

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Hidrotehniška smer

Kandidat:

Miha Šupek

Ekstrapolacija pretočne krivulje vodomerne postaje s hidravličnim modelom HEC-RAS.

Diplomska naloga št.: 3001

Mentor:

prof. dr. Franc Steinman

Somentor:

viš. pred. dr. Leon Gosar

Ljubljana, 28. 2. 2008

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji hidrotehnične smeri:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 627.133(043.2)

Avtor: Miha Šupek

Mentor: prof. dr. Franci Steinman

Somentor: mag. Leon Gosar

Naslov: Ekstrapolacija pretočne krivulje vodomerne postaje s hidravličnim modelom HEC-RAS

Obseg in oprema: 68 str., 3 pregl., 63 sl., 3 pril.

Ključne besede: vodomerna postaja, pretočna krivulja, hidravlika, ekstrapolacija, HEC-RAS

Izveček

Pretočna krivulja opisuje zvezo med gladino vode in pretokom ter omogoča transformacijo izmerjenih vodostajev v pretoke. Zaradi pomanjkanja hidrometričnih meritev za velike pretoke, je zgornji del pretočne krivulje dobljen s pomočjo ekstrapolacije. Diplomsko delo obravnava ekstrapolacijo pretočne krivulje za vodomerno postajo Litija na Savi. Namen naloge je analizirati območje raztrosa ekstrapoliranih vrednosti zaradi uporabe različnih metod. Obstaja več načinov ekstrapolacije, v nalogi pa je uporabljena ekstrapolacija s pomočjo hidravličnega modela. Na podlagi posnetih podatkov geometrije je bil v programu HEC-RAS narejen hidravlični model odseka Save. Umerjanje modela je potekalo na podlagi izvedenih meritev pretoka z akustičnim Dopplerjevim merilnikom pretokov (ADMP) in meritev gladin. Dobro umerjen model namreč služi kot orodje za simulacijo dogodkov, ki se še niso zgodili. Zaradi obsežnih poplavnih območij dolvodno od vodomerne postaje, je za doseg boljših rezultatov, poleg 1-D simulacije, izvedena tudi simulacija kvazi 2-D modela, obravnavanega s pomočjo razvejanega toka. Iz primerjave rezultatov obeh simulacij ugotovimo, da na obravnavanem odseku poplavna območja na potek krivulje nimajo velikega vpliva in je izračun z 1-D modelom dovolj natančen. Kot rezultat naloge je s hidravličnim modelom dobljena pretočna krivulja, ki kaže, da ima vodomerni profil v povprečju za 10 % večjo pretočnost kot jo določa pretočna krivulja, ki je trenutno v uporabi na ARSO.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC:	627.133(043.2)
Author:	Miha Šupek
Supervisor:	Prof. Dr. Franci Steinman
Co-supervisor:	Msc. Leon Gosar
Title:	Gauging station rating curve extrapolation using HEC-RAS
Notes:	68 p., 3 tab., 63 fig., 3 ann.
Key words:	gauging station, rating curve, hydraulics, extrapolation, HEC-RAS

Abstract

Rating curve represents stage-discharge relationship and is used to transform observed water level into discharge. At high water levels, the stage-discharge relationship often has to be extrapolated due to lack of measured data. The graduation thesis analyses rating curve extrapolation for gauging station Litija on river Sava. The intent of thesis is to narrow the expansion area of extrapolation. There are different methods for extrapolating stage-discharge relationships and most advanced of them is to use a numerical model. The hydraulic simulation was performed with HEC-RAS, where the river Sava main channel and floodplains geometry had to be surveyed. Using discharge measurements made by acoustic Doppler current profiler (ADCP) and observed water levels, the roughness coefficients of the hydraulic model were calibrated and simulation for high discharges was taken. Due to relative wide floodplains downstream of gauging station, also quasi 2-D simulation using split-flow was taken to verify if 1-D model gives satisfactory results. Comparing both simulations, very good accuracy is established, so the use of 1-D simulation is certified. The final results show about 10 % difference between rating curve developed with HEC-RAS and rating curve used in ARSO.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge bi se zahvalil mentorju prof. dr. Franciju Steinmanu in somentorju mag. Leonu Gosarju, ki sta pomagala, da je naloga dobila končno podobo.

Zahvalil bi se staršema, ki sta mi ves čas študija stala ob strani, iz srca pa se za potrpežljivost in podporo pri izdelavi naloge zahvaljujem mojima najdražjima, Simoni in Niki.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Meritve vodostajev in pretokov	1
1.2	Namen diplomske naloge	3
2	IZHODIŠČA ZA IZRAČUN	5
2.1	Vrste tokov	5
2.1.1	Porazdelitev hitrosti po prerezu	6
2.1.2	De Chezy-jeva in Manningova enačba	7
2.1.2.1.	De Chezyjeva enačba	7
2.1.2.2.	Manningova enačba	8
2.1.3	Vpliv hrapavosti dna	9
2.2	Splošno o pretočnih krivuljah	11
2.2.1	Metode ekstrapolacije pretočnih krivulj	13
2.2.1.1.	Grafična ekstrapolacija	14
2.2.1.2.	Ekstrapolacija na osnovi korelacije	14
2.2.1.3.	Empirične metode ekstrapolacije pretočnih krivulj	17
2.2.1.4.	Ekstrapolacija s pomočjo matematičnega modela	17
2.3	Hidravlični račun z računalniškim programom HEC-RAS	19
2.4	Teoretične podlage za terenske meritve	22
2.4.1	Akustični Dopplerjev merilnik pretokov	22
2.4.2	Podatkovni zapisovalnik Gealog micro	25
3	OPIS RAZMER NA VODOMERNI POSTAJI LITIJA	27
3.1	Naravne danosti	27
3.1.1	Opis razmer na obravnavanem odseku	28
3.1.2	Geološke in hidrološke razmere	31
3.1.3	Odtočni režimi	33
3.2	Obstoječe pretočne krivulje	34
3.3	Terensko delo	36
3.3.1	Namestitev vodomerovalnikov, podatkovnega zapisovalnika in meritev pretoka	36

3.3.2	Podatki za modeliranje	39
3.3.2.1.	Geometrija odseka	39
3.3.2.2.	Meritve pretokov	40
3.3.2.3.	Meritve gladin na odseku vodotoka	45
3.3.2.4.	Določitev spodnjega robnega pogoja	48
4	MATEMATIČNO MODELIRANJE	49
4.1	Postopek izvedbe hidravličnega izračuna	49
4.1.1	Umerjanje hidravličnega modela	53
4.2	Prikaz rezultatov hidravličnega modela	56
4.3	Izvedba vejičastega toka	57
4.4	Ekstrapolacija pretočnih krivulj za višje pretoke	61
4.4.1	Za vodomerno postajo Sava – Litija I	61
4.4.2	Primer za sestavljen prečni profil	63
5	ZAKLJUČKI	67
	VIRI	69

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Obdobni pretoki na vodomerni postaji Litija I	32
Preglednica 2: Izvedene meritve na treh lokacijah v letu 2006 in 2007	41
Preglednica 3: Meritve izvedene s hidrometričnim krilom in ADMP v obdobju med letoma 2001 in 2006	44

KAZALO SLIK

Slika 1: Ekstrapolacija pretočne krivulje	3
Slika 2: Sile delujoče na izbrani volumen vodnega telesa dolžine L	8
Slika 3: Sprememba vodostaja in pretoka za neoviran odtok	11
Slika 4: Prileganje krivulje točkam meritev	12
Slika 5: Različne vrste krivulj, s katerimi opišemo prileganje meritvam za enoten prerez	16
Slika 6: Vpliv sestavljenega prereza na obliko pretočne krivulje	16
Slika 7: Orodna okna računalniškega programa HEC-RAS	21
Slika 8: <i>RioGrande Zedhed 1200 kHz</i>	23
Slika 9: <i>WorkHorse RioGrande1200 kHz</i>	23
Slika 10: Meritev z mostu	23
Slika 11: Prehod struge s čolnom	23
Slika 12: Območja neizmerjenih hitrosti z ADMP	24
Slika 13: Enota podatkovnega zapisovalnika Gealog Micro	25
Slika 14: Topografski prikaz odseka Save pri Litiji	27
Slika 15: Topografski prikaz vodomerne postaje Sava – Litija I	27
Slika 16: Vodozbirno območje Save do vodomerne postaje Litija I	28
Slika 17: Razmere na desnem bregu med vodomerno postajo in mostom	28
Slika 18: Zgornji del odseka z vrisanimi prečnimi prerezi	28
Slika 19: Prečni profil 7 (prodišče)	29
Slika 20: Desno poplavno območje	29
Slika 21: Omejeno poplavno območje	30
Slika 22: Zarast ob strugi	30
Slika 23: Prečni profil 3 (stranski rokav)	30
Slika 24: Prečni profil 2	30
Slika 25: Karakteristični pretoki na vodomerni postaji Litija I v obdobju od 1927 do 2001	32
Slika 26: Spreminjanje srednjega dnevnega vodostaja v letu 2004 na vodomerni postaji Litija	33
Slika 27: Trenutno veljavne pretočne krivulje za vodomerno postajo Sava-Litija I na Agenciji RS za okolje	35
Slika 28: Oznake na vodomeru	36

Slika 29: Lokacija VP Litija I (PP 9)	36
Slika 30: Nameščeni vodomeri v PP 8	37
Slika 31: Prečni prerez 10m dolvodno of PP 8 v HEC-RASu	37
Slika 32: Nameščeni vodomeri v PP 1	38
Slika 33: Prečni prerez 1 v HEC-RASu	38
Slika 34: Namestitev zapisovalnika	38
Slika 35: Prenosnik s povezovalnim kablom	38
Slika 36: Vzdolžni prerez odseka z nameščenimi vodomeri	40
Slika 37: Razlika pretoka med izvedeno meritvijo in največjim pretokom dne 19.9.2007	43
Slika 38: Arhivske meritve do sedaj najvišjih meritev pretoka, primerjane s pretoki izbrane verjetnosti pojava	45
Slika 39: Sled najvišje gladine dne 19.9.2007	46
Slika 40: Izris limnigrafa dne 19.9.2007	46
Slika 41: Grafični prikaz spreminjanja gladine Save	46
Slika 42: Voda na levem poplavnem območju	47
Slika 43: Razmere v prečnem profilu 2	47
Slika 44: Prečni prerez kot ga poda ADMP (izrisan s programsko opremo WinRiver)	48
Slika 45: Potek trase reke Save na izbranem odseku izrisan v HEC-RAS	49
Slika 46: Različne možnosti upoštevanja količine vode v prečnem prerezu	51
Slika 47: Most v Litiji – PP8	52
Slika 48: Shema mostu v HEC-RAS	52
Slika 49: Horizontalna sprememba n_g v prečnem profilu 8	54
Slika 50: Prečni profil 9 pri pretoku $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$ z označeno opazovano gladino	54
Slika 51: Vodomer predstavlja oviro toku vode	55
Slika 52: Prikaz gladin v PP 9	56
Slika 53: Prikaz gladin v PP 8	56
Slika 54: 3D pogled obravnavanega odseka pri pretoku $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$	56
Slika 55: Vzdolžni prerez obravnavanega območja pri pretoku $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$	57
Slika 56: Shematski prikaz izbire dveh vej po poplavnih območjih	58
Slika 57: Prečni prerez glavne struge (kota gladine je 233,49 m n.m.v)	59
Slika 58: Pripadajoči prečni prerez desnega poplavnega območja (233,50 m n.m.v)	59

Slika 59: Primerjava pretočne krivulje izvedene z 1-D in 1-D modelom z vejičastim tokom v HEC-RAS	60
Slika 60: Primerjava obstoječe pretočne krivulje in krivulje dobljene s HEC-RAS, s prikazom vpliva $\pm 5\%$ spreminjanja n_G	61
Slika 61: Shema odseka Save, s strugo in dvema vejama toka po inundacijah	64
Slika 62: Sestavljen prečni profil – PP5	64
Slika 63: Ekstrapolacija pretočne krivulje za primer sestavljenega prečnega prereza 5	65

KAZALO PRILOG

- Priloga A: Tabelarni prikaz rezultatov hidravličnega modela za 3 izbrane pretoke
- Priloga B: Tabelarni izpis podatkovnega zapisovalnika
- Priloga C: Izpis poročila meritve Sava – Litija iz programa WinRiver

1 UVOD

Voda predstavlja za človeka eno pomembnejših dobrin, kar se kaže skozi celotno zgodovino, saj si je za svoje življenjsko okolje ponavadi izbiral bližino rek, potokov oziroma jezer. Zaradi večanja števila prebivalstva in s tem pomanjkanja prostora, se danes dogaja, da so pogosto naseljena tudi območja, za katera se ve, da so v poplavnem območju rek. Z gradnjo visokovodnih nasipov in razbremenilnikov se poskuša zaščititi tudi takšna območja, vendar se lahko, ob napačnem načrtovanju in prevelikim posegom v strugo reke, situacija poslabša oziroma se problem samo prestavi dolvodno.

1.1 Meritve vodostajev in pretokov

Na Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO) je razvita mreža vodomernih postaj na slovenskih rekah, kjer se izvajajo meritve pretokov in gladin. Za vsako posamezno vodomerno postajo so izrisane pretočne krivulje, ki prikazujejo zvezo med gladino vode v vodotoku in pretokom ter omogočajo transformacijo zabeleženih vodostajev v pretoke. Dobro zasnovane pretočne krivulje omogočajo kvalitetno napoved o pričakovanem vodostaju, če poznamo pričakovano vrednost pretoka. Iz tega lahko namreč predvidimo, do katere nadmorske višine se bo dvignila gladine reke in s tem poznamo obseg poplavnega območja. V obeh primerih so za preučevanje hidravličnih razmer najbolj zanimivi ekstremi, se pravi minimalni in maksimalni pretoki oziroma vodostaji. Ob suši vodostaji rek močno upadejo in takrat je potrebna omejitev za različne uporabnike voda, ki odzemajo vodo iz rek (npr. za uporabo namakalnih sistemov, ribogojnice, različna podjetja...). V teh primerih je pomemben natančno izveden spodnji del pretočnih krivulj, ki ga je, zaradi zadostnega števila meritev in dokaj enostavnih pogojev pri meritvi pretoka ob nizkem vodostaju, ponavadi možno zagotoviti z zadosti veliko natančnostjo. Drug ekstrem se pojavi v času poplav, ko vodotoki dosežejo velike pretoke. Tedaj so oteženi pogoji za izvedbo kvalitetne meritve, kar posledično doprinese k pomanjkanju podatkov za izris zgornjih odsekov pretočnih krivulj. Za te odseke se pretočna krivulja določi s pomočjo ekstrapolacije na podlagi izmerjenih pretokov pri nižjih gladinskih stanjih.

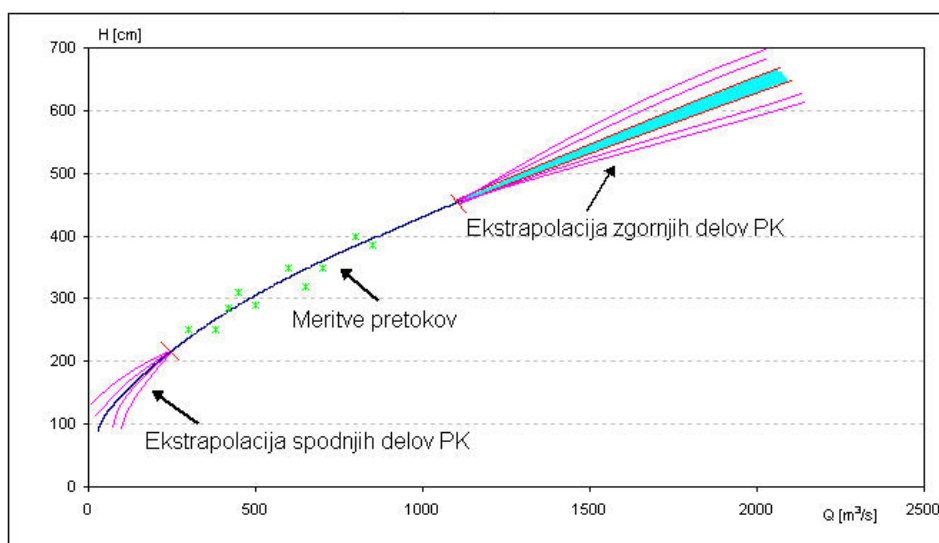
Hiter razvoj tehnologije in znanosti nam danes omogoča, da lahko veliko hitreje rešimo nekatere probleme, ki so se v preteklosti zdeli še tako zapleteni. Tudi v hidrotehnični praksi so pomembne nadgradnje doživeli računalniški programi, ki omogočajo simulacijo visokovodnih dogodkov. Z dobrimi vhodnimi podatki, kot so natančno izmerjena geometrija struge in terena, natančne meritve pretokov in vodostajev ter dobrim poznavanjem razmer na obravnavanem odseku, lahko dobimo rezultate, ki se zelo približajo dejanskemu stanju ter s tem predvidimo negativne posledice. Prav tako se je izpopolnila merilna oprema, ki se uporablja za merjenje pretokov ter tako v mnogo čem izboljšala kvaliteto samih meritev. Danes so za meritve pretokov že v redni uporabi akustični Dopplerjevi merilniki pretokov (ADMP), medtem ko so se v preteklosti uporabljala hidrometrična krila. Akustični merilniki omogočajo varnejše in enostavnejše meritve tudi ob povečanih pretokih, vendar pa je zaradi dejstva, da so v uporabi šele kratek čas ter da so poplave redki dogodki, ki se ne zgodijo nujno vsako leto, na večini vodomernih postaj še vedno moč zaslediti pomanjkanje meritev v zgornjih delih pretočnih krivulj. S tem so sama oblika in potek zgornjih delov pretočnih krivulj povzeti po starejših krivuljah, ki so bile preračunane in izrisane na osnovi starejših meritev s hidrometričnimi krili. Glede na nove izpopolnjene računalniške programe za simulacijo hidravličnih razmer je zamisel o izdelavi hidravličnih modelov za večino vodomernih postaj vsekakor vredna razmisleka. S tem je namreč možno preveriti in po potrebi popraviti dejanske poteke pretočnih krivulj ter posledično spremeniti maksimalne pričakovane pretoke.

Diplomska naloga je sestavljena iz teoretičnega in praktičnega dela. Najprej so v teoretičnem delu predstavljena vsa osnovna znanja o obravnavani temi, kasneje je v praktičnem delu predstavljen potek dela na konkretnem primeru vodomerne postaje Litija. V prvi fazi dela na terenu smo v sodelovanju z Oddelkom za površinske vode Agencije Republike Slovenije za okolje izvedli nivelacijo izbranega odseka Save ter na dveh prečnih prerezih dodatno namestili vodomere. Meritve pretokov so bile predvidene v okviru rednega monitoringa ARSO, razen v primeru visokih voda, ko se izvedejo izredne meritve, ki predstavljajo izredno pomemben dodaten podatek pri umerjanju hidravličnega modela. S podatki o geometriji terena in izmerjenimi pretoki je bil v računalniškem programu HEC-RAS izdelan hidravlični model. Umerjanje modela je doseženo na podlagi merjenih pretokov in gladin s

spreminjanjem koeficienta hrapavosti, na koncu pa je opravljena tudi analiza občutljivosti glede na spremenljivost koeficienta hrapavosti.

1.2 Namen diplomske naloge

Na Agenciji za okolje se izvaja monitoring slovenskih vodotokov, zato je za te potrebe razvita mreža več kot 200 hidroloških postaj po vsej Sloveniji. Za vsako od postaj so skonstruirane pretočne krivulje, ki predstavljajo zvezo med vodostajem in pretokom. V osrednjem delu pretočnih krivulj je ponavadi na voljo zadostno število meritev (Slika 1), zato lahko krivuljo izrišemo s prileganjem izvedenim meritvam (*curve fitting*). Za ekstremne vrednosti (ekstremno visoki oziroma ekstremno nizki pretoki), pa je zaradi pomanjkanja podatkov potrebno opraviti ekstrapolacijo. V diplomski nalogi se bomo osredotočili na območje visokih pretokov (zgornji deli pretočnih krivulj), kjer lahko prihaja do večjega raztrosa ekstrapoliranih vrednosti. Namen naloge je, s pomočjo podatkov o izmerjenih visokih pretokih zožiti območje raztrosa same ekstrapolacije.



Slika 1: Ekstrapolacija pretočne krivulje

Danes se z novejšimi metodami meritev pretokov, na natančnejši način izvede meritve višjih pretokov in posledično se lahko pokažejo odstopanja od obstoječih pretočnih krivulj, ekstrapoliranih na podlagi nižjih meritev. S tem se tudi zmanjša verodostojnost obstoječih pretočnih krivulj in jih je potrebno dodatno preveriti. Eden takšnih primerov so vodomerne

postaje na spodnji in srednji Savi, kjer obstaja možnost, da bi bilo potrebno pretočnost povečati za 5 – 10 %. Zato smo v diplomski nalogi predstavili način izdelave pretočnih krivulj s pomočjo hidravličnega modela, ki predstavlja najbolj napreden način ekstrapolacije, ter preverili kateri vhodni podatki so ključni, da je model čim bolj natančen. Zanimala nas je ekstrapolacija zgornjih delov pretočnih krivulj na izbranem primeru vodomerne postaje Litija na reki Savi, kjer so bile za potrebe diplomske naloge izvedene dodatne kontrolne meritve pretokov.

V diplomski nalogi želimo tudi preveriti ali je izvedba 1-D hidravličnega modela zadosti natančna za obravnavani primer ali pa je, zaradi obširnih poplavnih območij na odseku dolvodno od vodomerne postaje, potrebno problem predstaviti v 2-D modelu oziroma t.i. kvazi 2-D modelu. Možnost izvedbe kvazi 2-D hidravličnega modela je v programu HEC-RAS omogočena s funkcijo vejičastega toka (*Split Flow*).

Cilj diplomske naloge ni potrditi oziroma zavreči veljavnost zgornjih delov obstoječe pretočne krivulje ARSO, pač pa le podati okvirno mejno območje, kjer naj bi krivulje potekale. Izvedena analiza občutljivosti koeficienta hrapavosti je namreč narejena s postopnim povečevanjem in zniževanjem umerjevalnega koeficienta hrapavosti, zato računski pretok na grafu predstavlja neko območje, kjer naj bi veljale pretočne krivulje izvedenega hidravličnega modela.

2 IZHODIŠČA ZA IZRAČUN

Na začetku bodo predstavljene osnovne izpeljave ter védenja o obravnavanem problemu. S tem je omogočeno boljše razumevanje praktičnega primera izračuna pretočne krivulje v odprtih vodotokih.

2.1 Vrste tokov

Tok vode se lahko spreminja s časom in prostorom. Glede na čas ločimo stalen in nestalen tok. Glede na spreminjanje vzdolž struge zaradi spreminjanja prereza, pa ločimo enakomeren in neenakomeren tok. Možni so štirje tipi tokov:

- stalni enakomerni tok: $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$; $\frac{\partial u}{\partial s} = 0$

Pretok se ne spreminja po času in prerez je vzdolž toka konstanten

- stalni neenakomerni tok: $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$; $\frac{\partial u}{\partial s} \neq 0$

Tok se spreminja vzdolž struge, vendar pa količina pretoka ostaja konstantna po času.

- nestalni enakomerni tok: $\frac{\partial u}{\partial t} \neq 0$; $\frac{\partial u}{\partial s} = 0$

Prerez ostaja vzdolž toka nespremenjen, vendar se pretok s časom spreminja.

- nestalni neenakomerni tok: $\frac{\partial u}{\partial t} \neq 0$; $\frac{\partial u}{\partial s} \neq 0$

Pretok se spreminja po času, prav tako pa se spreminja prečni prerez vzdolž toka.

Za obravnavanje problema bomo v nadaljevanju privzeli, da imamo opravka s stalnim enakomernim tokom, kljub temu, da je teoretičnim pogojem za uporabo stalnega enakomernega toka v praksi možno le redko popolnoma zadovoljiti. Stalni enakomerni tok se v lahko v naravi pojavi le v zelo dolgih, blago vijugajočih, prizmatičnih kanalih, v katerih se dokončno razvije ustrezna hitrost toka. Z upoštevanjem ustreznih predpostavk pa je možno napake zmanjšati na minimum in še vedno dobimo zadovoljive rezultate.

Vsak zgoraj opisan tok je lahko mirni, deroči, lahko pa se nahaja tudi kot vmesni primer med tema dvema stanjema (kritični tok). Razdelitev je možna na podlagi Froudovega števila, ki ga za vodotoke izračunamo po spodnji enačbi:

$$Fr = \bar{v} / \sqrt{g \cdot A / B_s} \quad (1)$$

Fr...Froudovo število

\bar{v} ...povprečna hitrost toka skozi prerez A [m/s]

A...prečni prerez [m²]

B_s...širina struge na višini gladine

Za široke reke velja približek $A/B_s \sim d$, kjer je d povprečna globina prereza. Tako dobimo novo obliko enačbe:

$$Fr = \bar{v} / \sqrt{g \cdot d} \quad (2)$$

Tok razdelimo na podlagi Froudovega števila na mirni in deroči tok, pri čemer velja:

Fr < 1 mirni tok

Fr > 1 deroči tok

2.1.1 Porazdelitev hitrosti po prerezu

Porazdelitev hitrosti po prečnem prerezu je ponavadi precej neenakomerna. Na porazdelitev hitrosti po prerezu vplivajo številni parametri, kot so: oblika prečnega prereza, lokacija prečnega prereza v vzdolžnem poteku struge (krivina, raven odsek), hrapavost ostenja, ovire v toku (mostni oporniki), vegetacija, ipd. Na dovolj dolgih ravnih odsekih je tipična razporeditev hitrosti takšna, da je hitrost ob ostenju manjša, v notranjosti toka se pojavi ena ali več matric toka. Vse neenakomernosti v razporeditvi hitrosti po prerezu zajamemo v popravnem Coriolisovem koeficientu α_c .

Ponavadi pa v praksi ni potrebno obravnavati celotnega 3-D gibanja vode, pač pa celoten problem poenostavimo na 1-D obravnavo toka. Pri takšni obravnavi toka je pomembno, da

ponazorimo razmere v prečnem profilu vodotoka s povprečnimi parametri za tok kot celoto. V enačbah za 1-D tok zato uporabimo srednjo hitrost (po prerezu):

$$\bar{v} = Q / S \quad (3)$$

\bar{v} ...povprečna hitrost po prerezu

Q...pretok

S...površina prečnega prereza

2.1.2 De Chezy-jeva in Manningova enačba

Splošna enačba za izračun povprečne hitrosti enakomernega toka, predlagana po različnih avtorjih je:

$$\bar{u} = C \cdot R^x \cdot I_0^y \quad (4)$$

\bar{u} ...povprečna hitrost po prerezu

R...hidravlični radij: $R=S/O$

I_0 ...vzdolžni padec (naklon) kanala

C...koeficient

x, y...eksponenta

V praksi sta največkrat uporabljeni de Chezy-jeva in Manningova enačba prikazani v nadaljevanju.

2.1.2.1. De Chezyjeva enačba

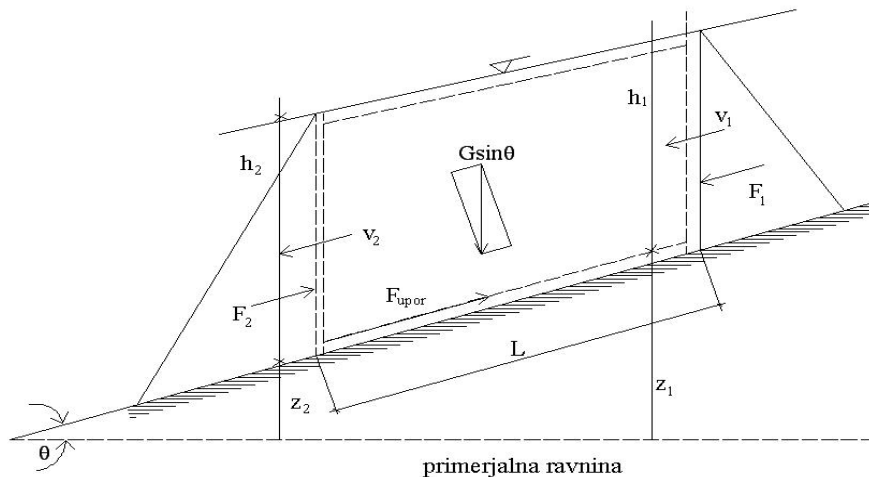
Izpeljemo jo iz definicije enakomernega toka, če privzamemo ustrezne predpostavke. Kot vemo se enakomerni tok pojavi, ko so sile upora toku v ravnotežju s silami, ki povzročajo gibanje. Sila upora toku na enoto površine, ki deluje na omočenem obodu kanala, narašča sorazmerno s kvadratom povprečne hitrosti:

$$F_{\text{upor}} \sim \bar{u}^2 \quad (5)$$

Na izbrani volumen vodnega telesa dolžine L, ki ima omočeni obod O, deluje torej sila upora toku vode (Slika 2):

$$F_{upor} = L \cdot O \cdot K \cdot \bar{u}^2 \quad (6)$$

K...sorazmernostna konstanta



Slika 2: Sile delujoče na izbrani volumen vodnega telesa dolžine L

Pri stalnem enakomernem toku sta sila, ki povzroča gibanje in sila upora izenačeni:

$$\rho \cdot g \cdot S \cdot L \cdot I_o = L \cdot O \cdot K \cdot \bar{u}^2 \quad (7)$$

Kadar je to ravnovesje, je hitrost toka enaka:

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{K}} \cdot \sqrt{R \cdot I_o} = C \cdot \sqrt{R \cdot I_o} \quad (8)$$

C...de Chezyjev koeficient $C = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{K}}$

De Chezyjev koeficient ni brezdimenzijski, saj ima dimenzijo $[m^{1/2} \cdot s^{-1}]$. Določimo ga s poizkusi.

2.1.2.2. Manningova enačba

Nastala je kot rezultat iz vrednotenja eksperimentalnih podatkov in je čisto eksperimentalnega značaja (brez izpeljave):

$$\bar{u} = \frac{1}{n_G} \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{I_o} \quad (9)$$

V enačbi nastopa koeficient trenja n_G , ki pa tudi ima dimenzijo $[s \cdot m^{-1/3}]$.

Če izenačimo obe enačbi za hitrost:

$$C \cdot \sqrt{R \cdot I_o} = \frac{1}{n_G} \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{I_o} \quad (10)$$

dobimo zvezo:

$$C = \frac{1}{n_G} \cdot R^{1/6} \quad (11)$$

S tem smo pokazali, da mora izračun hitrosti tako po de Chezyjevi kot Manningovi enačbi pri istih razmerah dati isti rezultat.

2.1.3 Vpliv hrapavosti dna

Manningova in de Chezyjeva enačba sta odvisni od Reynoldsovega števila, hrapavosti na ostenju in geometrijskih lastnosti prečnega prereza kanala. Za n_G in C predpostavimo, da se obnašata enako kot Darcy-Weisbachov koeficient trenja (λ), uporabljen za določitev ocene energijskih izgub v cevovodih (Steinman, 1999).

$$I_o = \frac{\lambda}{4R} \cdot \frac{\bar{u}^2}{2g} \quad (12)$$

$$n_G = R^{1/6} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{8g}} \quad (13)$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \quad (14)$$

Reynoldsovo število se določa na podlagi eksperimentalno določene brezdimenzijske enačbe

$$Re = \frac{\bar{v}d}{\nu} \quad (15)$$

\bar{v} ...srednja hitrost toka [m/s]

d ...karakteristična dolžina

ν ...kinematični koeficient viskoznosti [m²/s]

V primeru velikih Reynoldsovih števil in velike hrapavosti, kar je običajno primer v naravnih koritih, postane faktor trenja neodvisen od Reynoldsovega števila. Manningova enačba ima tedaj konstantno vrednost za n_G le v primeru popolnoma hrapavega turbulentnega toka in takrat je pomembno kvalitativno poznavanje faktorjev, od katerih je n_G odvisen. Enega od načinov, ki pregledno upošteva celo vrsto vplivov, je podal W.H. Shen v obliki enačbe:

$$n_G = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m \quad (16)$$

n_G ...izračunani Manningov koeficient hrapavosti

n_0 ...vpliv materiala, ki sestavlja strugo (glina, prod)

n_1 ...vrednost, ki upošteva stopnjo hrapavosti omočenega oboda

n_2 ...faktor za določitev vpliva neprizmatičnosti

n_3 ...faktor za določitev vpliva ovir v koritu

n_4 ...faktor vpliva zarasti z vegetacijo

m ...stopnja meandriranja vodotoka

Manningov koeficient hrapavosti pa lahko ocenimo tudi z meritvami stanja na terenu na podlagi izmerjenih pretokov, poteka gladin in karakteristik vodotoka na stabilnem rečnem odseku vodotoka. Za izmerjenih N prečnih prerezov je podana enačba:

$$n_G = \frac{1}{Q} \left(\frac{(h + h_v)_1 - (h + h_v)_N - \sum_{j=2}^N (k \cdot \Delta h_h)_{j-1,j}}{\sum_{j=2}^N \frac{L_{j-1,j}}{\left(SR^{2/3}\right)_{j-1} \cdot \left(SR^{2/3}\right)_j}} \right) \quad (17)$$

h gladina prostega toka v profilu glede na znane podatke ostalih profilov

$(h_v)_{j-1,j}$ sprememba hitrostne višine med profiloma $j-1$ in j

$h_v = \frac{\alpha_c \cdot \bar{u}^2}{2g}$ hitrostna višina v profilu (člen kinetične energije)

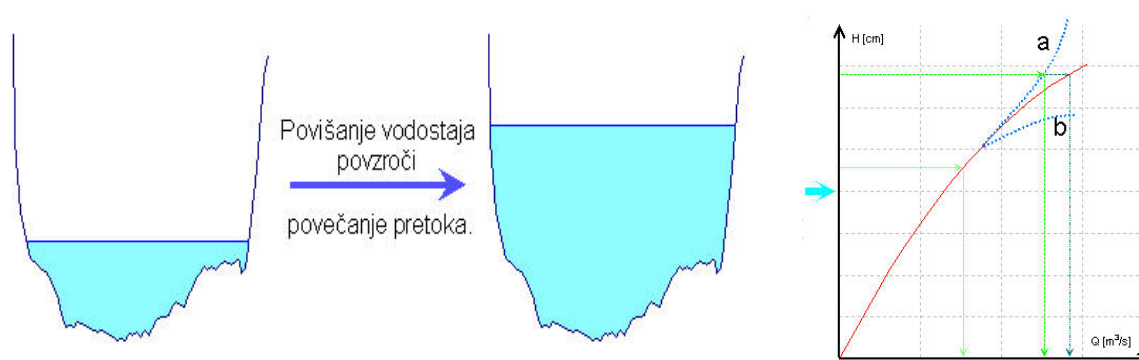
k koeficient, ki zajema neenakomernost kanala ($k=0$, če je kanal enakomeren; $k=1$ če neenakomeren)

$L_{j-1,j}$ razdalja med profiloma $j-1$ in j

Pomembno je, da so izmerjene količine (opazovanja) vsaj v dveh prečnih prerezih. Poleg zgoraj omenjenih metod, lahko koeficient hrapavosti določimo tudi na podlagi merjenih hitrosti ali z različnimi empiričnimi metodami.

2.2 Splošno o pretočnih krivuljah

Za mirni tok v vodotoku velja, da se z višanjem vodostaja večja pretok, kar velja tudi obratno, da vsako povečanje pretoka povzroči dvig gladine vodotoka (Slika 3). To razmerje med vodostajem in pretokom opisujejo pretočne krivulje, ki nam omogočajo transformacijo nivograma v hidrogram. Pretočne krivulje so zasnovane na izhodiščih, da je tok vode v strugi enakomeren in se s časom ne spreminja. Na spodnji sliki je prikazan potek pretočne krivulje pri neoviranem odtoku, kot tudi potek, ko se zaradi dolvodnih ovir pojavi zajezba (varianta a) ali pa se zaradi dolvodnega pojava deročega toka pojavi depresija (varianta b). Oba pojava lahko imata bistven vpliv na določitev pretoka pri izmerjeni gladini na vodomerni postaji.

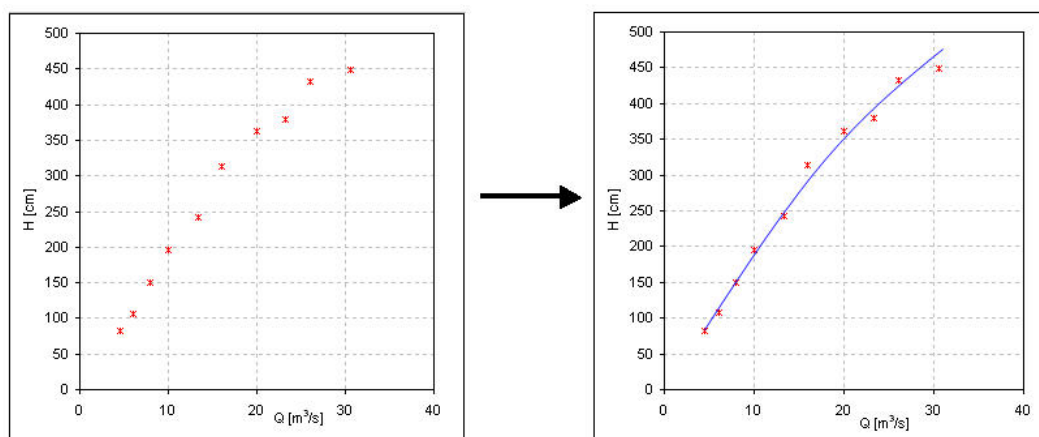


Slika 3: Sprememba vodostaja in pretoka za neoviran odtok

Načrtovanje pretočnih krivulj se izvaja na podlagi meritev pretoka na terenu. Vsako merilno mesto je opremljeno z merilno lato oziroma samodejnim vodomermom, ki služi za odčitek vodostaja. Podatek o pretoku dobimo iz meritve pretokov. Meritve so se v preteklosti izvajale s hidrometričnimi krili, razvoj tehnologije pa je omogočil, da se danes v glavnem uporabljajo akustični merilniki pretokov oziroma pri nižjih vodostajih merilniki FlowTracker.

Posamezna meritev, ki daje podatek o vodostaju in pretoku, nam predstavlja eno točko na grafikonu pretočnih krivulj. Za vsako novo vzpostavljeno merilno mesto je potreben niz

meritev ob različnih vodostajih, da dobimo čim natančnejši potek pretočne krivulje. Pretočna krivulja namreč na grafu predstavlja funkcijo, ki se najbolje prilega nizu točk meritev pretoka (Slika 4). Nikoli namreč nimamo točk na isti liniji, pač pa so vedno odstopanja zaradi merilne negotovosti, katerih velikostni razred znaša približno $\pm 5\%$.



Slika 4: Prileganje krivulje točkam meritev

Ob dobro izbranem merilnem mestu za vodomerno postajo, imajo pretočne krivulje odsekoma približno ves čas nekako enak naklon. Dobro merilno mesto pomeni lokacijo na ravnem odseku vodotoka, kjer imamo v strugi eno najnižjo točko dna in se voda ne razliva na poplavne ravnice tudi pri visokih pretokih. Prav tako ne sme biti prevelikega vpliva zarasti. Če ne moremo zagotoviti pogoju, da se voda ne razliva na poplavne ravnice, se bo to na pretočni krivulji pokazalo v izraziti spremembi naklona krivulje, od tiste točke naprej, kjer začne voda prelivati iz osnovne struge. Ko se voda razlije na poplavno ravnico, se namreč pretok še kar večja tako kot prej, gladina vode pa se dviguje dosti bolj počasi, saj vodotok zavzema širše območje. Na nekaterih vodomernih postajah je primer, ko imamo v strugi vodotoka betonsko kineto, kjer pri zelo nizkih pretokih voda teče le po ozki kineti, pri določeni višini pa se tok razširi po celi strugi. To pa pomeni, da imamo za takšno merilno mesto enakomeren potek prečne krivulje v spodnjem delu, dokler vsa voda teče le po kineti (običajno ves čas enak prerez) nato pa se pretočna krivulja ostro prelomi v trenutku, ko voda prestopi vrh kinete.

Ko je pretočna krivulja za določeno merilno mesto skonstruirana, jo je potrebno kontrolirati z rednimi meritvami. Na Agenciji Republike Slovenije za okolje opravijo za vsako vodomerno

postajo letno v povprečju 6 rednih meritev. Če pade kontrolna meritev znotraj zahtevanega reda natančnosti ($\pm 5\%$), potem se pretočni krivulji podaljša veljavnost, v nasprotnem primeru je potrebna konstrukcija nove. Še posebej je pomembno, da se izvedejo kontrolne meritve po nastopu visokih voda, saj je to dostikrat vzrok za spremembo poteka pretočne krivulje zaradi spremembe prereza (erozija, naplavine). Prav tako vsak večji poseg v strugi na območju vodomerne postaje (dela v strugi, izgradnja pragu, odstranitev večje ovire v strugi) povzroči spremembo pretočne krivulje.

Za pretočne krivulje je značilno, da imamo veliko število meritev za nizke in srednje pretoke ter je posledično v tem delu tudi konstrukcija krivulj enostavna. Problem nastopi za zgornje dele pretočnih krivulj, kjer ni na voljo meritev oziroma so zelo redke. Tu se uporablja ekstrapolacija na osnovi meritev pri nižjih vodostajih. Možni načini ekstrapolacij so predstavljeni v naslednjih poglavjih. Ker so pretočne krivulje vir informacij o pretokih in vodostajih za mnoge službe, ki delujejo v hidrološki praksi, je potrebno, da se pretočne krivulje sproti ažurirajo in vse službe uporabljajo iste pretočne krivulje.

2.2.1 Metode ekstrapolacije pretočnih krivulj

Informacijo o trenutnem pretoku dobimo s pomočjo merjenja vodostaja z vodomeri in preračunu odtoka s pomočjo pretočnih krivulj, ki odražajo razmerje med pretokom in vodostajem, imenovane tudi $Q - h$ krivulje. Ta relacija $Q - h$ mora biti določena in preverjena z direktno merilno metodo (npr. pretok izračunamo kot produkt izmerjenega prečnega prereza in povprečne hitrosti), kot je npr. na podlagi meritev z ADMP. Da dosežemo dober odnos med vodostaji in pretokom, je potrebno meritve opravljati večkrat v daljšem časovnem obdobju, z upoštevanjem dejstva, da je rezultate za visoke pretoke izredno težko dobiti, saj se poplave pojavljajo redko in ponavadi trajajo le kratek čas, v tem obdobju pa so pogoji za meritve zelo zahtevni.

Kljub temu, da je poznavanje visokih pretokov zelo pomembno za določanje ekstremnih statističnih vrednosti (uporabno za varnost pregrad, zaščito pred poplavami), so vrednosti za zgornje dele pretočnih krivulj ponavadi ekstrapolirane s pomočjo statističnih metod. V splošnem bi bilo zato potrebno med sabo primerjati rezultate različnih metod ekstrapolacije.

Za vse metode je zahtevano, da se pretočna krivulja določi odsekoma, še posebej, če so zabeležene občutne spremembe geometrije prečnega prereza.

2.2.1.1. Grafična ekstrapolacija

Enostavna metoda prikaza pretočnih krivulj je vnos vseh meritev na graf in sicer kot pari vodostaj-pretok. Skozi polje izmerjenih točk potegnemo krivuljo, ki se najbolje prilega vsem, z neko toleranco določenim, rezultatom meritev. V splošnem dobimo dobre rezultate za območje merjenih pretokov, problemi nastopijo za visoke pretoke, ki presegajo območje meritev.

Z uporabo logaritmičnega merila si lahko pomagamo pri ekstrapolaciji, če so v tem primeru meritve na ravni črti, ki se enostavno ekstrapolira, s predpostavko, da so parametri Q-h krivulje konstantni. Vendar moramo nato za preverjanje verjetnosti te predpostavke in praktično uporabo krivuljo spet prikazati v linearnem merilu.

Druga pomoč je, da grafično prikažemo razmerje med površino prečnega prereza (A) in vodostajem (h) ter srednjo hitrostjo (v) z vodostajem (h), kjer je srednja hitrost izračunana kot $v = Q/A$. S tem ugotovimo možne napake v merjenju površine prečnega profila ali pretoka. Kljub temu, da je grafična ekstrapolacija enostavna in se lahko napake hitro odkrijejo, pa metoda ni v celoti uporabna – pri izlitju v inundacije se namreč razmere pomembno spremenijo.

2.2.1.2. Ekstrapolacija na osnovi korelacije

Stvarnejši način ekstrapolacije razmerja med vodostajem in pretokom je uporaba neke funkcijske zveze, ki ima koeficiente prilagojene tako, da dosežemo čim boljše ujemanje med privzeto funkcijo in rezultati meritev. S tem načinom namesto statističnega odnosa Q-h uporabimo razmerje izraženo s pomočjo funkcije, ki opiše proces pretakanja. Vodostaj je namreč funkcija odvisna od pretoka (Dose, Morgenschweis, Schlurmann 2002). Ker nas pri pretočnih krivuljah dostikrat zanima, kakšen je pretok pri merjenem vodostaju, odvisnost ponavadi obravnavamo obratno.

Pozornost je potrebno posvetiti gladini, ki določa najnižji pretok, katera pa je v glavnem odvisna od razmer dolvodno. Boiten (2000) določa metodologijo, kako izračunati gladino za najnižji pretok:

$$\begin{aligned} & \text{izberemo } (Q_1, h_1) \text{ in } (Q_3, h_3) \\ & \text{določimo } (Q_2, h_2), \text{ kjer } Q_2 = \sqrt{Q_1 \cdot Q_3} \\ & \text{odtod sledi } h_0 = h_1 \cdot h_3 - h_2^2 \cdot h_1 + h_3 - 2 \cdot h_2 \end{aligned} \quad (18)$$

Osnovna funkcija je

$$Q = a \cdot W_0^m \quad (19)$$

izpeljana iz Brahms-Chezy –jeve enačbe (poenostavljena za pravokotne kanale)

$$Q = A \cdot v = C \cdot \sqrt{R \cdot I} = W_0 \cdot B \cdot C \cdot \sqrt{h \cdot I} = a \cdot W_0^{1,5} \quad (20)$$

kjer velja

$$W_0 = W - h_0 \quad (21)$$

Baumgartner (1981) poda enostavno rešitev z uporabo enačb:

$$a_1 = ((r \cdot S_y) / S_x + S_y / (r \cdot S_x)) / 2 \quad (22)$$

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \cdot \bar{x} \quad (23)$$

kjer predstavljajo

r...korelacijski koeficient

S...standardna deviacija

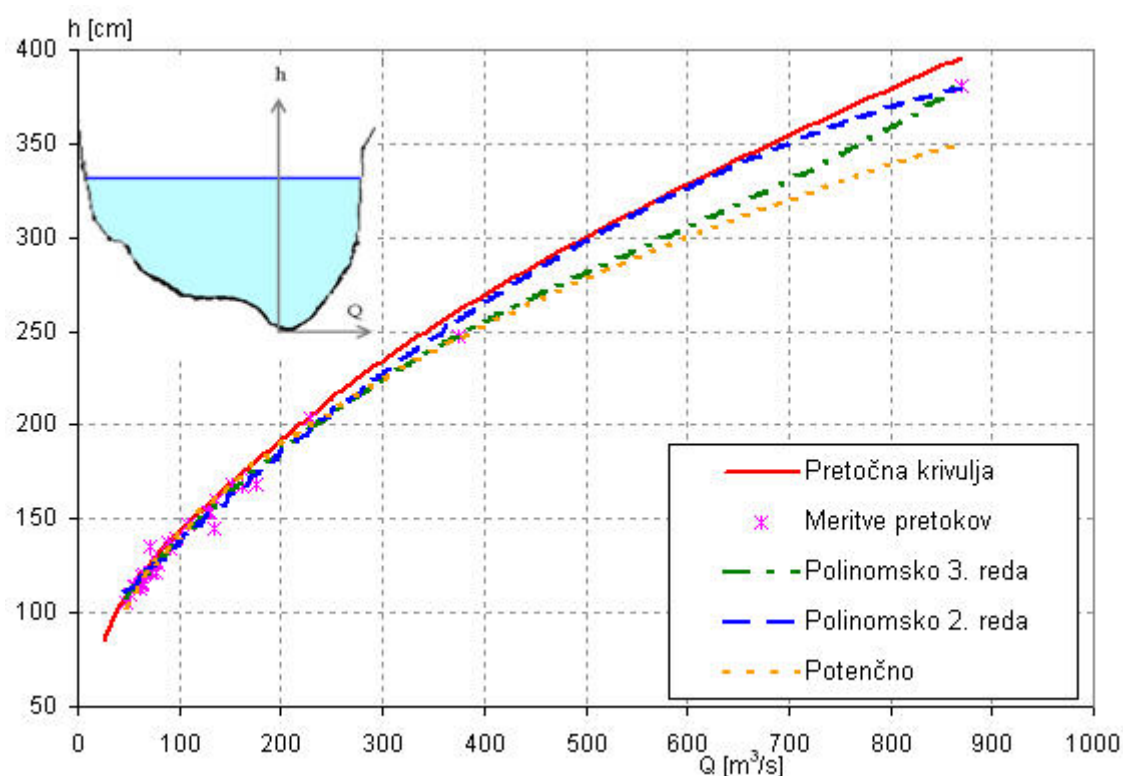
za spremenljivki x in y.

Kadar je korelacijski koeficient enak 1, $r = 1$, se rešitev poenostavi

$$m = \frac{S_y}{S_x} \quad (24)$$

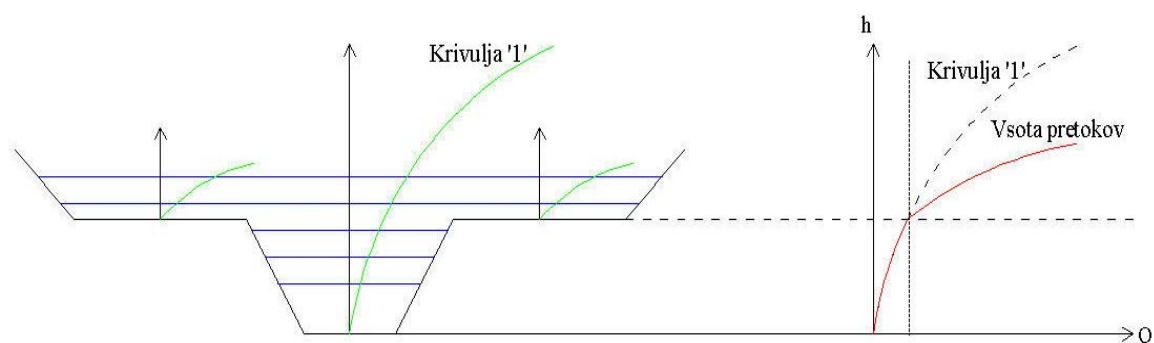
$$a_0 = \exp(\bar{y} - m \cdot \bar{x}) \quad (25)$$

V praktičnih primerih se pojavi problem pri linearizaciji točk pridobljenih z meritvami. Poznamo več vrst funkcij s katerimi lahko poiščemo najboljše prileganje meritvam (polinom 2. stopnje, polinom 3. stopnje, eksponentna funkcija itd.), zato je težje najti tisto pravo.



Slika 5: Različne vrste krivulj, s katerimi opišemo prileganje meritvam za enoten prerez

Pogosto se izmed teh funkcij uporablja polinom 2. stopnje, vsekakor pa je priporočljivo, da se preverijo tudi ostale funkcije, saj lahko pride predvsem v zgornjih delih pretočnih krivulj do slabše korelacije, pri čemer je potrebno poudariti, da dobimo še slabše rezultate v primeru, ko imamo opravka s sestavljenim prerezom vodotoka.



Slika 6: Vpliv sestavljenega prereza na obliko pretočne krivulje

V sestavljenem prečnem prerezu imamo poleg glavne struge tudi levo oziroma desno poplavno območje. Ta območja so ponavadi dosti široka in zato gladina narašča dosti

počasneje, kar se odraža v zmanjšanem naklonu pretočne krivulje (Slika 6). Krivulja '1' predstavlja pretočno krivuljo ob predpostavki enotnega prereza, medtem ko dobimo ob upoštevanju krivulj tudi za poplavni območji, kot rezultat vsoto pretokov in bistveno zmanjšan naklon krivulje.

2.2.1.3. Empirične metode ekstrapolacije pretočnih krivulj

Naslednja izmed metod ekstrapolacije temelji na Manningovi enačbi:

$$Q = k_M \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{I} \cdot A \quad (26)$$

Glavna ideja metode je, da ločimo geometrijski del enačbe in del, ki se nanaša na hrapavost vključno z naklonom vodne gladine ter jih tudi ekstrapoliramo ločeno. Geometrijski del je odvisen le od kvalitete izmere geometrije in zato ne potrebuje nobene krivulje, s katero bi se rezultati med seboj čimbolj ujeli.

Hrapavost se v kombinaciji z naklonom vodne gladine zelo spreminja zaradi večjih izgub pri nizkih pretokih, a se z večanjem vodostaja asimptotično približuje konstantni vrednosti. Z ekstrapolacijo koeficienta hrapavosti (pri visokih pretokih je skoraj konstanten), lahko izračunamo tudi pretoke za visoke vodostaje v enotnem prerezu vodotoka.

Problemi nastanejo ob poplavah, ko voda prestopi bregove osnovne struge ter se razlije na poplavna območja, kar povzroči spremembo hrapavosti in tudi bolj kompleksne hidravlične pogoje. Prav tako z empiričnimi metodami težko zajamemo vplive razmer dolvodno od vodomerne postaje (depresija, zaježba).

2.2.1.4. Ekstrapolacija s pomočjo matematičnega modela

Najbolj napreden način ekstrapolacije pretočnih krivulj je z uporabo matematičnega modela za simulacijo visokih pretokov. To je edina metoda, kjer upoštevamo tudi za mirni tok merodajne razmere dolvodno od vodomerne postaje. Zahteva pa ta metoda dovolj natančne geodetske izmere, meritve pretokov ter meritve poteka gladin na odseku vodomerne postaje.

Bistvo vsakega modela je, da verodostojno opisuje pojav oziroma simulira njegove bistvene značilnosti. Matematični modeli so ena od rešitev, kako prikazati dejanska dogajanja v naravi, kjer pa uporabimo določene poenostavitve. Tako lahko z modeli dovolj natančno dobimo relacije med vzroki in posledicami za realne razmere, vendar pa se je pri samem modeliranju procesov potrebno zavedati, da pogosto zapletene naravne pojave opisujemo s končno mnogo enačbami. Preden se lotimo modeliranja, moramo vedeti kakšni podatki so na voljo in kaj iščemo kot rezultat. Pomembno je, da definiramo zahtevani red točnosti ter poskušamo problem čimbolj poenostaviti, s čimer izločimo določene fizikalne pojave, ki so za obravnavani problem manj bistveni. Potrebna pa je previdnost, da modela ne poenostavimo preveč (Hojnik, 2000).

Osnovni predpogoj za uspešno modeliranje hidravličnih procesov je dobro umerjen hidravlični model, umerjen s pomočjo rekonstrukcije prejšnjih dogodkov. Zelo učinkovita metoda modeliranja procesov je kombinacija matematičnega modela in meritev na terenu. V hidravličnem modeliranju poplavnih razmer to pomeni, da je v času pojava poplav potrebno zabeležiti višinske kote visokih vod ter izmeriti pretoke. Večje kot je število in časovna razporejenost izmerjenih dogodkov, natančneje lahko simuliramo pretekli dogodek in posledično bolje umerimo hidravlični model. Ko imamo podatke o izmerjenih gladinah in pretokih, jih obdelamo v hidravličnem modelu. Ker imamo v tem primeru znan podatek o pretoku, model umerimo s pomočjo spreminjanja koeficienta hrapavosti ter ga spreminjamo tako dolgo, dokler se izmerjene in izračunane gladine ne ujamejo (Leonard et al., 2000). Razmere v sami strugi, na brežinah in poplavnih območjih niso enake (skale, drevesa, grmovje, trava...), zato je potrebno zadostno število meritev pri različnih gladinskih stanjih. Če je za umerjanje modela na voljo malo podatkov, je bolje, da se z rezultati modela ne poskušamo na vsak način prilagoditi izmerjenim vrednostim, saj lahko s tem poslabšamo rezultate v drugih delih odseka. Z dobro umerjenim modelom lahko nato simuliramo poljubne dogodke, ki se še niso zgodili in predvidimo njihove posledice (višinske kote gladine, ali se voda razlije ali ostane v strugi, kolikšno območje bo poplavljeno itd.).

2.3 Hidravlični račun z računalniškim programom HEC-RAS

Računalniški program HEC-RAS (**R**iver **A**nalysis **S**ystem) je bil razvit pod okriljem ameriške vojske v centru HEC (**H**ydrologic **E**ngineering **C**enter). Program je dostopen od leta 1995 in se od ustanovitve do danes ves čas izpopolnjuje in dopolnjuje z novimi verzijami. Pri diplomski nalogi je uporabljena verzija 3.1.3, ki je nastala maja 2005 (danes je na voljo tudi že beta verzija 4.0.0).

V začetku je bila s tem programom možna le hidravlična analiza stalnega neenakomernega toka, danes pa program omogoča izvedbo modela eno-dimenzijskega stalnega oziroma nestalnega toka, transporta sedimentov in spreminjanja temperature vode.

Računanje hidravličnih lastnosti vodotokov temelji na energijski enačbi:

$$\alpha_1 \cdot \frac{(Q/A_1)^2}{2 \cdot g} + y_1 + z_{01} = \alpha_2 \cdot \frac{(Q/A_2)^2}{2 \cdot g} + y_2 + z_{02} + L_f + L_e \quad (27)$$

kjer pomenijo:

α	Coriolisov koeficient
g	težnostni pospešek
Q	pretok [m^3/s]
A	površina prereza [m^2]
y	globina vode [m]
z_0	kota dna [m n.m.v.]
L_f	trenjske izgube
L_e	izgube zaradi razširitve ali zožitve

Številčni indeks predstavlja oznako prečnega profila 1 ali 2, ki določata računski odsek vodotoka.

Trenjske izgube program računa po formuli:

$$L_f = (x_1 - x_2) \cdot \bar{S}_f = (x_2 - x_1) \cdot \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (28)$$

$$K = \frac{1}{n_g} \cdot A \cdot R^{2/3} = \frac{Q}{\sqrt{S_0}} \quad (29)$$

kjer pomenijo:

- x stacionaža
- R hidravlični radij [m]
- K prevodnost [m³/s]
- n_g Manningov koeficient hrapavosti [sm^{-1/3}]
- \bar{S}_f povprečen padec energijske črte med profiloma [m/m]
- S₀ padec dna [m/m]

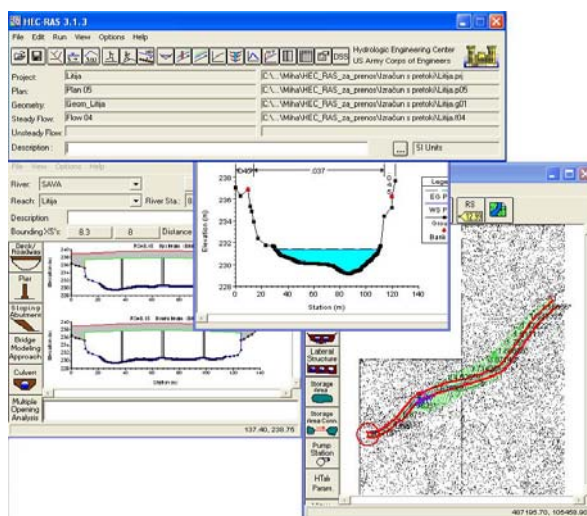
Izgube zaradi razširitve ali zožitve pa računa po formuli:

$$L_e = C \cdot \frac{|v_1^2 - v_2^2|}{2 \cdot g} \quad (30)$$

- C koeficient razširitve ali zožitve
- v hitrost [m/s]

Na začetku dela s programom HEC-RAS je potrebno vnesti geometrijske podatke obravnavanega odseka vodotoka. Na osnovi izrisane tlorisne situacije vodotoka, določimo lokacije izbranih prečnih profilov in za vsak prečni profil vnesemo podatke o: stacionaži in nadmorski višini, oddaljenosti do dolvodnega profila, koeficientih hrapavosti ter točkah prelivanja. Program omogoča, da v hidravlično analizo vključimo tudi različne objekte na vodotoku, kot so mostovi, prepusti, pragovi, kanali in drugo. Podatki o teh hidravličnih objektih se podajo posebej, pri čemer je potrebno biti pozoren, da imamo vedno definiran prečni profil tik pred in za samim objektom.

Ko so vneseni vsi podatki o geometriji, začnemo z vnašanjem podatkov o pretokih. Vedeti je potrebno ali bo naša analiza obsegala stalni oziroma nestalni tok. Preračun lahko izvedemo samo za en pretok, lahko pa podamo večje število pretokov (do 2000) in program opravi preračun za vse hkrati. S tem je tudi pri pregledu rezultatov omogočena medsebojna primerjava razlik ob posameznih pretokih.



Slika 7: Orodna okna računalniškega programa HEC-RAS

Pomemben podatek predstavljajo hidravlični robni pogoji (*Boundary Conditions*) s katerimi podamo dejansko stanje na gorvodnem ali dolvodnem koncu odseka vodotoka. Za različne režime toka so zahtevani različni robni pogoji. V primeru mirnega toka zadošča dolvodni robni pogoj, v primeru deročega toka pa je podan gorvodni robni pogoj. Kadar imamo opravka z izmenjavajočim režimom toka, je potrebno podati oba robna pogoja.

Po vnosu vseh potrebnih podatkov geometrije, pretokov in robni pogojev lahko zaženemo hidravlični izračun. Če so bili vsi podatki pravilno vneseni, program brez napak izvede preračun. V nasprotnem primeru nas opozori kateri podatki manjkajo oziroma jih je potrebno preveriti, da bo izračun pravilen. Rezultati hidravlične analize so na voljo tako v grafični kot tabelarni obliki. Grafično je možen pregled po posameznih prečnih profilih, vzdolžni prezek celotnega odseka, tri dimenzijski pogled odseka in izris pretočnih krivulj. V tabelarnem izpisu ima program že prednastavljene tabele s podatki o najbolj tipičnih parametrih, vendar lahko uporabnik tudi sam definira kateri parametri naj bodo vključeni v tabeli.

Z računalniškim programom HEC-RAS tako izvajamo hidravlične analize za 1-D tokove, kjer predpostavimo, da je ena komponenta vektorja hitrosti bistveno večja od ostalih dveh. S tem ima 1-D model neko povprečno globino in hitrost toka. Tak model je uporaben na odsekih, kjer se voda tudi pri povišanem pretoku ne preliva na poplavne ravnice oziroma ostaja ves čas v strugi. V primeru, ko imamo na odseku obširne poplavne ravnice, kamor se razlije voda, ko

prestopi bregove, pa že lahko govorimo o 2-D problemu in 1-D model teh situacij ne more opisati dovolj dobro. Za obravnavo takih primerov lahko s programom HEC-RAS simuliramo t.i. kvazi 2-D hidravlični model, kjer z uporabo eno-dimenzijskih modelov poskušamo rešiti 2-D problem. To nam omogoča vgrajena funkcija vejičastega toka (Split Flow), s katero ločimo osnovno strugo in poplavne ravnice ter jih upoštevamo kot nov rečni odsek.

Za natančno simulacijo je treba poznati mesto na odseku vodotoka, kjer voda najprej prestopi bregove in se razlije na poplavno ravnico. V tem prečnem profilu določimo novo vozlišče in razdelimo prej enoten odsek vodotoka na dva dela: na glavno strugo in na tok v poplavnem območju. V vozlišču je potrebno definirati notranji robni pogoj in sicer kolikšna količina vode odteče po glavni strugi naprej in koliko vode se prelije preko bregov.

Uspešno umerjanje hidravličnega modela visokovodnega stanja je zagotovljeno, če uspemo ob nastopu visoke vode izmeriti tudi hitrosti na poplavnih območjih. Hitrosti se na poplavnih območjih namreč zmanjšajo, saj se voda, ki je prej tekla z veliko hitrostjo po dosti ožji strugi, sedaj razlije na široko območje. Gladina v tem primeru narašča počasneje, kot če bi imeli vso vodo še v glavni strugi, saj se zdaj ista količina vode nahaja na zelo širokem območju. Pomemben je tudi tip in gostota zarasti na poplavnih območjih, saj gre za velike razlike v koeficientih hrapavosti, če imamo opravka z gozdnatim območjem ali pa je na poplavnem območju le trava.

2.4 Teoretične podlage za terenske meritve

2.4.1 Akustični Dopplerjev merilnik pretokov

Napredek znanosti in tehnologije je omogočil nove metode meritev pretokov in hkrati hiter razvoj nove merilne opreme. V zadnjih letih so tako doživeli razvoj merilniki, s katerimi je možno meriti globino in hitrost, to so akustični Dopplerjevi merilniki hitrosti (ADMP). Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), ki izvaja kontrolne meritve pretokov na slovenskih rekah, trenutno razpolaga z dvema merilnikoma in sicer *RioGrande Zedhed 1200 kHz* in *WorkHorse RioGrande1200 kHz* podjetja RD Instruments iz ZDA.



Slika 8: *RioGrande Zedhed 1200 kHz*



Slika 9: *WorkHorse RioGrande1200 kHz*

Akustični merilniki hitrosti za merjenje hitrosti delcev v vodi izkoriščajo princip Dopplerjevega pojava. Omogočajo meritve pretokov v strugah od najmanjše globine 0,4 m do globine 40 m ter do hitrosti 10 m/s. Meritev pretoka z ADMP je v osnovi sestavljena iz dveh (pod)meritev: hitrost vode se meri preko odboja od v vodi raztopljenih delcev, globina (in posledično površina prečnega prereza) pa se meri kot čas potovanja signala od merilnika do dna struge in nazaj (Trček, Cankar 2006). Samo meritev izvajamo z gibanjem čolnička preko struge na naslednje načine:

- peš prehod struge (mogoče samo ob nižjem vodostaju)
- prehod preko mostu, meritve se izvajajo z eno vrvjo na odtočni oziroma nizvodni strani mostu (Slika 10)
- prehod s čolnom, merilnik se vodi na vrvi za čolnom (Slika 11)
- prehod z žičnimi premostitvami čez strugo reke, na vodomernih postajah, ki so s tem opremljene



Slika 10: Meritev z mostu

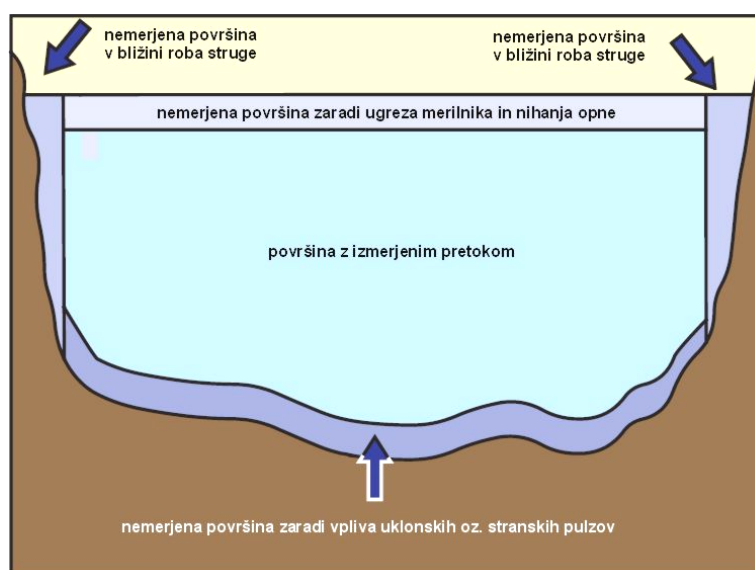


Slika 11: Prehod struge s čolnom

Pri vsakem od zgoraj omenjenih načinov je najpomembnejši faktor, na katerega moramo biti pozorni, hitrost gibanja merilnika. Za natančno meritev je namreč pomembno, da je gibanje merilnika enakomerno in čim počasnejše, medtem, ko ni pomembno, da se gibljemo v ravni črti, kot tudi ne, ali je gibanje čez strugo pravokotno na smer struge. V realnosti so hitrosti gibanja čolnička ocenjene med 0,2 m/s in 1 m/s.

Za dobro oceno natančnosti meritve je potrebno izvesti več prehodov struge. Minimalno število prehodov je določeno na podlagi preskusov oziroma preteklih izkušenj na posameznem merilnem mestu. Pri stabilnih, enostavnih in lepo oblikovanih prečnih prerezih sta dovolj že dva prehoda, drugod pa najmanj trije. Končna vrednost pretoka je povprečje izbranih prehodov.

Bistvena prednost meritev z ADMP pred klasičnimi meritvami s hidrometričnim krilom se pokaže v tem, da dobimo podatek o pretoku takoj po končanem prečenju struge. S posebno programsko opremo, imenovano *WinRiver*, je omogočena primerjava posameznih prehodov struge in v primeru prevelikih odstopanj se lahko meritev ponovi z boljšimi nastavitvami. S tem že med oziroma takoj po izvajanju meritve opravimo prvo in najpomembnejšo analizo in na ta način močno zmanjšamo število grobih, slučajnih napak, ki so posledica neustreznega merilnega mesta, neizkušenosti ekipe itd.



Slika 12: Območja neizmerjenih hitrosti z ADMP

Slabost akustičnega merilnika je dejstvo, da ne more izmeriti vrednosti hitrosti po celotnem prečnem prerezu. Tako v vsakem prečnem prerezu ločimo 4 območja, kjer hitrosti ne moremo izmeriti: plast na površini in na dnu ter območje ob levem in desnem bregu. Debelina neizmerjene plasti ob površini znaša 20 – 30 cm in je posledica potopljenosti oziroma ugreza merilnika (7 – 8 cm) ter dejstva, da je vsak od štirih oddajnikov hkrati tudi sprejemnik. Neizmerjeno območje ob dnu nastane zaradi motnje uklona zvočnega žarka in znaša okvirno 6 % globine vode. Zaradi neizmerjenih delov ob obeh bregovih je potrebno na začetku in koncu meritve oceniti oddaljenost čolnička od bregov. Pretok skozi neizmerjene dele se prišteje k skupnemu pretoku z uporabo interpolacijskih oziroma ekstrapolacijskih metod.

Neizmerjena območja predstavljajo velik delež v primerjavi z izmerjenim delom samo v primerih plitvih in širokih oziroma majhnih prečnih prerezov. Pri prečnih prerezih z globino večjo od 2 m, samo spreminjanje parametrov med meritvijo nima bistvenega vpliva na končno vrednost pretoka (napaka manjša od 5 %). Takšni prečni prerezi so zato primerni za meritev pretokov s pomočjo ADMP in podoben primer ustreznih prečnih prerezov predstavljajo tudi izbrane lokacije na reki Savi pri Litiji (Cankar, 2005).

2.4.2 Podatkovni zapisovalnik Gealog micro

Podatkovni zapisovalnik Gealog micro se uporablja za beleženje podatkov o vodostaju in temperaturi vode. Vodostaj se meri s pomočjo tlačne sonde, temperatura vode pa s temperaturnimi tipali (senzorji).



Slika 13: Enota podatkovnega zapisovalnika Gealog Micro

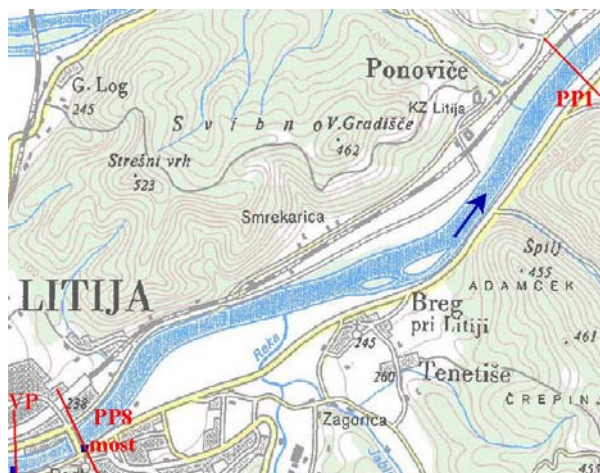
Uporabljen podatkovni zapisovalnik je sestavljen iz nerjavečega ohišja premera 46 mm in dolžine 390 mm, v katerem se nahaja tlačna sonda, temperaturni senzor ter baterija, ki zagotavlja delovanje. Del podatkovnega zapisovalnika je tudi kabel, ki služi za povezavo z računalnikom.

Enota podatkovnega zapisovalnika je običajno položena v zaščitno cev nameščeno na dno vodotoka, kabel pa je speljan na brežino, kjer je potrebno zagotoviti, da bo konec kabla na suhem tudi ob nastopu visokih voda. Podatki se z zapisovalnika preberejo s pomočjo računalnika, ki ga priključimo na kabel.

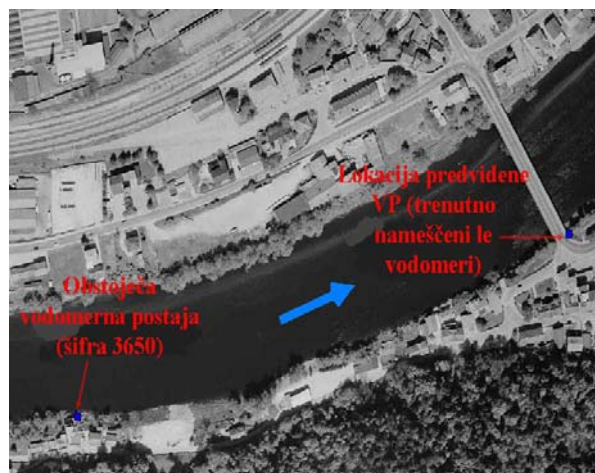
Obseg merjenja je mogoče nastaviti na 10m, 20m ali 30m, natančnost meritev pa znaša $\pm 0,1\%$ obsega merjenja, kar predstavlja od ± 1 cm do ± 2 cm.

3 OPIS RAZMER NA VODOMERNI POSTAJI LITIJA

Meritve pretokov za potrebe hidravličnega modela so bile izvedene na treh različnih prečnih prerezih na izbranem odseku reke Save dolvodno od vodomerne postaje Litija I.



Slika 14: Topografski prikaz odseka Save pri Litiji



Slika 15: Topografski prikaz vodomerne postaje Sava – Litija I

Od topografskih značilnosti je za hidravlični model pomembno ali se vodomerne postaja nahaja v krivini ter kakšen je vpliv mostu, ki se nahaja na obravnavanem odseku. V hidravličnem modeliranju sta prav tako pomembna zgornji in spodnji robni pogoj. Ker imamo ves čas opravka z mirnim tokom, je bilo potrebno v nalogi poznati le spodnji robni pogoj.

3.1 Naravne danosti

Reka Sava, pritok Donave, je osrednji odvodnik Republike Slovenije. Na svoji 250 km dolgi poti skozi Slovenijo odvaja vodo z območja 11.749 km² ali 56 % celotnega ozemlja Slovenije od tega znaša površina dela porečja, ki pripada Savi do Litije 4821,43 km² (ZVSS, 1978).

Med važnejše pritoke na tem delu reke Save, vključno s Savo Dolinko in Savo Bohinjko, ki zajemata izvirno področje Save, štejemo Tržiško Bistrico, Kokro, Soro, Kamniško Bistrico ter Ljubljano.



Slika 16: Vodozbirno območje Save do vodomerne postaje Litija I

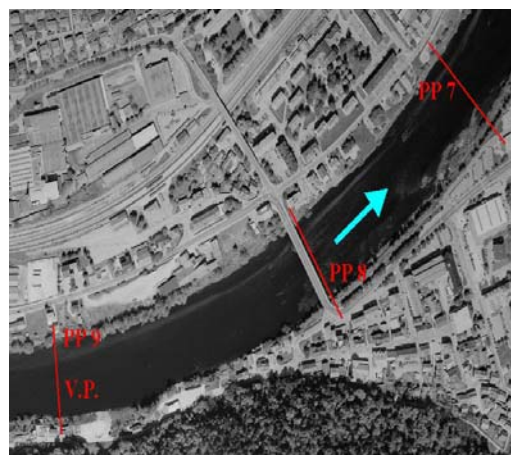
Vodozbirno območje Save do vodomerne postaje Litija I predstavlja celotno območje s katerega se v reko Savo in pritoke zbira voda ter je prikazano na zgornji sliki (Slika 16).

3.1.1 Opis razmer na obravnavanem odseku

Gorvodni prečni profil (PP 9) je izbran na lokaciji vodomerne postaje Litija. Gre za profil brez izrazitih poplavnih območij, saj je na obeh bregovih izveden dovolj visok nasip.



Slika 17: Razmere na desnem bregu med vodomerno postajo in mostom



Slika 18: Zgornji del odseka z vrisanimi prečnimi prerezi

Razmere so podobne tudi vse do 450 metrov nižje ležečega cestnega mostu (PP 8). Tu je potrebno poudariti, da imamo 100 metrov gorvodno in 200 metrov dolvodno od mostu desni

breg izveden kot betonski zid, ki v PP 8 sega do nadmorske višine 235.12 m n.m.v. Betonski zid je prav tako izveden tudi na levem bregu, vendar v krajšem obsegu. S hidravličnim modelom je mogoče izračunati, do katerega pretoka ostane Sava v teh mejah in ne ogrozi mesta Litija na levem bregu. Na zgornji sliki (Slika 17) je prikazan pogled gorvodno proti vodomerni postaji, kjer so dobro vidne razmere na desnem bregu (betonski zid, nasuti material brez zarasti višje proti vodomerni postaji).

Dolvodno od mostu se struga v PP 7 za kratek čas razširi na širino 120 m, zato se oblikuje prodišče na desni strani struge, ki je dobro vidno ob nižjem vodostaju (Slika 19). Na lokaciji tega prečnega profila je na desnem bregu še poseljeno območje (mesto Litija), medtem ko se nato na delu med PP 2 in PP 3 na desnem bregu začne obširno poplavno območje - Litijsko polje (Slika 20). Območje je omejeno z regionalno cesto Litija – Zagorje in se razteza do 350 m stran od struge. V pasu tik ob strugi imamo več grmičevja in dreves, medtem ko gre na poplavnem območju za travnike ter njive in polja s posevki. Poplavno območje na desnem bregu se zaključuje za prečnim profilom 4.



Slika 19: Prečni profil 7 (prodišče)



Slika 20: Desno poplavno območje

Na levem bregu imamo v tem območju del odseka, kjer se lokalna cesta ter železnica zelo približata reki Savi. Cesta poteka direktno po kroni nasipa, medtem ko je železniška proga odmaknjena še povprečno za 2 m višje. Cesta se 200 m nižje od prečnega profila 3 dodatno dvigne do kote železnice in jo tudi prečka ter od tod naprej ne poteka več direktno ob strugi. Tu imamo tudi najnižjo točko brega, kjer se reka Sava začne prelivati na široko poplavno območje na levem bregu, ki poteka vse do najbolj dolvodnega profila (PP 1). Poplavno

območje na najširšem delu obsega 350 m in je na celotnem delu omejeno z nasipom železniške proge Ljubljana – Zidani Most. Podobno kot na desnem bregu imamo tukaj na sami brežini struge grmičevje in drevje, nato pa si v smeri proti železniškemu nasipu sledijo travniki ter njive in polja s posevki.



Slika 21: Omejeno poplavno območje



Slika 22: Zarast ob strugi

V območju med prečnima profiloma 4 in 2 imamo območje, kjer se reka Sava razdeli na dva dela in imamo ob nizkih in srednjih vodostajih neke vrste otok v strugi. Osnovna struga je široka povprečno 110 m, zato večina vode še vedno teče po osnovni strugi, medtem ko le manjši del odteče po desnem rokavu. Potrebno pa je poudariti, da je ta rokav suh v času nižjih vodostajev in je zato območje zelo zaraščeno. V času nastopa visokih voda je ves otok poplavljen, vendar predstavlja gosta zarast velik upor toku vode in zato v hidravličnem modelu za to območje uporabimo visoke vrednosti koeficienta hrapavosti.



Slika 23: Prečni profil 3 (stranski rokav)



Slika 24: Prečni profil 2

Prečni profil 2 je izbran tik za ponovno združitvijo rokava z osnovno strugo. V tem profilu se na desnem bregu regionalna cesta Litija – Zagorje približa reki in poteka po vrhu brežine, nato pa se 200 m nižje spet umakne na rob desnega poplavnega območja, ki pa obsega le povprečno 50 m širine. Stanje je nespremenjeno do dolvodnega prečnega profila, ki je izbran na podaljšanem odseku za zagotovitev spodnjega robnega pogoja.

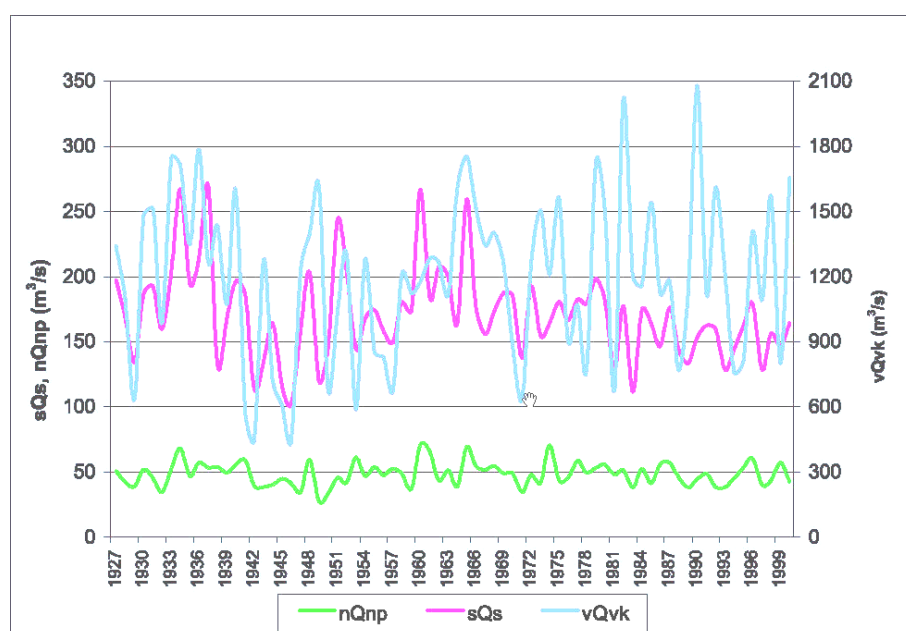
3.1.2 Geološke in hidrološke razmere

Ozemlje vodnega območja reke Save glede na geološko zgradbo razdelimo na naslednje hidrogeološke enote: alpsko področje, predalpsko hribovito območje, ozemlje visokega krasa, ter ravninski predel Ljubljanske kotline.

Območje Julijskih Alp in Karavank odvodnjavajo Sava Dolinka in Sava Bohinjka, Tržiška Bistrica, Kokra in Kamniška Bistrica s pritoki. Za to območje so značilne prepustne karbonatne kamnine. V predalpsko hribovito območje prištevamo Škofjeloško-polhograjsko ozemlje, Idrijsko-žirovske hribe in Posavske gube. To ozemlje je grajeno iz več vrst kamnin, kjer v prvi vrsti prevladujejo neprepustne, flišu podobne kamnine različne starosti, apnenec in dolomit pa nastopata v podrejeni vlogi. Karbonatne kamnine so pogostoma ob prelomih stisnjene med slabo prepustne in neprepustne kamnine, ki jih sestavljajo razni skrilavci, laporji, peščenjaki, tufi in predornine. V teh karbonatnih masivih so akumulirane le manjše količine podzemne vode (ZVSS, 1978).

Ozemlje visokega krasa, katero je v glavnem grajeno iz prepustnih karbonatnih kamnin, različno starih apnencev in dolomitov, odvodnjava Ljubljana, katere porečje lahko v grobem razdelimo na tri enote: povirni del zgornje Pivke in Postojnske kotline, povirno območje na notranjskih kraških poljih do Vrhnike in obrobje Ljubljanskega barja. Ravninski predeli so večja polja in kotlina, kjer se je kvartarni prod, pesek in konglomerat odložil v večji debelini. Prodni zasipi so zelo porozni in prepustni ter pomenijo velike zbiralnike podzemne vode. Za Ljubljansko kotlino sta znana dva važnejša rezervoarja podtalne vode: Kranjsko-Sorško polje in Ljubljansko polje.

Alpski značaj izvirnih področij Save in njenih pritokov je vzrok hudourniškemu značaju Save, predvsem v severozahodnem delu Slovenije. Zaradi zadrževanja odtoka v kraških predelih in zmanjševanja padca, se hudourniški značaj zmanjša že v srednjem, znatno pa v njenem spodnjem toku. Zaradi hudourniškega značaja Save in pritokov spremlja odtok erozija in s tem vezana prodonosnost in kalnost, kar povzroča stalno spreminjanje matice toka, večkrat celo premeščanje korita vodotoka, poglobljanje in zasipanje korit vodotokov. Velik del (blizu 40 %) vodnega območja Save zajema kraško področje, katerega meje so ponekod še nejasne in se ob njih skoraj redno opažajo površinske in podzemne bifurkacije.



Slika 25: Karakteristični pretoki na vodomerni postaji Litija I v obdobju od 1927 do 2001

Preglednica 1: Obdobni pretoki na vodomerni postaji Litija I

		JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	letni	
LITIJA I	nQnk	39.2	35.9	42.1	60.8	62.3	48	37	35.7	32.9	32.9	32.9	37.7	32.9	27.9.1971
	sQs	153	148	177	226	203	180	133	110	138	172	217	181	170	
SAVA	vQvk	1724	1392	1218	1554	1248	895	900	1105	1745	1595	2069	1427	2069	2.11.1990

Oznake obdobjnih vrednosti pretokov pomenijo:

Qs... srednji pretok

Qvp... največji srednji obdobjni pretok

Qnp... najmanjši srednji obdobjni pretok

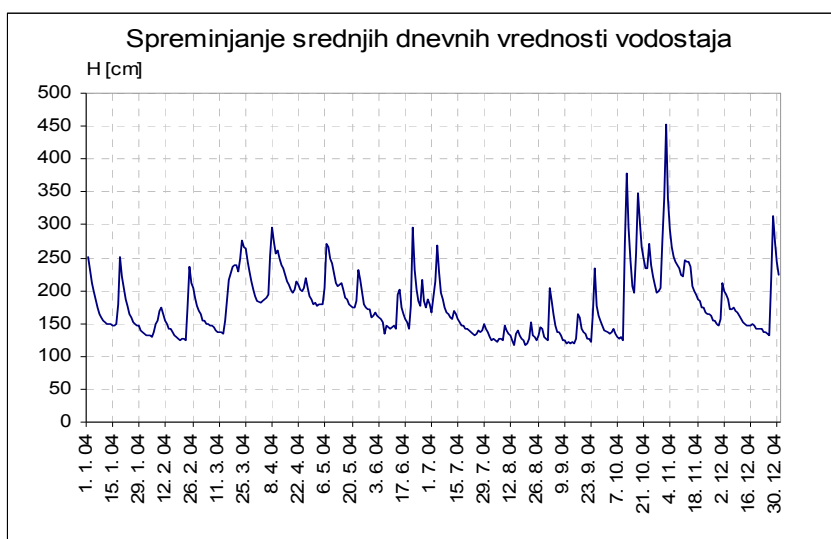
Qvk... konica velikega pretoka

Qnk... konica nizkega pretoka

3.1.3 Odtočni režimi

Rečni odtočni režim opisuje povprečno sezonsko gibanje pretoka reke, na katerega najbolj vpliva odvisnost pretoka od padavin, temperature tal in drugih podnebnih dejavnikov. Zaradi geografske raznolikosti vodozbirnih zaledij, lahko vodotoke v Sloveniji, glede na značilno spreminjanje pretokov preko leta, in vire, iz katerih se napajajo, razdelimo v grobem v tri oziroma štiri odtočne režime. Reka Sava ima povsod dežno-snežni režim s tremi variantami. Sava Bohinjka pri Sv. Janezu ima glede na pretoke dežno-snežni režim. Snežna retinenca še vedno povzroča primarni nižek februarja in sekundarni višek maja. Sekundarni minimum je avgusta, primarni višek pa nastopa z jesenskim deževjem. Na Savi Bohinjki je za obdobje po letu 1991 opaziti, da je režim postal bolj dežen, vseeno pa še ima značilnosti posledic zimskih nizkih temperatur. Odtočni režim na Savi Bohinjki tako poimenujemo visokogorski dežno-snežni režim (Frantar, 2005)

V drugo skupino uvrščamo Savo Dolinko, ter Savo do Šentjakoba. Primarna ekstrema pretočnih režimov na tem območju sta: višek jeseni, večinoma v novembru in nižek pozimi, povečini februarja. Glavna značilnost te skupine je, da sta sekundarna ekstrema praktično zabrisana, zlasti pri Savi Dolinki. Tudi tu gre za varianto dežno-snežnega odtočnega režima, kjer se pozna še večja dežnost (pluvialnost) režima ter zmanjšan pomen vpliva snega, zato ga imenujemo sredogorski dežno-snežni tip.



Slika 26: Spreminjanje srednjega dnevnega vodostaja v letu 2004 na vodomerni postaji Litija

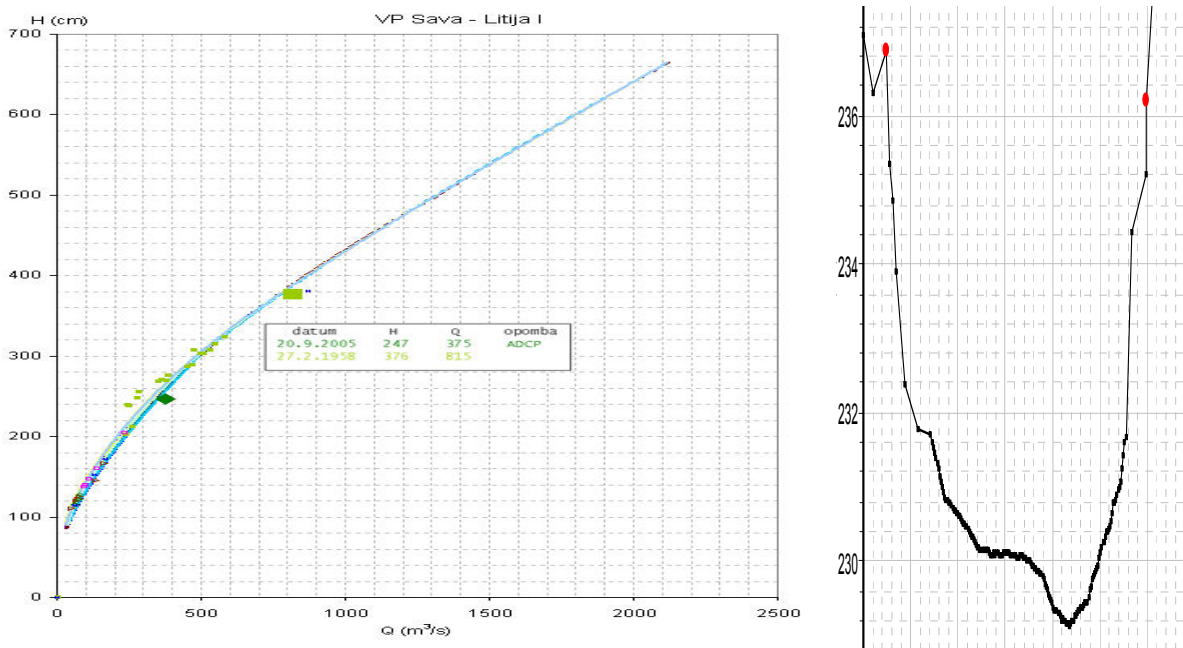
Na Savi pri Litiji je primarni maksimum novembra, sekundarni pa aprila, minimuma pa nastopata avgusta in februarja. Glede na letni potek padavin gre tu za dežno-snežni odtočni režim, spet z večjo dežnostjo, poimenujemo pa ga nižinski dežno-snežni tip.

Odtočni režimi kažejo običajno sezonsko spreminjanje vodnatosti naših rek, poplave in suše pa spadajo med izjemne hidrološke dogodke. Iz odtočnih režimov lahko ocenimo le večjo ali manjšo verjetnost njihovega pojavljanja. Na večini naših rek nastopajo visoke vode in tudi poplave najbolj pogosto spomladi in jeseni (dežno – snežni in snežno - dežni odtočni režim).

3.2 Obstoječe pretočne krivulje

V okviru monitoringa površinskih voda se na Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO) za celotno mrežo vodomernih postaj na površinskih vodotokih izvajajo terenske meritve pretokov. V enem letu je na vsaki vodomerni postaji izvedeno približno šest meritev, ki so osnova za konstrukcijo pretočnih krivulj (PK). Večina hidrometričnih meritev je opravljena v spodnjem in srednjem območju pretočnih krivulj, se pravi za nizke in srednje pretoke. Za določitev zgornjega dela pretočnih krivulj pa je ponavadi na voljo zelo malo kvalitetnih hidrometričnih meritev. Eden od vzrokov je v tem, da je sam pojav visoke vode veliko težje ujeti, saj na nekaterih vodotokih visokovodni val zelo hitro upade, drugi, prav tako pomemben vzrok pa je v tem, da so se v preteklosti meritve izvajale predvsem s hidrometričnimi krili. V razmerah, ki vladajo ob nastopu visokih voda, pa so meritve iz čolna s hidrometričnim krilom lahko tudi življenjsko nevarne, zato verjetno meritev dostikrat sploh ni bilo mogoče opraviti. Z nastopom nove tehnologije pa je možno te probleme odpraviti. Tako se na ARSO od leta 2003 naprej že uporablja akustični Dopplerjev merilnik pretokov (ADMP), ki v mnogočem olajša meritve pretokov v času povišanja vodostajev, saj omogoča merjenje tudi direktno z mostu, kjer je to mogoče. Ker pa je ADMP v uporabi šele kratek čas, še vedno velja, da je na večini vodotokov problem s pomanjkanjem hidrometričnih meritev v zgornjih delih pretočnih krivulj. Zato se na ARSO za določitev zgornjega dela PK poslužujejo ekstrapolacijskih izračunov, kjer se najpogosteje uporablja metoda ekstrapoliranja srednje hitrosti. Srednje hitrosti se preračunajo na podlagi merjenih površinskih hitrosti iz razmerij, ki se dobijo že pri nižjih vodostajih. Površinske hitrosti se namreč merijo tudi pri nižjih vodostajih zato obstajajo

določene relacije s srednjimi hitrostmi. Na podlagi izmerjenega prečnega profila (odnos vodostaj – površina je znan) dobimo z upoštevanjem ekstrapolirane srednje hitrosti relacijo vodostaj – pretok tudi za višje vodostaje. Prednost omenjenega načina ekstrapolacije je, da poznavanje (določanje) hrapavosti vodomernega profila (n_G) ni potrebno. Potrebno pa je izvesti kontrolne izračune ujemanja s povezanimi vodomernimi postajami.



Slika 27: Trenutno veljavne pretočne krivulje za vodomerno postajo Sava-Litija I na Agenciji RS za okolje

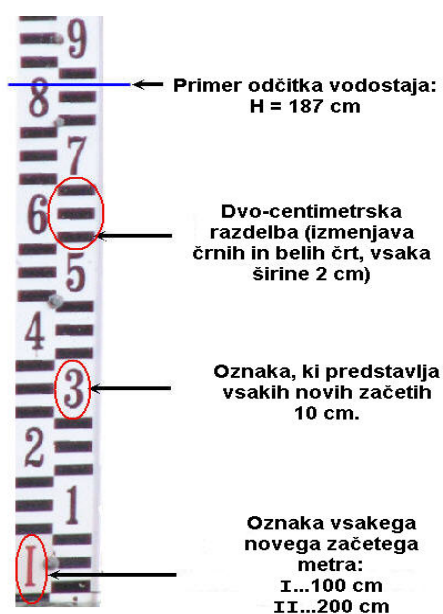
Vodomerna postaja Litija na današnji lokaciji deluje od leta 1953 (pred tem je delovala na drugi lokaciji), pretočne krivulje pa imajo od leta 1990 naprej enoten zgornji del krivulj. Sama lokacija vodomerne postaje je izbrana na ustreznem delu, kjer imamo stabilen prečni profil in ni retenzije (razlitja) tudi pri zelo visokih vodah. Za vodomerno postajo Litija je zanimiva primerjava s sicer že opuščeno vodomerno postajo Radeče, ki je nekakšno izhodišče za ostale vodomerne postaje na reki Savi. Na VP Radeče so namreč imeli postavljene tri usklajene vodomere na medsebojni razdalji 300 m. Za hidrometrične meritve, ki so se izvajale za določitev pretočnih krivulj pri visokih vodostajih, je bila uporabljena žična premostitev, ki daje v vseh razmerah zelo dobre rezultate. Na podlagi teh meritev so bile izdelane pretočne krivulje, ki so bile v zgornjem delu praktično enake več kot 60 let. Zaradi ukinitve te

vodomerne postaje in izredno starih hidrometričnih meritev, je težko določiti stopnjo zanesljivosti. Podatki o visoki vodi iz leta 1998 nakazujejo možnost, da je bila krivulja podcenjena in sicer približno za 10 %.

3.3 Terensko delo

3.3.1 Namestitev vodomero, podatkovnega zapisovalnika in meritev pretoka

Za potrebe določevanja vodostaja reke Save so na treh lokacijah na območju obravnavanega odseka nameščeni dodatni vodomeri. Vsi vodomeri so emajlirani in imajo dvo-centimetrsko razdelbo, vodostaj pa se odčitava na centimeter natančno.



Slika 28: Oznake na vodomeru



Slika 29: Lokacija VP Litija I (PP 9)

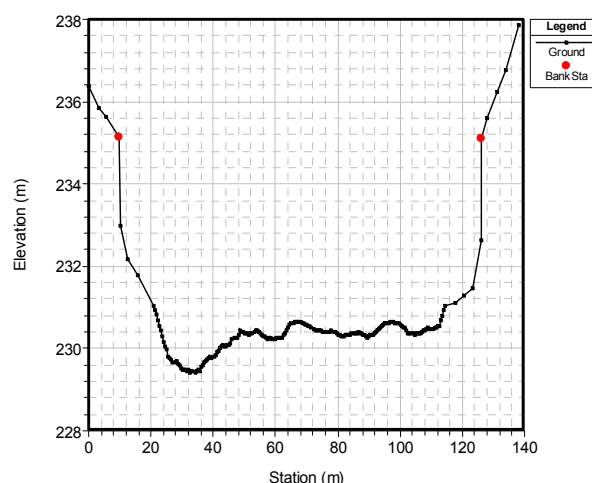
Na sami vodomerni postaji Sava-Litija I (šifra postaje 3650; prečni profil številka 9) so vodomeri nameščeni že od leta 1953, ko je postaja začela delovati. Kota '0' vodomera znaša 230,444 m n.m.v. Na tej lokaciji deluje tudi limnigraf za beleženje spreminjanja gladine Save. Vodomeri služijo tako za samo kontrolo delovanja limnigrafa kot tudi za odčitek gladine v kateremkoli času. S kvalitetnimi opazovanji se lahko namreč ugotovi ali je limnigraf dobro sledil naraščanju gladine in ali je zabeležen maksimalni vodostaj tudi dejanski maksimum.

Vse to je namreč še posebej pomembno pri nastopu visokih voda, ko je podatek o maksimalni gladini vode izrednega pomena.

Za potrebe diplomske naloge so bili naknadno nameščeni vodomeri tudi na cestnem mostu preko Save v Litiji, ki se nahaja približno 450 metrov dolvodno od obstoječe vodomerne postaje. To bo tudi lokacija nove premaknjene vodomerne postaje Sava Litija (nova šifra 3660; prečni profil številka 8). Vzrok za takšno namestitev vodomerov je tudi v novi metodologiji merjenja pretokov. S pričetkom izvajanja meritev z akustičnim Dopplerjevim merilnikom pretokov (ADMP) se namreč vse meritve izvajajo ravno z mostu. Med vodomerno postajo Litija I in lokacijo na mostu ni nobenih sprememb v toku – ni pritokov, ni zatekanja vode – zato se izmerjeni pretok na mostu uporabi tudi kot pretok na vodomerni postaji. Od leta 2004 so vse redne meritve pretokov izvedene z mostu, podatek o vodostaju pa je odčitán iz vodomera na postaji Litija I. Kota '0' vodomera na lokaciji mostu znaša 230.618 m n.m.v. in ni enaka koti '0' na lokaciji vodomerne postaje. So pa zato absolutne kote določene iz znanih temeljnih višinskih geodetskih točk Geodetske uprave Republike Slovenije (GURS), zato lahko dobimo točne podatke o vzdolžnem padcu gladine na odseku med vodomernima postajama 3650 in 3660. Posledično lahko zelo dobro spremljamo kako se spreminja padec gladine pri različnih gladinskih stanjih.



Slika 30: Nameščeni vodomeri v PP 8

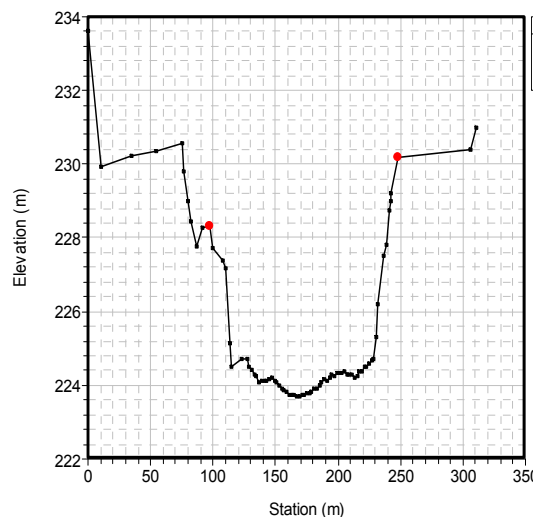


Slika 31: Prečni prerez 10m dolvodno of PP 8 v HEC-RASu

Zadnja izmed lokacij, kjer so nameščeni vodomeri, je v dolvodnem prečnem profilu označenem kot Sava – Ponoviče (šifra 3672; prečni profil 1). Kota '0' vodomera je v tem profilu postavljena na 224.730 m n.m.v. S pomočjo odčitkov vodostaja na vodomeru v tem prečnem profilu in primerjavo vrednosti za zgornja gorvodna profila, lahko ocenimo nek povprečen padec gladin na celotnem obravnavanem odseku.



Slika 32: Nameščeni vodomeri v PP 1



Slika 33: Prečni prerez 1 v HEC-RASu

V prečnem profilu Sava – Ponoviče (prečni profil 1) je nameščen tudi podatkovni zapisovalnik (data-logger) Gealog Micro z nalogo beleženja gladin reke Save s frekvenco 15 minut.



Slika 34: Namestitev zapisovalnika



Slika 35: Prenosnik s povezovalnim kablom

Podatki o gladinah se poberejo s pomočjo prenosnika in kabla, ki vodi do enote podatkovnega zapisovalnika (Slika 35). Podatkovni zapisovalnik daje pomembne podatke v primeru, ko je zaradi različnih vzrokov (onemogočen dostop do vodomero, nastop visoke vode ponoči itd.) meritev izvedena le v gorvodnih profilih. Pravilno delovanje zapisovalnika se na terenu vsakič preveri s primerjavo zabeleženega podatka o vodostaju in dejanske gladine odčitane z vodomera. V primeru, da se ugotovi odstopanje, je potrebno podatkovni zapisovalnik nastaviti na novo vrednost.

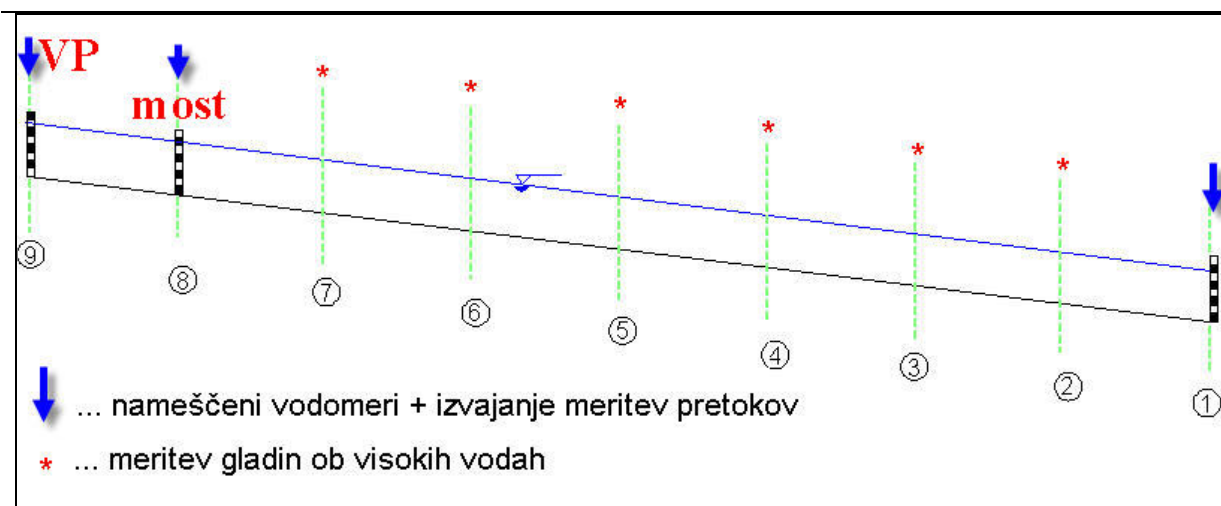
3.3.2 Podatki za modeliranje

Za uspešno modeliranje je bilo potrebno dobiti ustrezne podatke. Nekateri podatki so na voljo iz obstoječe literature, ostale pa smo dobili s pomočjo meritev na terenu. Pri določanju geometrije poplavnih območij so deloma uporabljeni podatki iz temeljnega topografskega načrta Geodetske uprave Republike Slovenije v merilu 1:5000 (TTN5). Geometrija mostne konstrukcije je pridobljena iz hidravlične študije Save na odseku od Spodnjega Hotiča do Litije (Inženiring za vode, 2005).

3.3.2.1 Geometrija odseka

Na podlagi terenskega ogleda območja dolvodno od vodomerne postaje Litija I je bilo izbranih 8 prečnih profilov na skupni dolžini odseka približno 5 km. Celotna nivelacija je obsegala posnetek posameznih prečnih profilov in na podlagi temeljnih višinskih točk GURS tudi določitev višinskih kot karakterističnih točk posameznega prečnega profila. Geodetske meritve na terenu so bile izvedene v začetku meseca novembra leta 2006 in sicer pri nizkem vodostaju reke Save. Za vsak izbran prečni profil je bilo potrebno narediti posnetek dejanskega stanja na terenu, saj je iz topografskega načrta možno dobiti le približne višinske kote inundacij, ne moremo pa dobiti podatka o globini struge. Geometrija in oblika dna struge je v treh prečnih profilih dobljena s pomočjo ADMP, ki pri meritvi pretoka poda tudi obliko prečnega prereza, v preostalih pa s prehodom s čolnom, kjer se na določeni razdalji ročno odčitava globina in se kasneje izriše geometrija prečnega prereza. Brežine in poplavna območja v prečnem profilu se izmerijo z nivelirjem najprej samo v relativnih kotah, kasneje, ko imamo za vsak prečni profil tudi fiksno točko z znano višinsko točko, pa se preračunajo in

izrišejo v absolutnih kotah. Za osnovno referenčno točko pri določanju absolutnih kot je izbrana nivelmanska točka IV. reda vzdana v poslopju knjižnice Litija, Parmova ulica 9, z višinsko koto 236,356 m n.m.v. Z nivelacijo po desnem bregu se nato določijo fiksne točke za posamezne prečne profile dolvodno.



Slika 36: Vzdolžni prerez odseka z nameščenimi vodomeri

Iz zgornje slike (Slika 36) je razvidno, da so vodomeri postavljeni v prečnih profilih 9, 8 in 1, kjer tudi potekajo meritve pretokov z ADMP. Na osnovi znanih podatkov o absolutnih višinskih kotah posameznih prečnih prereзов, lahko določimo tako padec dna med posameznima prečnima profiloma kot tudi povprečni padec dna na celotnem obravnavanem odseku. Z odčitkom gladin se določi tudi padec gladine na odseku pri različnih pretokih. Ob visokih vodah se namreč zabeležijo gladine tudi v profilih, kjer niso nameščeni vodomeri in sicer z nivelacijo sledi visokih voda glede na referenčno točko posameznega prečnega prereza.

3.3.2.2. Meritve pretokov

Za potrebe diplomske naloge je bilo izvedenih več meritev pretokov ob različnih gladinskih stanjih. V enem primeru gre za kombinacijo meritev na vseh treh merilnih lokacijah, medtem ko so ostale meritve izvedene le na lokaciji mostu (PP8) ter na dolvodnem profilu v Ponovičah (PP1).

Dne 10.1.2007 so izvedene kontrolne meritve pretokov na vseh treh lokacijah. Od začetka uporabe ADMP v letu 2004 se namreč meritve za vodomerno postajo Litija I vedno izvajajo izključno z mostu in je bilo zato potrebno preveriti ali so se razmere na lokaciji vodomerne postaje v tem času spremenile. Kot je razvidno iz rezultatov meritev, je pretok na vodomerni postaji enak pretoku v PP8, zato se je zaradi lažje izvedbe meritve v nadaljnjih primerih izvedla le meritev z mostu. Za pretočno krivuljo pa se tako kot v preteklosti uporabi vodostaj odčitani na vodomerni postaji. V preglednici so prikazani rezultati opravljenih meritev v letu 2007. Za vodomerno postajo Litija I (šifra 3650) so podane le vrednosti vodostaja, saj je pretok enak kot na lokaciji s šifro 3660.

Preglednica 2: Izvedene meritve na treh lokacijah v letu 2006 in 2007

Datum meritve	3660		3650	3672	
	H [cm]	Q [m ³ /s]	H [cm]	H [cm]	Q [m ³ /s]
07.11.2006	43	46.2	100	33	46.5
10.01.2007	56	64.6	117	40	62.3
02.02.2007	78	109	142	54	-
29.03.2007	98	156	166	73	164
17.05.2007	52	58.9	110	34	53.1
12.07.2007	76	105	141	51	-
19.09.2007	310	870	381	331	-
20.09.2007	224	525	295	231	-
05.10.2007	84	114	149	58	107

Za izvedene meritve je značilno, da se vse nahajajo v spodnjem delu pretočnih krivulj, izjemo predstavlja le meritev izvedena ob visokovodnem dogodku dne 19.9.2007.

- o Značilnost meritev

Pretok izmerjen na dolvodnem prečnem profilu (PP1) ima v nekaterih primerih manjšo vrednost kot izmerjeni pretok v PP 8, kljub nekaterim manjšim pritokom v Savo na odseku od Litije do Ponovič. Vzroke gre iskati v območju med prečnima profiloma 4 in 2, kjer se struga Save razcepi na dva dela. Desni rokav je ob zelo nizkih pretokih presušen, tako da vsa voda teče po osnovni strugi. Nato se ob postopnem dvigovanju gladine Save polni tudi desni rokav, vendar zaradi goste zarasti in razgibanega terena voda v tem območju tudi zastaja in v začetku ne zapolni celotnega rokava. Šele kasneje, ko je vode dovolj, teče voda dokaj neovirano tudi

po desnem kanalu in se spet združi z osnovno strugo nad PP2. Vendar pa je potrebno poudariti, da so to zelo majhne razlike v pretokih in v hidravličnem modelu predpostavimo, da gre ves čas za enak pretok, s čimer sicer naredimo določeno napako, ki pa na same rezultate hidravličnega modela nima znatnega vpliva, saj je znotraj zahtevanega reda natančnosti.

o Opis situacije 19. septembra 2007

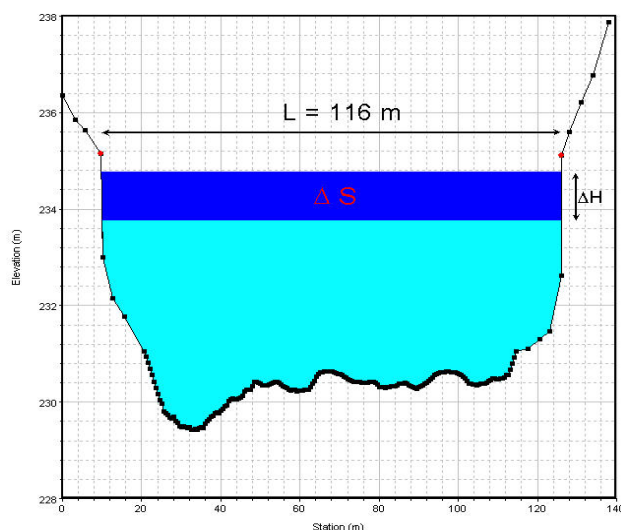
Zaradi močnih padavin v severozahodni in osrednji Sloveniji dne 18.9.2007 se je najprej povečal pretok Save v zgornjem delu in se nato postopoma povečeval v srednjem in spodnjem delu. Na vodomerni postaji Litija I je maksimalni vodostaj zabeležen v noči iz 18. na 19. september in znaša 525 cm.

Sledi visoke vode so bile označene 19. septembra ob 13. uri, meritev pretoka pa je bila zaradi tehničnih težav izvedena istega dne ob 19. uri, ko je vodostaj na VP Litija znašal 381 cm. Ob ogledu stanja ob 13. uri je bilo ugotovljeno, da se je večina vode že umaknila iz inundacij nazaj v osnovno strugo. Kontrolna meritev je bila izvedena tudi naslednjega dne pri vodostaju 295 cm.

S pomočjo več podatkov, ki so na voljo ob pojavu visoke vode dne 19.9.2007, lahko za potrebe hidravličnega modela ocenimo tudi kakšen je bil približen maksimalen pretok. Zaradi posebne oblike prečnega prereza 8 (obe brežini sta izvedeni z navpičnim betonskim zidom), lahko s preprostim izračunom določimo maksimalni pretok. Na voljo imamo naslednje podatke:

- meritev z mostu dne 19.9.2007 ob 19. uri ... $H_{pp8} = 310$ cm in $Q_{pp8} = 870$ m³/s
- posnetek višinske kote maksimalne gladine vode
- širina struge v prečnem profilu 8 znaša 116 m.

S temi podatki je mogoče približno oceniti Q_{max} . Iz spodnje slike (Slika 37) je razvidno, da predstavlja neznani del pretoka količino vode, ki teče skozi pravokotnik s površino ΔS .



Slika 37: Razlika pretoka med izvedeno meritvijo in največjim pretokom dne 19.9.2007

$$H_{\max} = 415 \text{ cm}$$

$$H_{\text{mer}} = 310 \text{ cm} \rightarrow \Delta H = 105 \text{ cm}$$

$$\Delta S = \Delta H \cdot L = 1,05 \text{ m} \cdot 116 \text{ m} = 121,8 \text{ m}^2 \quad (31)$$

Ker za razmere v strugi velja, da so hitrosti na površini največje, torej večje od povprečnih, ocenimo površinsko hitrost na 4,5 m/s in odtod izračunamo ocenjeni maksimalni pretok za visokovodni dogodek dne 19. septembra 2007.

$$v \cong 4,5 \text{ m/s} \Rightarrow \Delta Q = v \cdot \Delta S \cong 540 \text{ m}^3 / \text{s} \Rightarrow Q_{\max}^{\text{ocenjeni}} \cong 1400 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (32)$$

- o Starejše meritve izvedene v obdobju od leta 2001 do leta 2006

Za obdobje od leta 2001 do 2006 so v preglednicah zbrani podatki o izvedenih meritvah pretokov. Potrebno je poudariti, da so se meritve do vključno leta 2003 izvajala s hidrometričnimi krili, medtem ko se od leta 2004 dalje za meritev pretoka uporablja ADMP (v preglednici označeno z odebeljenim tiskom). Te meritve smo v diplomski nalogi uporabili zgolj kot primerjavo z letos izvedenimi meritvami in jih nismo uporabili pri umerjanju

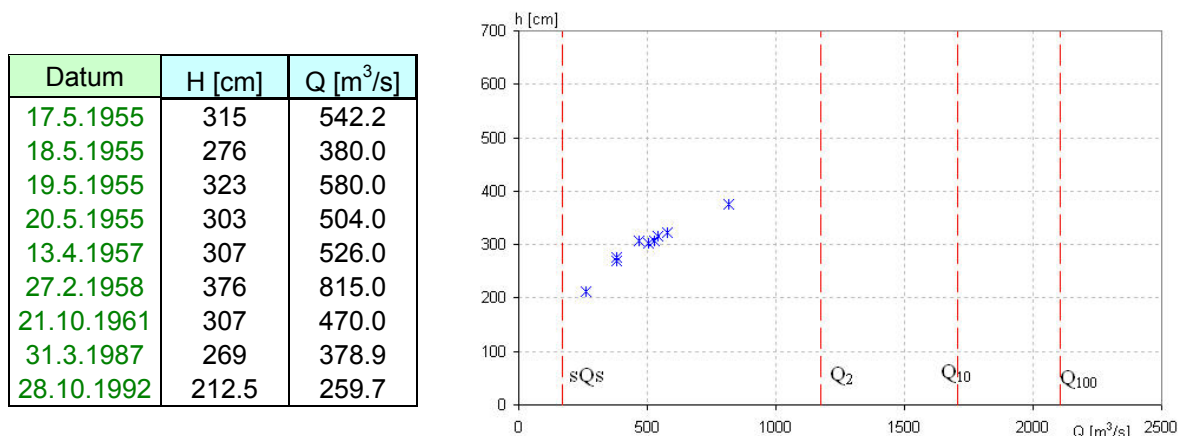
hidravličnega modela. Za samo umerjanje smo imeli namreč s temi meritvami premalo podatkov. Znan je samo vodostaj na lokaciji vodomerne postaje (PP 9), medtem ko ne razpolagamo z nobenim podatkom, kakšne so bile takrat vrednosti gladine v ostalih profilih. Iz preglednice je razvidno, da je najvišja izvedena meritev pri vodostaju 247 cm in pretoku 375 m³/s, kar pa je še vedno v srednjem delu pretočnih krivulj, kjer pa sam potek ni vprašljiv.

Preglednica 3: Meritve izvedene s hidrometričnim krilom in ADMP v obdobju med letoma 2001 in 2006

Datum	H [cm]	Q [m ³ /s]	Datum	H [cm]	Q [m ³ /s]	Datum	H [cm]	Q [m ³ /s]
16.2.2001	168	174.950	25.1.2002	135	71.910	31.1.2003	145	134.480
26.4.2001	168	151.903	29.3.2002	114	57.088	2.4.2003	120	66.012
6.7.2001	113	61.403	31.5.2002	134	91.261	23.5.2003	122	72.454
14.9.2001	106	47.679	26.7.2002	153	128.663	4.9.2003	110	50.797
9.11.2001	114	55.103	9.10.2002	119	63.767	24.10.2003	167	162.197
						19.12.2003	126	78.988
Datum	H [cm]	Q [m ³ /s]	Datum	H [cm]	Q [m ³ /s]	Datum	H [cm]	Q [m ³ /s]
13.2.2004	140	95.680	28.1.2005	116	62.161	26.1.2006	115	60.523
16.4.2004	204	229.522	25.3.2005	128	77.212	22.3.2006	172	170.435
11.6.2004	137	89.418	3.6.2005	122	77.534	18.5.2006	153	129.607
3.9.2004	160	136.520	11.8.2005	121	71.401	14.7.2006	110	56.8
25.11.2004	147	108.139	20.9.2005	247	374.940	20.9.2006	177	178
			24.11.2005	115	63.330	14.11.2006	102	46.1

Za vodomerno postajo Litija I so iz arhiva ARSO pridobljeni podatki o meritvah višjih pretokov v obdobju od začetka delovanja postaje. Tudi te meritve niso služile za umerjanje hidravličnega modela, pač pa zgolj kasneje za informacijo, koliko se pretočne krivulje izvedene s hidravličnim modelom razlikujejo od meritev. Iz spodnje slike (Slika 38) je razvidno, da gre v nekaterih primerih za zelo stare meritve in pričakovati je, da se bodo (vsaj za višje pretoke) rezultati nekoliko razlikovali. V tako dolgem časovnem obdobju je namreč bila sama struga in območje ob njej izpostavljeno različnim spremembam, kar se lahko pokaže v odstopanju meritev. Prav tako pa je razlika tudi v sami metodologiji meritev, hidrometrična krila je namreč nadomestil ADMP.

Na grafu (Slika 38) so prikazani tudi pretoki posamezne verjetnosti pojava in vidimo lahko, da so vse meritve izvedene pod vrednostjo pretoka z 2-letno povratno dobo, za vse ostale vrednosti pa je potrebna ekstrapolacija.



Slika 38: Arhivske meritve do sedaj najvišjih meritev pretoka, primerjane s pretoki izbrane verjetnosti pojava

Najvišji do sedaj izmerjeni pretok je znašal 815 m³/s pri vodostaju 376 cm in ta meritev odstopa od trenutno veljavne pretočne krivulje za približno 5 %. Problem Q-h krivulje je torej, kako dovolj natančno določiti pretoke majhne verjetnosti pojava.

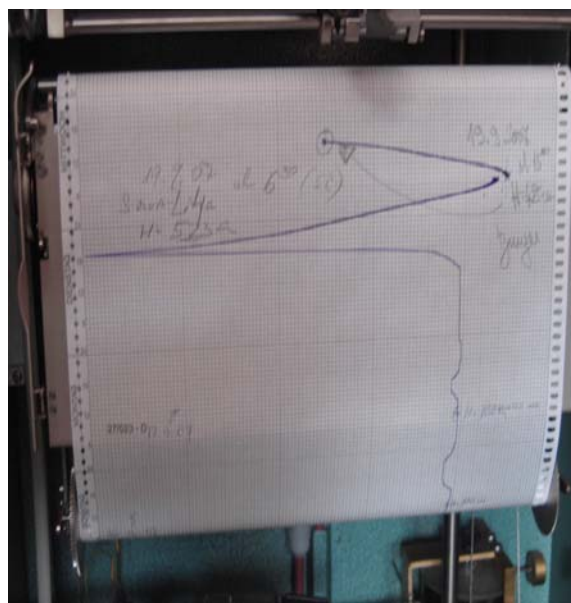
3.3.2.3. Meritve gladin na odseku vodotoka

Najpomembnejši podatki o gladinah reke Save, potrebni za umerjanje hidravličnega modela, so pridobljeni na osnovi novejših opazovanj in meritev v letu 2007. V tem obdobju se je namreč sistematično beležilo gladino na več lokacijah.

Na vodomerni postaji Litija I je aparat za beleženje spreminjanja vodostaja imenovan limnigraf, nameščen že od začetka delovanja postaje od leta 1953. Prav tako je za to postajo zadolžen opazovalec, ki enkrat dnevno odčita vodostaj z vodomera ter s tem preveri pravilno delovanje limnigrafa. Možno je namreč, da ob zelo hitrem naraščanju gladine reke limnigraf ne sledi pravilno dvigu gladine. Delovanje limnigrafa se preveri tudi ob vsaki meritvi pretoka. Tako je bilo v obravnavanem obdobju ugotovljeno, da je aparat ves čas deloval pravilno, tudi ob naglem naraščanju vodostaja dne 19. septembra 2007. To je bil tudi edini visokovodni dogodek v tem obdobju, kjer je maksimalni vodostaj znašal 525 cm (Slika 39 in Slika 40). Za celotno preostalo obdobje je ugotovljeno, da ni bilo nobenega izrazitega povišanja vodostaja, vsi vodostaji pa ustrezajo srednjim oziroma nizkim vrednostim.

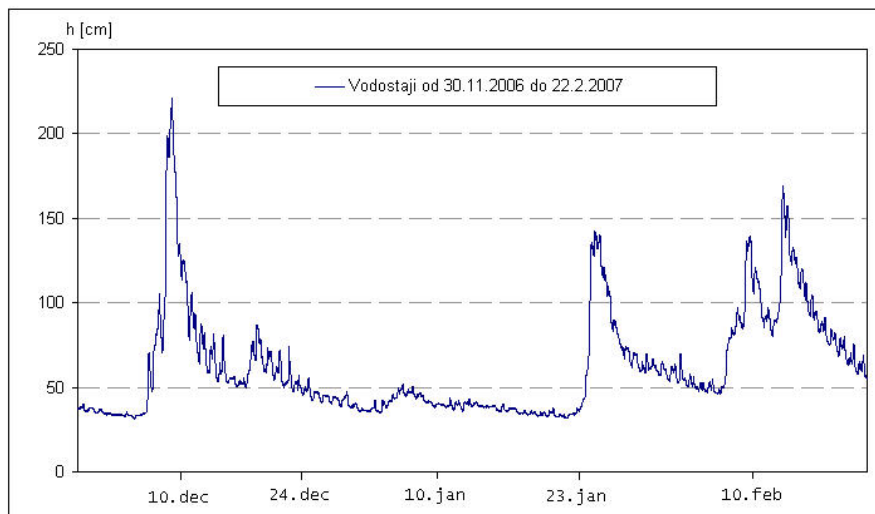


Slika 39: Sled najvišje gladine dne 19.9.2007



Slika 40: Izris limnigrafa dne 19.9.2007

Podatkovni zapisovalnik, ki je nameščen v dolvodnem prečnem profilu 1, je beležil podatke o gladini Save od 28. novembra 2006. Aparat podatke zapisuje v 15-minutnih intervalih in ima ob takšni frekvenci zapisovanja možnost zapisa za približno 80 dni.



Slika 41: Grafični prikaz spreminjanja gladine Save

S primerjavo gladin z lokacijami gorvodno, se lahko določi sprememba vzdolžnega padca gladine reke Save pri visokih vodostajih v primerjavi s padcem pri nizkih vodostajih. Z rednimi kontrolnimi opazovanji je bilo potrjeno pravilno delovanje zapisovalnika za obdobje

do visokovodnega dogodka dne 19. septembra 2007. Ob nastopu visoke vode pa je bilo ugotovljeno, da je aparat zabeležil približno 40 cm nižjo gladino, kot je bila dejansko posneta na terenu na podlagi sledi visoke vode. S tem se je pokazala kot pravilna odločitev, da se ob vsakem pojavu visoke vode čim prej zabeleži sledi maksimalne gladine v vseh izbranih prečnih profilih, s čimer dobimo izredno pomembne podatke za umerjanje modela. Po ogledu razmer naslednjega dne po nastopu visoke vode je bilo na terenu ugotovljeno, da je reka Sava prestopila bregove predvsem na mestih, kjer je bilo to možno že prej predvideti. Tako je bilo poplavljenno celotno poplavno območje na levem bregu, vendar je potrebno poudariti, da Sava v vseh prečnih profilih ni prestopila bregov. Tipičen primer je prečni profil 2, kjer se je voda sicer nahajala na poplavnem območju, vendar kot posledica toka vode po poplavnem območju iz gorvodnih profilov. Samo mesto Litija ni bilo ogroženo ne na levem in ne na desnem bregu, saj so nasipi izvedeni tako, da zdržijo tudi večje pretoke.



Slika 42: Voda na levem poplavnem območju

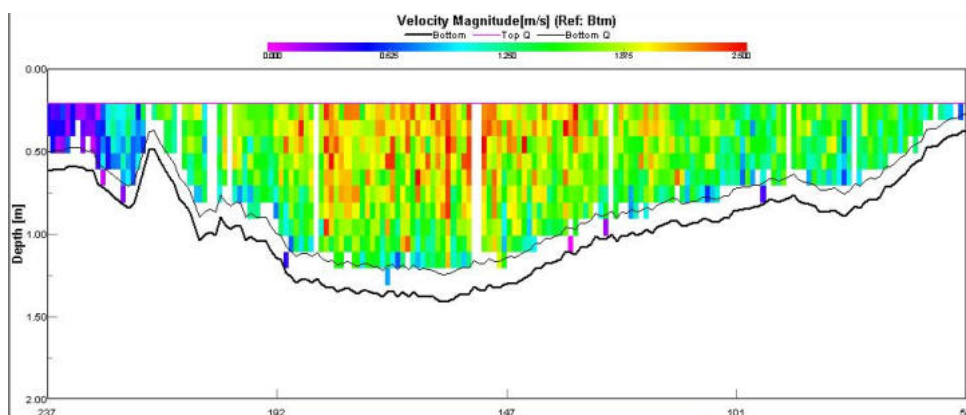


Slika 43: Razmere v prečnem profilu 2

Na desnem bregu je bilo ob nastopu visoke vode dne 19. septembra 2007 poplavljenno območje med prečnima profiloma 4 in 5, medtem ko je celoten otok na območju dolvodno poplavljen ter sta tako glavna struga kot rokav združena v enem toku (Slika 43). S tem so na območju med prečnima profiloma 2 in 4 doseženi veliki koeficienti hrapavosti, kot posledica goste zarasti na otoku, ki se razraste v času, ko otok ni poplavljen.

3.3.2.4. Določitev spodnjega robnega pogoja

Možni režimi toka pri simulaciji hidravličnih razmer v programu HEC-RAS so: mirni, deroči in izmenjajoči se režim toka. Za obravnavani odsek reke Save smo diplomski nalogi uporabili simulacijo mirnega toka. Pri mirnem toku so razmere gorvodno določene s stanjem na dolvodnem odseku, zato je še posebej pomembno, da natančno določimo spodnji robni pogoj. Za potrebe diplomske naloge je na ustrezno podaljšanem dolvodnem odseku nameščen podatkovni zapisovalnik, ki beleži gladino reke Save, tako da imamo v vsakem trenutku podatek o višini vode. Kot spodnji robni pogoj tako uporabimo podatek o znani višinski koti gladine Save v dolvodnem profilu odseka.

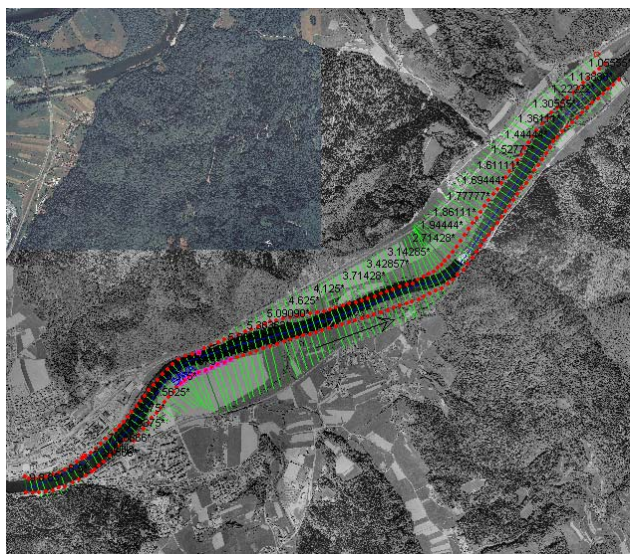


Slika 44: Prečni prerez kot ga poda ADMP (izrisan s programsko opremo WinRiver)

Prečni profil, kjer je nameščen podatkovni zapisovalnik, se nahaja na ravnem odseku vodotoka, kjer ni vpliva meandriranja v strugi. To je razvidno tudi iz same oblike prečnega profila, kjer gre za lepo oblikovan profil z eno samo najnižjo točko dna, ki se nahaja v srednjem delu struge nato pa se teren postopoma enakomerno dviguje proti levemu in desnemu bregu.

4 MATEMATIČNO MODELIRANJE

Celotni obravnavani odsek reka Save, ki je uporabljen v hidravličnem modelu, sega od obstoječe vodomerne postaje Litija I do vasi Ponoviče v dolžini približno 5 kilometrov. Struga Save je na celotnem območju široka v povprečju 100 m.



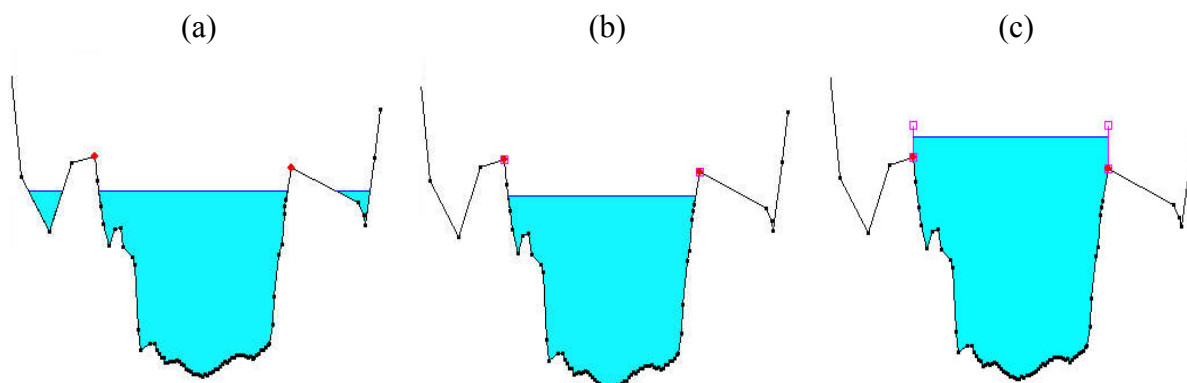
Slika 45: Potek trase reke Save na izbranem odseku izrisan v HEC-RAS

4.1 Postopek izvedbe hidravličnega izračuna

V prvem delu simulacije hidravličnih razmer na reki Savi smo se odločili za klasično metodo modela. Celoten obravnavani del Save je bil izveden samo z enim odsekom (*Reach*), kjer imamo definirano osnovno strugo ter levi in desni breg. Tu gre za eno-dimenzijski hidravlični model.

V računalniškem programu HEC-RAS smo najprej izrisali tlorisni potek geometrije obravnavanega odseka ter vnesli podatke o izmerjenih prečnih profilih. Z vnosom situacije smo programu pokazali, kako teče vodotok, saj situacijo vedno izrišemo v smeri toka. Izrisana tlorisna situacija je predpogoj za vnos podatkov o prečnih prerezih in hidravličnih objektih. Izmerjenih je bilo 9 prečnih profilov, na medsebojni razdalji med 300 in 500 m, zadnji, najnižje ležeči prečni profil 1, pa je od predhodnega profila 2 oddaljen 1800 m. Na začetku urejanja prečnih prerezov je potrebno vsak prerez ustrezno poimenovati. Za oznako osnovnih

prečnih prerezov so uporabljeni številke od 1 do 9, kjer predstavlja PP1 dolvodni prečni profil v Ponovičah, PP9 pa je gorvodni prečni profil na lokaciji vodomerne postaje Litija I. Prečni prerez je definiran s točkami v koordinatnem sistemu X-Y, kjer predstavlja X koordinato v prečni smeri (*Station*), od levega proti desnemu bregu, Y smer pa predstavlja absolutno nadmorsko višino (*Elevation*) posamezne točke prečnega prereza. Poleg tega je bilo potrebno podati tudi razdalje do prečnega profila dolvodno in sicer posebej za levo poplavno območje (*LOB*), glavno strugo (*Main channel*) in desno poplavno območje (*ROB*). Z mejami glavne struge smo določili v katerih dveh točkah posameznega prečnega prereza glavna struga preide v levo oziroma desno poplavno območje. HEC-RAS omogoča tri načine kako upoštevati količino vode v izbranem prečnem prerezu. Zaradi razgibanosti terena se namreč dostikrat zgodi, da je teren na poplavnem območju v nekaterih točkah nižji kot znaša nadmorska višina prelivne točke. V teh primerih je potrebno uporabiti enega izmed sledečih pristopov. Pri prvem načinu predpostavimo, da naj program upošteva ves prečni prerez, ki se nahaja pod vodno gladino. To pomeni, da bo program upošteval vodo na poplavnem območju tudi, če sama gladina dejansko ne prestopi prelivnih točk (Slika 46a). Tak pristop je uporaben takrat, kadar vemo, da je voda prestopila bregove že v gorvodnem profilu in sedaj teče po poplavni ravnici. Drugi pristop predvideva, da programu povemo, da naj do kote krone nasipa upošteva le prerez v osnovni strugi, nad to koto pa ves prečni profil (Slika 46b). V programu to dosežemo z uporabo funkcije *Levees* na prelivnih točkah, kjer kot nadmorsko višino uporabim dejansko višino v prelivni točki. Tretja možnost je simulacija nadvišanja nasipov, kjer pa v funkciji *Levees* podamo dejansko neko višjo nadmorsko višino (Slika 46c). S tem pristopom lahko predvidimo kakšen vpliv bi imela izvedba visokovodnih nasipov na razmere v vodotoku. V simulaciji hidravličnih razmer na reki Savi sta bila uporabljena prva dva načina. Na območjih, kjer imamo široke inundacije, je potrebno dolvodno od mesta razlitja uporabiti prvi pristop z upoštevanjem celotnega prečnega profila, saj je bilo po ogledu stanja na terenu ugotovljeno, da se je voda v nekaterih prečnih profilih nahajala na poplavnem območju, čeprav v tem profilu ni prestopila bregov. Prav tako smo na podoben način simulirali tudi območje med PP4 in PP2, kjer se struga reke Save razdeli na dva dela. Zaradi neznanosti količine vode, ki odteče po desnem rokavu, je simulacija izvedena tako, da program upošteva celoten prečni prerez, ko se pod gladino nahaja tudi desni rokav. V prečnih profilih, kjer je bilo ocenjeno, da voda ne poplavi poplavnih območij iz gorvodnih profilov, je bil uporabljen pristop z nasipi (*Levees*).



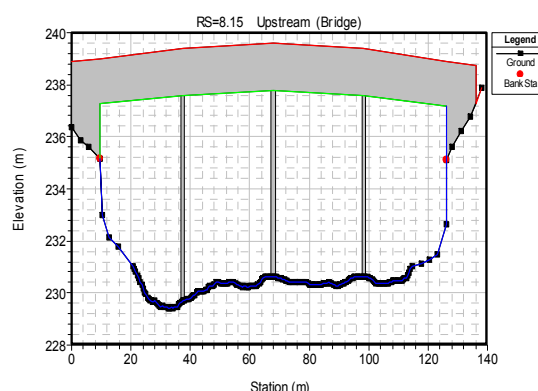
Slika 46: Različne možnosti upoštevanja količine vode v prečnem prerezu

Zelo pomemben podatek pri opisu prečnega profila predstavlja vrednost Manning-ovega koeficienta hrapavosti n_G . Koeficiente hrapavosti podamo posebej za glavno strugo ter levo in desno poplavno območje. Program HEC-RAS ima že vgrajeno tabelo z mejnimi vrednostmi Manning-ovih koeficientov za različne primere. V diplomski nalogi smo poleg uporabe tabele kot začetne vrednosti uporabili podatke o koeficientih hrapavosti iz že opravljene hidravlične študije Save na odseku od Spodnjega Hotiča do Litije in sicer smo za glavno strugo vzeli vrednost $n_G=0.035 \text{ sm}^{-1/3}$, za poplavna območja pa $n_G=0.040 \text{ sm}^{-1/3}$. S temi podatki dokončno definiramo posamezni prečni profil.

V nadaljevanju smo podali podatke o mostni konstrukciji, ki se nahaja 450 m dolvodno od vodomerne postaje Litija I. Geometrija mostne konstrukcije vključno z mostnimi oporniki je bila pridobljena iz dokumentacije hidravlične analize Save od Spodnjega Hotiča do Litije. Struga reke Save je na območju mostne konstrukcije široka 120 m, obe brežini struge pa sta izvedeni kot navpični betonski zid, ki je podaljšan tako gorvodno kot dolvodno od mostu. Mostni oporniki so zaradi manjšega upora toku vode zaobljeni. Ob nastopu visoke vode dne 19. septembra 2007, je bilo z ogledom situacije na terenu ugotovljeno, da mostni oporniki ne predstavljajo ovire toku vode tudi pri visokih vodah. Na mostnih opornikih namreč ni bilo nalaganja plavja, kot je to lahko primer na ostalih mostovih, kjer se zaradi oprornikov pojavi zajezba. Prav tako zaradi mostnih opornikov niso bili oteženi odčitki gladin v profilu 8, saj je vodomer za visoke vode nameščen na betonskem zidu ob desnem bregu, kjer ni vpliva mostnega opornika na gladino reke Save.



Slika 47: Most v Litiji – PP8



Slika 48: Shema mostu v HEC-RAS

Po vnosu vseh znanih podatkov o geometriji prečnih prerezov in mostne konstrukcije, smo izvedli še interpolacijo prečnih prerezov. Uporabili smo avtomatsko interpolacijo, kjer smo prečne prereze razporedili približno 50 m narazen. V območju, kjer se teren spreminja postopoma, smo prečne prereze pustili takšne, kot so bili dobljeni z interpolacijo in sicer tako glavno strugo kot poplavna območja. Na določenih delih odseka se pojavijo mesta, kjer pride do hipne spremembe topografije terena. V teh profilih smo ohranili podatke interpolacije za glavno strugo, medtem ko smo bregove in poplavna območja deloma popravili na osnovi ogleda stanja na terenu in točk iz topografskega načrta. Predvsem so pomembna mesta, kjer se voda najprej prelije preko bregov.

S tem smo končali z vnosom vseh geometrijskih podatkov potrebnih za simulacijo, treba je bilo obdelati še podatke o pretoku in robnih pogojih. Za uspešno simulacijo je potrebno uporabiti najmanj en pretok, za smiseln izris pretočne krivulje pa je dobro uporabiti čim več različnih pretokov, do maksimalno 2000. V prvi fazi simulacije smo izbrali samo en pretok, da bi videli do kam seže vodna gladina pri izbranih koeficientih hrapavosti ter kako se izračunane gladine ujemajo z izmerjenimi na terenu. Meritve so zajemale vrednosti pretoka od $46 \text{ m}^3/\text{s}$ pa vse do $870 \text{ m}^3/\text{s}$. V začetni simulaciji smo uporabili pretok $46 \text{ m}^3/\text{s}$, saj nas je zanimalo tudi kako se hidravlične razmere spreminjajo z višanjem pretoka. Pričakovali smo, da se bo koeficient hrapavosti spreminjal tudi z večanjem pretoka, saj imajo pri nizkem vodostaju na hrapavost največji vpliv večji kamni in skale v strugi, medtem ko se njihov vpliv pri višjem vodostaju zmanjša, nastopijo pa novi koeficienti hrapavosti zaradi zarasti na brežinah.

Za simulacijo hidravličnih razmer na Savi smo izbrali režim mirnega toka, kar pomeni, da je bilo dovolj vnesti samo spodnji robni pogoj. Robni pogoji (*Boundary Conditions*) so namreč nujno potrebni za začetek izračuna, saj s temi podatki programu nakažemo začetno stanje na dolvodnem koncu odseka, iz katerega nato model izhaja. Robne pogoje lahko izberemo z eno od naslednjih možnosti: znana vodna gladina (*Known W.S.*), kritična globina (*Critical Depth*), normalna pretočna globina (*Normal Depth*) ali pretočna krivulja (*Rating Curve*). V diplomski nalogi je bil izbrani odsek zasnovan tako, da se je na ustrezno podaljšanem dolvodnem profilu namestil podatkovni zapisovalnik, ki je beležil gladino Save in zato za izvedene meritve kot spodnji robni pogoj uporabimo znano vodno gladino. S tem so bili vneseni vsi podatki potrebni za izračun.

4.1.1 Umerjanje hidravličnega modela

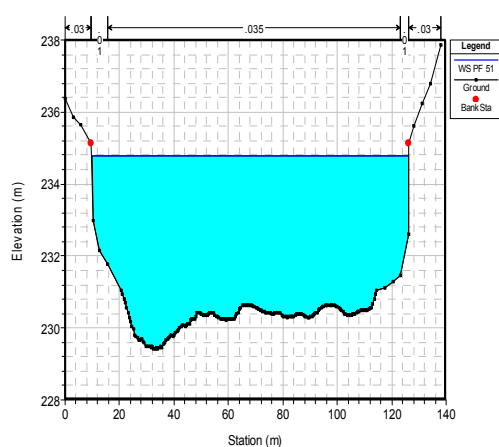
Pregled rezultatov simulacije pokaže odstopanje izračunanih gladin od izmerjenih v prečnih profilih 8 in 9. Za natančnejše rezultate je bilo potrebno hidravlični model umeriti.

Iz Manning-ove enačbe lahko na podlagi terenskih meritev dobimo padec, prečni presek in omočeni obod. Neznanki nam tako predstavljata pretok Q in koeficient hrapavosti n_G . Izvedene meritve z ADMP nam dajo vrednost pretoka Q , ki se uporabi kot konstanta, koeficient hrapavosti pa je potrebno večati oziroma manjšati, da se bodo gladine ujemale. Pri nalogi smo imeli zelo natančno določene naslednje parametre: gladino vode v prečnih profilih 9, 8 in 1 ter izmerjeni pretok v prečnem profilu 8 in 1. S spreminjanjem koeficienta hrapavosti smo se želeli čim bolj približati izmerjenim gladinam, saj so le-te predstavljale dejansko stanje v naravi in ne zgolj starih podatkov katerih verodostojnosti ni mogoče preveriti. Vseeno pa je bilo potrebno paziti, da s koeficienti hrapavosti ostanemo znotraj mej značilnih za območje, ki ga obravnavamo, saj so določene napake v modelu lahko posledica slabše geometrije terena.

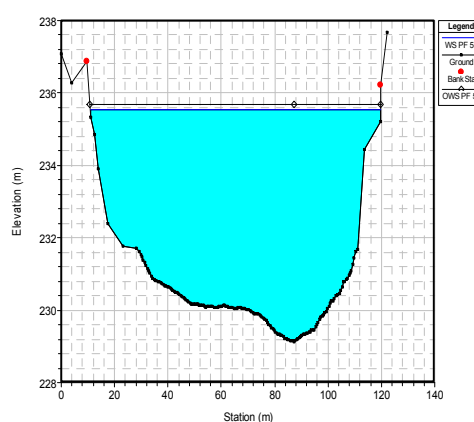
V prvi fazi umerjanja smo pregledali dobljene rezultate simulacije in ugotovili, da so predpostavljeni koeficienti hrapavosti v določenih profilih previsoki, v nekaterih pa prenizki. Koeficiente hrapavosti smo v hidravličnem modelu popravljali v smeri proti gorvodnemu delu. S primerjavo ostalih izvedenih meritev pri različnih pretokih smo ugotovili, da se

koeficienti hrapavosti spreminjajo tudi z večanjem pretoka in ni bilo mogoče kar uporabiti podatkov prvega umerjanja (Armanini, Righetti, 1998). Ugotovljeno je bilo tudi, da lahko na isti lokaciji ob različnem pretoku izbrani koeficient hrapavosti enkrat določa preveč vode, medtem ko pri višjem pretoku kaže, da je vode v strugi premalo. Zaradi različnih dejavnikov se je bilo potrebno odločiti katere meritve bodo glavne pri umerjanju modela. Model smo grobo umerili že pri nižjih pretokih, vendar smo kot glavno meritev za umerjanje uporabili meritev izvedeno dne 19. 9. 2007 pri pretoku $Q = 870 \text{ m}^3/\text{s}$ ter podatke o opazovanih gladinah visoke vode istega dne. Pri nalogi so nas namreč zanimala razmere ob nastopu ekstremnih pretokov, zato je smiselno, da se z umerjenim modelom poskušamo čim bolj približati najvišje izmerjenim podatkom. Meritev dne 19.9.2007 je kvalitetno izvedena z redom točnosti $\pm 2 \%$ in predstavlja najvišje izmerjeni pretok na obravnavani vodomerni postaji.

Zaradi spremenljivih razmer v sami strugi ter na brežinah in poplavnih ravninah, smo pri umerjanju modela uporabili tudi horizontalno spremembo koeficienta hrapavosti po prerezu. V določenih prečnih profilih je namreč nemogoče podati vrednost koeficienta samo za glavno strugo ter levo in desno poplavno ravnico. V večini prečnih profilov imamo v območju tik ob strugi drevesa in grmovje v pasu povprečno treh metrov, nato se območje razširi v travnato poplavno območje. Trava predstavlja dosti manjši upor toku vode kot gosto grmovje, zato smo zaradi večje natančnosti za ti območji upoštevali različna koeficienta hrapavosti. Podoben primer se je pojavil v območju gorvodno in dolvodno od mostu, kjer imamo brežini izvedeni iz betonskega zidu z bistveno nižjim koeficientom hrapavosti kot ostali deli (Slika 49).



Slika 49: Horizontalna sprememba n_g v prečnem profilu 8



Slika 50: Prečni profil 9 pri pretoku $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$ z označeno opazovano gladino

S tako umerjenim modelom, kjer smo za spodnji robni pogoj za pretoke do $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$ uporabili znano gladino v dolvodnem profilu, uporabimo koeficiente hrapavosti za glavno strugo v mejah od 0.025 do 0.045. Vrednosti se nekoliko razlikujejo od prvotno izbranih, vendar so izbrane na osnovi dejanskih meritev izvedenih posebej za izvedbo hidravličnega modela ter na osnovi ogleda na terenu. Vrednosti koeficienta hrapavosti na brežinah so izbrane okrog 0.045, medtem ko so vrednosti na poplavnih območjih še nekoliko nižje zaradi pretežno travnatih območij s koeficientom hrapavosti povprečno 0.035. Izjemo predstavlja območje okrog prečnega profila 3, kjer so tako struga desnega rokava kot tudi same brežine močno zaraščene s koeficientom hrapavosti do 0.15. Za betonski zid v območju mostu smo uporabili koeficient hrapavosti 0.01.

V umerjenem hidravličnem modelu se izračunane gladine približajo izmerjenim vrednostim na terenu. Natančnost ujemanja je pogojena z natančnostjo posamezne meritve. Ker so gladine v profilih, kjer ni vodomerov, odčitane s pomočjo sledi visoke vode, je natančnost v teh profilih manjša, saj je lahko sled tudi posledica vala in ne dejanske gladine Save.

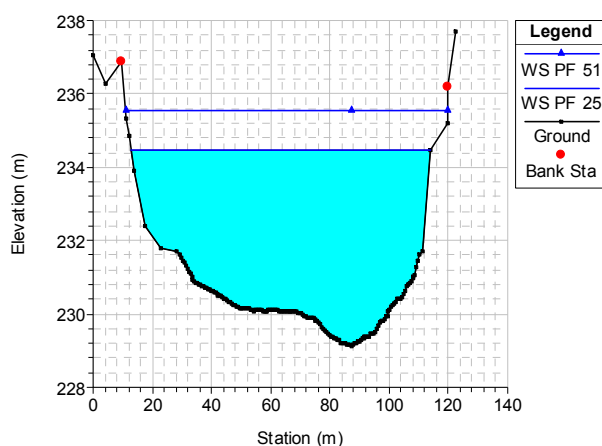


Slika 51: Vodomer predstavlja oviro toku vode

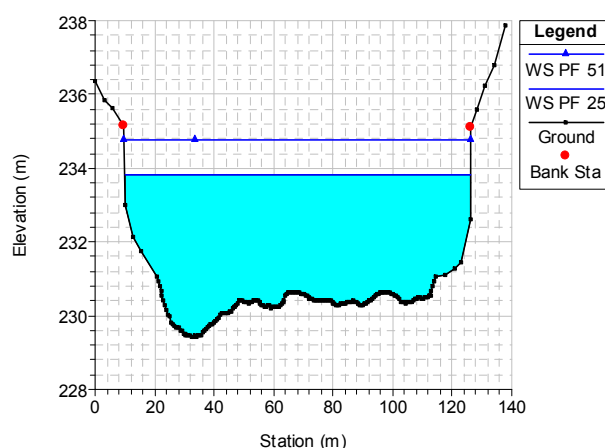
Prav tako lahko že do določene majhne napake pride pri odčitku gladine z vodomera, čeprav se temu posveti velika pozornost. Celotna razdelba vodomerov je namreč dvo-centimeterska, vodostaj pa se odčita na 1 cm natančno. Včasih se pred vodomerom nabere vejevje, ki ga reka prinese s sabo in posledično se na vodomeru pojavi nenaden upad vodostaja, kar povzroči težavo pri odčitku vodostaja na 1 cm natančno (Slika 51). Vodomeri se sicer redno čistijo, da do takšnih primerov ne prihaja, vendar je včasih dostop zaradi previsoke vode onemogočen.

4.2 Prikaz rezultatov hidravličnega modela

Hidravlični model HEC-RAS omogoča več načinov pregleda rezultatov simulacije tako od tabelarnih do grafičnih prikazov. Z grafi lahko prikažemo rezultate simulacije v posameznih prečnih prerezih, kjer lahko kombiniramo tudi, kateri pretoki naj bodo prikazani. Na spodnji sliki (Slika 52) je prikazan prečni profil 9 na lokaciji vodomerne postaje pri naslednjih pretokih: $870 \text{ m}^3/\text{s}$ in $1400 \text{ m}^3/\text{s}$. Na desni sliki (Slika 53) je za ista pretoka prikazan tudi prečni profil 8 pod mostom.

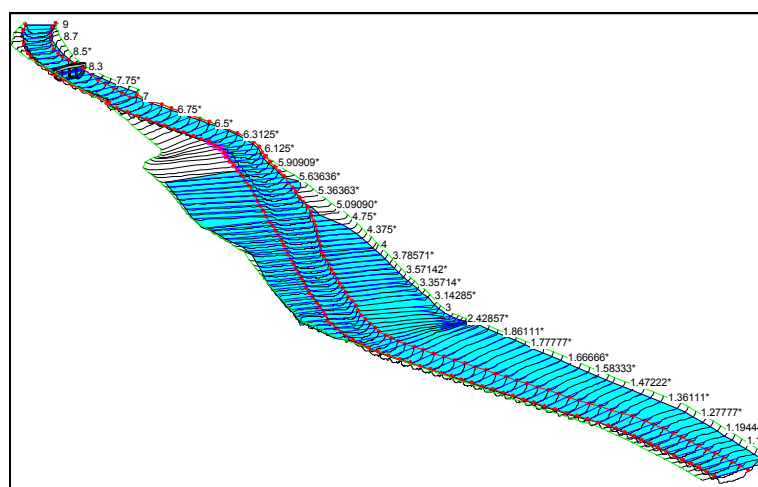


Slika 52: Prikaz gladin v PP 9



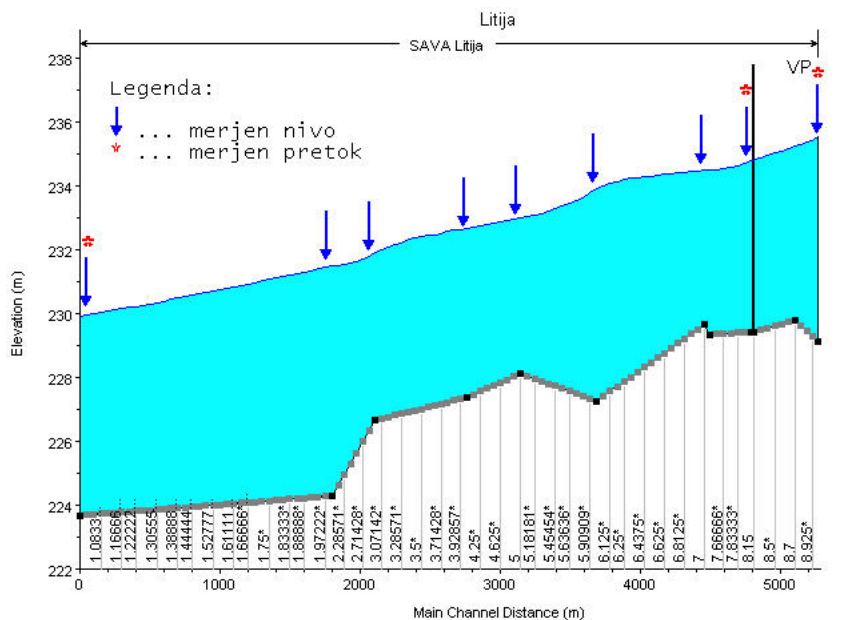
Slika 53: Prikaz gladin v PP 8

Program omogoča tudi pregled razmer na celotnem odseku. Iz slike (Slika 54) je razvidno katera območja so poplavljeni pri izbranem pretoku $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 54: 3D pogled obravnavanega odseka pri pretoku $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$

Vzdolžni prerez omogoča pregled naklona gladin in dna na celotnem odseku. Po primerjavi naklona gladin pri posamezni pretokih je ugotovljeno, da se z večanjem pretoka, naklon gladine manjša. Pri pretoku $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$ znaša povprečen padec gladine približno 0,8 ‰, medtem ko pri nižjih pretokih do 1,2 ‰.



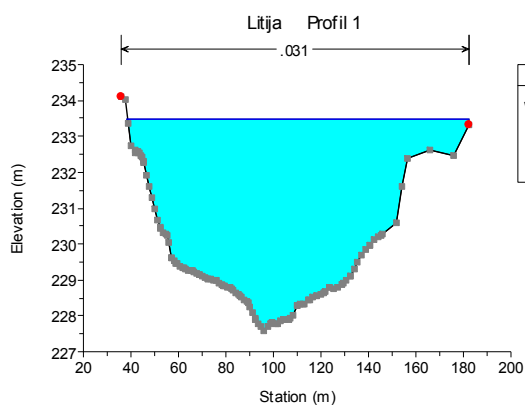
Slika 55: Vzdolžni prerez obravnavanega območja pri pretoku $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$

Na sliki (Slika 55) so prikazani tudi prečni profili v katerih so bile izvedene meritve tako pretokov kot gladine ter profili, kjer je bila zabeležena le gladina.

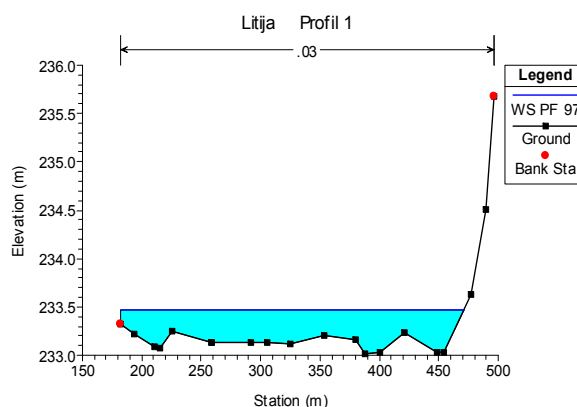
4.3 Izvedba vejičastega toka

Zaradi izrazitega 2-D problema na obravnavanem odseku reke Save je bila potrebna tudi izvedba t.i. kvazi 2-D hidravličnega modela, da preverimo v kolikšni meri razlitje vode na poplavna območja vpliva na obliko pretočne krivulje vodomerne postaje Litija. Računalniški program HEC-RAS omogoča izvedbo t.i. vejičastega toka (*Split Flow*), kjer poplavna območja predstavimo kot popolnoma svoje odseke ločene od glavne struge in s tem 2-D problem izvedemo z več 1-D odseki. V osnovi je potrebno imeti dober posnetek terena ter na terenu preučiti v katerih točka voda najprej prestopi bregove struge (Hojnik, 1997). Glavno strugo in poplavno območje v HEC-RAS razdelimo z določitvijo vozlišča (*Junction*) ter

poplavno območje na levem bregu. Zaradi tehničnih težav na ADMP ni bila možna meritev pretoka prej kot ob 19. uri istega dne pri vodostaju 381 cm. Predhodno je bil ob 14. uri opravljen ogled na terenu, kjer je bilo pri vodostaju 425 cm ugotovljeno, da se je večina vode že umaknila nazaj v strugo, razen na nekaterih delih, kjer je bilo to zaradi oblike prereza onemogočeno. Da bi dobili podatke o količini vode na poplavnih območjih, bi morala biti meritev opravljena zgodaj zjutraj, kar pa je bilo, kot že omenjeno, zaradi tehničnih težav z merilno opremo nemogoče. Prav tako bi bila takšna meritev po poplavnih območjih tvegana. Takrat bi namreč morala ekipa opraviti meritev iz čolna, kar pa je lahko ob razmerah pri visoki vodi nevarno. Za potrditev 1-D modela z bolj točnim kvazi 2-D modelom bi bilo tako treba ob naslednji visoki vodi določiti hitrosti vode in s tem tudi pretok na poplavnem območju, seveda ob oceni zadostne varnosti za izvedbo meritve. S tem bi dobili nove podatke, s katerimi bi lahko še boljše opisali hidravlični model.



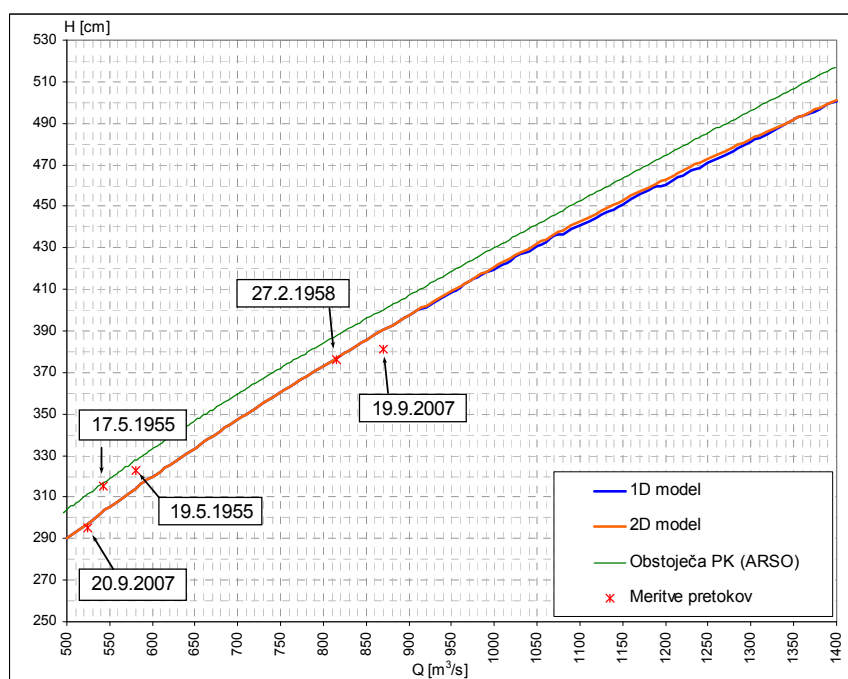
Slika 57: Prečni prerez glavne struge (kota gladine je 233,49 m n.m.v)



Slika 58: Pripadajoči prečni prerez desnega poplavnega območja (233,50 m n.m.v)

Program lahko računanje količine vode na poplavnem območju izvede z iteracijskim računom, kjer pa je potrebno podati predvideni začetni pretok po vejah. Kot začetno vrednost smo v izračunu uporabili, da na poplavno območje odteče 1 % celotnega pretoka. Simulacijo smo izvedli na primeru pretoka $1400 \text{ m}^3/\text{s}$, saj smo za ta primer imeli podatke o gladinah v posameznih prečnih profilih. V tem primeru je začetni pretok po poplavnih območjih znašal $14 \text{ m}^3/\text{s}$. Koeficienti hrapavosti so za osnovno strugo povzeti po umerjenem 1-D modelu, za poplavna območja pa smo uporabili tri različne vrednosti in sicer 0.03, 0.04 in 0.05. S takšno izbiro parametrov smo s pomočjo modela HEC-RAS ocenili, da znaša pretok po poplavnih območjih med 2 % do 7 % celotnega pretoka, kar na konkretnem primeru pretoka $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ znaša vrednosti med 30 in $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Po primerjavi rezultatov treh različnih simulacij z izbranimi koeficienti hrapavosti na poplavnih območjih med 0.03 in 0.05 ugotovimo, da samo spreminjanje parametrov na poplavnih območjih nima bistvenega vpliva na spremembo gladine v prečnem profilu 9, kjer se nahaja vodomerna postaja. Gladina se namreč med mejnimi vrednostmi spremeni le za 4 cm, kar pri vodostaju 510 cm predstavlja manj kot 1 %. Glede na to je mogoče sklepati, da poplavna območja dolvodno od vodomerne postaje Litija ne predstavljajo območij, ki bi spremenila potek pretočne krivulje in je simulacija z 1-D modelom za izdelavo pretočne krivulje dovolj natančna metoda.



Slika 59: Primerjava pretočne krivulje izvedene z 1-D in 1-D modelom z vejičastim tokom v HEC-RAS

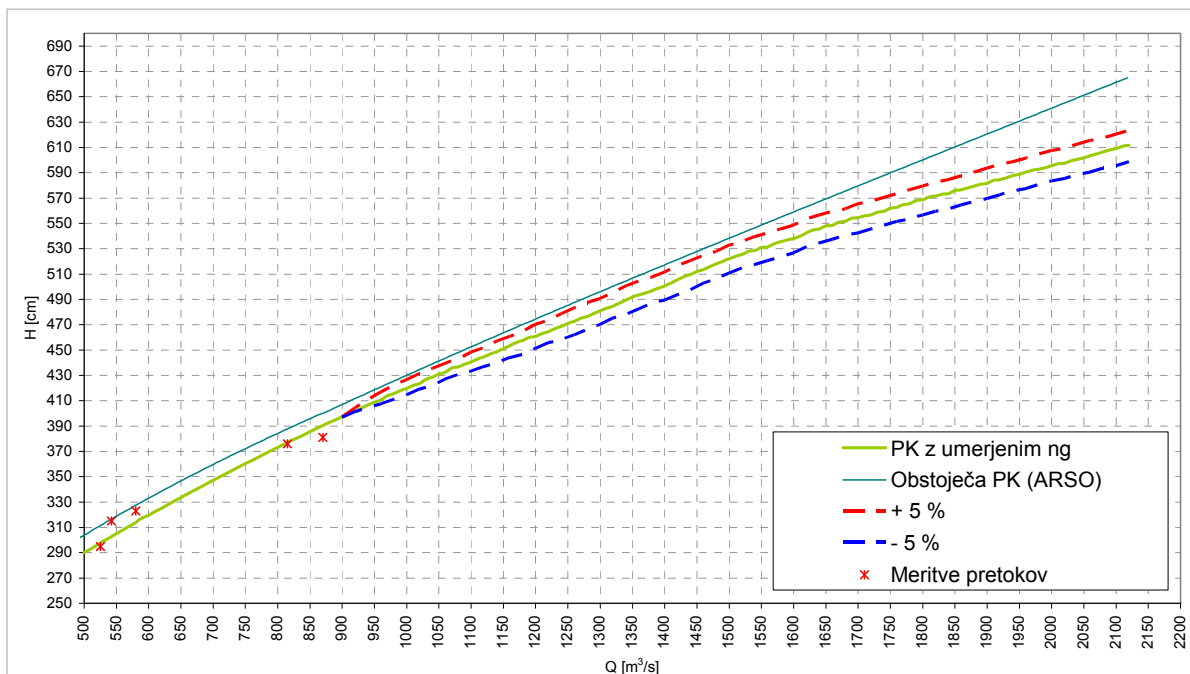
Iz zgornje slike (Slika 59) je razvidno, da sta pretočni krivulji izvedeni z 1-D oziroma 1-D modelom z vejičastim tokom popolnoma prekriti do pretoka med 800 in 900 m³/s, saj se do tega pretoka še vsa voda nahaja osnovni strugi in ni toka po poplavnem območju. Nad vrednostjo 900 m³/s ter vse tja do 1400 m³/s, pa daje pretočna krivulja izvedena z 1-D modelom malo nižje gladine pri istem pretoku. Vendar so te razlike, kot že prej omenjeno, zelo majhne in sicer pod 1 %. Na zgornji sliki so poleg pretočnih krivulj prikazane tudi najvišje izvedene meritve pretokov v obdobju od začetka delovanja postaje.

4.4 Ekstrapolacija pretočnih krivulj za višje pretoke

4.4.1 Za vodomerno postajo Sava – Litija I

Za pretoke višje od $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ nimamo podatka o gladini vode v dolvodnem profilu, saj je bil v času od namestitve podatkovnega zapisovalnika za potrebe diplomske naloge to najvišji izmerjeni pretok. Zato je potrebno upoštevati nov spodnji robni pogoj, ki smo ga podali s povprečnim padcem energijske črte. Podatek smo določili s pomočjo rezultatov hidravličnega izračuna za pretoke do $1400 \text{ m}^3/\text{s}$, kjer smo kot povprečni padec energijske črte na obravnavanem odseku dobili vrednost 0.8% . S to vrednostjo, ki predpostavlja paralelen dvig gladine, smo nato simulirali še ostale višje pretoke.

S pomočjo umerjenega modela in izvedenih meritev, se izrišejo pretočne krivulje za posamezen profil. Ker so nas v nalogi zanimale pretočne krivulje konkretno na lokaciji vodomerne postaje Litija, so izrisane pretočne krivulje v prečnem profilu 9.



Slika 60: Primerjava obstoječe pretočne krivulje in krivulje dobljene s HEC-RAS, s prikazom vpliva $\pm 5 \%$ spreminjanja n_G

Treba je poudariti, da so krivulje izrisane od pretoka $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ naprej, saj so pretočne krivulje v spodnjem delu do te vrednosti enotne in dostikrat preverjene z zadostnim številom meritev ter kot takšen spodnji del krivulj ni vprašljiv. Problemi nastopijo vedno z zgornjimi deli pretočnih krivulj, kjer ni na voljo meritev. Za čim boljši izris pretočne krivulje, smo uporabili skupaj 80 pretokov za simulacijo z vrednostmi med $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in $2120 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pretočna krivulja dobljena s pomočjo 1-D hidravličnega modela kaže na večjo pretočnost kot obstoječa (statistično) ekstrapolirana pretočna krivulja ARSO (Slika 60), saj imamo enak pretok skozi prerez pri nižjem vodostaju in obratno pri enakem vodostaju imamo večji pretok skozi obravnavani prečni prerez. Iz slike (Slika 60) je razvidno, da se v območju okrog vodostaja 300 cm krivulji med sabo razlikujeta za približno 10 %, medtem ko se od vodostaja 550 cm naprej, pretočna krivulja še bolj odmakne od obstoječe pretočne krivulje, ki je v uporabi na ARSO. Tako imamo pri vodostaju 550 cm razliko v pretokih približno 8 %, medtem ko znaša razlika med pretokoma pri vodostaju 610 cm že 12 %.

Zaradi dejstva, da smo umerjanje modela izvedli z izbiranjem koeficienta hrapavosti ter možnih napak zaradi netočnosti topografskih podatkov, je bilo potrebno izvesti tudi analizo občutljivosti koeficienta hrapavosti. Najprej smo za celotno območje, tako za strugo kot poplavna območja, povečali koeficiente hrapavosti za 1%, 2% in 5% ter kasneje tudi zmanjšali osnovno umerjene vrednosti za 1%, 2% in 5%. Po vsaki posamični spremembi smo na novo zagnali simulacijo in dobili nove rezultate. Na zgornji sliki (Slika 60) sta zaradi boljše preglednosti kot črtkani prikazani le mejni krivulji (5 % povečanje oziroma 5 % zmanjšanje koeficienta hrapavosti), vse ostale krivulje pa ležijo v vmesnem območju.

Iz rezultatov simulacij je razvidno, da pretočne krivulje za maksimalne pretoke tudi pri 5% povečanju koeficienta hrapavosti ne dosežejo obstoječe pretočne krivulje na ARSO. S tem se nakaže možnost, da obstoječe pretočne krivulje dejansko prikazujejo manjšo pretočnost pri enakem vodostaju. V primeru vodostaja 550 cm daje pretočna krivulja uporabljena na ARSO vrednost pretoka $1556 \text{ m}^3/\text{s}$, medtem ko dajejo pretočne krivulje hidravličnega modela vrednosti med $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ (5% povečanje n_g) in $1750 \text{ m}^3/\text{s}$ (5% zmanjšanje n_g), kar predstavlja razliko v pretočnih krivuljah med 3 % in 12 %. Pri višanju gladine se te razlike še povečujejo, saj imajo pretočne krivulje med seboj drugačen potek. Pri maksimalnem upoštevanem pretoku

2100 m³/s je po pretočni krivulji ARSO dosežen vodostaj 663 cm, s pretočnimi krivuljami hidravličnega modela pa le 624 cm oziroma 599 cm, kar v povprečju znaša približno 50 cm razlike v gladini pri istem pretoku.

4.4.2 Primer za sestavljen prečni profil

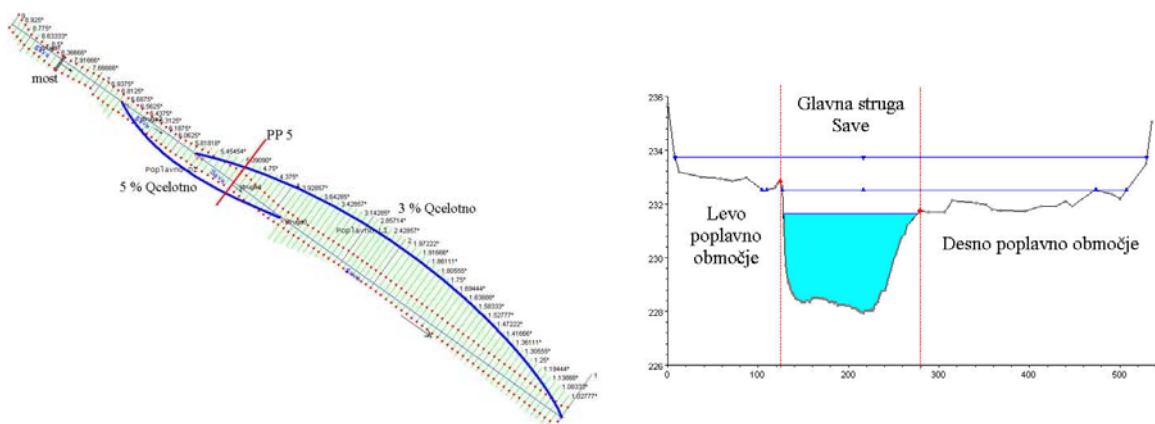
V primeru vodomerne postaje Litija gre za enotni prečni prerez, kjer voda tudi pri največjih pretokih nima velikih inundacijskih površin. Zato v poteku pretočne krivulje ni zaznati nobene hipne spremembe naklona vsotne krivulje pretokov, ki se pojavi, ko se voda izlije v inundacijo. Vse metode ekstrapolacij, ki se nanašajo na statistične podatke, dokaj zadovoljivo opišejo pretočne krivulje za enotne prečne prereze, zato bo prikazano, kakšne razlike se lahko pojavijo pri ekstrapolaciji pretočnih krivulj, kadar gre za sestavljen profil.

Na obravnavanem odseku so sestavljeni prečni profili, ki imajo poleg glavne struge še levo in desno poplavno območje ali pa prečni profil vsebuje kar obe območji. Dokler je voda znotraj glavne struge, imamo enak potek pretočne krivulje, saj gre še vedno za enoten prerez. Razlika v krivuljah se pojavi, ko voda prelije desni oziroma levi breg in je treba seštevati pretoke v strugi in obeh inundacijah.

Razliko bomo ugotavljali tako, da bomo za vodostaje, ko voda poplavi inundaciji, primerjali:

- ekstrapolirano pretočno krivuljo, dobljeno s pomočjo statistične ekstrapolacije iz izračunanih pretokov za vodostaje, pri katerih je vodotok še v strugi in zato še veljajo pogoji za enoten prerez. Ekstrapolacija bo torej segala v področje vodostajev, ko se pojavi tok v strugi in v inundacijah.
- izračunano pretočno krivuljo za sestavljen prerez, kot jo za tok v strugi in inundacijah daje program HEC-RAS. Ta upošteva, da je skupni pretok vsota pretoka v strugi in pretokov po inundacijah. Ko se voda razlije na poplavno območje, gladina s pretokom narašča počasneje, povprečna hitrost v strugi pa ni enaka povprečnim hitrostim v inundacijah, saj se lahko pojavijo zelo različne hrapavosti pretočnih profilov.

Za analizo razlike je bil kot sestavljen profil izbran prečni profil 5, ki se nahaja dolvodno od vodomerne postaje. Izbran je bil zato, ker je v območju, kjer ima Sava tako levo kot tudi desno poplavno območje (Slika 61), v katerem se pričinja poplavljanje na različnih višinskih kotah. Seveda v tem (poljubno izbranem) prerezu ni merjenih vrednosti, zato je treba za potrebe ekstrapolacije vse vrednosti izračunati s programom HEC-RAS. Za simulacijo hidravličnih razmer na izbranem odseku so bili povzeti rezultati izračunov vejičastega toka. Iz spodnje slike (Slika 62) je razvidno, da reka Sava najprej prestopi desni breg, nato gladina narašča počasneje, dokler ne doseže točke, ko se voda razlije tudi po levem poplavnem območju. Hidravlični račun za vodostaje, ko se voda izlije iz struge, je praviloma treba opraviti z različnimi koeficienti hrapavosti, ki jih je treba pri projektnih izračunih še verificirati.

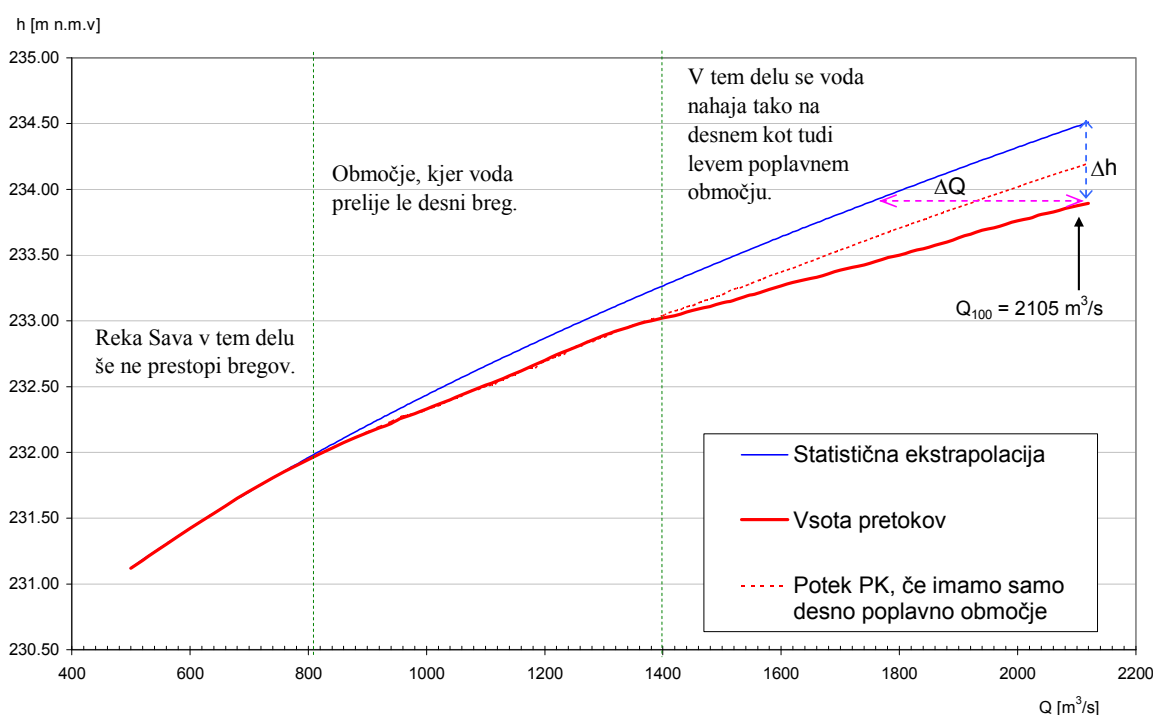


Slika 61: Shema odseka Save, s strugo in Slika 62: Sestavljen prečni profil – PP5
dvema vejama toka po inundacijah

Za primerjalno analizo so izbrani enaki koeficienti hrapavosti, vendar s predpostavljenimi deleži pretoka po vejah, kar za primerjalno analizo zadošča, sicer pa je treba imeti opravljene meritve, s katerimi bi lahko to razdelitev utemeljili. Ker teh meritev ni na voljo, je glede na različne hrapavosti in površine poplavnih območij predpostavljeno, da na obravnavani lokaciji po desni veji teče 5 % celotnega pretoka in po levi veji 3 % celotnega pretoka.

Rezultati simulacije na spodnji sliki (Slika 63) pokažejo v načelu, v kakšnem obsegu lahko pride v obravnavanem primeru do večjega odstopanja med pretočno krivuljo, določeno s pomočjo hidravličnega modela HEC-RAS in pristopom ekstrapoliranja pretočne krivulje s

statistično metodo. Pretočna krivulja s HEC-RAS upošteva vsoto pretokov po glavni strugi ter levem in desnem poplavnem območju. Vsako območje ima namreč svoj potek pretočne krivulje, zaradi večjih ovir (hrapavosti) v poplavnem območju pa sta krivulji za poplavni območji bolj položni. Pričakovati je bilo sicer izrazitejši prehod med posameznimi odseki pretočne krivulje, vendar je očitno delež pretoka, ki je bil privzet, da odteče na posamezno poplavno območje, sorazmerno majhen v primerjavi s celotnim pretokom (od 3% do 5%). Kljub temu se izrazitejša razlika pokaže v zgornjem delu pretočne krivulje, kjer je odstopanje relativno veliko.



Slika 63: Ekstrapolacija pretočne krivulje za primer sestavljenega prečnega prereza 5

Na zgornji sliki (Slika 63) je prikazana ekstrapolacija pretočne krivulje z uporabo metode najboljšega prileganja (statistična ekstrapolacija), nato pa še pretočna krivulja za skupni pretok (struga + poplavni območji). Prav tako je označen potek pretočne krivulje, če bi imeli prerez s samo enim poplavnim območjem. Če npr. primerjamo gladine pri pretoku $2120 \text{ m}^3/\text{s}$, ugotovimo, da je razlika pri vodostajih med obema krivuljama 62 cm, kar v tem primeru znaša 18 % - vodostaj je višji v primeru enotnega prečnega prereza. Možno pa je ugotavljati tudi razliko v pretokih pri isti gladini, če bi npr. bil na tem mestu na terenu izmerjen vodostaj. Medtem, ko je v primeru simulacije vejičastega toka s HEC-RAS gladina 233.89 m n.m.v

dosežena šele pri pretoku $2120 \text{ m}^3/\text{s}$, je ista gladina pri ekstrapolirani pretočni krivulji dosežena že pri pretoku $1750 \text{ m}^3/\text{s}$, kar predstavlja 21 % odstopanje. Če se ustrezno ne upoštevajo pretoki v poplavnih območjih, so pretoki podcenjeni.

Iz obravnavanega primera vidimo, da so sestavljeni prerezi precej občutljivi na izbiro metode ekstrapolacije in lahko z izbiro nepravilne metode ekstrapolacije naredimo velike napake. Zato je še posebej pomembno, da so merilna mesta izbrana na primernih lokacijah, na takšnih delih vodotoka, kjer imamo po možnosti enoten profil, s čimer že zmanjšamo del napak v ekstrapolaciji. Vsekakor pa je ekstrapolacija s hidravličnim modelom z dejanskim stanjem na terenu (geometrija, hrapavost, višinske razmejitve) podprta metoda, ki upošteva tudi hidravlične razmere na celotnem obravnavanem odseku (npr. zaježitve), kar večina ostalih metod ne upošteva.

5 ZAKLJUČKI

Z diplomsko nalogo smo želeli preveriti možnosti izdelave pretočnih krivulj s pomočjo hidravličnega matematičnega modela rečnega odseka. Za geometrijski del hidravličnega modela je bila izvedena nivelacija celotnega odseka z izbranimi 9 prečnimi prerezi. Prav tako je bilo izvedenih več kontrolnih meritev, ki so bile v pomoč pri umerjanju modela. Pri ekstrapolaciji smo bili osredotočeni na visoke pretoke in vodostaje, žal pa je bil v opazovanem obdobju zabeležen le en nastop povišanih pretokov, vse ostale meritve pa so bile izvedene pri nizkih pretokih. Tako smo se pri umerjanju modela osredotočili na meritev pri pretoku $870 \text{ m}^3/\text{s}$ in podatke o maksimalnih višinskih kotah visoke vode dne 19.9.2007 z ocenjenim pretokom $1400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Simulacija visokih pretokov je bila izvedena z 1-D modelom, kjer smo tako glavno strugo kot poplavna območja obravnavali kot enoten odsek, saj je kontrolna simulacija vejičastega toka pokazala, da poplavna območja dolvodno od vodomerne postaje nimajo pomembnega vpliva na sam potek pretočne krivulje. Rezultati simulacije z umerjenim hidravličnim modelom so predstavljeni v obliki pretočne krivulje za lokacijo vodomerne postaje.

S pretočnimi krivuljami predstavimo odnos med vodostajem in pretokom za izbran vodotok. Zgornji deli pretočnih krivulj se dobijo z ekstrapolacijo, saj ponavadi nimamo na voljo meritev visokih pretokov. To je posledica dejstva, da pri visokih vodah nastopijo ekstremni pogoji, ki so v preteklosti predstavljali nevarnost za izvajalce meritev. Danes je z novo merilno opremo ADMP izvedba meritve visokih pretokov varnejša in tudi bolj natančna, vendar še vedno velja, da je takih meritev relativno malo, ker so visokovodni dogodki redki, ADMP pa je v uporabi šele od leta 2003.

Bistvo natančnega modeliranja je dobro umerjen model, kar dosežemo s primerjanjem izračunanih gladin in izmerjenih na terenu. Pomembno je, da pri umerjanju upoštevamo red natančnosti s katero je bila meritev izvedena. Z umerjanjem smo se poskušali izmerjenim gladinam čim bolj približati, vendar smo bili omejeni s preudarno in realno oceno dejanskih koeficientov hrapavosti. Koeficiente namreč ne moremo spreminjati samo zaradi ujemanja

gladin, pač pa je potrebno paziti, da koeficientov ne spremenimo izven realno možnega obsega in da s tem ne spremenimo razmer v drugih delih odseka. Z analizo občutljivosti koeficienta hrapavosti smo zmanjšali vpliv vmesnih napak oziroma netočnosti na končne rezultate simulacije. S tem dobimo rezultate predstavljene v območju $\pm 5 \%$ umerjene hrapavosti in jih ne podamo kot eno samo krivuljo.

Rezultati modela kažejo večjo pretočnost kot obstoječa pretočna krivulja uporabljena na ARSO, kar ustreza predhodnim domnevam. Za vodostaje nad 550 cm znaša razlika v pretoku v povprečju 10 %.

Hidravlični model se je vsekakor potrdil kot uspešna metoda za ekstrapolacijo pretočnih krivulj, če le imamo dobro posneto geometrijo struge in terena ter podatke o hidravličnih razmerah iz ogleda razmer na terenu (tip zarasti, točke prelivanja itd). Za natančno potrditev rezultatov hidravličnega modela za odsek Save pri vodomerni postaji Litija I, bi bilo treba ob naslednji visoki vodi izvesti izredne meritve, po možnosti tudi na poplavnem območju, da se lahko bolje oceni, koliko vode dejansko odteče iz struge. Prav tako je smiselno s hidravličnimi modeli preveriti pretočne krivulje tudi za ostale vodomerne postaje, saj je hiter razvoj tehnologije omogočil, da imamo danes na voljo boljšo opremo tako za izvajanje meritev kot izdelavo hidravličnega modela, s čimer se lahko pretočne krivulje ekstrapolirajo bolj natančno kot v preteklosti.

VIRI

Arhiv Agencije Republike Slovenije za okolje.

Armanini, A., Righetti, M. 1998. Flow Resistance in Compound Vegetated Channel. V: 3rd Int. Conf. on Hydro-Science and Engineering: 20 str.

Bat, M. et al. 2003. Vodno bogastvo Slovenije. Ljubljana: 131 str.

Becker, A., Melcher, M., Kose, G. 1982. Up-dating of discharge rating curves by means of mathematical models. Advances in Hydrometry. IAHS Publ. No. 134: str. 37-48

Boiten, W. 2003. Hydrometry. Meppel, A.A. Balkema Publishers: 155 str.

Brilly, M. 1994. Zaščita pred poplavami. Priročnik. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana: 67 str.

Cankar, B. 2005. Meritve pretokov na odprtih vodotokih z akustičnim Dopplerjevim merilnikom. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 80 str.

Chanson, H. 1999. The Hydraulics of Open Channel Flow. Hodder Headline. London

Cleveland, T.G. 2007. Hydrology Rating Curves. Lecture 006: 12 str.

Dose T., Morgenschweis G., Schlurmann T. 2002. Extrapolating stage-discharge relationship by numerical modelling. V: 5th Int. Conf. on Hydro-Science and Engineering: 8 str.

Frantar, P. 2005. Pretočni režimi slovenskih rek in njihova spremenljivost. UJMA, št. 19 (2005). Str. 145-153.

French, R.H. 1986. Open-channel hydraulics. New York. McGraw-Hill book company: 705 str.

Fukui, Y. 2000. About the Flow in Skewed Compound Open Channel with Trees on a Flood Plain. V: 4th Int. Conf. on Hydro-Science and Engineering: 10 str.

Gabrovec, M. Poplave Save 1990 med Dolskim in Zidanim Mostom. UJMA, št. 5 (l. 1991): str. 80.

Hojnik, T. 1997. Primerjava matematičnih modelov HEC-2 in MIKE11 na primeru preračuna hidrosistema reke Pesnice. Diplomaska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Hojnik, T. 2000. Matematično modeliranje v vodarstvu in opis značilnosti nekaterih računalniških programov za tok s prosto gladino. Seminarska naloga. Ljubljana. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 24 str.

Hudson, R. H. et al. 1999. Quality assurance in hydrological measurement. Hydrological Sciences Journal 44. Št. 5: str. 825-834

Inženiring za vode. 2005. Hidravlično - hidrološka analiza reke Save na odseku med Graško Dobravo pri Litiji in Spodnjim Hotičem.

Jobson, H.E., Froelich, D.E. 1988. Basic Hydraulic Principles of Open Channel Flow. U.S. Geological Survey Open-File Report 88-707: 150 str.

Leonard, J., Mietton, M., Najib, H., Gourbesville, P. 2000. Rating curve modelling with Manning's equation to manage instability and improve extrapolation. Hydrological Sciences Journal 45. Št. 5: str. 739-750

Logotronic. 1999. Gealog micro User's manual: 20 str.

Mikoš, M., Mastnak, M. 1998. Navodila za program HEC-RAS verzija 2.1, Ljubljana, FGG: 97 str.

Mikoš, M. et al.: Hidrološko izrazje – Terminology in Hidrology. Acta hydrotecnica 20/32 (2002) Ljubljana.

Pasley, R., Snider, D. 1972. National engineering handbook. Chapter 14: Stage-discharge relationship.

Rak, G. 2005. Analiza hidravličnih lastnosti vodotokov z uporabo GIS orodja. Seminar. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 70 str.

Rak, G. 2006. Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 87 str.

Rantz, S.E. et al. 1982. Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge; Volume 2. Computation of Discharge. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 2175: 331 str.

Rowinski, P.M., Czernuszenko, W., Koziol, A., Kusmierczuk, K., Kubrak, J. 1998. Longitudinal Turbulence Characteristics in a Compound Channel under Various Roughness Conditions. 3rd Int. Conf. on Hydro-Science and Engineering: 9 str.

Shestakova, R.A. 1969. Extrapolation of discharge rating curves using Chezy's formula. IAHS Publ. 84: str. 245-252

Steinman, F., Banovec, P. 1996. Hidrotehnika. Vodne zgradbe I. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana: 107 str

Steinman, F. 1999. Hidravlika. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana: 295 str.

Trček, R., Cankar, B. 2006. Meritve visokovodnih pretokov slovenskih rek z ultrazvočnimi merilniki. UJMA št. 20, 2006: str. 182-187.

US Army Corps of Engineers. 2002. HEC-RAS, River Analysis System User's Manual, Version 3.1.3. Hydrologic Engineering Center. Davis. CA.

Zveza vodnih skupnosti Slovenije. 1978. Vodnogospodarske osnove Slovenije. Ljubljana.

World Meteorological Organization. 1994. Guide to Hydrological Practices - Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Other Applications. WMO-No. 168: 770 str.

Spletne strani:

Agencija Republike Slovenije za okolje

<http://www.arso.gov.si> (oktober 2007)

US Army Corps of Engineers. HEC-RAS documentation

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-document.html> (september 2007)

Accuracy of HEC-RAS To Calculate Flow Depths and Total Energy Loss With and Without Bendway Weirs in a Meander Bend

<http://www.usbr.gov/uc/albuq/envdocs/techreports/flowDepthReport/> (5.9.2007)

Priloge

Priloga A: Tabelarični prikaz rezultatov hidravličnega modela za 3 izbrane pretoke

Priloga B: Tabelarični izpis podatkovnega zapisovalnika

Priloga C: Izpis poročila meritve Sava – Litija iz programa WinRiver

Tabelarični prikaz rezultatov hidravličnega modela za 3 izbrane pretoke Priloga A

Odsek	Prečni profil	Oznaka pretoka	Vrednost pretoka	Kota dna	Kota gladine	Energ. višina	Hitrost	Površina	Širina	Froudevo število	Manningov koef. hrap.
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude #	Mann Wtd Chnl
Litija	9	PF 24	870	229.14	234.31	234.66	2.21	389.13	100.72	0.36	0.033
Litija	8.7	PF 24	870	229.80	234.11	234.43	2.27	379.21	107.01	0.38	0.033
Litija	8.3	PF 24	870	229.43	233.79	234.06	2.27	378.09	116.09	0.40	0.031
Litija	8.15		Bridge								
Litija	8	PF 24	870	229.43	233.75	234.02	2.30	373.39	116.08	0.41	0.029
Litija	7.5	PF 24	870	229.35	233.48	233.74	2.29	397.13	122.86	0.38	0.030
Litija	7	PF 24	870	229.66	233.47	233.70	2.12	405.08	129.86	0.38	0.028
Litija	6	PF 24	870	227.26	233.00	233.26	2.25	382.65	110.18	0.38	0.045
Litija	5	PF 24	870	228.12	232.07	232.25	1.84	478.68	260.63	0.35	0.039
Litija	4	PF 24	870	227.38	231.61	231.82	2.05	459.00	263.70	0.36	0.035
Litija	3	PF 24	870	226.66	230.72	231.02	2.47	382.37	190.60	0.46	0.045
Litija	2	PF 24	870	224.29	230.16	230.31	1.69	508.41	126.59	0.27	0.040
Litija	1	PF 24	870	223.68	228.60	228.72	1.56	557.48	158.91	0.25	0.044

Odsek	Prečni profil	Oznaka pretoka	Vrednost pretoka	Kota dna	Kota gladine	Energ. višina	Hitrost	Površina	Širina	Froudevo število	Manningov koef. hrap.
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude #	Mann Wtd Chnl
Litija	9	PF 51	1400	229.14	235.52	235.91	2.77	506.02	108.72	0.41	0.038
Litija	8.7	PF 51	1400	229.80	235.25	235.65	2.83	495.43	109.05	0.42	0.037
Litija	8.3	PF 51	1400	229.43	234.84	235.24	2.80	499.47	116.33	0.43	0.034
Litija	8.15		Bridge								
Litija	8	PF 51	1400	229.43	234.79	235.2	2.84	493.45	116.32	0.44	0.031
Litija	7.5	PF 51	1400	229.35	234.49	234.88	2.85	522.93	127.59	0.42	0.030
Litija	7	PF 51	1400	229.66	234.49	234.84	2.59	540.01	134.45	0.41	0.028
Litija	6	PF 51	1400	227.26	233.92	234.32	2.82	496.50	128.27	0.46	0.045
Litija	5	PF 51	1400	228.12	233.02	233.19	1.93	846.54	458.66	0.32	0.039
Litija	4	PF 51	1400	227.38	232.66	232.86	2.13	836.73	447.82	0.33	0.035
Litija	3	PF 51	1400	226.66	231.92	232.22	2.53	694.49	297.71	0.41	0.045
Litija	2	PF 51	1400	224.29	231.49	231.68	1.98	770.18	364.97	0.28	0.040
Litija	1	PF 51	1400	223.68	229.91	230.08	1.85	771.89	169.30	0.26	0.044

Odsek	Prečni profil	Oznaka pretoka	Vrednost pretoka	Kota dna	Kota gladine	Energ. višina	Hitrost	Površina	Širina	Froudevo število	Manningov koef. hrap.
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude #	Mann Wtd Chnl
Litija	9	PF 86	2100	229.14	236.53	237.12	3.41	616.48	113.84	0.46	0.038
Litija	8.7	PF 86	2100	229.80	236.18	236.81	3.53	597.29	110.51	0.48	0.037
Litija	8.3	PF 86	2100	229.43	235.66	236.29	3.53	596.14	122.91	0.50	0.034
Litija	8.15		Bridge								
Litija	8	PF 86	2100	229.43	235.57	236.23	3.59	586.03	121.79	0.51	0.031
Litija	7.5	PF 86	2100	229.35	235.14	235.79	3.70	606.67	130.11	0.51	0.030
Litija	7	PF 86	2100	229.66	235.16	235.73	3.33	630.88	137.24	0.50	0.028
Litija	6	PF 86	2100	227.26	234.58	234.99	3.03	850.35	446.64	0.46	0.045
Litija	5	PF 86	2100	228.12	233.99	233.96	2.00	1246.74	537.36	0.30	0.039
Litija	4	PF 86	2100	227.38	233.47	233.68	2.29	1204.24	460.74	0.32	0.035
Litija	3	PF 86	2100	226.66	232.90	233.17	2.53	1142.78	532.28	0.37	0.045
Litija	2	PF 86	2100	224.29	232.64	232.80	1.93	1279.62	475.31	0.25	0.040
Litija	1	PF 86	2100	223.68	231.13	231.35	2.13	1092.35	303.79	0.27	0.044

Tabelarični izpis podatkovnega zapisovalnika

Priloga B

		Vodostaj	Vodostaj	Temp.			Vodostaj	Vodostaj	Temp.			Vodostaj	Vodostaj	Temp.
25.3.2007	9:30:00	780	78.0	7.6	26.3.2007	4:00:00	885	88.5	7.9	26.3.2007	22:30:00	997	99.7	8.8
25.3.2007	9:45:00	784	78.4	7.6	26.3.2007	4:15:00	877	87.7	7.8	26.3.2007	22:45:00	1003	100.3	8.8
25.3.2007	10:00:00	782	78.2	7.6	26.3.2007	4:30:00	872	87.2	7.8	26.3.2007	23:00:00	997	99.7	8.7
25.3.2007	10:15:00	783	78.3	7.7	26.3.2007	4:45:00	863	86.3	7.8	26.3.2007	23:15:00	1003	100.3	8.7
25.3.2007	10:30:00	777	77.7	7.7	26.3.2007	5:00:00	857	85.7	7.8	26.3.2007	23:30:00	1003	100.3	8.7
25.3.2007	10:45:00	781	78.1	7.8	26.3.2007	5:15:00	851	85.1	7.8	26.3.2007	23:45:00	998	99.8	8.7
25.3.2007	11:00:00	785	78.5	7.8	26.3.2007	5:30:00	842	84.2	7.8	27.3.2007	0:00:00	1000	100.0	8.6
25.3.2007	11:15:00	787	78.7	7.8	26.3.2007	5:45:00	836	83.6	7.8	27.3.2007	0:15:00	996	99.6	8.6
25.3.2007	11:30:00	789	78.9	7.9	26.3.2007	6:00:00	833	83.3	7.8	27.3.2007	0:30:00	993	99.3	8.6
25.3.2007	11:45:00	804	80.4	7.9	26.3.2007	6:15:00	837	83.7	7.7	27.3.2007	0:45:00	989	98.9	8.6
25.3.2007	12:00:00	825	82.5	8.0	26.3.2007	6:30:00	833	83.3	7.7	27.3.2007	1:00:00	991	99.1	8.6
25.3.2007	12:15:00	834	83.4	8.0	26.3.2007	6:45:00	836	83.6	7.7	27.3.2007	1:15:00	982	98.2	8.5
25.3.2007	12:30:00	859	85.9	8.1	26.3.2007	7:00:00	830	83.0	7.7	27.3.2007	1:30:00	982	98.2	8.5
25.3.2007	12:45:00	868	86.8	8.1	26.3.2007	7:15:00	834	83.4	7.7	27.3.2007	1:45:00	984	98.4	8.5
25.3.2007	13:00:00	873	87.3	8.1	26.3.2007	7:30:00	838	83.8	7.7	27.3.2007	2:00:00	979	97.9	8.5
25.3.2007	13:15:00	882	88.2	8.1	26.3.2007	7:45:00	835	83.5	7.7	27.3.2007	2:15:00	978	97.8	8.5
25.3.2007	13:30:00	893	89.3	8.1	26.3.2007	8:00:00	842	84.2	7.8	27.3.2007	2:30:00	989	98.9	8.4
25.3.2007	13:45:00	893	89.3	8.1	26.3.2007	8:15:00	841	84.1	7.8	27.3.2007	2:45:00	982	98.2	8.4
25.3.2007	14:00:00	893	89.3	8.2	26.3.2007	8:30:00	843	84.3	7.8	27.3.2007	3:00:00	970	97.0	8.4
25.3.2007	14:15:00	895	89.5	8.2	26.3.2007	8:45:00	844	84.4	7.9	27.3.2007	3:15:00	969	96.9	8.4
25.3.2007	14:30:00	893	89.3	8.2	26.3.2007	9:00:00	851	85.1	7.9	27.3.2007	3:30:00	960	96.0	8.4
25.3.2007	14:45:00	899	89.9	8.2	26.3.2007	9:15:00	852	85.2	7.9	27.3.2007	3:45:00	944	94.4	8.3
25.3.2007	15:00:00	904	90.4	8.2	26.3.2007	9:30:00	857	85.7	8	27.3.2007	4:00:00	937	93.7	8.3
25.3.2007	15:15:00	892	89.2	8.2	26.3.2007	9:45:00	856	85.6	8.1	27.3.2007	4:15:00	928	92.8	8.3
25.3.2007	15:30:00	896	89.6	8.2	26.3.2007	10:00:00	859	85.9	8.1	27.3.2007	4:30:00	916	91.6	8.3
25.3.2007	15:45:00	901	90.1	8.2	26.3.2007	10:15:00	868	86.8	8.2	27.3.2007	4:45:00	904	90.4	8.3
25.3.2007	16:00:00	904	90.4	8.2	26.3.2007	10:30:00	874	87.4	8.2	27.3.2007	5:00:00	896	89.6	8.3
25.3.2007	16:15:00	894	89.4	8.2	26.3.2007	10:45:00	895	89.5	8.3	27.3.2007	5:15:00	888	88.8	8.3
25.3.2007	16:30:00	893	89.3	8.2	26.3.2007	11:00:00	907	90.7	8.3	27.3.2007	5:30:00	885	88.5	8.2
25.3.2007	16:45:00	892	89.2	8.2	26.3.2007	11:15:00	934	93.4	8.4	27.3.2007	5:45:00	879	87.9	8.2
25.3.2007	17:00:00	897	89.7	8.2	26.3.2007	11:30:00	951	95.1	8.5	27.3.2007	6:00:00	875	87.5	8.2
25.3.2007	17:15:00	890	89.0	8.2	26.3.2007	11:45:00	975	97.5	8.5	27.3.2007	6:15:00	878	87.8	8.2
25.3.2007	17:30:00	893	89.3	8.2	26.3.2007	12:00:00	984	98.4	8.6	27.3.2007	6:30:00	878	87.8	8.2
25.3.2007	17:45:00	899	89.9	8.2	26.3.2007	12:15:00	992	99.2	8.7	27.3.2007	6:45:00	867	86.7	8.2
25.3.2007	18:00:00	899	89.9	8.2	26.3.2007	12:30:00	997	99.7	8.7	27.3.2007	7:00:00	870	87.0	8.2
25.3.2007	18:15:00	896	89.6	8.2	26.3.2007	12:45:00	996	99.6	8.7	27.3.2007	7:15:00	866	86.6	8.2
25.3.2007	18:30:00	892	89.2	8.2	26.3.2007	13:00:00	994	99.4	8.8	27.3.2007	7:30:00	869	86.9	8.2
25.3.2007	18:45:00	890	89.0	8.2	26.3.2007	13:15:00	999	99.9	8.8	27.3.2007	7:45:00	863	86.3	8.2
25.3.2007	19:00:00	889	88.9	8.2	26.3.2007	13:30:00	1003	100.3	8.8	27.3.2007	8:00:00	864	86.4	8.3
25.3.2007	19:15:00	883	88.3	8.2	26.3.2007	13:45:00	1001	100.1	8.9	27.3.2007	8:15:00	859	85.9	8.3
25.3.2007	19:30:00	878	87.8	8.2	26.3.2007	14:00:00	1008	100.8	8.9	27.3.2007	8:30:00	865	86.5	8.3
25.3.2007	19:45:00	874	87.4	8.2	26.3.2007	14:15:00	1004	100.4	8.9	27.3.2007	8:45:00	860	86.0	8.3
25.3.2007	20:00:00	862	86.2	8.2	26.3.2007	14:30:00	1009	100.9	8.8	27.3.2007	9:00:00	862	86.2	8.3
25.3.2007	20:15:00	854	85.4	8.2	26.3.2007	14:45:00	1013	101.3	8.8	27.3.2007	9:15:00	863	86.3	8.4
25.3.2007	20:30:00	837	83.7	8.2	26.3.2007	15:00:00	1018	101.8	8.9	27.3.2007	9:30:00	861	86.1	8.4
25.3.2007	20:45:00	846	84.6	8.1	26.3.2007	15:15:00	1018	101.8	8.9	27.3.2007	9:45:00	857	85.7	8.4
25.3.2007	21:00:00	837	83.7	8.1	26.3.2007	15:30:00	1012	101.2	8.9	27.3.2007	10:00:00	854	85.4	8.5
25.3.2007	21:15:00	834	83.4	8.1	26.3.2007	15:45:00	1015	101.5	9	27.3.2007	10:15:00	858	85.8	8.5
25.3.2007	21:30:00	831	83.1	8.1	26.3.2007	16:00:00	1011	101.1	9	27.3.2007	10:30:00	870	87.0	8.5
25.3.2007	21:45:00	835	83.5	8.1	26.3.2007	16:15:00	1009	100.9	9	27.3.2007	10:45:00	873	87.3	8.6
25.3.2007	22:00:00	837	83.7	8.1	26.3.2007	16:30:00	1006	100.6	9	27.3.2007	11:00:00	882	88.2	8.6
25.3.2007	22:15:00	833	83.3	8.1	26.3.2007	16:45:00	1007	100.7	9	27.3.2007	11:15:00	891	89.1	8.7
25.3.2007	22:30:00	835	83.5	8	26.3.2007	17:00:00	1007	100.7	9	27.3.2007	11:30:00	910	91.0	8.8
25.3.2007	22:45:00	827	82.7	8	26.3.2007	17:15:00	1001	100.1	9.1	27.3.2007	11:45:00	920	92.0	8.8
25.3.2007	23:00:00	832	83.2	8	26.3.2007	17:30:00	998	99.8	9.1	27.3.2007	12:00:00	928	92.8	8.8
25.3.2007	23:15:00	843	84.3	8	26.3.2007	17:45:00	1000	100.0	9	27.3.2007	12:15:00	940	94.0	8.8
25.3.2007	23:30:00	846	84.6	8	26.3.2007	18:00:00	990	99.0	9	27.3.2007	12:30:00	952	95.2	8.8
25.3.2007	23:45:00	870	87.0	8	26.3.2007	18:15:00	998	99.8	9	27.3.2007	12:45:00	955	95.5	8.9
26.3.2007	0:00:00	876	87.6	8	26.3.2007	18:30:00	989	98.9	9	27.3.2007	13:00:00	963	96.3	8.9
26.3.2007	0:15:00	895	89.5	8	26.3.2007	18:45:00	996	99.6	9	27.3.2007	13:15:00	960	96.0	8.9
26.3.2007	0:30:00	899	89.9	8	26.3.2007	19:00:00	993	99.3	9	27.3.2007	13:30:00	964	96.4	8.9
26.3.2007	0:45:00	908	90.8	8	26.3.2007	19:15:00	992	99.2	9	27.3.2007	13:45:00	959	95.9	8.9
26.3.2007	1:00:00	913	91.3	8	26.3.2007	19:30:00	992	99.2	9	27.3.2007	14:00:00	965	96.5	8.9
26.3.2007	1:15:00	910	91.0	8	26.3.2007	19:45:00	986	98.6	9	27.3.2007	14:15:00	966	96.6	8.9
26.3.2007	1:30:00	914	91.4	8	26.3.2007	20:00:00	989	98.9	8.9	27.3.2007	14:30:00	966	96.6	9
26.3.2007	1:45:00	907	90.7	8	26.3.2007	20:15:00	992	99.2	8.9	27.3.2007	14:45:00	964	96.4	9
26.3.2007	2:00:00	910	91.0	8	26.3.2007	20:30:00	990	99.0	8.9	27.3.2007	15:00:00	965	96.5	9
26.3.2007	2:15:00	916	91.6	8	26.3.2007	20:45:00	977	97.7	8.9	27.3.2007	15:15:00	958	95.8	9
26.3.2007	2:30:00	916	91.6	8	26.3.2007	21:00:00	986	98.6	8.9	27.3.2007	15:30:00	961	96.1	9
26.3.2007	2:45:00	906	90.6	8	26.3.2007	21:15:00	989	98.9	8.9	27.3.2007	15:45:00	969	96.9	9
26.3.2007	3:00:00	904	90.4	7.9	26.3.2007	21:30:00	985	98.5	8.9	27.3.2007	16:00:00	957	95.7	9
26.3.2007	3:15:00	902	90.2	7.9	26.3.2007	21:45:00	978	97.8	8.8	27.3.2007	16:15:00	969	96.9	9
26.3.2007	3:30:00	901	90.1	7.9	26.3.2007	22:00:00	987	98.7	8.8	27.3.2007	16:30:00	969	96.9	9
26.3.2007	3:45:00	894	89.4	7.9	26.3.2007	22:15:00	992	99.2	8.8	27.3.2007	16:45:00	961	96.1	8.9

Izpis poročila meritve Sava – Litija iz programa WinRiver

Priloga C

Station No.: 3680		Meas. No:																	
Station Name:		Date: 2007-05-17																	
Party:	Width: 90.1 m	Processed by: MB																	
Boat/Motor: z mostu	Area: 78.8 m ²	Mean Velocity: 0.747 m/s																	
Gage Height: 52.000 m	G.H.Change: 0.000	Discharge: 58.9 m ³ /s																	
Area Method: Mean Flow	ADCP Depth: 0.07 m	Index Vel.: 0.00 m/s Rating No.:1																	
Nav. Method: Bottom Track	Shore Ens.: 10	Adj. Mean Vel: 0.00 m/s Qm Rating:U																	
MagVar Method: None (0.0°)	Top Est: Power (0.1667)	Rated Area: 0.000 m ² % Diff: 0.0%																	
Depth Sounder: Not Used	Bottom Est: Power (0.1667)	Control: Unspecified																	
Screening Thresholds:		ADCP:																	
BT 3-Beam Solution: ON	Max. Vel.: 2.22 m/s	Type/Freq.: Rio Grande / 1200 kHz																	
WT 3-Beam Solution: OFF	Max. Depth: 1.82 m	Serial #: 2952	Firmware: 10.14																
BT Error Vel.: 0.10 m/s	Mean Depth: 0.875 m	Bin Size: 10 cm	Blank: 5 cm																
WT Error Vel.: 1.07 m/s	% Meas.: 52.55%	BT Mode: 7	BT Pings: 1																
BT Up Vel.: 0.30 m/s	Water Temp.: None	WT Mode: 12	WT Pings: 1																
WT Up Vel.: 2.00 m/s	ADCP Temp.: 13.0 °C	WV:340	WO:12,4																
Diag. Test:	Filename Prefix: LITIJA_17052007_MB_																		
Moving Bed Test:	Software: 1.05.00																		
Compass Test:																			
Meas. Location: 5m dolvodno od v.p.																			
Tr.#	Edge D.		#Ens	Discharge							Width	Area	Time		Mean Vel.		% Bad		
	L	R		Top	Middle	Bottom	Left	Right	Total	Start			End	Boat	Water	Ens	Bins		
000	L	1.00	1.00	232	17.0	30.7	10.1	0.173	0.157	58.2	90.5	79.2	06:05	06:09	0.45	0.73	22	4	U
002	R	1.00	1.00	219	17.9	31.2	10.2	0.137	0.119	59.8	89.7	78.4	06:09	06:13	0.46	0.76	23	4	U
Mean	1.00	1.00	226	17.5	30.9	10.2	0.155	0.138	58.9	90.1	78.8	Total	00:08		0.45	0.75	22	4	
SDev	0.00	0.00	9	0.635	0.308	0.068	0.025	0.027	0.959	0.6	0.6				0.01	0.02			
R/M%	0.00	0.00	5.8	5.1	1.4	0.9	23.2	27.5	2.3	0.9	1.1				2.68	3.35			
Remarks:																			

