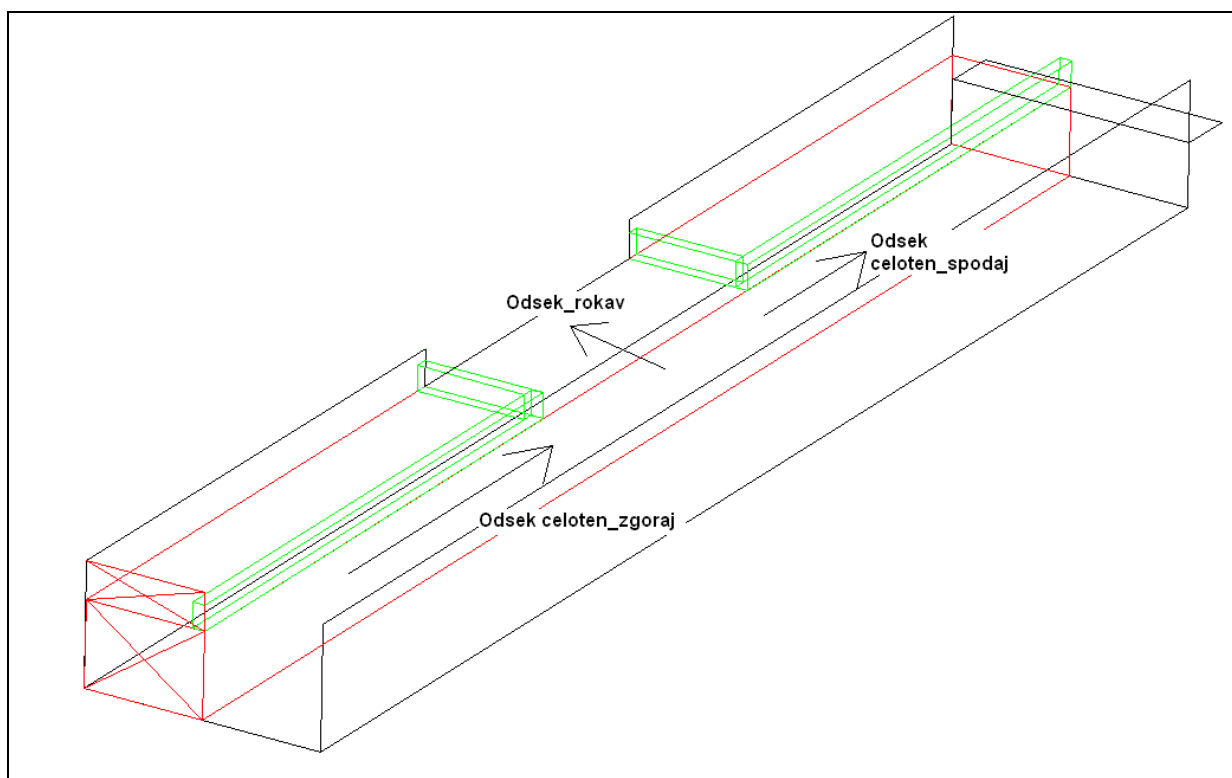
Odsek	Skupni pretok (m <sup>3</sup> /s)	Gladina vode (m)	Hitrosti v kanalu (m/s)	Froudovo število	Rezultati meritev gladin vode	Napaka [%]
Celoten_zgoraj	0.0650	0.4047	0.3213	0.1612	0.4150	2.4819
Celoten_zgoraj	0.0550	0.3962	0.2777	0.1408	0.4060	2.4138
Celoten_zgoraj	0.0500	0.3910	0.2558	0.1306	0.4018	2.6879
Celoten_zgoraj	0.0400	0.3821	0.2094	0.1082	0.3919	2.5006
Celoten_zgoraj	0.0650	0.4046	0.3214	0.1613	ni meritve	/
Celoten_zgoraj	0.0550	0.3961	0.2778	0.1409	ni meritve	/

Celoten_zgoraj	0.0500	0.3909	0.2559	0.1306	ni meritve	/
Celoten_zgoraj	0.0400	0.3820	0.2095	0.1082	ni meritve	/
Rokav	0.0325	0.4119	0.3797	0.4867	0.4107	0.2922
Rokav	0.0275	0.4033	0.3732	0.5155	0.4018	0.3733
Rokav	0.0250	0.3994	0.3658	0.5247	0.3974	0.5033
Rokav	0.0200	0.3907	0.3555	0.5621	0.3882	0.6440
Rokav	0.0325	0.4109	0.3863	0.4994		
Rokav	0.0275	0.4020	0.3823	0.5345		
Rokav	0.0250	0.3981	0.3761	0.5471		
Rokav	0.0200	0.3889	0.3714	0.6003		
Celoten_spodaj	0.0325	0.4072	0.1597	0.0799	ni meritve	/
Celoten_spodaj	0.0275	0.3981	0.1382	0.0699	ni meritve	/
Celoten_spodaj	0.0250	0.3926	0.1274	0.0649	ni meritve	/
Celoten_spodaj	0.0200	0.3831	0.1044	0.0539	ni meritve	/
Celoten_spodaj	0.0325	0.4072	0.1597	0.0799		
Celoten_spodaj	0.0275	0.3981	0.1382	0.0699		
Celoten_spodaj	0.0250	0.3926	0.1274	0.0649		
Celoten_spodaj	0.0200	0.3831	0.1044	0.0539		

○ Uporaba dinamične enačbe

Odsek	Skupni pretok (m <sup>3</sup> /s)	Gladina vode (m)	Hitrosti v kanalu (m/s)	Froudovo število	Rezultati meritev gladin vode	Napaka [%]
Celoten_zgoraj	0.0650	0.3996	0.3254	0.1643	0.4150	3.7108
Celoten_zgoraj	0.0550	0.3924	0.2804	0.1429	0.4060	3.3498
Celoten_zgoraj	0.0500	0.3879	0.2579	0.1322	0.4018	3.4594
Celoten_zgoraj	0.0400	0.3800	0.2106	0.1090	0.3919	3.0365
Celoten_zgoraj	0.0650	0.3994	0.3255	0.1644	ni meritve	/
Celoten_zgoraj	0.0550	0.3923	0.2805	0.1429	ni meritve	/
Celoten_zgoraj	0.0500	0.3878	0.2579	0.1322	ni meritve	/
Celoten_zgoraj	0.0400	0.3800	0.2106	0.1091	ni meritve	/
Rokav	0.0325	0.4119	0.3797	0.4867	0.4107	0.2922
Rokav	0.0275	0.4033	0.3732	0.5155	0.4018	0.3733
Rokav	0.0250	0.3994	0.3658	0.5247	0.3974	0.5033
Rokav	0.0200	0.3907	0.3555	0.5621	0.3882	0.6440
Rokav	0.0325	0.4109	0.3863	0.4994		
Rokav	0.0275	0.4020	0.3823	0.5345		
Rokav	0.0250	0.3981	0.3761	0.5471		
Rokav	0.0200	0.3889	0.3714	0.6003		

Celoten_spodaj	0.0325	0.4072	0.1597	0.0799	ni meritve	/
Celoten_spodaj	0.0275	0.3981	0.1382	0.0699	ni meritve	/
Celoten_spodaj	0.0250	0.3926	0.1274	0.0649	ni meritve	/
Celoten_spodaj	0.0200	0.3831	0.1044	0.0539	ni meritve	/
Celoten_spodaj	0.0325	0.4072	0.1597	0.0799		
Celoten_spodaj	0.0275	0.3981	0.1382	0.0699		
Celoten_spodaj	0.0250	0.3926	0.1274	0.0649		
Celoten_spodaj	0.0200	0.3831	0.1044	0.0539		



**Slika 40:** Prikaz scenarija 1 v 3D prostoru

V kolikor bi primerjali gladine, bi rekli, da je izračun dober, saj je razlika v gladinah v obeh primerih manjša od 2.5 % (z uporabo energijske enačbe so rezultati celo nekoliko boljši), kar je zadovoljivo. Če primerjamo pretoke pa vidimo, da je razdelitev ostala takšna, kot smo jo predpostavili na začetku. To je vodilo k povečanim hitrostim v odseku Rokav in posledično k višjim pretokom v tem odseku.

Rezultati izračuna povedo, da je bila energijska črta v odseku Rokav višja od energijske črte v odseku Celoten\_spodaj. Ker je bil med izračunom vključen optimizator toka, je napaka lahko samo ena, in sicer v dopustni toleranci, ki je bila postavljena na 2 cm.

**Preglednica 20:** Izmerjeni pretoki pri scenariju 1

Qna [l/s]	Q <sub>rokav</sub> [l/s]	Q <sub>celoten_spodaj</sub> [l/s]
40	10.2	29.8
50	13.5	36.5
55	15.2	39.8
65	18.8	46.2

Sedaj pa se postavi vprašanje na kakšno vrednost znižati dopustno toleranco? Slednje vprašanje je pogojeno z energijo v prvem profilu odseka Rokav in Celoten\_spodaj. Kajti bolj kot bomo nižali toleranco bolj bosta energiji v teh profilih enaki. Posledično se bo energija v odseku Rokav nižala zaradi nižanja hitrosti in s tem nižanja pretoka, obraten proces pa se bo izvajal v odseku Celoten\_spodaj. Če toleranco v obravnavanem primeru precej znižamo ( $\pm 4$  mm), po izračunu dobimo, da v odseku Rokav teče pretok 1 l/s, kar pa je nelogičen rezultat. To vodi k temu, da je v našem primeru očitno energija v rokavu višja. Naslednje vprašanje, ki se postavi je, za koliko je višja energija v odseku Rokav oziroma kolikšna naj bo dopustna toleranca. Za slednje vprašanje ni direktnega odgovora, in ker gre za ostro delitev toka (kot je  $90^\circ$ ), ugotavljamo, da je v takšnih primerih bolj primerno uporabiti bočni preliv, pa čeprav dejansko ne gre za preliv, temveč za odliv iz struge.

Scenarij 1 sprva nismo imeli namena računati kot bočni preliv, zato tudi nismo izvajali regresijske analize dobljenih meritev. Glede na prej ugotovljeno je tudi za takšne primere očitno bolj primerno uporabiti bočni preliv, in zaradi tega bomo na tem mestu podali analizo meritev in rezultate izračuna.

**Preglednica 21:** Preglednica izmerjenih vrednosti za scenarij 1

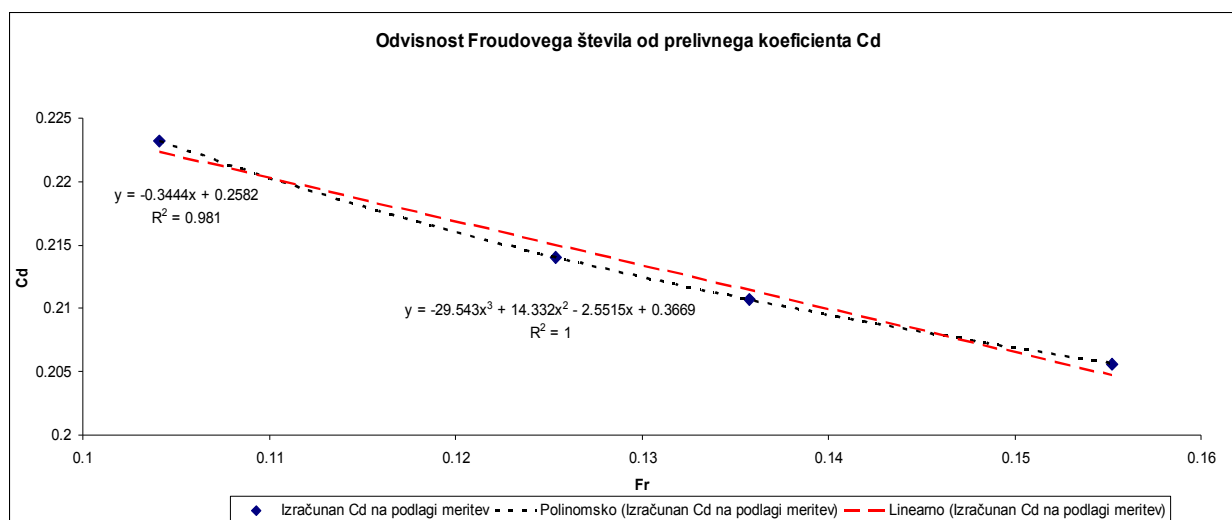
Qna [l/s]	K1 [cm]	K2 [cm]	K3 [cm]	K4 [cm]	K5 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]
40	39.19	38.74	38.59	38.36	38.32	3.7	3.81	4.24
50	40.18	39.72	39.51	39.4	39.27	4.58	4.74	5.23
55	40.6	40.18	40	39.75	39.8	4.95	5.2	5.75
65	41.5	41.13	40.97	40.83	40.73	5.83	6.06	6.76

R1 [cm]	R2 [cm]	R3 [cm]	Qb.p. [l/s]	Qb.p. [m <sup>3</sup> /s]	Qb.p./Qna [%]	(h-p)povp [cm]	(h-p)povp [m]
3.65	3.95	4.24	10.2	0.0102	25.5	3.823018831	0.038230188
4.34	4.84	5.23	13.5	0.0135	27	4.739625806	0.047396258

4.6	5.34	5.7	15.2	0.0152	27.63636364	5.183618828	0.051836188
5.37	6.26	6.66	18.8	0.0188	28.92307692	6.070539174	0.060705392

(h-p)povp-ar.sr. [cm]	(h-p)povp-ar.sr. [m]	Cd	v	Fr
3.916666667	0.039166667	<b>0.2232</b>	0.2041337	<b>0.1041</b>
4.85	0.0485	<b>0.214</b>	0.24888	<b>0.1254</b>
5.3	0.053	<b>0.2107</b>	0.270936	<b>0.1358</b>
6.216666667	0.062166667	<b>0.2056</b>	0.313253	<b>0.1553</b>

Pri tej analizi smo prišli do želenega prelivnega koeficienta Cd, ki znaša od 0.2 do 0.22 (za prelive brez višine krone - torej odtok v isti ravnini, je precej malo priporočenih in evidentiranih vrednosti v literaturi). Ujemanje Froudovega števila in prelivnega koeficienta Cd je za dani primer zelo dobro ( $R^2 = 1$ , glej grafikon 14). Na tem mestu je zopet smiselno omeniti trend spreminjanja prelivnega koeficienta Cd v odvisnosti od Froudovega števila, ki je podoben kot pri ostrorobih prelivih, negativen.

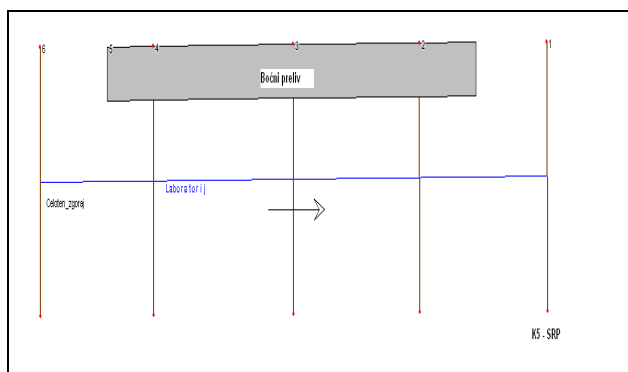


**Grafikon 14:** Regresijska analiza bočnega preliva brez višine: scenarij 1

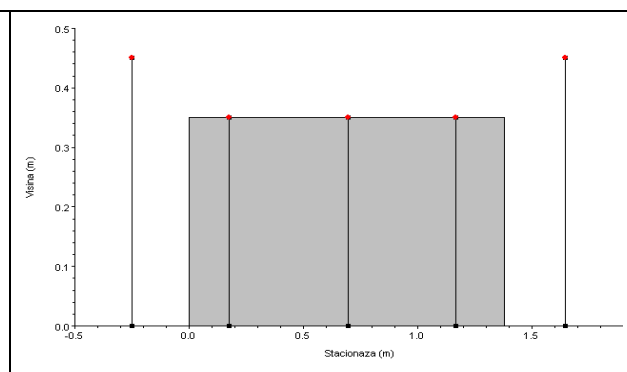
**Preglednica 22:** Napaka pri izračunu s trendno črto za scenarij 1

Izračunan Cd na podlagi meritev	Fr	Izračunan Cd glede na enačbo trendne črte	Napaka [%]
0.223234816	0.104110034	0.223268903	0.015269581
0.214037119	0.125357579	0.2140729	0.016716943
0.210700425	0.135759157	0.210737129	0.017420078
0.205630893	0.155251821	0.205669492	0.018770794

Izračunane vrednosti prelivnih koeficientov  $C_d$  smo uporabili pri simulaciji 1D toka s programskim paketom HEC-RAS (glej sliki 41 in 42), kjer smo za SRP pogoj vzeli znano gladino (K5) in umerjene vrednosti Manningovega koeficienta  $n_G$ .



Slika 41: Tlorisni prikaz bočnega preliva v programu HEC-RAS



Slika 42: Prečni prerez bočnega preliva v programu HEC-RAS

Preglednica 23: Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti scenarija 1<sup>11</sup>

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd
40.0000	39.1900	3.7000	3.8100	4.2400	38.3200	10.2000	0.2232
50.0000	40.1800	4.5800	4.7400	5.2300	39.2700	13.5000	0.2140
55.0000	40.6000	4.9500	5.2000	5.7500	39.8000	15.2000	0.2107
65.0000	41.5000	5.8300	6.0600	6.7600	40.7300	18.8000	0.2056

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd HEC <sup>12</sup>
40.0000	38.2700	3.2700	3.2900	3.3100	38.3100	8.1000	0.9888
50.0000	39.1900	4.1900	4.2200	4.2500	39.2600	11.3000	0.9481
55.0000	39.7100	4.7200	4.7600	4.7900	39.8100	13.3000	0.9333
65.0000	40.5900	5.6000	5.6600	5.7000	40.7200	16.7000	0.9108

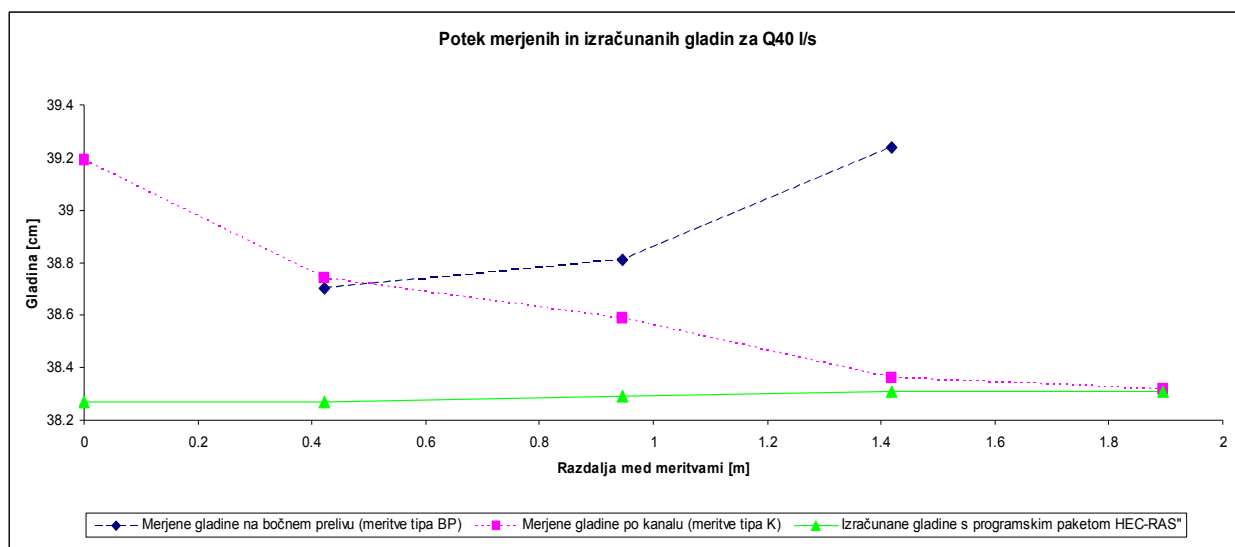
Napaka Qb.p. [%]	Delež prelitega pretoka [%]	K5/p
20.5882	25.5000	1.0946
16.2963	27.0000	1.1217
12.5000	27.6364	1.1374
11.1702	28.9231	1.1634

<sup>11</sup> Vrednosti, ki imajo sivo ozadje, predstavljajo izmerjene vrednosti.

<sup>12</sup> Cd HEC je zaradi načina izračuna v programu HEC-RAS (glej poglavje 3.2.1 1D matematični model HEC-RAS), Cd dobljen s statistično analizo pomnožen z  $(2g)^{0.5}$ .



Primerjamo lahko tako gladine kot tudi pretoke. Izračunane gladine so glede na izmerjene vrednosti v povprečju za 1 cm nižje, kar ne moremo pripisati nihanju dna, saj smo ta vpliv precej dobro zajeli z Manningovim koeficientom (odstopanje gladin za  $\max \pm 1.6$  mm), ampak vplivu lokalne motnje na samem bočnem prelivu (vpliv zastoje točke, ki povzroči zajezbo). Ta je povzročila povišane prelivne gladine od meritve K5, ki je predstavljala SRP (glej grafikon 15). Posledično smo dobili nižjo izračunano bočno prelivanje. Ugotavljamo, da se z višanjem  $Q_{na}$  manjša napaka med izračunanim in izmerjenim bočnim prelivom (napaka iz 20 % pade na 11 % zaradi manjšega vpliva lokalne motnje oziroma večjega vpliva lokalne motnje na meritev K5). Glede na nekoliko nižje izračunane gladine, ki posledično vplivajo na količino bočnega preliva, bi bilo smiselno slednji vpliv znižati s povišanjem prelivnega koeficienta Cd. V želji po čim boljšem izračunu se je izvedlo še nekaj dodatnih izračunov s povišanim prelivnim koeficientom Cd.



**Grafikon 15:** Prikaz vpliva zastoje točke (razlog za napačen izračun) za scenarij 1, primer 1 (kota preliva je na 35. cm)

**Preglednica 24:** Primerjava izračunanih pretokov za višje prelivne koeficiente Cd za scenarij 1

Cd=1.9

Qna [l/s]	Qb.p. [l/s]	Napaka Qb.p. [%]
40	15.4	50.9804
50	22.3	65.1852
55	26.7	75.6579
65	34.4	82.9787

Cd=1.5

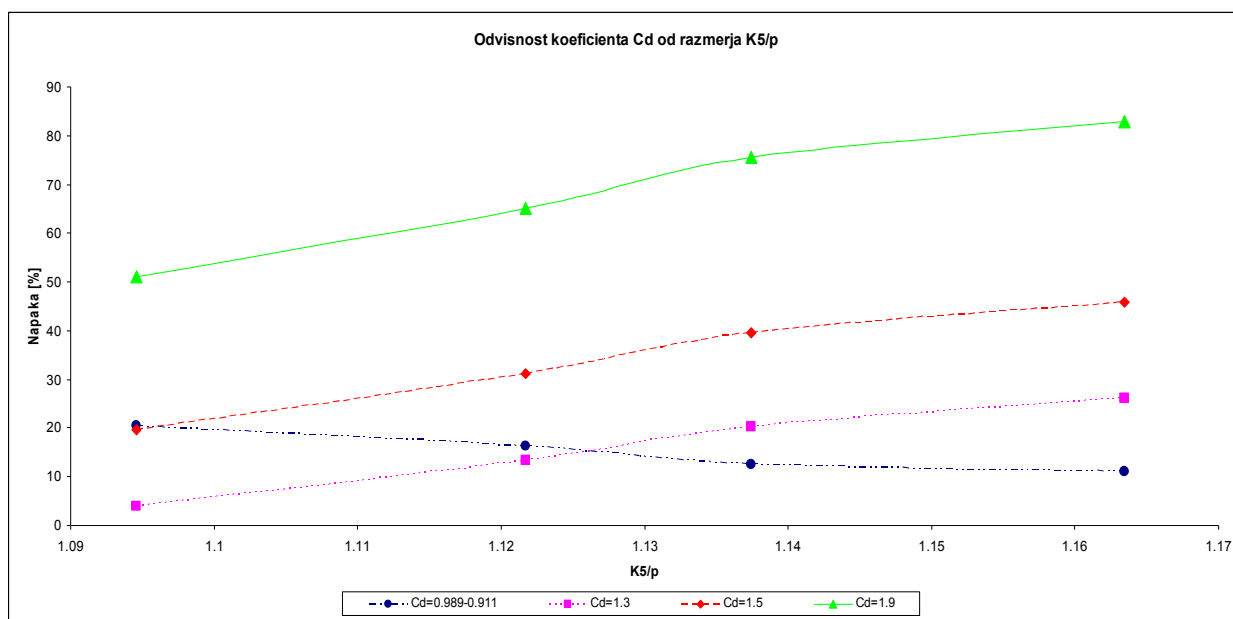
Qna [l/s]	Qb.p. [l/s]	Napaka Qb.p. [%]
40	12.2	19.6078
50	17.7	31.1111
55	21.2	39.4737
65	27.4	45.7447

Cd=1.3

Qna [l/s]	Qb.p. [l/s]	Napaka Qb.p. [%]
40	10.6	3.9216
50	15.3	13.3333
55	18.3	20.3947
65	23.7	26.0638

Vidimo lahko, da do neke vrednosti prelivnega koeficienta Cd napaka z večanjem  $Q_{na}$  pada, od določene vrednosti Cd pa se trend obrne in začne napaka z večanjem  $Q_{na}$  rasti. Tako je smiselno uporabiti različne prelivne koeficiente Cd v želji, da bi dobili čim boljše izračunane bočne prelive. V ta namen se je zrisal graf odvisnosti  $K5/p$  in napake bočnega pretoka, ki za razmerja  $K5/p$  od 1.1 do 1.16, uporabljeno geometrijo, višjih gladin na bočnem prelivu zaradi lokalne motnje oziroma zastojne točke in dobljen interval Froudovih števil, prikazuje prelivni koeficient Cd, s katerim v obravnavanem primeru dobimo najmanjšo napako pri izračunu bočnega pretoka.

Ugotavljamo (glej grafikon 16), da lahko vpliv zastojne točke s pametnim izborom prelivnega koeficienta Cd dokaj dobro eliminiramo in tako dobimo precej dobre rezultate bočnega pretoka (napaka manjša od 13 %). Vidimo pa lahko tudi, da z napačno oceno prelivnega koeficienta oziroma z napačno vzetim SRP dobimo precej napačne rezultate. Slednje govori v prid raziskovanju in iskanju bolj natančnih vrednosti prelivnih koeficientov in vplivu krilnih zidov za različne geometrijske in natočen razmere, saj je uporabnost predstavljenih rezultatov zopet vezana na analogne pogoje (geometrija, Froudova števila,  $h_1/p$ , prelivna višina,  $K5/p$ , SRP – vpliv zajezbe), pod katerimi so se izvajale meritve.



**Grafikon 16:** Vpliv različnih prelivnih koeficientov Cd na napako med izračunanim in izmerjenim bočnim pretokom za scenarij 1

Glede na predstavljene rezultate sam scenarij ni ravno najboljši za primerjavo izračuna z dinamično in energijsko metodo, ker je očitno v takšnih primerih bolj primerno uporabiti bočni preliv, pri katerem pa lahko kot alternativo uporabimo, da se prelita voda zlije v dodatno vejo in na takšen način simuliramo vozlišče oziroma delitev toka.

### 5.2.2 Scenarij 2

Scenarij 2 je hkrati tudi osrednji scenarij diplomske naloge. Po obdelavi merjenih podatkov bomo preverili kakovost 1D in 2D izračuna.

Za 1D izračun bomo uporabil funkcijo bočnega preliva, kjer se bodo za prelivne koeficiente Cd uporabile prej izračunane vrednosti, kot SRP pa bomo vzeli meritev K5. Analize se bodo izvedle tako za široki prag kot tudi za ostrorobi preliv (pri slednjemu bo velikost prelivnega koeficienta višja).

ID izračun s programskim paketom HEC-RAS – scenarij 2, primer 1 in primerjava z meritvami

Vnos podatkov oziroma geometrije je bil analogen tako kot pri scenariju 1. Sliki 41 in 42, ki prikazujeta tloris in prečni prerez poteka bočnega preлива, veljata tudi za ta primer (scenarij 2, primer 1 in 2), le višina preлива ni 0.35 m, ampak je 0.4 m (slika 42, slika 41 je popolnoma enaka).

**Preglednica 25:** Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 2, primer 1<sup>13</sup>

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd
45.0000	42.4000	1.9500	2.0600	2.1000	41.4600	6.6500	0.3822
48.0000	42.7200	2.1200	2.2600	2.3000	41.8600	7.5300	0.3781
50.0000	42.8600	2.3200	2.4200	2.4600	41.8900	8.5000	0.3822
55.0000	43.2000	2.6500	2.7900	2.8200	42.2400	10.4000	0.3799
60.0000	43.5800	2.9400	3.1000	3.1700	42.7500	12.5000	0.3884
65.0000	43.9400	3.2700	3.3600	3.5100	43.1200	14.5000	0.3923

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd HEC
45.00	41.44	1.44	1.45	1.45	41.45	4.00	1.692813291
48.00	41.83	1.83	1.84	1.84	41.85	5.70	1.674778521
50.00	41.85	1.85	1.87	1.87	41.88	5.90	1.693050808
55.00	42.21	2.21	2.22	2.24	42.25	7.60	1.682779968
60.00	42.70	2.70	2.73	2.75	42.76	10.60	1.720490631
65.00	43.04	3.05	3.09	3.11	43.13	12.90	1.737688071

Napaka Qb.p. [%]	K5/p
39.85	1.03625
24.30	1.04625
30.59	1.047
26.92	1.05625
15.20	1.069
11.03	1.07825

Podobno kot pri scenariju 1 lahko tudi tukaj primerjamo tako gladine kot tudi pretoke. Zopet ugotavljamo, da so izračunane gladine glede na izmerjene vrednosti nižje (do 1 cm), kar lahko zopet pripišemo vplivu zastojne točke, ki je povzročila zajezbo (povišana prelivna gladina na

<sup>13</sup> Vrednosti, ki imajo sivo ozadje predstavljajo, izmerjene vrednosti.

delu bočnega preliva). Posledično smo zaradi nižjih gladin dobili tudi nižjo izračunano bočno prelivanje. Analogno s scenarijem 1 tudi v tem scenariju ugotavljamo, da se z višanjem  $Q_{na}$  manjša napaka med izračunanim in izmerjenim bočnim prelivom (napaka iz 40 % pade na 11 %). Glede na nekoliko nižje izračunane gladine, ki posledično vplivajo na količino bočnega preliva, bi bilo smiselno slednji vpliv znižati s povišanjem prelivnega koeficienta  $C_d$ . V želji po čim boljšem izračunu smo naredili še nekaj simulacij s povišanim prelivnim koeficientom  $C_d$ .

**Preglednica 26:** Primerjava izračunanih pretokov za višje prelivne koeficiente  $C_d$  za scenarij 2, primer 1

$C_d = 2.8$

$Q_{na}$ [l/s]	$Q_{b.p.}$ [l/s]	Napaka $Q_{b.p.}$ [%]
45	6.6	0.7519
48	9.5	26.1620
50	9.7	14.1176
55	12.6	21.1538
60	17.1	36.8000
65	20.5	41.3793

$C_d = 2.6$

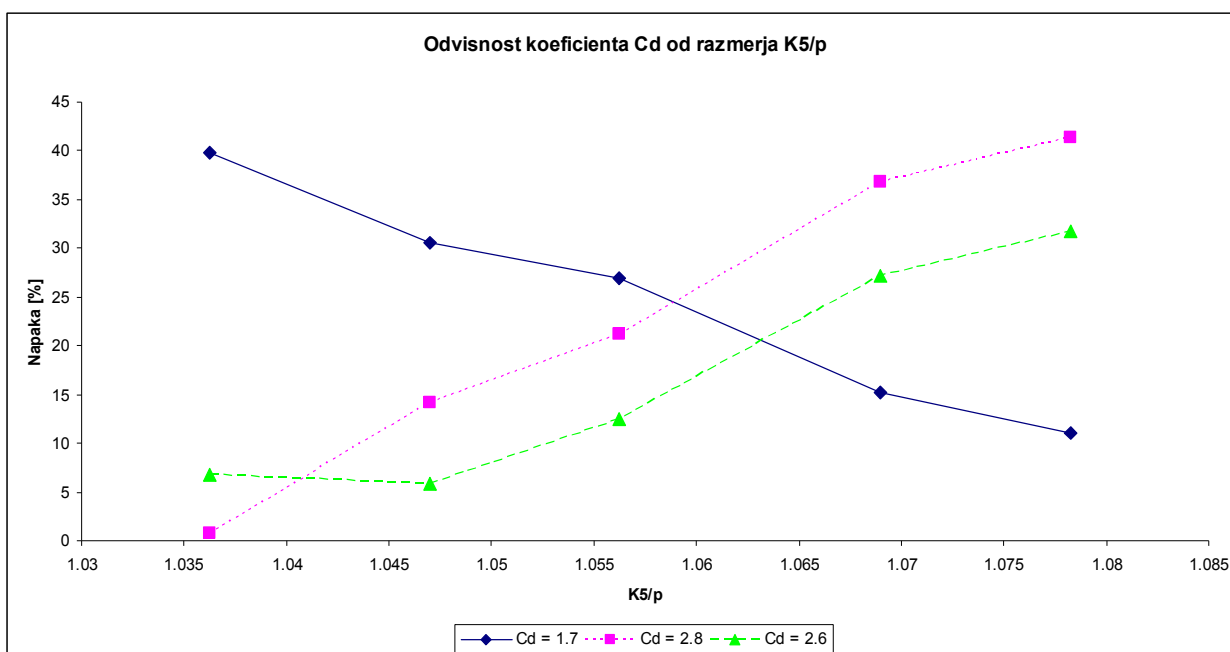
$Q_{na}$ [l/s]	$Q_{b.p.}$ [l/s]	Napaka $Q_{b.p.}$ [%]
45	6.2	6.7669
48	8.8	16.8659
50	9	5.8824
55	11.7	12.5000
60	15.9	27.2000
65	19.1	31.7241

Vidimo lahko, da za višje vrednosti prelivnega koeficienta  $C_d$  (glej preglednico 26) napaka z večanjem  $Q_{na}$  raste. Za nižje vrednosti prelivnega koeficienta  $C_d$ , pa je trend negativen in začne napaka z večanjem  $Q_{na}$  padati. Tako je za obravnavani primer zopet smiselno uporabiti spremenljive prelivne koeficiente  $C_d$  v želji, da bi dobili čim boljše izračunane bočne prelive. Zato se je zrisal graf odvisnosti  $K5/p$  in napake bočnega pretoka, ki za razmerja  $K5/p$  od 1.04 do 1.08, uporabljeno geometrijo ter interval Froudovih števil (posledično tudi za razmerja  $h_1/p$ ), prikazuje prelivni koeficient, s katerim v obravnavanem primeru dobimo najmanjšo napako pri izračunu bočnega pretoka.

Zopet lahko potrdimo besede iz scenarija 1, kjer lahko s pravilnim spreminjanjem prelivnega koeficienta dobimo precej dobre rezultate bočnega pretoka (napaka manjša od 18 %), rezultati

gladin pa so nekoliko slabši (vpliv zastoje točke, ki povzroča zaježbo). Potek krivulj na grafikonu 17 je praktično zrcalen, kjer imata krivulji za  $C_d = 2.6$  in  $2.8$  pozitiven trend, krivulja  $C_d = 1.7$  pa negativen. Edina vrednost, ki precej pade ven iz vzorca, je meritev pri natočnem pretoku  $Q = 48$  l/s, ki bi jo bilo smiselno ponoviti in potrditi njeno vrednost. Zaradi tega je v analizi, ki je prikazana na grafikonu 17 nismo upoštevali. Vrednosti 2.6 in 2.8 sta priporočeni vrednosti za prelivne koeficienta pri prelivih oblike širokega pragu (HEC-RAS, Reference Manual – priporočene vrednosti so od 2.6-3.1), ki pa v našem primeru pri večjih natočnih pretokih ne bi bila dobra izbira (lokalna motnja vedno bolj vpliva tudi na gladino na mestu K5). Tako bi z napačno oceno prelivnega koeficienta dobili precej napačne rezultate.

Slednje zopet govori v prid raziskovanju in iskanju bolj natančnih vrednosti prelivnih koeficientov ter vplivu krilnih zidov za različne geometrijske in natočne razmere, saj je uporabnost predstavljenih rezultatov zopet vezana na analogne pogoje (geometrija, Froudova števila,  $h_1/p$ , prelivna višina,  $K5/hpr$ , vpliv zaježbe), pod katerimi so se izvajale meritve.



**Grafikon 17:** Vpliv različnih prelivnih koeficientov  $C_d$  na napako med izračunanim in izmerjenim bočnim pretokom za scenarij 2, primer 1

1D izračun s programskim paketom HEC-RAS – scenarij 2, primer 2 in primerjava z meritvami

Podobno kot pri scenariju 2 primeru 1, smo tudi za primer 2 istega scenarija opravili izračune z 1D matematičnim programom HEC-RAS, kjer smo uporabili izračunane vrednosti prelivnega koeficienta Cd in dobljene rezultate primerjali z meritvami.

**Preglednica 27:** Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 2, primer 2<sup>14</sup>

K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd
42.4	1.81	1.95	1.99	41.62	10.2000	0.6409
42.72	2.11	2.22	2.25	41.82	11.7000	0.6014
42.86	2.21	2.31	2.36	41.99	12.6000	0.6069
43.2	2.54	2.65	2.75	42.41	14.8000	0.5764
43.58	2.84	2.93	3.09	42.73	17.0000	0.5637
43.9400	3.1700	3.2600	3.46	43.1500	19.1500	0.5391

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd HEC
45.0000	41.5700	1.5700	1.5900	1.6000	41.6100	7.3000	2.8387
48.0000	41.7700	1.7800	1.8000	1.8100	41.8200	8.8000	2.6639
50.0000	41.9400	1.9500	1.9700	1.9900	42.0000	10.2000	2.6882
55.0000	42.3200	2.3300	2.3600	2.3800	42.4000	12.7000	2.5532
60.0000	42.6300	2.6400	2.6800	2.7200	42.7300	15.1000	2.4968
65.0000	43.0300	3.0500	3.1000	3.1400	43.1600	17.9000	2.3878

Napaka Qb.p. [%]	K5/p
28.4314	1.04025
24.7863	1.0455
19.0476	1.05
14.1892	1.06
11.1765	1.06825
6.5274	1.079

Tudi tukaj ugotavljamo, da so izračunane gladine glede na merjene nižje, in sicer do 1 cm. Posledično dobimo nižje bočne pretoke, kjer se zopet pojavi vzorec manjšanja napake, ko se viša natočni pretok Qna (napaka iz 28 % pade na 6.5 %). Ker smo hoteli najti najboljše

<sup>14</sup> Vrednosti, ki imajo sivo ozadje, predstavljajo izmerjene vrednosti.

rezultate obravnavanega primera, smo opravili še nekaj simulacij s povišanim prelivnim koeficientom Cd.

**Preglednica 28:** Primerjava izračunanih pretokov za višje prelivne koeficiente Cd za scenarij 2, primer 2

Cd =3.2

Qna [l/s]	Qb.p. [l/s]	Napaka Qb.p. [%]
45	8.8	13.7255
48	10.6	9.4017
50	12.1	3.9683
55	15.8	6.7568
60	19.2	12.9412
65	23.7	23.7598

Cd =3.3

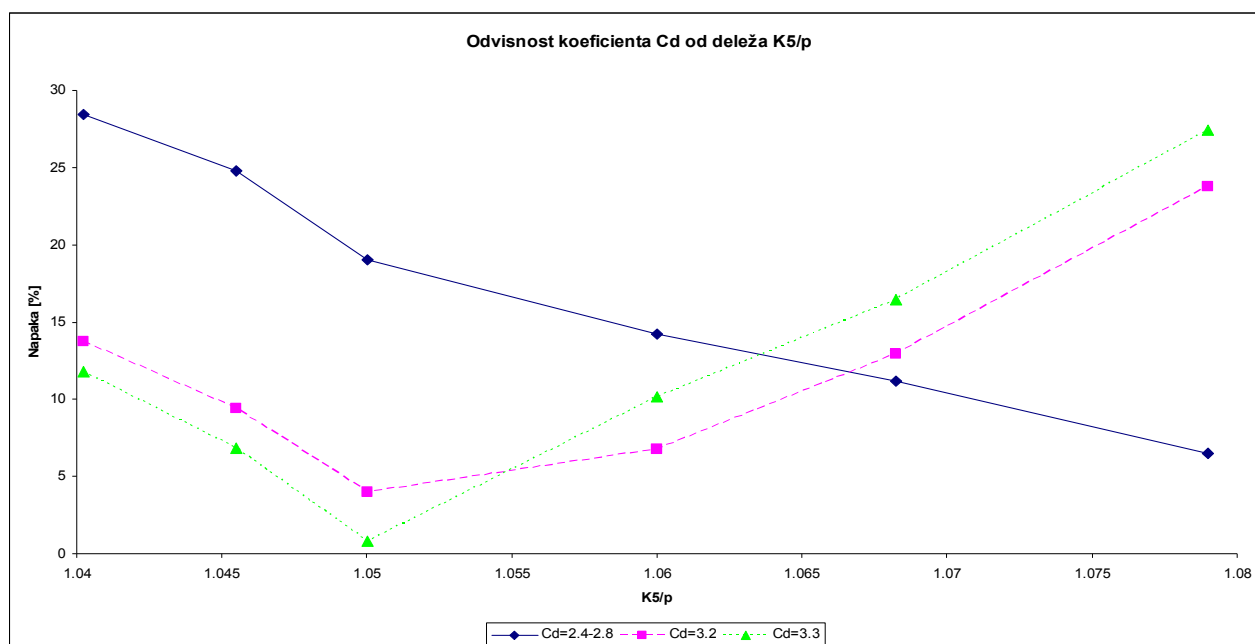
Qna [l/s]	Qb.p. [l/s]	Napaka Qb.p. [%]
45	9	11.7647
48	10.9	6.8376
50	12.5	0.7937
55	16.3	10.1351
60	19.8	16.4706
65	24.4	27.4151

Globalno gledano je trend napake pri višjih vrednostih Cd (priporočene vrednosti) pozitiven, kar pomeni, da se napaka v višanem Qna povečuje. Če smo bolj natančni: do Qna = 50 l/s pada, nato se trend obrne in začne napaka naraščati. Tako se je zopet zrisal graf odvisnosti razmerja  $K5/p$  od napake bočnega pretoka (glej grafikon 18) v želji, da bi za dani primer dobili najboljše prelivne koeficiente Cd.

V tem primeru bi s spremenljivim prelivnim koeficientom lahko dosegli to, da napaka ne bi bila višja od 15 %, kar bi predstavljalo soliden rezultat. Višji vrednosti prelivnega koeficienta Cd (3.2 in 3.3), ki smo ju uporabili, sta priporočeni vrednosti prelivnega koeficienta pri ostrorobnih prelivnih oblikah (HEC-RAS, Reference Manual – priporočene vrednosti so od 3.2 do 3.3), ki pa v našem primeru pri večjih natočnih pretokih ne bi bila dobra izbira (napaka bi bila tudi do 30 %).

Rezultati so zopet vezani na analogne pogoje (geometrija, Froudova števila,  $h_1/p$ , prelivna višina,  $K5/p$ , SRP pod vplivom zajezbe), pod katerimi smo izvajali meritve.

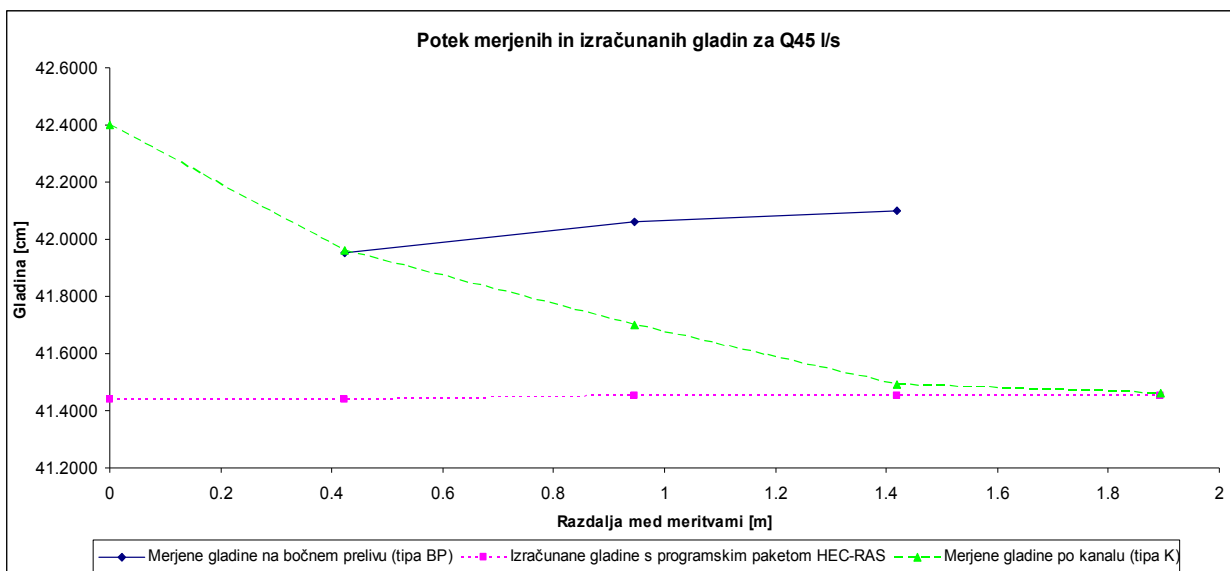




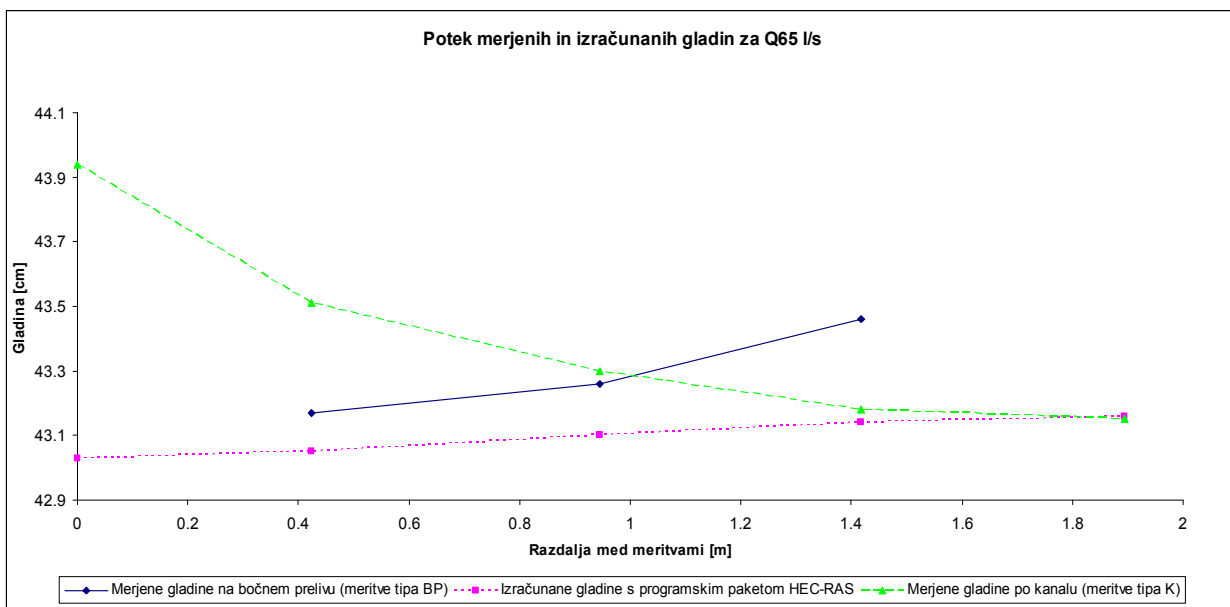
**Grafikon 18:** Vpliv različnih prelivnih koeficientov Cd na napako med izračunanim in izmerjenim bočnim pretokom za scenarij 2, primer 2

Če povzamemo dobljene rezultate 1D izračuna obeh primerov scenarija 2 lahko rečemo, da so vrednosti prelivnih koeficientov, ki jih priporočajo avtorji publikacij programskega paketa HEC-RAS višje od tistih, ki smo jih izračunali na podlagi meritev. Višje vrednosti prelivnih koeficientov so nam prav prišle pri nižjih razmerjih  $K5/p$  oziroma nižjih natočnih pretokih (SRP ni bil tako močno pod vplivom lokalne motnje), pri višjih pa bi naredili precejšnjo napako. Rezultati izračunanih gladin so bili vedno nižji od izmerjenih (pri primerih z višjimi razmerji  $K5/p$  je bila ta razlika manjša in obratno pri nižjih razmerjih  $K5/p$ ), kar je posledica dejstva, da je na območju bočnega preliva prišlo do določenih lokalnih motenj oziroma lahko komentiramo, da smo imeli opravka s vplivom spodnje vode, ki jo je uporabljena izvedba krilnih zidov povzročala in jo z 1D modelom lahko zajamemo na dva načina (glej grafikona 19 in 20). V kolikor imamo podatek o gladinah, ki do določene mere vsebujejo vpliv lokalne motnje (kot v našem primeru – gladine na delu preliva so bile pod vplivom zajeze), in želimo vpliv teh motenj kar se da zmanjšati, je ena možnost z uporabo višjih, priporočenih, vrednosti prelivnih koeficientov Cd (v našem primeru se je kot dobra rešitev izkazala prilagajanje prelivnega koeficienta Cd glede na razmerje  $K5/p$  oziroma natočnega pretoka) ali pa za SRP postavimo kar prelivno višino. Problem slednje rešitve je v tem, da ponavadi nimamo podatka o koti te gladine in jo pravzaprav hočemo izračunati. Tako nam praktično ostane

samo iskanje najprimernejšega prelivnega koeficienta  $C_d$ , ki pa ga je brez izvedenih meritev praktično nemogoče pravilno definirati.



**Grafikon 19:** Primerjava izračunanih in merjenih gladin (tipa BP in K) za scenarij 2, primer 1 pri razmerju  $K5/p = 1.036$  (višina preliva je na 40. cm)



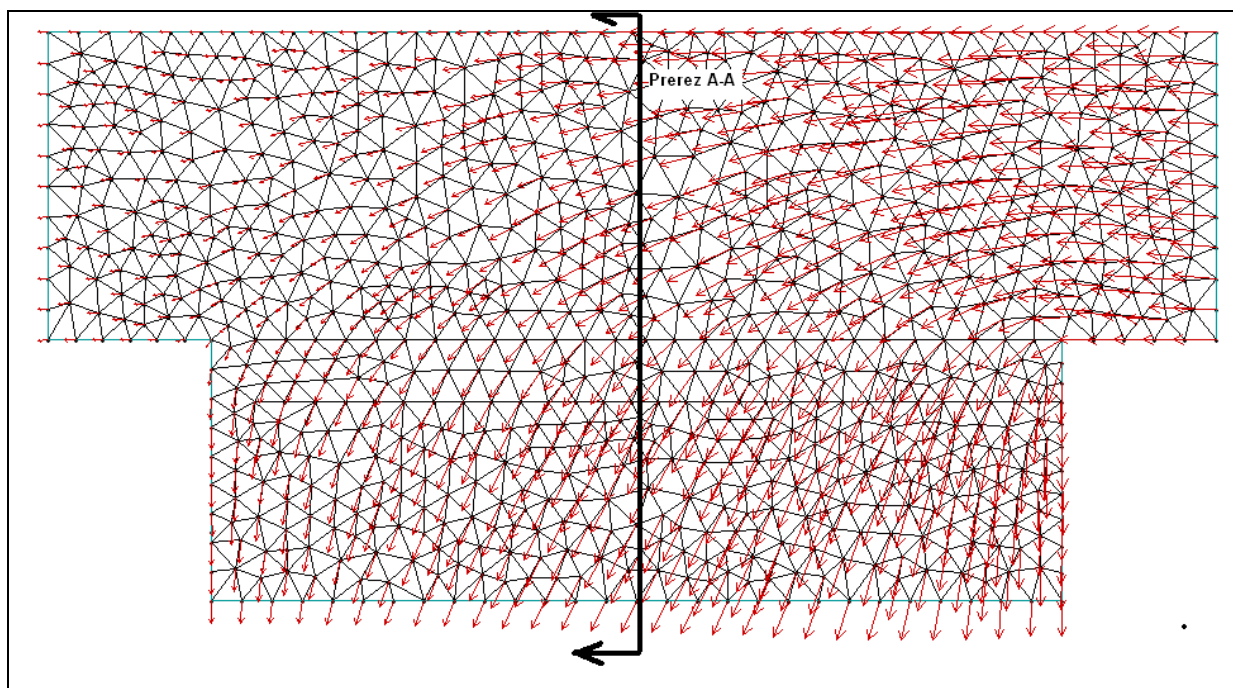
**Grafikon 20:** Primerjava izračunanih in merjenih gladin (tipa BP in K) za scenarij 2, primer 2 pri razmerju  $K5/p = 1.08$  (višina preliva je na 40. cm)

### 2D izračun s programskim paketom AquaDyn – scenarij 2, primer 1 in primerjava z meritvami

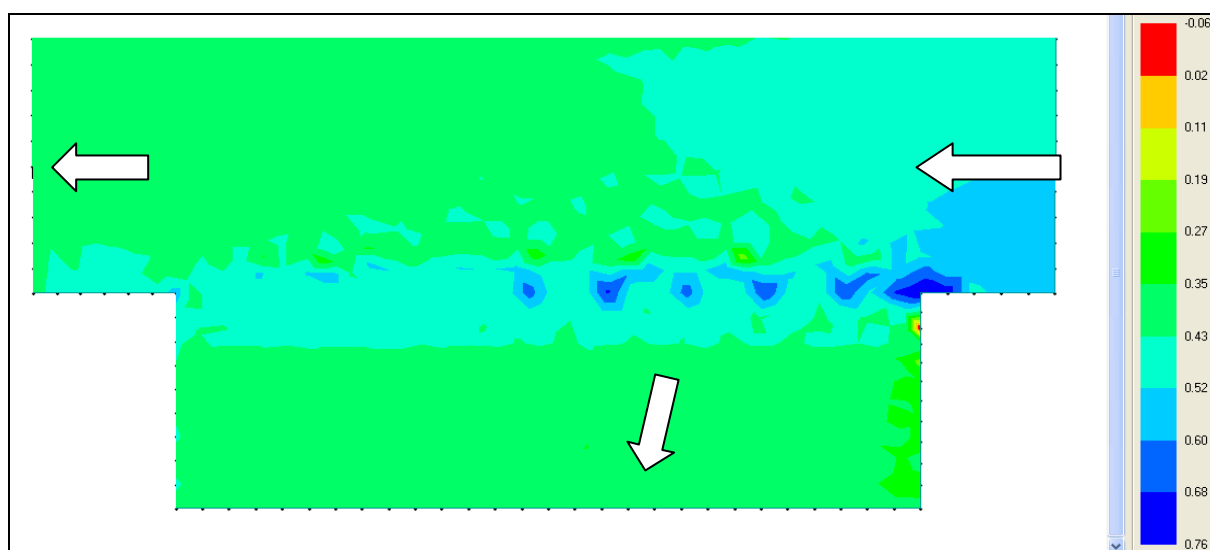
Glede na vse meritve in 1D izračune smo hoteli preveriti tudi, kako dobro lahko primer bočnega preлива modeliramo z 2D modelom. Izbrali smo si matematični paket AquaDyn, izračun pa se je izvedel za natočni pretok  $Q_{na} = 65 \text{ l/s}$ .

#### Izračun

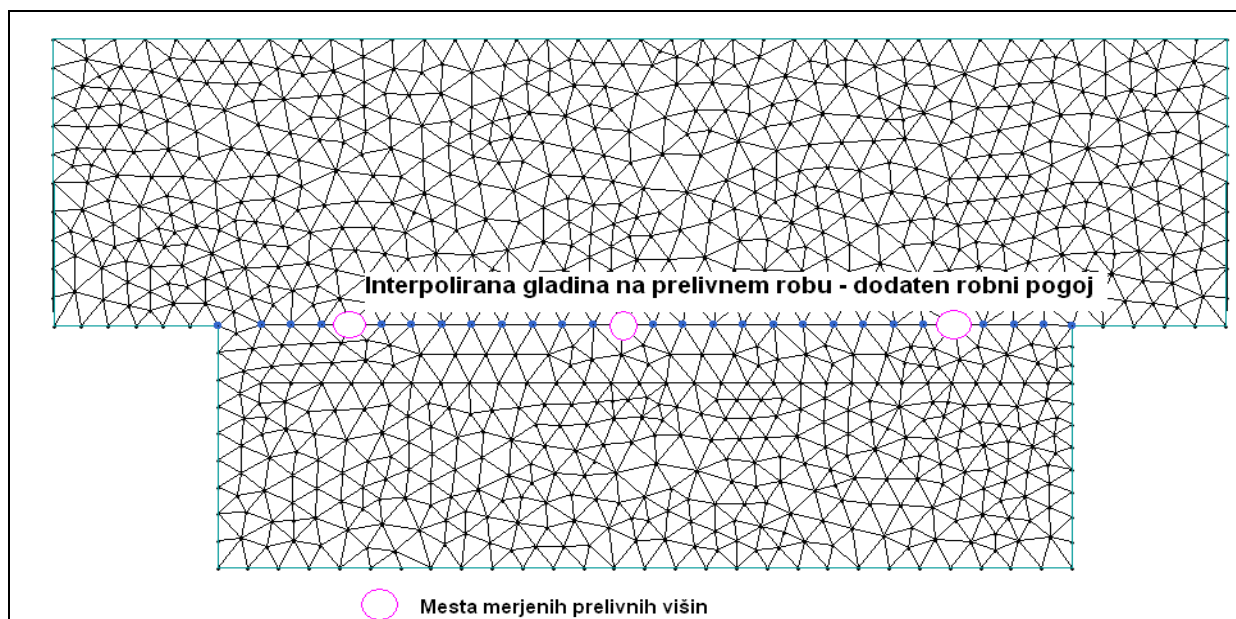
Na začetku smo definirali 3 robne pogoje, in sicer natočni pretok kot ZRP, ter izmerjeni dolvodni gladini, ki sta predstavljali SRP (glej sliko 37). Sledil je izračun, kjer smo v želji po najboljših rezultatih spreminjali privzete vrednosti dopustnih toleranc in vrednosti parametrov, ki jih program vsebuje in potrebuje za izračun (spreminjali smo predvsem koeficient kinematične viskoznosti). Izračun (simulacija 1) je sicer prišel do solidne tolerance, vendar pa lahko opazimo, da so bili dani pogoji precej zahtevni, kar je vodilo do numeričnih anomalij in posledično do napačnih rezultatov. Poleg napačne razdelitve pretokov (neizpolnjena kontinuiteta) in vektorskega polja je prišlo tudi do velikih nihanj v samem poteku gladin (glej sliko 43 in 44). Slednja nihanja so najbolj vidna prav na območje preлива, kjer pride do največjih sprememb v gladinah in hitrostih (prehod preko kritične gladine v deroči tok). Kljub slabim rezultatom pa smo v želji po boljših rezultatih modeliranje nadaljevali (simulacija 2), vendar z dodatnim pogojem. Dodali smo izmerjene prelivne gladine, ki smo jih interpolirali na celotno območje preлива (glej sliko 45). Toleranca je bila sicer zadovoljiva, vendar pa je bila konvergenca precej nestabilna, kar je vodilo k nihanju rešitev. To je bil znak, da bo zopet prišlo do anomalij in nihanj. Opazili smo tudi to, da v kolikor nižamo viskoznost, se sicer stabilnost izračuna poveča, vendar se sam potek vektorjev hitrosti spremeni tako, da vsa voda izteka skozi bočni preliv (potrebno bi bilo spremeniti robne pogoje). Dodaten pogoj ni vplival na potek vektorskega polja in tudi razdelitev pretokov je ostala slaba, izboljšalo pa se je stanje gladin, kjer je nihanje manj oziroma so manjša, ampak kljub dodatnemu pogoju ostajajo. Opazili smo tudi višjo gladino na mestu ZRP glede na izmerjeno, kar pomeni, da so se ob danem pretoku hitrosti zmanjšale. Kljub vsemu so rezultati boljši, saj se tukaj že vidi nihanje gladin na območju za prelivom (glej sliko 46).



Slika 43: Napačno izračunano vektorsko polje – simulacija 1 (prez A-A se navezuje na sliko 47)

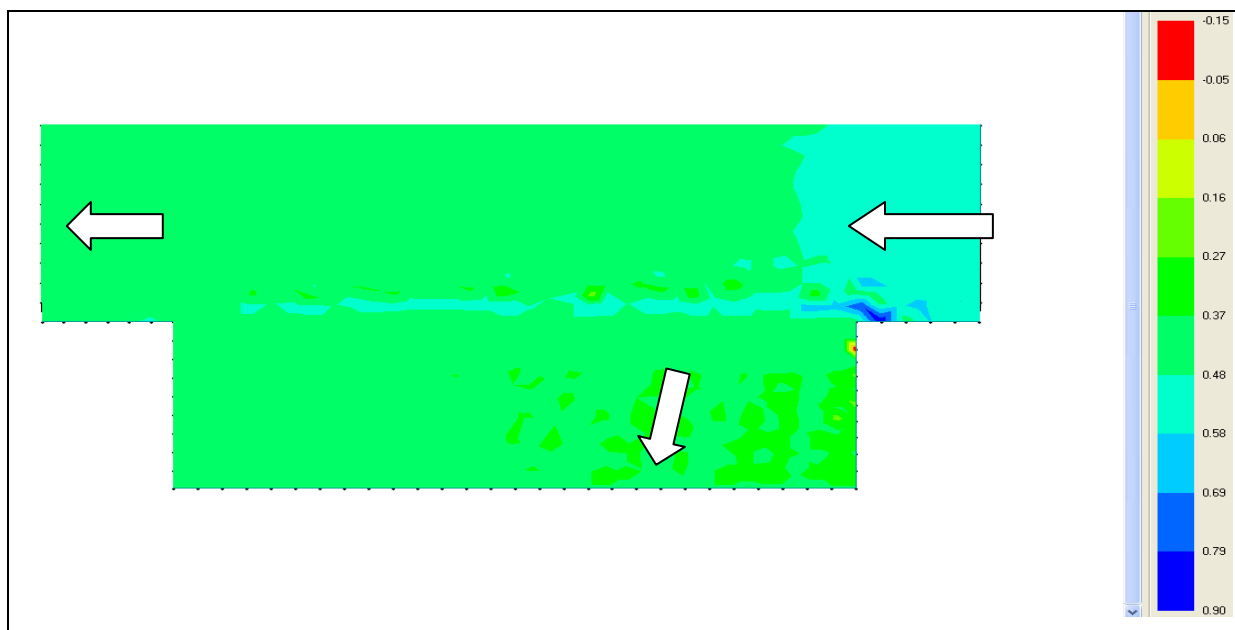


Slika 44: Anomalije izračunanih gladin – simulacija 1 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa relativno gladino v metrih)



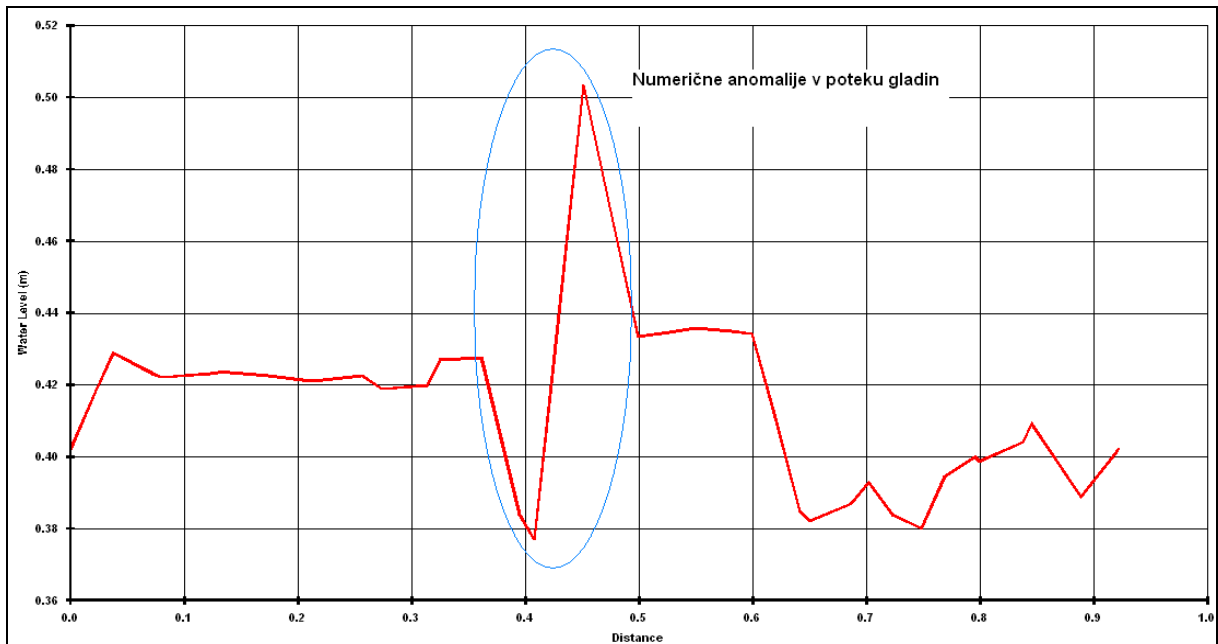
**Slika 45:** Dodaten pogoj za simulacijo 2

V kolikor nižamo viskoznost, je račun stabilnejši, vendar je vektorsko polje napačno oziroma smer vode ni pravilna. V želji po boljšem in stabilnejšem računu z znižano viskoznostjo smo tako nadaljevali s simulacijami in sicer s simulacijo 3, kjer se je poleg vseh že uporabljenih robnih in notranjih pogojev, dodalo še enega in sicer hitrost v smeri  $x$  na SRP. Velikost hitrosti smo dobili z 1D izračunom (HEC-RAS) in je znašala  $0.25 \text{ m/s}$ . V program pa se je vnesla vrednost  $-0.25 \text{ m/s}$  kar pomeni, da smo poleg same hitrosti definirali tudi smer toka, ki se je izkazal kot glavni problem pri računu z nižjimi viskoznostmi. V tem primeru je račun sicer bil stabilnejši, vendar so se tudi tukaj pojavljala nihanja v rešitvah, ki pa so bila manjša kot pri simulaciji 1 in 2. Simulacija 3 nam je dala zopet nekoliko boljše rezultate. V tem primeru se vidno spremeni vektorsko polje (glej sliko 48). Potek vektorjev je v samem kanalu pravilnejše, kar vodi k pravilnejši razdelitvi pretokov spodnjega dela kanala. V rokavu oziroma na samem prelivu pa je program oblikoval hitrostno polje glede na dane robne pogoje. To pomeni, da je glede na dane gladine izračunal pot vode proti nižji gladini in nato ven iz sistema. Zato dobimo na delu rokava izredno majhne hitrosti s povišanimi gladinami (zajezba), na drugem delu pa povišane hitrosti in ukrivljanje vektorjev hitrosti (zopet vpliv zajezbe).

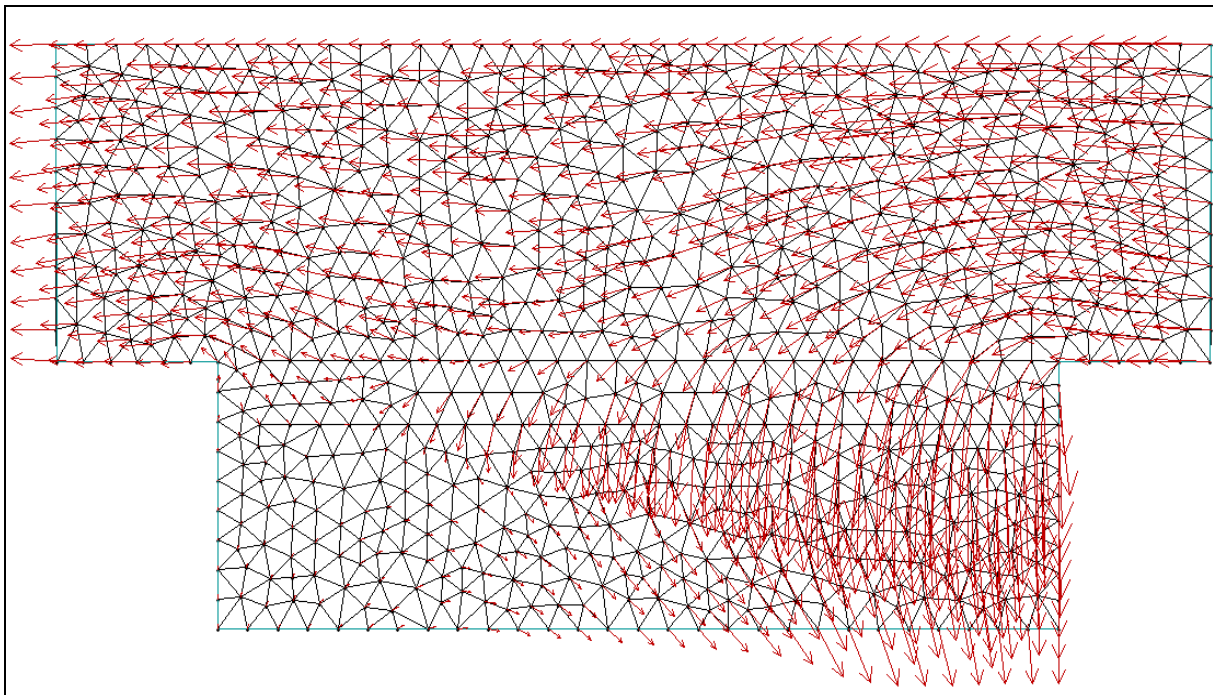


**Slika 46:** Potek gladin ob dodatnem pogoju – simulacija 2 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa relativno gladino v metrih)

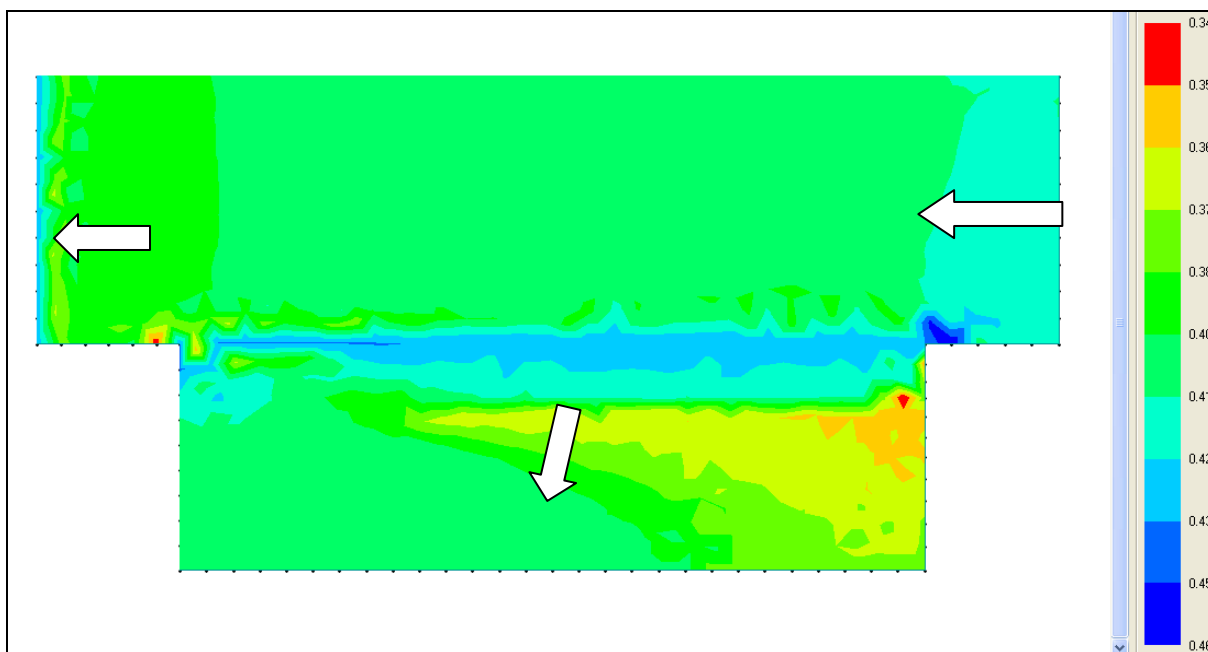
Potek gladin med vnesenimi robnimi pogoji že kar dobro kaže na dejansko stanje, vendar z ne tako obširno zajezbo. Zelo lepo je vidna bifurkacija v samem rokavu (glej sliko 49), kjer vodna gladina narašča s smeri toka v kanalu (viden vpliv zajezbe). Glede na to, da so rezultati gladin precej dobri, je na tem mestu smiselno pogledati še razporeditev Froudovih števil, ki kažejo na to, da je program dobro uspel locirati mesto vodnega skoka, in da je izračunal tudi prehod iz mirnega v deroči tok in obratno (glej sliko 50), kar je ena glavnih problematik matematičnih programov. Mesta višjih Froudovih števil so glede na robne pogoje logična. Ker smo hoteli popraviti sliko vektorskega polja in še izboljšati rezultate, se je opravila še simulacija 4, kjer smo dodali še dodaten pogoj, ki sem ga postavil na mesto prelivnih višin. Ta pogoj je bila hitrost v smeri  $y$ , z njim pa smo želeli definirati količino prelitega pretoka preko preлива. Kot podatek smo imeli samo skupno količino prelitega pretoka, zato smo hitrosti spreminjali toliko časa, da smo dobili zelen pretok in zeleno sliko vektorskega polja. Tako se je za hitrosti vzelo vrednosti  $-0.18$ ,  $-0.35$  in  $-0.2$  l/s, s predznakom pa smo definirali tudi smer toka oziroma gibalne količine (glej sliko 51). Tako izračunane vodne gladine v rokavu so v skladu s pričakovanji in se zopet lepo kaže zajezba na dolvodnem koncu preлива (glej sliko 52). Z vnesenimi robnimi pogoji smo dosegli pretok v rokavu, ki je znašal približno 12.5 l/s, kar je zadovoljiv rezultat. Zanimivi so še rezultati Froudovih števil (glej sliko 53), ki lepo kažejo potek vodnega skoka (pride tudi do odstopanj – numerična napaka).



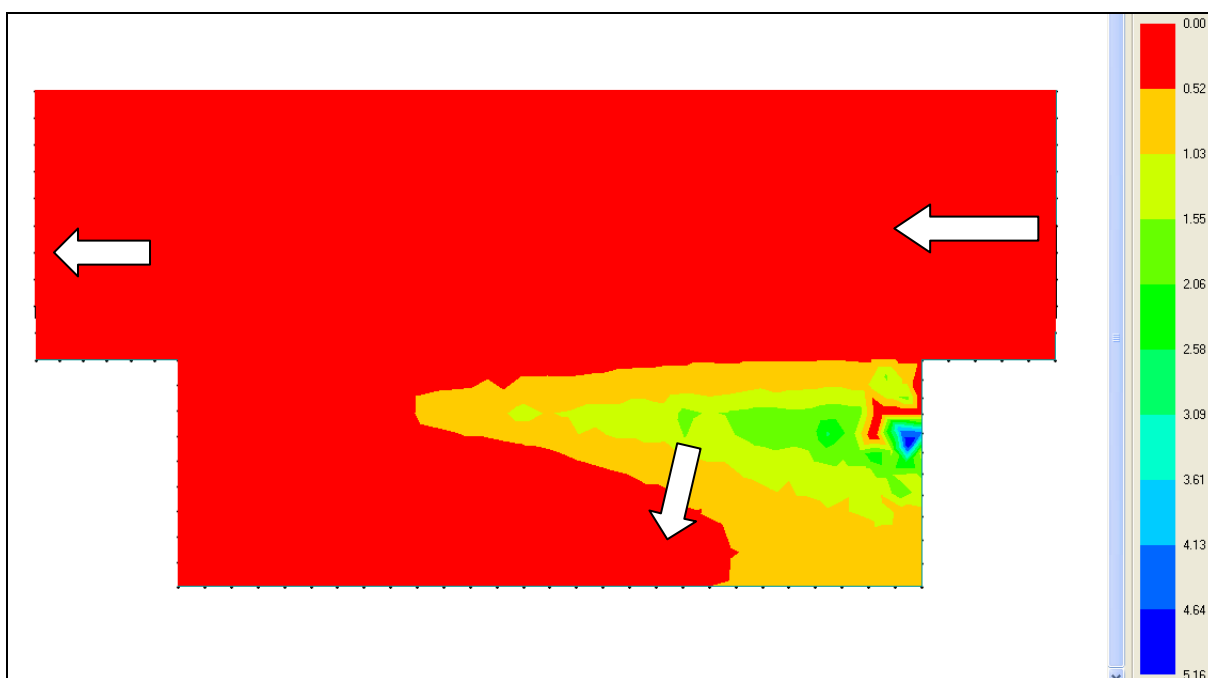
Slika 47: Prečni prezek poteka gladin preko bočnega preliva - simulacija 2



Slika 48 Vektorsko polje – simulacija 3

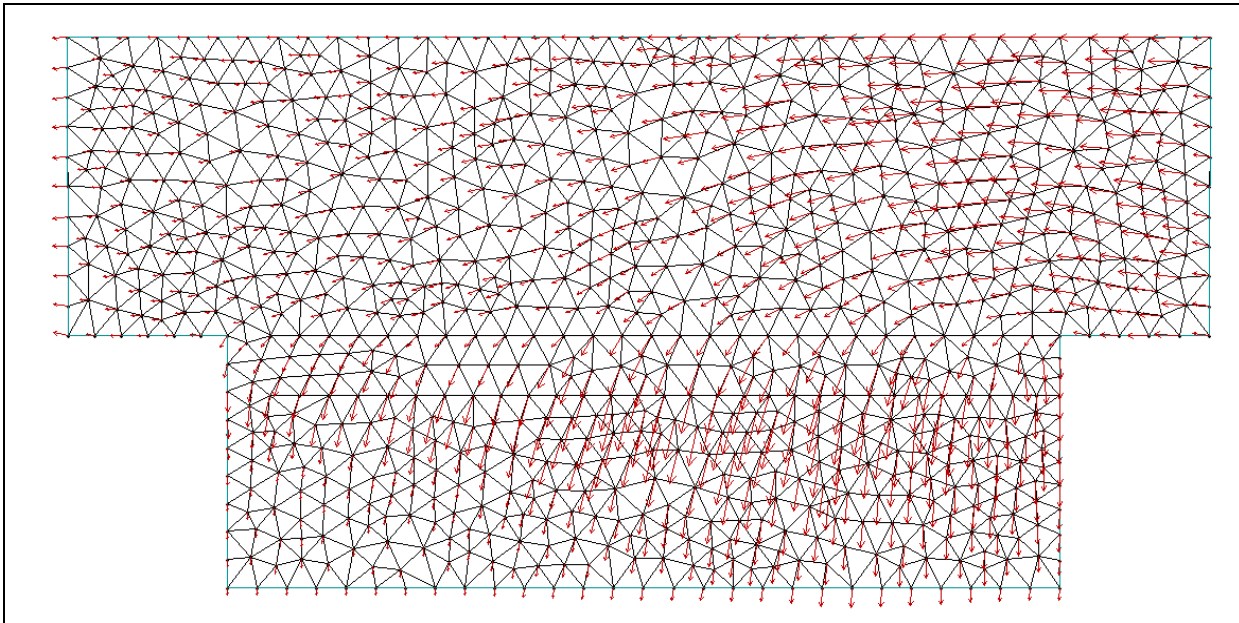


**Slika 49:** Potek gladin – simulacija 3 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa relativno gladino v metrih)

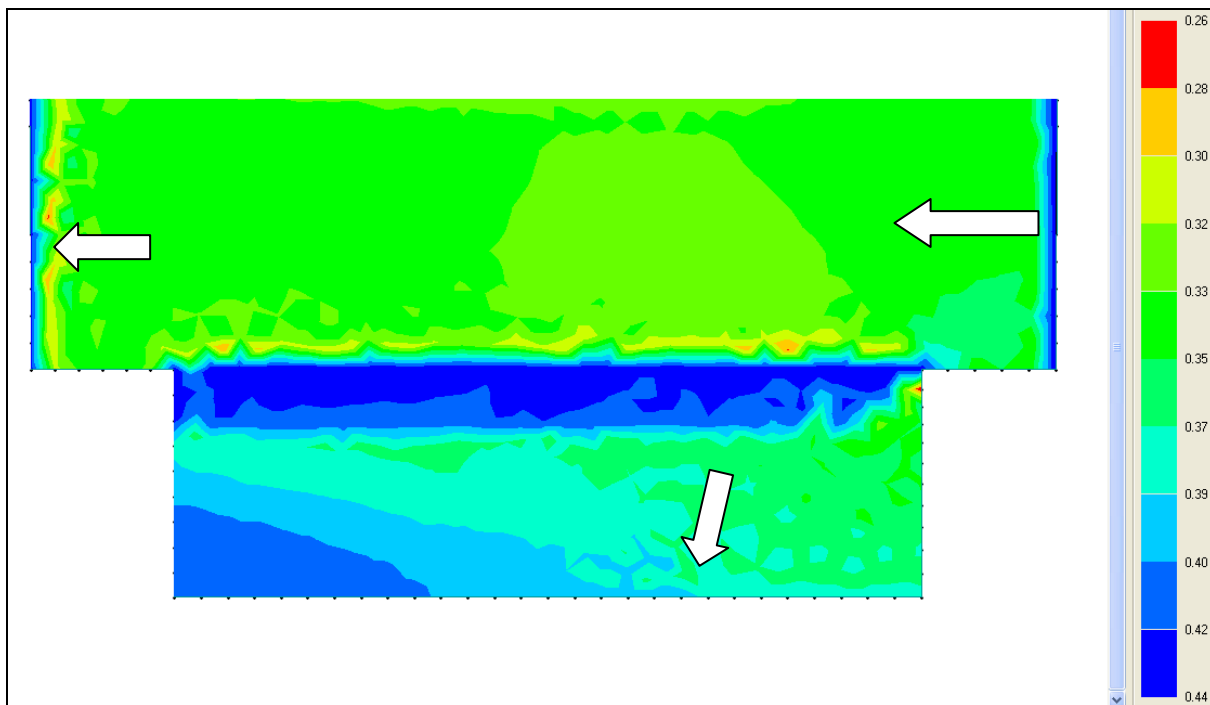


**Slika 50:** Razporeditev Froudovih števil – simulacija 3 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa vrednost Froudovih števil)

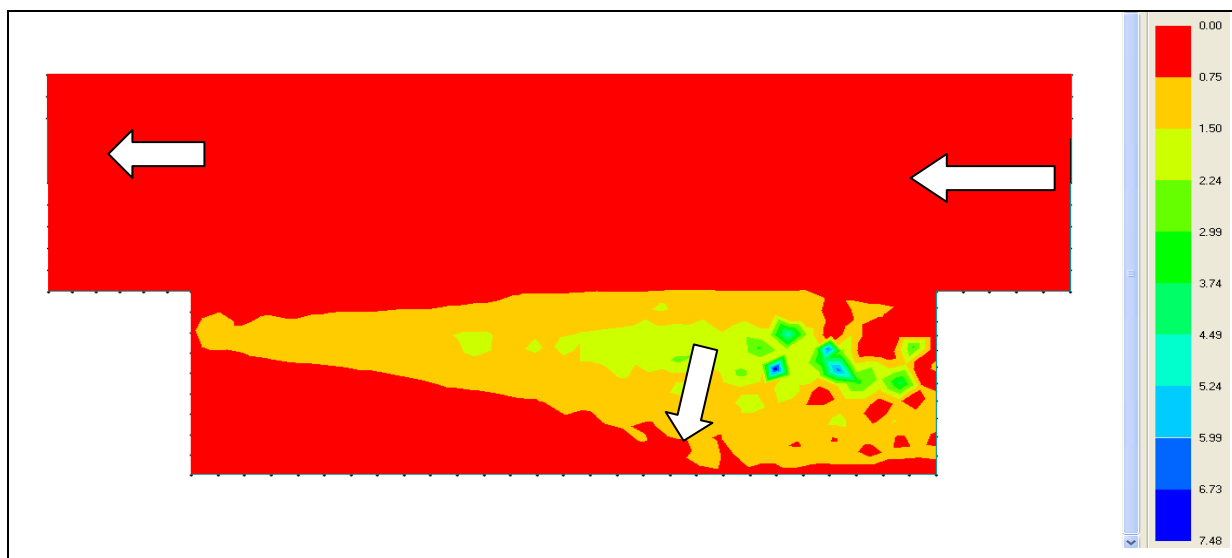




Slika 51: Vektorsko polje – simulacija 4



Slika 52: Potek gladin – simulacija 4 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa relativno gladino v metrih)



**Slika 53 :** Razporeditev Froudovih števil – simulacija 4 (puščice predstavljajo smer vode, legenda na desnem robu pa vrednost Froudovih števil)

Rezultati zopet kažejo na nepopolni vodni skok oziroma preliv, ki je pod vplivom spodnje vode (glej sliko 53).

S simulacijo 4 se je hkrati tudi zaključilo izvajanje simulacij, ker smo prišli do solidnih rezultatov. Omeniti je še potrebno numerično napako, ki je bila prisotna skozi vse izvajane simulacije, in sicer nihanje gladine pred prelivom (glej sliko 47). Bolj kot smo urejevali gladine in pretoke v rokavu (dodajanje novih robnih pogojev na mesto preliva – gladina, hitrosti), nižje gladine smo dobili med robnima pogojem v kanalu in gladina je bolj zanihala. Kljub nihanju gladin so rezultati v rokavu dobri (račun prehoda iz mirnega v deroči tok, vidna zajezba,...), saj tudi slabši rezultati v kanalu celotne slike nič ne spremenijo. Praktično nam je kanal samo služil kot začetna vrednost gibalne količine (smer toka pred prelivom) s katero je program s pomočjo danih pogojev (gladine in hitrosti v smeri  $y$ ) izračunal hidravlične spremenljivke na območju rokava. Količine v kanalu pa lahko dovolj dobro izračunamo z 1D modelom (uporaba bočnih prelivov). V kolikor bi hoteli imeti manjša nihanja na mestu bočnega preliva in v kanalu, bi bilo potrebno zgostiti mrežo, kar pa bi precej podaljšalo izračun. Na tem mestu se ponudi tudi ideja o ločenem računu, kjer bi najprej izračunali potek gladin in hitrosti po kanalu do preliva, nato pa bi dobljeno gibalno količino prenesli na drug del računa, kjer bi nam služila kot robni pogoj (hitrosti v smeri  $x$  in  $y$ ). Ker ponavadi

računamo z veliko količino točk, bi bilo ročno vnašanje robnih pogojev precej zamudno, zato se zaradi omejenega časa tega nismo lotili.

Podobne simulacije bi lahko izvajali tudi za druge oblike prelivov, kjer bi najbrž naleteli na podobne težave, vendar bi po umerjanju modela zopet prišli do zadovoljivih rezultatov. Vsekakor bi bilo zanimivo izvajati simulacije z različnimi oblikami prelivov in opazovati, kakšen potek gladin bi program izračunal, vendar pa bi za kaj takega potrebovali nekoliko več časa. To pa tudi ni bil namen diplomske naloge, ki smo ga dosegli že z simulacijo in primerjavo ene oblike preliva. Na tem mestu je potrebno vsekakor omeniti še hitrost samega računa v primeru večjega števila točk. Sama numerika programa, ki je uporabniku precej zamegljena, je zahtevna in je posledično izračun za večje število točk precej daljši. V našem primeru smo imeli mrežo približno 1000-ih točk, ki je bila zadostna glede na velikost računskega območja oziroma domene. Račun je bil precej hiter, saj je program za eno iteracijo potreboval približno 1 sekundo. Glede na pretekle izkušnje pa vemo, da več kot 10 000 točk (maksimalno število točk je 20 000) in kompleksne batimetrije (LIDAR) ni dobro uporabiti, saj se z večanjem števila točk čas računa posamezne iteracije močno poveča. Če k temu dodamo še lastnosti metode končnih elementov, ki jo program uporablja, zaradi katere je potrebno precejšnje število slepih iteracij na poti do končne rešitve, lahko, kljub sodobnemu računalniku, kaj hitro obupamo nad samim programom, saj je rešitev z visoko natančnostjo skoraj nemogoča.

### **5.2.3 Scenarij 3**

Za scenarij 3 se je izvedel 1D izračun s programskim paketom HEC-RAS, z vgrajeno funkcijo preliva, kjer se je enkrat uporabila metoda z vodno gladino in enkrat metoda z energijo. Poleg slednjega se je za potrebe scenarija 3 dvignilo tudi dno kanala v želji, da bi z zmanjšanjem pretočnega prereza dobili višja Froudova števila.

Na tem mestu lahko komentiramo napako, ki smo jo dobili z izračunom, in sicer lahko zopet primerjamo napako in razmerje  $K5/p$ . Koeficient preliva smo zopet izračunali nižji od priporočenih vrednosti (za preliv oblike širokega praga znaša med 2.6 in 3.1 - HEC-RAS, Reference Manual) in glede na ugotovitve, ki smo jih predstavili pri prejšnjih scenarijih, je za

naš primer takšen koeficient primeren za višje vrednosti  $K5/p$ , za nižje vrednosti razmerja  $K5/p$  pa so bolj primerne višje vrednosti prelivnega koeficienta.

**Preglednica 29:** Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 3, primer 1 – uporaba metode z vodno gladino<sup>15</sup>

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	PR1 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd	K5/p
55	43.17	2.57	2.75	2.89	42.24	8.32	10.45	0.39	1.056
65	43.89	3.13	3.32	3.53	43	8.96	14.35	0.4	1.075

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd HEC	Napaka Qb.p. [%]
55	42.21	2.21	2.23	2.24	42.25	7.9	1.7274843	24.40191388
65	42.93	2.94	2.97	2.99	43.01	12.4	1.7717788	13.58885017

Če pa pogledamo dobljene vrednosti lahko vidimo, da imamo za višjo vrednost razmerja  $K5/p$  in z nižjo vrednostjo prelivnega koeficienta Cd zadovoljiv rezultat, za nižje vrednosti razmerja  $K5/p$  in z nižjo vrednostmi prelivnega koeficienta Cd, pa so rezultati občutno slabši (glej preglednico 29). Če bi hoteli izboljšati rezultate pri nižjih vrednostih razmerja  $K5/p$  ( $Qna = 55$  l/s in  $K5/p = 1.056$ ), bi glede na scenarij 2 morali uporabiti prelivni koeficient 2.6 (s takšnim koeficientom bi dobili  $Qb.p. = 11.8$  l/s in pri tem storili 11.44 % napako). To potrjuje ugotovitve iz scenarija 1 in 2 (zopet imamo vpliv zajezebe).

Z uporabo metode energije smo dobili višje izračunane bočne pretoke, kar je z uporabo nižjih izračunanih prelivnih koeficientov od predlaganih dalo boljše rezultate kot izračun, kjer smo uporabili metodo z gladino. Glede na priporočila (HEC-RAS, Reference Manual) je metodo energije smiselno uporabiti, če imamo bočni preliv lociran stran od glavne struge, kar smo v scenariju 3 tudi imeli. Meritve scenarija 3, primer 1, lahko dobro primerjamo z meritvami scenarija 2, primer 1, ker so natočne razmere precej podobne ( $K1$ , Froudovo število v natočenem prerezu). Edina razlika pa je v tem, da smo imeli v scenariju 3 poplavno ravnico (sestavljeno prerezo) v scenariju 1 pa ne. Vendar pa glede na meritve ocenjujemo, da smo imeli zaradi poplavne ravnice v povprečju nekoliko nižje prelivne višine in posledično nižji bočni

<sup>15</sup> Vrednosti, ki imajo sivo ozadje, predstavljajo izmerjene vrednosti.

pretok (vsaj za  $Q_{na} = 65$  l/s). Vzrok je najbrž v tem, da je na poplavni ravnici prišlo še do dodatnih energijskih izgub in posledično do znižanja bočnega pretoka in prelivnih gladin (glej preglednico 31).

**Preglednica 30:** Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 3, primer 1 – uporaba metode z energijo<sup>16</sup>

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	PR1 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd	K5/p
55	43.17	2.57	2.75	2.89	42.24	8.32	10.45	0.39	1.056
65	43.89	3.13	3.32	3.53	43	8.96	14.35	0.4	1.075

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd HEC	Napaka Qb.p. [%]
55	42.2	2.2	2.22	2.24	42.25	9.2	1.7274843	11.96172249
65	42.92	2.93	2.97	2.99	43.01	14.3	1.7717788	0.348432056

**Preglednica 31:** Primerjava meritev scenarija 3 primer 1 (z poplavno ravnico) in scenarija 2 primer 1 (brez poplavne ravnice)<sup>17</sup>

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]
55	43.17	2.57	2.75	2.89	42.24	10.45
65	43.89	3.13	3.32	3.53	43	14.35

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]
55.0000	43.2000	2.6500	2.7900	2.8200	42.2400	10.4000
65.0000	43.9400	3.2700	3.3600	3.5100	43.1200	14.5000

Kljub temu lahko rečemo, da vpliv poplavne ravnice ni opažen v tolikšni meri kot smo si želeli, zato ne moremo niti potrditi niti ovreči nasveta, kdaj uporabiti metodo energije in kdaj metodo gladine.

<sup>16</sup> Vrednosti, ki imajo sivo ozadje, predstavljajo izmerjene vrednosti.

<sup>17</sup> Vrednosti, ki imajo belo ozadje, predstavljajo izmerjene vrednosti meritev scenarija 3, primer 1, vrednosti s sivim ozadjem pa meritve scenarija 2, primer 1.

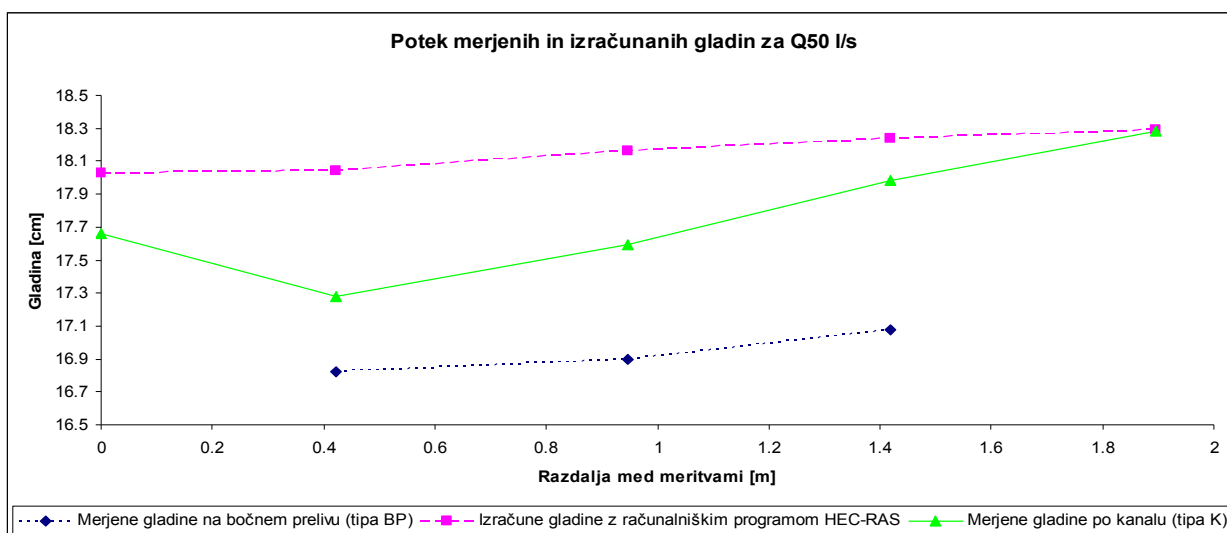
**Preglednica 32:** Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 3, primer 2 – uporaba metode z vodno gladino<sup>18</sup>

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	PR1 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd	K5/p
50	17.66	1.82	1.9	2.08	18.28	7.3	5.85	0.37	1.2186667
60	18.12	2.12	2.34	2.53	18.86	7.69	8.25	0.39	1.2573333

Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd HEC	Napaka Qb.p. [%]
50	18.03	3.04	3.16	3.24	18.29	12.5	1.6388954	
60	18.48	3.49	3.67	3.79	18.87	16.5	1.7274843	

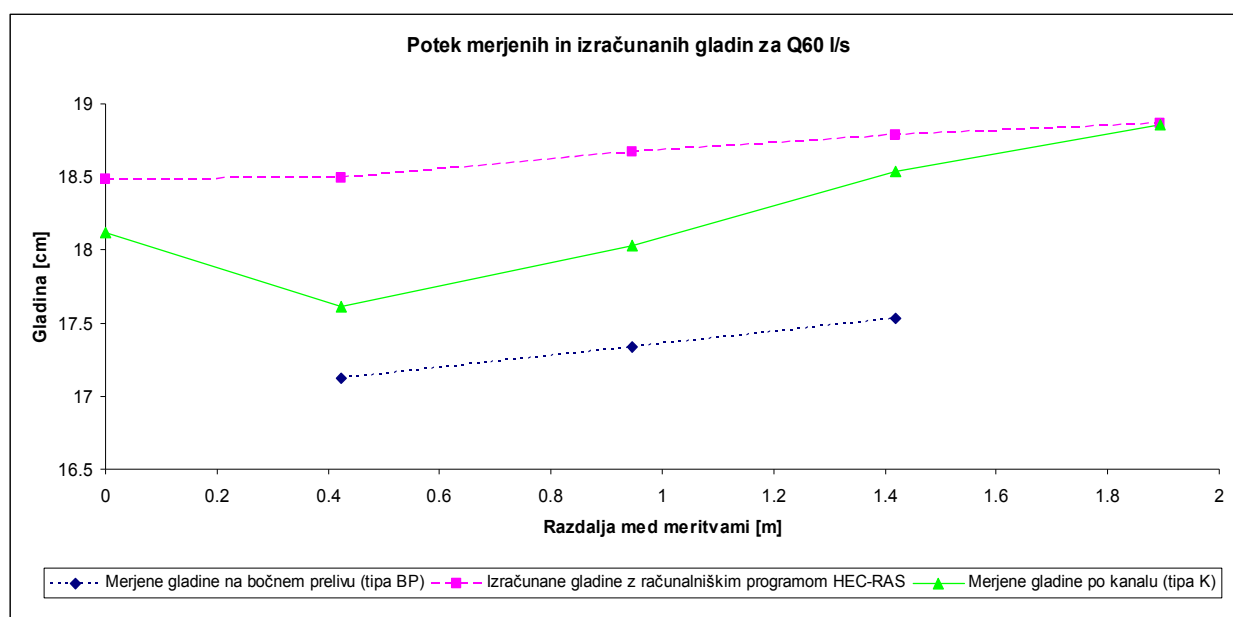
Iz preglednice 32 pa lahko vidimo, da je storjena napaka precejšnja. Razlog zakaj je prišlo do takšne napake, je zopet v SRP. Pri višjih Froudovih številih lahko vidimo, da je SRP (meritev K5) višji od meritev na bočnem prelivu (meritve tipa BP). To pomeni, da so bile gladine v kanalu precej višje od prelivnih gladin, kar je vodilo k višji bifurkaciji znotraj posameznega profila in k slabšim rezultatom (glej grafikona 21 in 22).

Z metodo energije obravnavanega primera nismo računali, ker bi dobili samo višje in s tem slabše rezultate.



**Grafikon 21:** Primerjava izračunanih in merjenih gladina za scenarij 3, primer 2 pri razmerju K5/p = 1.22 (preliv je na 15 cm.)

<sup>18</sup> Vrednosti, ki imajo sivo ozadje, predstavljajo izmerjene vrednosti.



**Grafikon 22:** Primerjava izračunanih in merjenih gladina za scenarij 3, primer 2 pri razmerju  $K5/p = 1.26$

### 5.3 Glavne ugotovitve

Glede na vse izvedene analize, izračune in primerjave lahko potrdimo, da sta bila cilj in namen naloge v celoti izpolnjena. Ugotovili smo, da je izbran položaj krilnih zidov imel velik vpliv na hidravlične razmere v okolici bočnega preliva in v kolikor hočemo takšen pojav dobro modelirati, moramo biti na elemente, ki jih bomo predstavili v nadaljevanju, še posebno pozorni.

Glede na strukturo diplomske naloge lahko glavne ugotovitve strnemo v tri skupine, in sicer:

- Ugotovitve do katerih smo prišli z meritvami na fizičnem modelu,
- ugotovitve pri modeliranju obravnavanega problema z enodimenzijskim modelom HEC-RAS,
- ugotovitve pri modeliranju obravnavanega problema z dvodimenzijskim modelom AquaDyn.

### Meritve na fizičnem modelu

#### ***Obravnavan položaj krilnih povzroči pojav zastojne točke (dušilka) in posledično zajezbo.***

Zgornja ugotovitev je zelo pomembna in jo moramo upoštevati. Obseg zajezbe je lahko zelo različen (povzroči dvignjene in zajezene gladine), opravljene meritve pa kažejo, da je v največji meri odvisen od Froudovega števila in razmerja  $h_1/p$ . To nam nakazujejo opravljene meritve pri scenarijih 2 in 3 (pravokotno korito) na eni strani in pri scenarijih 3 (trapezno korito), 4 in 5 na drugi. Pri slednjih smo imeli višja tako Froudova števila kot tudi razmerja  $h_1/p$ . Ugotovili smo, da je obseg zajezbe pri primerih z nižjimi Froudovimi števili in razmerjem  $h_1/p$  (scenarij 2) zajel okolico meritev BP2 in BP3 (obseg zajezbe se je z višanjem Froudovih števil širil tudi na meritve tipa K), pri primerih z višjimi Froudovimi števili in razmerji  $h_1/p$  (scenarija 4 in 5), pa je bil obseg precej večji in sega tudi na območje meritev tipa K, kjer se precej spremeni potek gladin (gladina vode v kanalu narašča v smeri toka vode). Opisani pojav lahko opazujemo na grafikonih 19, 20, 21 in 22.

Na tem mestu podajmo še eno ugotovitev, ki se prav tako navezuje na vpliv zajezbe. Ugotovili smo oziroma meritve nakazujejo na to, da bi lahko bil obseg zajezbe, ki je posledica vpliva uporabljenega položaja krilnih zidov, odvisen tudi od oblike preliva. Iz grafikonov 23 in 24 je razvidno, da je vpliv zajezbe manjši pri ostrorobem prelivu kot pa pri prelivu oblike širokega pragu (pri ostrorobem imamo na prelivu nižje gladine in višje hitrosti, ki posledično vodijo k manjšemu dušenju in višjemu pretoku, pri širokem pragu pa je ravno obratno).

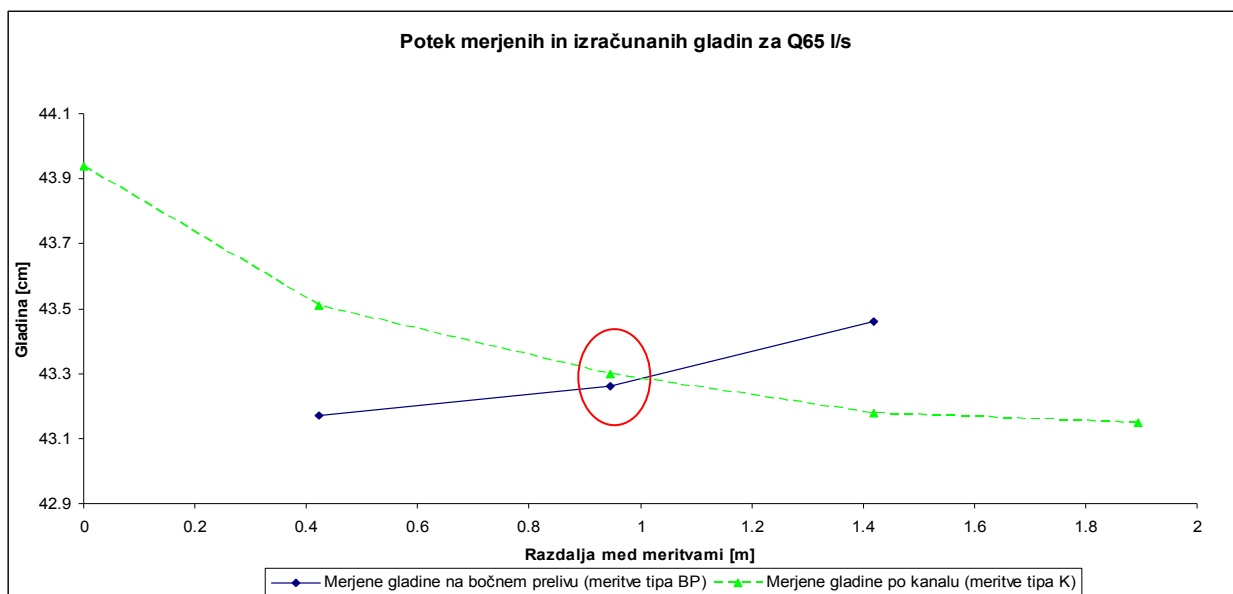
Oblika krilnih zidov je bila pri scenarijih 4 in 5 različna kot pri ostalih treh (glej priloge A2, B2, C2, D2, E2). Katera oblika povzroča večji obseg zajezbe, zaradi preveč različnih natočnih razmer (razlika v Froudovih številih, v razmerju  $h_1/p$ , oblika kanala vodotoka), ni mogoče ugotoviti, vsekakor pa lahko potrdimo, da obe obliki zaradi posledice zastojne točke povzročata zajezbo.

#### ***Obravnavan položaj krilnih zidov preko zajezbe povzroči padec prelivnih koeficientov Cd.***

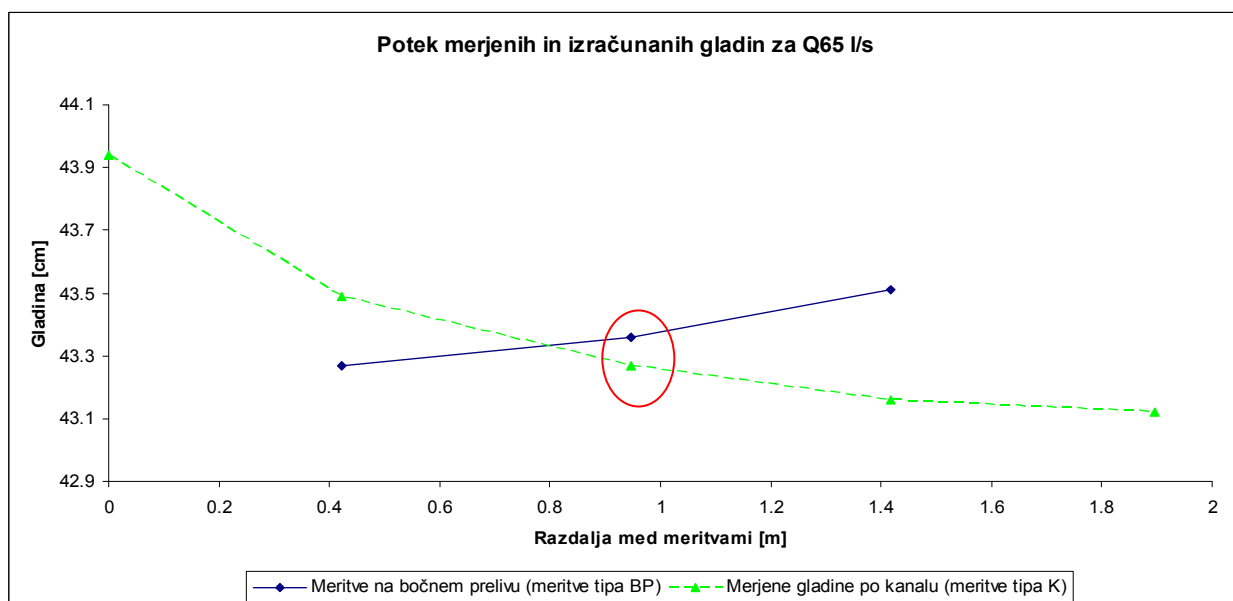
To ugotovitev lahko potrdimo, če primerjamo dobljene vrednosti prelivnih koeficientov  $C_d$  in priporočene vrednosti, ki so mišljene v kolikor imamo prost preliv. V našem primeru smo za



obliko širokega pragu izračunali vrednosti prelivnega koeficienta med 1.7 in 2, priporočene vrednosti (HEC-RAS, Reference Manual) pa znašajo med 2.6 in 3.1. Za obliko ostrorobega preliva smo izračunali vrednosti med 2.4 in 2.8, priporočene vrednosti (HEC-RAS, Reference Manual) pa znašajo od 3.2 do 3.3.



**Grafikon 23:** Vpliv zajeze pri ostrorobem prelivu (primer 2, scenarij 2)



**Grafikon 24:** Vpliv zajeze pri širokem pragu (primer 1, scenarij 2)

***Hrapava drča z grbo (bolj ugodna za višja Froudova števila) in ostrorobi preliv (bolj ugoden za nižja Froudova števila) sta se izkazala kot prelivni obliki z največjo prelivno sposobnostjo.***

Na podlagi vseh meritev in obdelavi le-teh ugotavljamo, da oblika bistveno vpliva na hidravlične razmere pri bočnih prelivih (scenariji so bili oblikovani tako, da lahko kljub vplivu zastoje točke izvajamo medsebojne primerjave znotraj scenarija). Za primerjavo razlik med posameznimi oblikami bočnih prelivov sta najbolj primerna scenarija 4 in 5<sup>19</sup>, znotraj katerih se je izvedla analiza štirih različnih oblik in sicer širokega pragu, ostrorobega preliva, hrapave drče brez grbe in hrapave drče z grbo. Kot najbolj ugodni obliki (najvišji prelivni koeficient  $C_d$ ) sta se izkazali hrapava drča z grbo in ostrorobi preliv (zaradi različnega trenda  $C_d$  se je ugotovilo, da je pri višjih Froudovih številih bolj ugodna oblika hrapava drča z grbo, pri nižjih Froudovih številih pa ostrorobi preliv. V našem primeru kot mejno Froudovo število ugotavljamo vrednost okoli 0.54), sledi jima hrapava drča, kot najmanj ugoden pa se je izkazal preliv oblike širokega pragu. Na tem mestu tudi ugotavljamo, da je površina prelivne oblike, z vidika energijskih izgub in posledično manjše prelivne sposobnosti, pomembnejša od vpliva kontrakcije curka. Pokazatelj tega je višja prelivna sposobnost (višji prelivni koeficient  $C_d$ ) ostrorobega preliva, pri katerem je vpliv kontrakcije curka večji kot pri prelivnih oblikah hrapave drče in širokega pragu, v primerjavi s širokim pragom in hrapavo drčo.

***Ugotovljen prelivni koeficient  $C_d$ , pri bočnem razbremenjevanju brez preliva, je za dane razmere med 0.2 in 0.22 (če uporabljamo enačbo 2).***

To ugotovitev izpostavljamo, ker je v literaturi malo priporočenih vrednosti prelivnega koeficienta  $C_d$  za takšno stanja, ki pa je v naravi pogost pojav. Ugotovljene vrednosti prelivnega koeficienta  $C_d$  so najverjetneje nižje od vrednosti pri prostem bočnem razbremenjevanju brez preliva (krilni zidovi nimajo vpliva na razmere).

---

<sup>19</sup> Scenarija imata podoben razpon Froudovih števil, nimata pa enakega razmerja  $h_1/p$ , ki prav tako vpliva na prelivni koeficient  $C_d$ . To pomeni, da scenarija nista neposredno primerljiva. Odvisnost prelivnega koeficienta  $C_d$  od  $h_1/p$  nismo analizirali, vendar pa na podlagi hrapave drče ugotavljamo, da gre za premo-sorazmerno odvisnost (glej poglavje 4.1.5). Če bi tako pri scenariju 4 naredili meritve še s prelivom z grbo, bi slednji najverjetneje izkazoval še višji prelivni koeficient  $C_d$  (v tem primeru bi ga morali ustrezno povišati).

***Prelivna oblika vpliva na trend spreminjanja prelivnega koeficienta Cd v odvisnosti od Froudovega števila.***

Za ostrorobo prelivno obliko se je prelivni koeficient Cd z večanjem Froudovega števila manjšal (negativen trend), obratno pa se je dogajalo z ostalimi tremi oblikami (široki prag, hrapava drča in hrapava drča z grbo), kjer smo ugotovili pozitiven trend. Ker je prelivni koeficient Cd kazalec prelivne sposobnosti preliva ugotavljamo, da prelivna sposobnost ostrorobega preliva z višanjem Froudovega števila pada, obratno pa velja za prelivne oblike širokega pragu, hrapave drče in hrapave drče z grbo. Negativen trend za proste ostrorobe prelive lahko potrdimo na podlagi ostale literature (Silva, 1996), kar pa ne moremo trditi za pozitiven trend ostalih treh oblik, ker je večina ostalih avtorjev delala poskuse z ostrorobimi prelivnimi oblikami ali pa le-te niso navedli.

Tako na tem mestu (za prelivne oblike širokega pragu, hrapave drče in hrapave drče z grbo) ne moremo niti potrditi niti ovreči morebitnega vpliva položaja krilnih zidov (zastojna točka, zajezba) na trend spreminjanja prelivnega koeficienta Cd. Za ostrorobe prelivne oblike pa ugotavljamo, da položaj krilnih zidov ne vpliva na spremembo trenda Cd.

***Odvisnost prelivnega koeficienta Cd in Froudovega števila lahko najboljše opišemo s polinomov višje stopnje.***

Pri vseh regresijskih analizah ugotavljamo, da lahko s polinomom 4 ali 3 stopnje najboljše opišemo odvisnost prelivnega koeficienta Cd od Froudovega števila (zaradi omejitev programa Excel je polinom 4. stopnje najvišji polinom s katerim lahko izvajamo regresijske analize). Ugotavljamo tudi to, da je bila napaka, ki smo jo naredimo s takšno regresijsko analizo (s polinomom 4. ali 3. stopnje), v vseh primerih majhna.

***Modeliranje problema z enodimenzijski model HEC-RAS******Za kakovosten izračun sta potrebna pravilno definiran prelivni koeficient Cd in pravilno postavljen SRP.***

Prišli smo do zelo pomembne ugotovitve, ki govori o tem, da v kolikor računamo z 1D modelom, moramo zelo paziti na dve stvari, in sicer kakšen prelivni koeficient  $C_d$  bomo uporabili in kakšen bo SRP. Zelo moramo biti pozorni, ali obstaja kakršnakoli možnost vpliva spodnje vode (zaradi postavitve krilnih zidov ali katerega drugega vzroka). Slednje motnje so lahko češče prisotne, ko poskušamo izračunati razbremenjevanje preko cest in naravnih barier (to se zgodi zelo pogosto), kjer samo mesto ni dimenzionirano in narejeno za bočno prelivanje. Motnje spodnje vode in posledično potopljenost preliva lahko zelo dobro eliminiramo s spreminjanjem prelivnega koeficienta  $C_d$  (način smo že predstavili) ali pa s spremembo SRP (pozitiven vpliv takšne spremembe bomo pokazali v nadaljevanju). V kolikor tega ne storimo, bodo rezultati skoraj zagotovo precej slabši. Zato je še kako pomembno, da se izvajajo raziskave dejavnikov (postavitev krilnih zidov), ki vplivajo na pojav potopljenosti preliva, s pomočjo katerih bi lahko še bolj natančno podali rešitve kako eliminirati negativen vpliv le-teh in tako izboljšali rezultat modeliranja.

Glede na splošen potek gladin pri bočnih prelivih v mirnem režimu smo za scenarij 2, primer 1 naredili še analizo, kjer smo kot spodnji robni pogoj vzeli zadnjo meritev na bočnem prelivu (BP3) in s tem predpostavili, da smo izmerili takšno gladino na mestu K5. V tem primeru so rezultati bistveno boljše. Napaka bočnega pretoka se giba med 3 in 20 % (brez skrajnosti je napaka manjša od 4 %), izračun gladine pa je še boljše. Napaka se spreminja zaradi variacije gladinskega profila, ki pri nekaterih pretokih bolj variira ( $Q_{na} = 65$  l/s) pri drugih pa manj ( $Q_{na} = 55$  l/s) in jih z 1D modelom žal ne moremo zajeti (glej grafikona 25 in 26).

**Preglednica 33:** Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti za scenarij 2, primer 1 – uporaba višjega SRP <sup>20</sup>

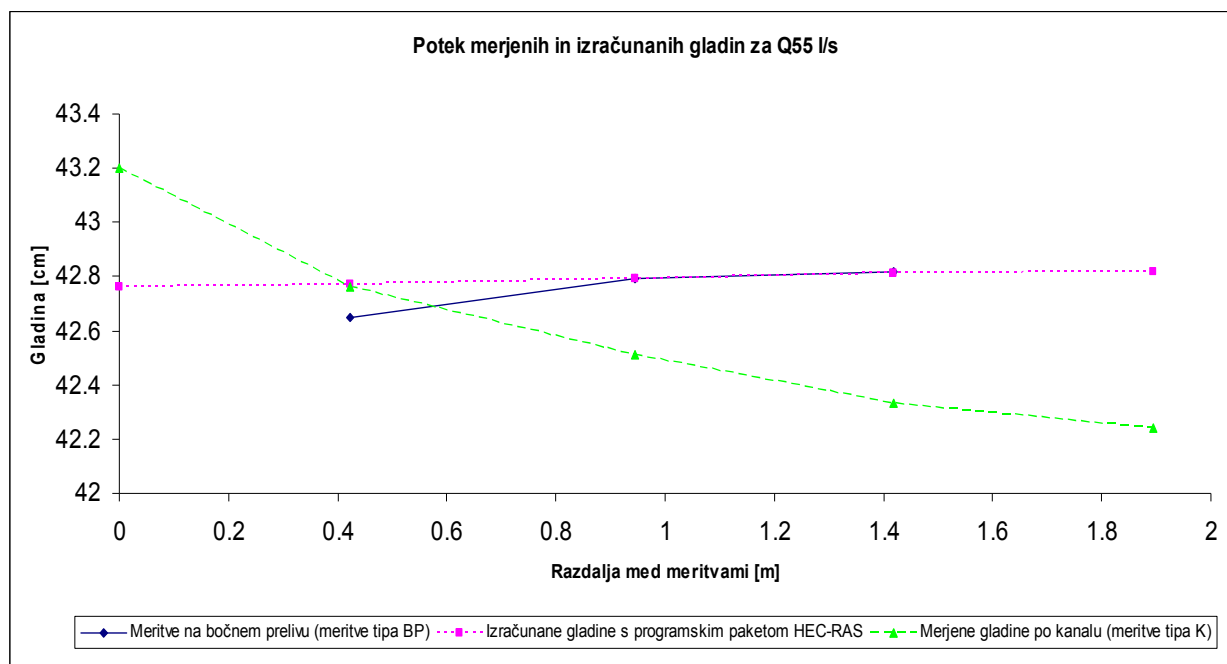
$Q_{na}$ [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	SRP = BP3 [cm]	K5 [cm]	Qb.p. [l/s]	$C_d$
45.0000	42.4000	1.9500	2.0600	2.1000	42.1000	41.4600	6.6500	0.3822
48.0000	42.7200	2.1200	2.2600	2.3000	42.3000	41.8600	7.5300	0.3781
50.0000	42.8600	2.3200	2.4200	2.4600	42.4600	41.8900	8.5000	0.3822
55.0000	43.2000	2.6500	2.7900	2.8200	42.8200	42.2400	10.4000	0.3799
60.0000	43.5800	2.9400	3.1000	3.1700	43.1700	42.7500	12.5000	0.3884
65.0000	43.9400	3.2700	3.3600	3.5100	43.5100	43.1200	14.5000	0.3923

<sup>20</sup> Vrednosti, ki imajo sivo ozadje, predstavljajo izmerjene vrednosti.

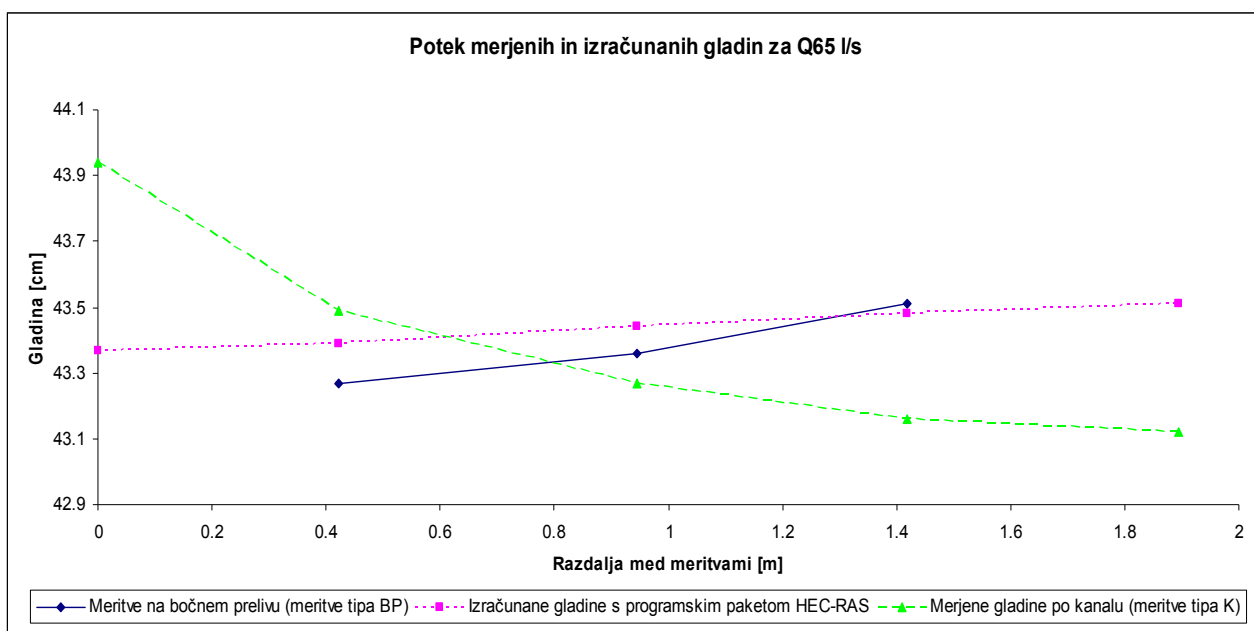
Qna [l/s]	K1 [cm]	BP1 [cm]	BP2 [cm]	BP3 [cm]	SRP = BP3 [cm]	Qb.p. [l/s]	Cd HEC	Napaka Qb.p. [%]
45.0000	42.0600	2.06	2.07	2.09	42.09	7.9	1.692813291	18.79699248
48.0000	42.2700	2.27	2.29	2.3	42.31	7.9	1.674778521	4.913678619
50.0000	42.4100	2.42	2.44	2.45	42.46	8.8	1.693050808	3.529411765
55.0000	42.7600	2.77	2.79	2.81	42.82	10.7	1.682779968	2.884615385
60.0000	43.0800	3.08	3.12	3.15	43.16	13	1.720490631	4
65.0000	43.3700	3.39	3.44	3.48	43.51	17.4	1.737688071	20

*Pri ostri delitvi toka (kot delitve toka je nad 80°) je bolje uporabiti funkcijo bočnega preliva kot delitev toka.*

Ugotovili smo, da v kolikor poznamo prelivni koeficient bočnega razbremenjevanja brez preliva (problem, ker imamo na voljo malo priporočenih vrednosti za tovrstne situacije) dobimo veliko boljše rezultate, če uporabimo funkcijo bočnega preliva in ne delitev toka (tudi če uporabljamo dinamično enačbo, ki vključuje vpliv kota). Pri uporabi delitve toka je največji problem o dopustni toleranci, katero pa lahko samo ugibamo.



**Grafikon 25** Variacija gladinskega profila: scenarij 2, primer 1 (uporaba višjega SRP) za natočni pretok Q55 l/s (višina preliva je na 40. cm)



**Grafikon 26:** Variacija gladinskega profila: scenarij 2, primer 1 (uporaba višjega SRP) za natočni pretok Q65 l/s (višina preliva je na 40. cm)

#### Modeliranje problema z dvodimenzijski model AquaDyn

***Za kakovosten izračun potrebujemo veliko časa, vhodnih podatkov, primerno velikost računskega območja, dovolj gosto numerično mrežo in pravilno tolmačenje rezultatov.***

Potrebno je bilo izvesti 4 simulacije, kjer smo na koncu prišli do ugotovitve, da smo morali v program vnesti vse razpoložljive (merjene ali izračunane z 1D modelom) podatke, v kolikor smo hoteli dobiti solidne rezultate. Območje je bilo pokrito s 1000 točkami, kar je vodilo k hitremu izračunu. V kolikor imamo nad 10 000 točk pa se računski čas močno poveča, hkrati pa je možnost pravilnega izračuna manjša. Ker gosta mreža ugodno vpliva na kakovost izračuna ugotavljamo, da si je potrebno izbrati tako veliko območje, ki ga je možno precej gosto pokriti z maksimalno 10 000 točkami (maksimalna količina uporabljenih točk je 20 000). Kljub solidnim rezultatom je potrebno pravilno tolmačenje le-teh (v našem primeru smo imeli kakovosten izračun v območju rokava in slab izračun v kanalu vodotoka kljub zelo dobri toleranci).

***Račun vodnega skoka je z matematičnim modelom AquaDyn mogoč.***

Ena največji numeričnih težav pri modeliranju tokov je ravno prehod iz mirnega v deroči tok in obratno. Ugotavljamo, da je s programom AquaDyn vodni skok (lokacija in spremembe veličin, ki pri tem nastanejo – sprememba gladin, hitrosti in Froudovega števila) možno precej dobro modelirati, kar kaže na kakovost programa (kljub nekaterim pomankljivostim).

***Za modeliranje bočnih prelivov z 2D matematičnim modelom AquaDyn je, v kolikor nimamo na voljo zadostne količine meritev, predhoden izračun z 1D modelom nujen.***

Kadar računamo z 2D modeli in nimamo ravno veliko podatkov s pomočjo katerih lahko stabiliziramo konvergenco in umerimo model, si moramo skoraj nujno pomagati z 1D modeli, ki nam služijo kot začetni račun s katerimi lahko določimo še dodatne pogoje, ki pomagajo 2D modelom k pravilnejši rešitvi. Prav tako bomo tudi hitreje prišli do rešitve.

## 6 ZAKLJUČEK IN MOŽNOSTI NADALJNEGA DELA

Če vse skupaj strnemo lahko ugotovimo, da so študije vplivov določenih motenj v okolici bočnih prelivov, kot je položaj krilnih zidov, nujno potrebne, ker brez njih pojava ne moremo dobro modelirati (matamtični programi so natančni toliko, kot so natančni vhodni podatki). V kolikor hočemo imeti kakovostne rezultate stanja v okolici bočnega preliva, potrebujemo dober fizični model, ki jih ob kopici matematičnih modelov v zadnjem obdobju nekoliko preveč zapostavljamo. Oba, tako HEC-RAS kot tudi AquaDyn, sta se izkazala kot dobra programa znotraj svojega območja delovanja in sta tako postregla s precej kakovostnimi rezultati. Po vseh izračunih ugotavljamo, da je, v kolikor hočemo najboljše možne rezultate, za dobro modeliranje dejanskega stanja v okolici bočnega preliva potrebna analiza tako z 1D kot tudi z 2D matematičnim modelom, kjer nam 1D model služi za račun hidravličnih spremenljivk (prelivne gladine in pretoka oziroma hitrosti), ki jih naknadno uporabimo kot robne oziroma notranje pogoje pri 2D izračunu.

Rezultati in ugotovitve do katerih smo prišli so zanimivi, hkrati pa nam dajejo dobro osnovo na kateri lahko gradimo. Tako bi v prihodnje bilo smiselno izvesti še:

- 2D izračun za ostale prelivne oblike in ugotoviti kakovost izračuna.,
- z večjo poplavno ravnico ugotavljati primernost metod energije in gladine,
- razširiti uporabnost že dobljenih rezultatov z razširjenimi intervali Froudovih števil in razmerij  $h_1/p$ ,
- ugotoviti trend spreminjanja prelivnega koeficienta  $C_d$  v odvisnosti od razmerja  $h_1/p$  za posamezne prelivne oblike,
- opazovati vpliv spreminjanja geometrijskih razmer (dolžine preliva, širine koita, višine preliva) na obseg zajeze za tovrstne razmere (imamo vpliv krilnih zidov),
- analizirati vpliv različnih izvedb krilnih zidov (različna oblika in položaj krilnih zidov, ožanje iztočnega dela) na pojav zastoje točke in posledično zajezebe,
- ugotavljati kateri parameter ima največji vpliv na pojav zajezebe,
- na podlagi velike količine meritev izpeljati določene teoretične zakonitosti.



## 7 VIRI

### Samostojne publikacije

1. Berkopec, A. 1994. Problem proste površine v toku viskozne tekočine. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Oddelek za fiziko: 43 f.
2. Carreau, M. 2000. AquaDyn 3.1 Tutorial. Quebec, HydroSoft Energie Inc.: 35 str.
3. Carreau, M. 2000. AquaDyn 3.1 Scientific Reference. Quebec, HydroSoft Energie Inc.: 9 str.
4. Četina, M. 1988. Matematično modeliranje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov : prvi del : tekst. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 105 f.
5. Gary. W. Brunner. 2008. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulics Reference Manual. California, US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC): 411 str.
6. Gary. W. Brunner. 2008. HEC-RAS, River Analysis System User's Manual. California, US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC): 733 str.
7. Kompare, B. 1980. Primerjava dveh metod za račun visokovodnih valov v reki s poplavnimi področji. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 103 f.

8. Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 279 str.
9. Rajar, R. 1997. Hidromehanika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 235 str.
10. Rak, G. 2006. Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 86 str.
11. Steinman, F. 1999. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 295 str.
12. Širca, A. 1989. Obdelava metod za račun stalnega neenakomernega toka v mirnem, prehodnem in deročem režimu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 179 f.
13. Wen Te Chow. 1973. Open-Channel Hydraulics. Singapore, McGraw-Hill Book Co: 680 str.
14. Žagar, D. 1989. Obdelava metod za račun nestalnega toka s prosto gladino, prireditev za računalnik PC in izdelava grafičnega prikaza rezultatov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 100 f.

## Elektronski viri

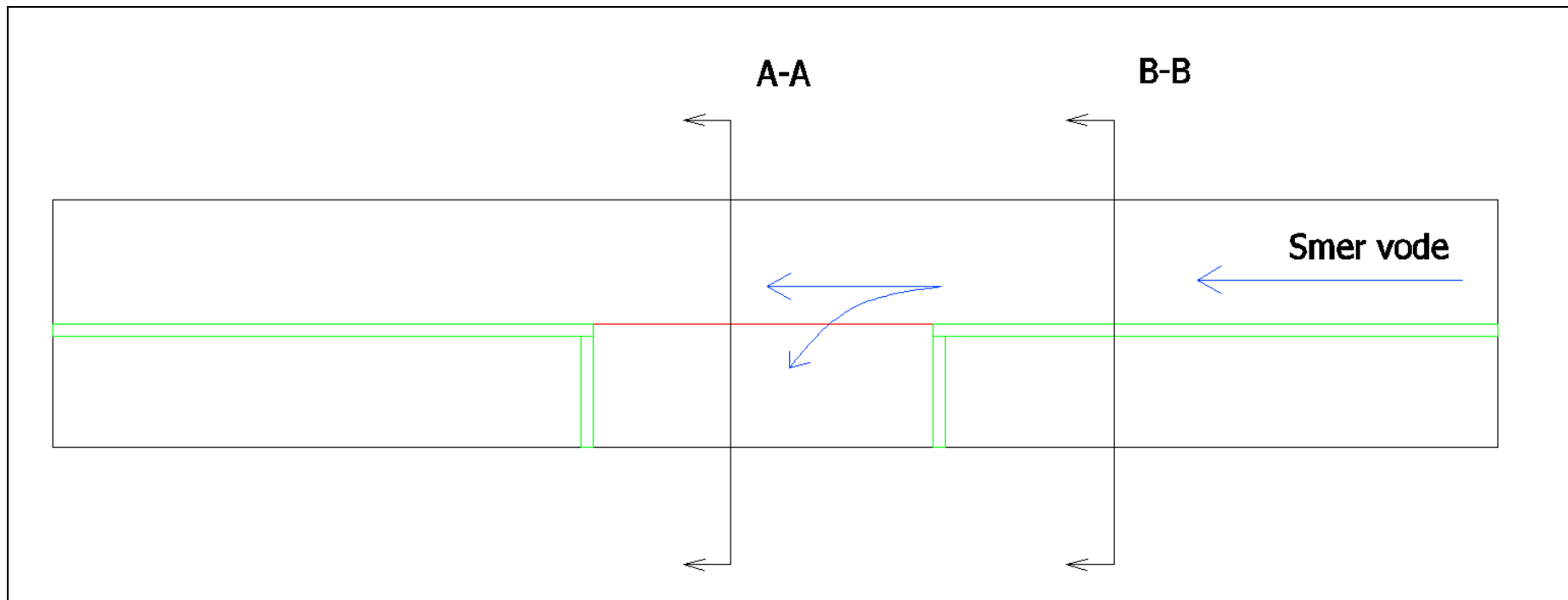
1. ANITON, Industrijske armature in avtomatika, elektromagnetni merilnik pretoka  
<http://www.aniton.si/text/13446211-1590.html> (3.2.2009)
2. Dyhouse, G. Hatchett, J., Benn, J. 2003. Floodplain Modeling Using HEC-RAS. Connecticut, Haestad Methods: 659 str.  
<http://www.haestad.com/library/books/fmras/floodplainonlinebook/javascript/wwhelp/wwhimpl/js/html/wwhelp.htm> (23.11.2008)
3. DHD modeliranje, projektiranje in meritve v hidrotehnikih.  
<http://www.dhd.si/> (14.10..2008)
4. Geršak, G. 2006. Merilna negotovost za začetnike: 21 str.  
<http://lmk.fe.uni-lj.si/izpiti/merilna%20negotovost%20za%20zacetnike.pdf> (1.2.2009)
5. Hidroinštitut, Inštitut za hidravlične raziskave, Ljubljana  
<http://www.hidroinstitut.si/PortalSLO/DesktopDefault.aspx> (4.12.2008)
6. Muslu, Y. 2002. Lateral Weir Flow Model using a Curve Fitting Analysis. Journal of Hydraulic Engineering 128, 7: 712-715.  
<http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JHEND8000128000007000712000001&idtype=cvips&prog=normal> (3.12.2008)
7. Mlačnik, J., Rodič, P. 2003. Hidravlična modelna raziskava (HMR) jezua in nove zapornice na Ljubljani pri Ambroževem trgu. Hidravlično modelna raziskava. Ljubljana, Mestna občina Ljubljana: 20 f.  
[www.ljubljana.si/file/561957/Hidravlicna\\_modelna\\_raziskava2002.pdf](http://www.ljubljana.si/file/561957/Hidravlicna_modelna_raziskava2002.pdf) (18.1.2009)
8. MKE Praktikum za ABAQUS, Uvod  
[http://lace.uni-mb.si/Num\\_meth\\_konst/Praktikum/1%20-%20Uvod.pdf](http://lace.uni-mb.si/Num_meth_konst/Praktikum/1%20-%20Uvod.pdf) (15.1.2009)

9. Pinheiro, A., Silva, I. 1996. Discharge Coefficient of Side Weirs. Experimental Study and Comparative Analysis of Different Formulas.  
<http://www.iahr.org/membersonly/grazproceedings99/pdf/B072.pdf> (3.12.2008)
10. Plestenjak, B. 2006. Numerična analiza - skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Oddelek za matematiko: 216 str.  
[http://www-lp.fmf.uni-lj.si/plestenjak/vaje/nafgg/predavanja/fgg\\_skripta.pdf](http://www-lp.fmf.uni-lj.si/plestenjak/vaje/nafgg/predavanja/fgg_skripta.pdf)  
(10.1.2009)
11. Proline Promag 50W, 53W, Technical Information  
<http://www.moyerinstruments.com/specs/TI046DAE.pdf> (13.1.2009)
12. Ramamurthy, A.S., Qu, J., Vo, D. 2006. Nonlinear PLS Method for Side Weir Flows. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 132, 5: 486-489.  
<http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JIDEDH000132000005000486000001&idtype=cvips&prog=normal> (3.12.2008)
13. Šterk, M. 2005. Mreže proste metode na vzporednih računalnikih. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko: 171 str.  
[http://www.fri.uni-lj.si/si/raziskave/doktorska\\_dela/2421/zagovor.html](http://www.fri.uni-lj.si/si/raziskave/doktorska_dela/2421/zagovor.html) (1.11..2008)

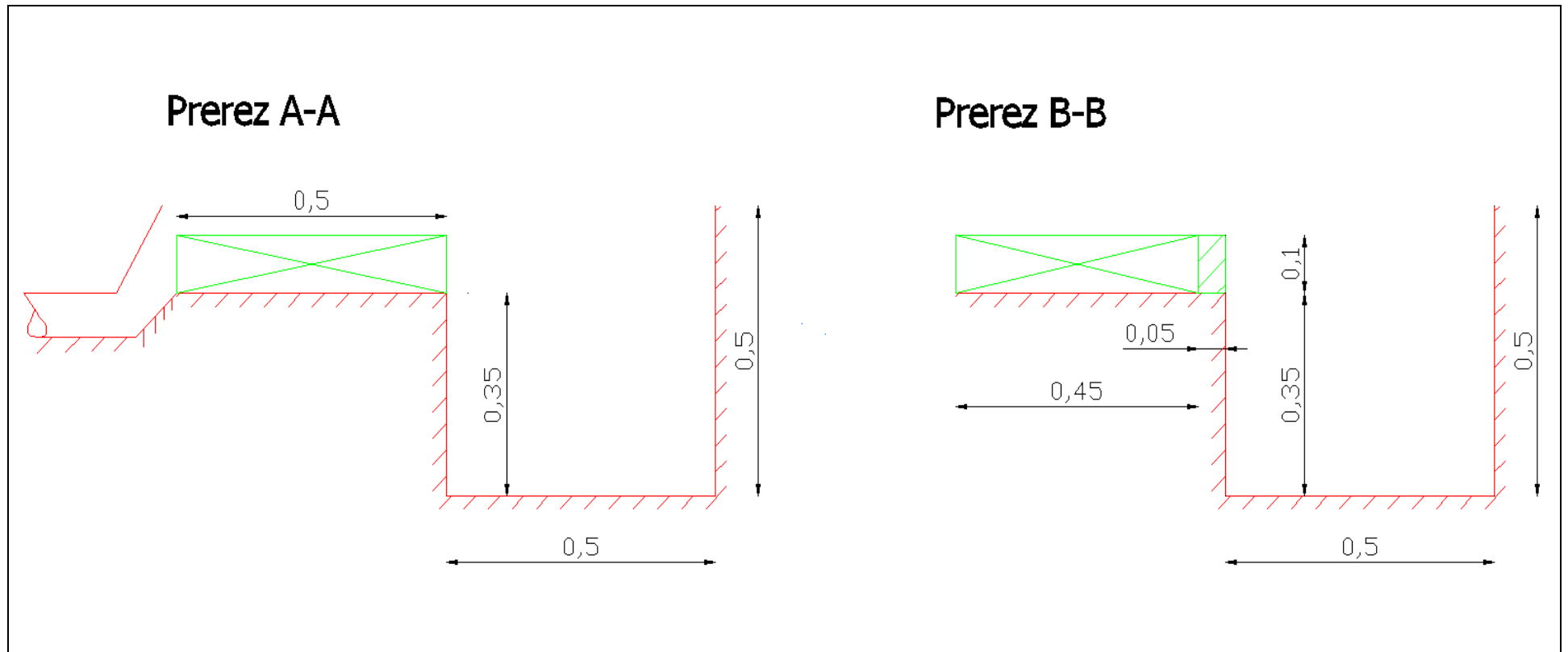
## **8 PRILOGE**

**Priloga A** Tloris in prereza za primer 1, scenarij 1

**A1** Tloris

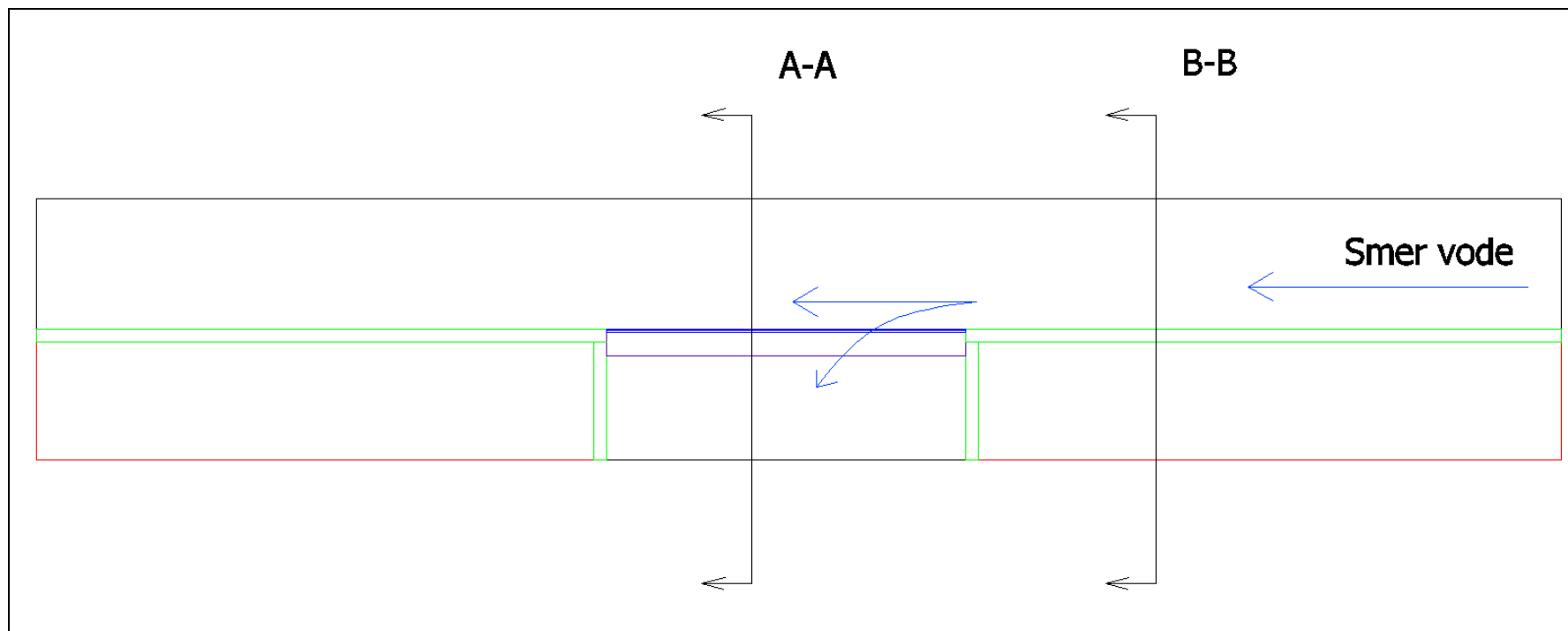


A2 Prereza A-A in B-B (glej A1)



**Priloga B** Tloris in prerezi uporabljeni pri primeru 1 in 2, scenarij 2

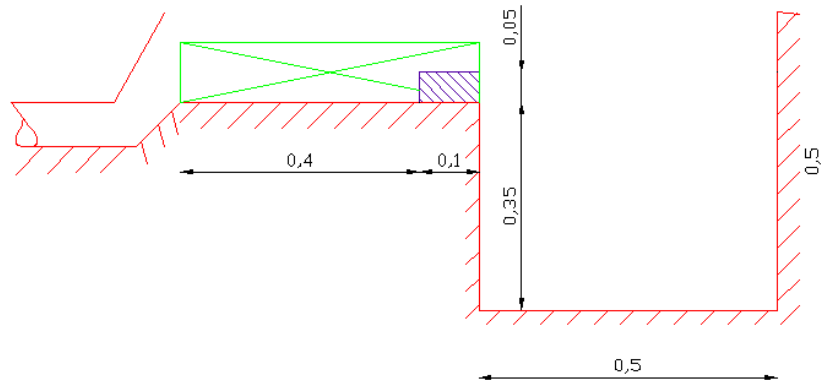
**B1** Tloris



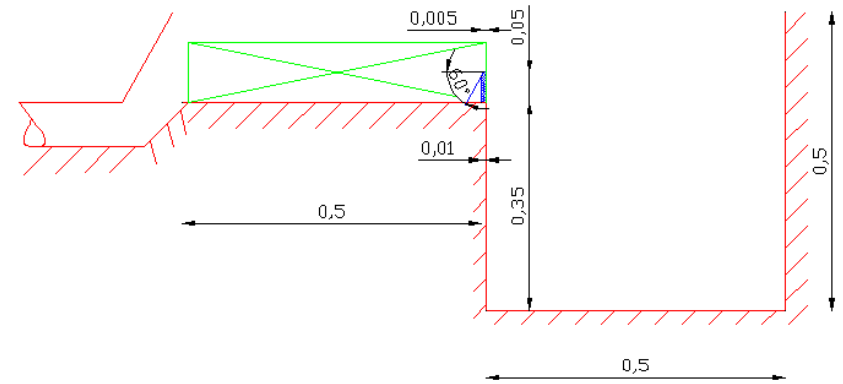


**B2**      Prezezi A-A:široki prag, A-A:ostrorobi preliv in B-B (glej B1)

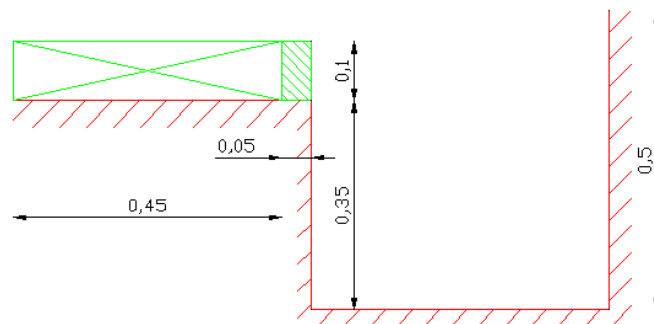
**Prerez A-A: široki prag**



**Prerez A-A: ostrorobi preliv**

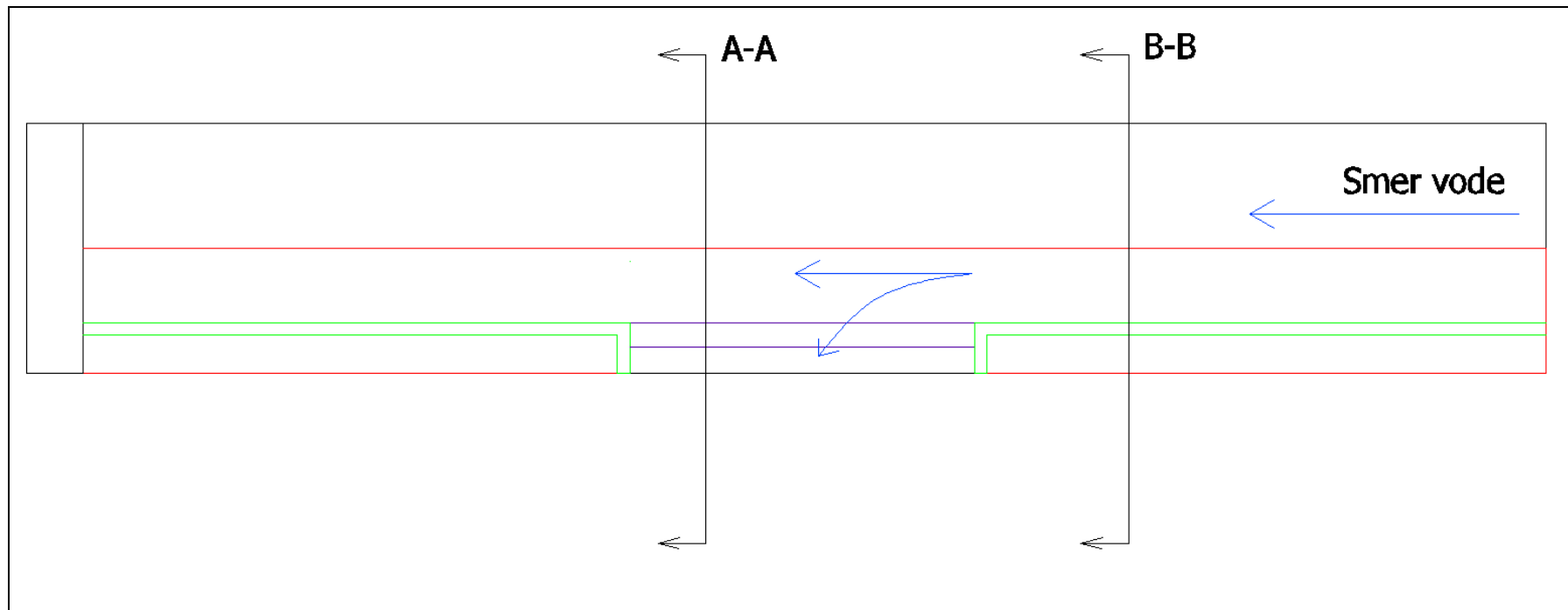


**Prerez B-B**

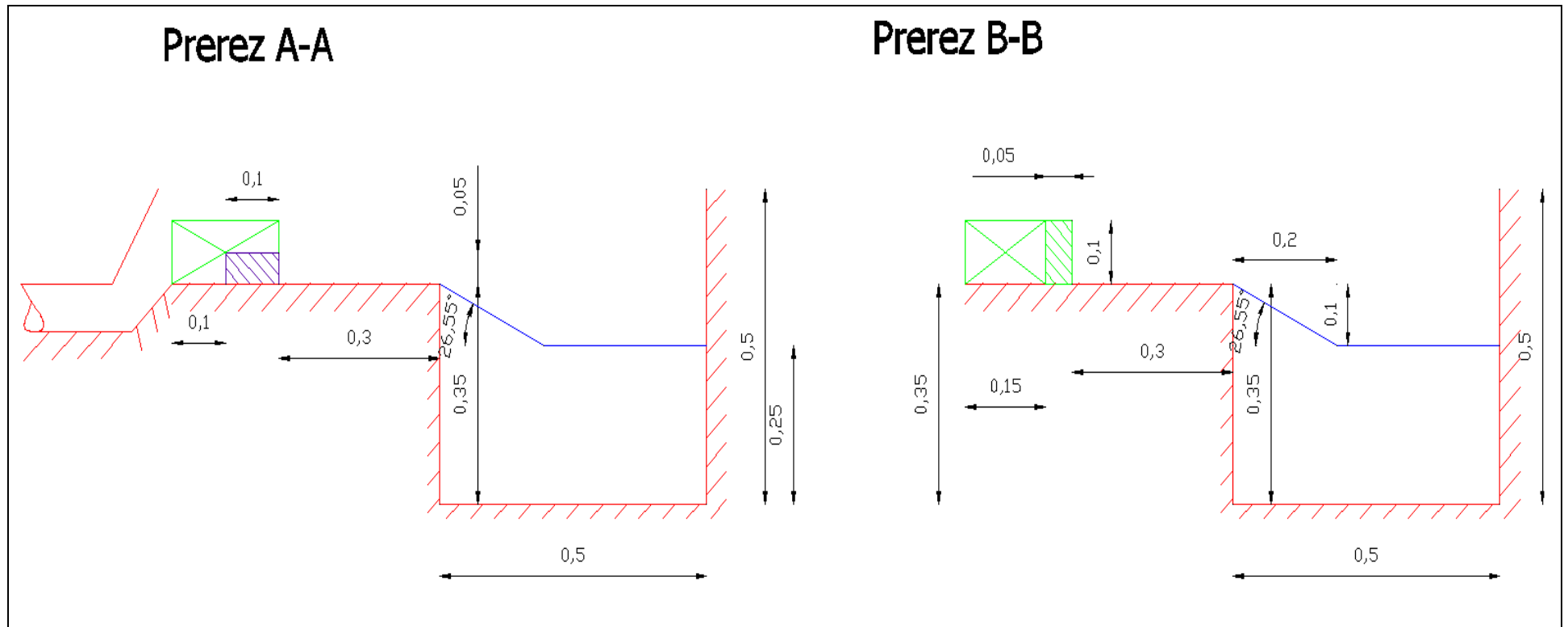


**Priloga C** Tloris in prereza uporabljena pri primeru 1, scenarij 3

**C1** Tloris

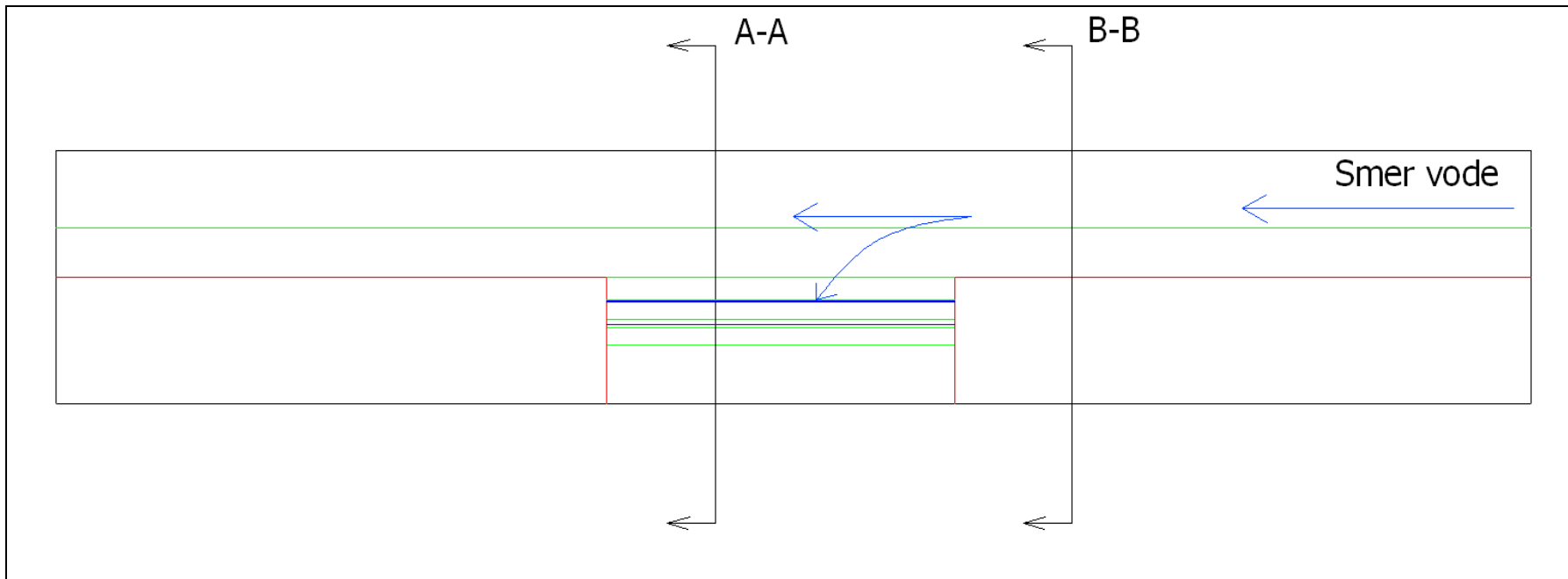


C2 Prereza A-A in B-B (glej C1)



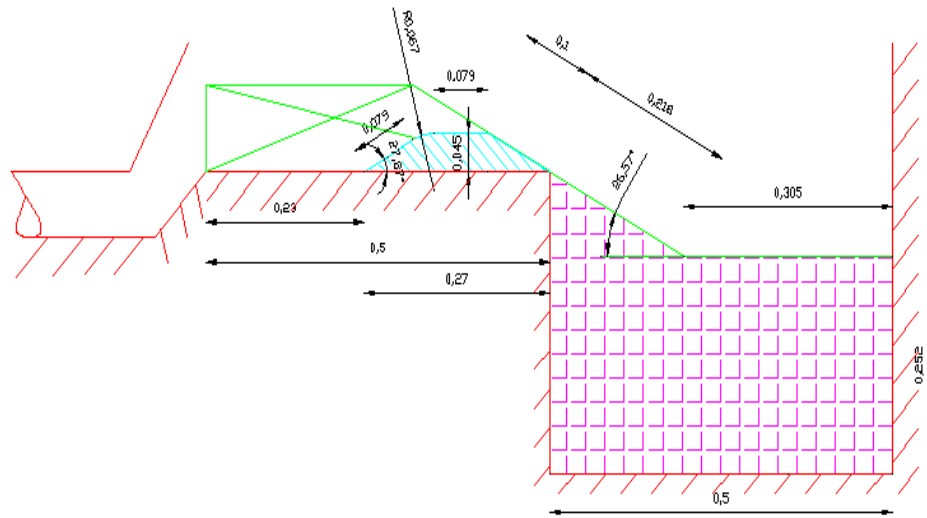
**Priloga D** Tloris in prerezi uporabljeni pri primeru 1,2 in 3, scenarij 4

**D1** Tloris

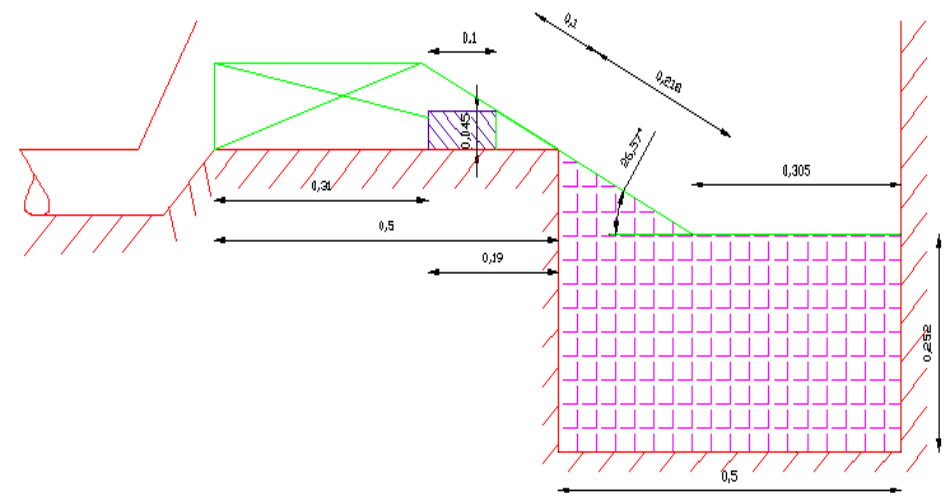


D2      Prerezi A-A:hrapava drča, A-A:široki prag, A-A:ostrorobi preliv in B-B (glej D1)

Prerez A-A: hrapava drča



Prerez A-A: široki prag





**Priloga E** Tloris in prerezi uporabljeni pri primeru 1 in 2, scenarij 5

**E1** Tloris

