

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Vodarstvo in
komunalno inženirstvo

Kandidat:

Gašper Rak

Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov

Diplomska naloga št.: 64

Mentor:

prof. dr. Franc Steinman

Somentor:

viš. pred. dr. Leon Gosar

Ljubljana, 25. 9. 2006

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVA O AVTORSTU

Podpisani **GAŠPER RAK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
**»UPORABA PROSTORSKIH PODATKOV V ANALIZI HIDRAVLIČNIH
LASTNOSTI VODOTOKOV«.**

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ljubljana, 12.9.2006

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji Študija vodarstva in komunalnega inženirstva:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	519.61/.64:556.536:627.51(043.2)
Avtor:	Gašper Rak
Mentor:	prof. dr. Franci Steinman
Somentor	mag. Leon Gosar
Naslov:	Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov
Obseg in oprema:	81 str., 1 preg., 31 str., 11 pril.
Ključne besede:	Hidravlika, odprti vodotoki, prostorski podatki, hidravlično modeliranje, GIS, HEC-GeoRAS

Izvleček

Poplave sodijo med največje ujme, katerih magnituda in pogostost narašča. V hidravličnem inženirstvu se za reševanje problemov uporabljajo matematični in fizični modeli. Pri obravnavanju površinsko obsežnejših problemov, kamor sodijo tudi analize poplavljanja vodotokov, so fizični modeli redki in prevladujejo matematični modeli. Običajni hidrodinamični modeli so učinkoviti le pri topografsko preprostih območjih. Za natančne hidravlične simulacije poplavljanja po so potrebni visoko resolucijski modeli. Pri upodobitvi topografije terena, ki jo omogoča uporaba geografskih informacijskih sistemov (GIS), se postavljajo vse večje zahteve. V diplomski nalogi je prikazana možnost uporabe prostorskih podatkov, zajetih z različnimi tehnologijami (od klasičnih geodetskih meritev do sodobne tehnologije LIDAR), v hidravličnih analizah, da bi izkoristili prednosti GIS tudi na tem področju. V kombinaciji s hidravličnim orodjem HEC-RAS je bilo uporabljeno programsko orodje ESRI ArcGIS z razširitvijo HEC-GeoRAS. Ta omogoča pripravo prostorskih podatkov o geometriji rečnega korita in poplavnih površin na podlagi izdelanega digitalnega modela terena, prikaz rezultatov hidravličnih izračunov v obliki kartiranja poplavnih območij, nudi pa tudi možnosti nadaljnjih prostorskih analiz za potrebe hidravličnega inženirstva.

BIBLIOGRAPHIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION

UDK:	519.61/.64:556.536:627.51(043.2)
Author:	Gašper Rak
Supervisor:	Prof. Dr. Franci Steinman
Co-supervisor	Leon Gosar, M. Sc., Civ. Engi.
Title:	Using spatial data in open channel hydraulic analysis
Notes:	81 p., 1 tab., 31 fig., 11 add.
Key word:	hydraulic, open channel, spatial data, hydraulic modeling, GIS, HEC-GeoRAS

Abstract

Floods are severe natural disasters and their magnitude and frequency increase presently. To simulate and solve problems of hydraulic engineering physical and mathematical models are being used. When dealing with problems that concern large areas, such as flood simulations, physical models are rarely used and mathematical models prevail. Common hydrodynamic models are successful only when applied to topographically simple areas with low heterogeneity. However, for more precise flood simulations high resolution models are needed. The increasing demands to enlarge the accuracy of the topography representation can be fulfilled geographic information system. This research work presents the possibility of using spatial data that was acquired with different land surveying techniques (from classical geodetic methods to up-to-date LIDAR technology) in order to take advantage of GIS in the field of hydraulic analysis. Hydraulic modelling software HEC-RAS and ESRI's ArcGIS software together with GIS extension HEC-GeoRAS were used. HEC-GeoRAS enables the creation of bathymetry of river channel and flood surfaces based on the existing digital terrain model. It also provides the representation of the results of hydraulic simulations (such as floodplain mapping) and offers some options for further spatial analysis that are needed in the field of hydraulic engineering.

ZAHVALA

Za strokovno pomoč pri izdelavi diplomske naloge se najlepše zahvaljujem mentorju prof. dr. Franciju Steinmanu in somentorju mag. Leonu Gosarju.

Hvala tudi vsem ostalim, ki so mi pomagali pri izdelavi naloge. Še posebej bi se rad zahvalil staršem za podporo in vzpodbudo v vseh letih študija.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA	3
2.1 Hidravlika odprtih vodotokov	3
2.1.1 Zakon o ohranitvi mase.....	5
2.1.2 Zakon o ohranitvi gibalne količine	7
2.1.3 Zakon o ohranitvi energije.....	8
2.1.4 Enodimenzionalen hidravlični model.....	10
2.1.5 Določanje Manning-ovega koeficienta (n_G) hrapavosti	12
2.2 Nevarnost poplavljanja	14
2.2.1 Vzroki poplav	16
2.3 Hidravlično modeliranje	19
2.3.1 Zbiranje podatkov	20
2.3.2 Izbira primernega modela	21
2.3.5 Viri napak v hidravličnem modeliranju.....	23
2.4 Prostorski podatki	24
2.4.1 Vrste prostorskih podatkov	25
2.4.1.1 Rasterski objekti.....	25
2.4.1.2 Vektorski objekti	26
2.4.2 Tehnike pridobivanja prostorskih podatkov za izdelavo DMT	29
2.4.3 Tehnike snemanja batimetrije.....	31
2.4.4 LIDAR tehnologija	31
2.4.4.1 Delovanje sistema LIDAR.....	32
2.4.4.2 Natančnost sistema LIDAR	34
2.4.5 Pomembnost natančnosti DMT za hidravlične analize.....	35
2.5 Opis programskega orodja	35
2.5.1 ESRI ArcGIS	36
2.5.1.1 Razširitev <i>3D Analyst</i>	36
2.5.1.2 Razširitev <i>Spatial Analyst</i>	37
2.5.1.3 HEC-GeoRAS	37

2.5.1.4 Dodatne razširitve uporabljene pri delu s programom ArcGIS.....	38
2.5.2 HEC-RAS.....	39
2.5.2.1 Račun 1D stalnega toka	40
2.5.2.2 Simulacije nestalnega toka	47
3 PRIPRAVA PODATKOV IN IZDELAVA MODELA TERENA KOT PODLAGE ZA IZDELAVO REČNE GEOMETRIJE	48
3.1 Topografski podatki.....	49
3.1.1 Baza topografskih podatkov	49
3.1.2 Izdelava digitalnega modela terena	50
3.1.3 Uporaba podatkov LIDAR.....	55
3.2 Pretoki in robni pogoji.....	56
3.2.1 Rečni režim	57
3.2.2 Specifični odtoki in odtočnost	57
3.2.4 Gostota rečne mreže.....	58
3.2.5 Pretoki	58
4 HIDRAVLIČNA ANALIZA Z INTEGRACIJO HIDRAVLIČNEGA MODELA IN DIGITALNEGA MODELA TERENA NA ODSEKU REKE SOČE	60
4.1 Modeliranje terena in priprava geometrijskih podatkov.....	61
4.1.1 Določitev rečnega sistema.....	63
4.1.2 Prečni profili.....	63
4.1.3 Rečni bregovi	64
4.1.4 Območja glavnega poplavnega toka.....	64
4.1.5 Raba površin.....	65
4.2.6 Določanje Manning-ovega koeficienta (n_g) hrapavosti	66
4.1.7 Nasipi ob rečnem koritu	67
4.1.8 Področja neefektivnega toka	68
4.1.9 Mostovi in drugi objekti	69
4.1.10 Dopolnitev podatkov	69
4.2 Hidravlična analiza s HEC-RAS-om.....	70
4.2.1 Dopolnitev geometrije.....	71
4.2.2 Pretoki voda in hidravlični robni pogoji.....	72
4.3 Prikaz rezultatov s programskim orodjem HEC-GeoRAS in ugotovitve.....	72

5 ZAKLJUČEK	78
6 VIRI IN LITERATURA	81

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz reliefa z izohipsami.....	24
Slika 2: Uporaba metode senčenja za upodobitev razgibanosti terena.....	24
Slika 3: Prikaz območja s posameznimi sloji, ki nosijo opis določene lastnosti.....	25
Slika 4: Struktura mreže neenakih trikotnikov.. ..	27
Slika 5: Model terena izdelan na podlagi izohips in detajla istega območja izdelan s podatki merjenimi s tehnologijo LIDAR.	28
Slika 6: Sistem LIDAR.	33
Slika 7: Prikaz kartiranja poplavnih površin reke Soče.	38
Slika 8: Orodna okna programa HEC-RAS.....	41
Slika 9: Grafični prikaz parametrov energijske enačbe.....	42
Slika 10: Prikaz osnovnih elementov, ki nastopajo v enačbi gibalne tekočine.....	45
Slika 11: Potek razširitve oziroma zožitve vodnega toka.	46
Slika 12: Delitev modelov glede na število dimenzij, ki jih prikazujejo.....	52
Slika 13: Prikaz DMT in strukturne mreže DMT z velikostjo celice 2.5m.....	53
Slika 14: Prikaz DMT in strukturne mreže DMT z velikostjo celice 5m.....	53
Slika 15: Prikaz DMT in strukturne mreže DMT z velikostjo celice 15m.....	54
Slika 16: Prikaz interpolacije prečnih profilov.	55
Slika 17: Prikaz točk posnetih s sistemom LIDAR in iz njih izdelan TIN.....	56
Slika 18: Porečje reke Soče na ozemlju Slovenije.	60
Slika 19: Ključne karakteristične točke prečnega prereza.	64
Slika 20: Razdelitev obravnavanega območja na podobmočja za katera definiramo rabo ali pokrovnost.	65
Slika 21: Spreminjanje koeficientov hrapavosti vzdolž prečnega prereza.....	56
Slika 22: Efektivna površina prečnega profila, kot jo upršteva program E HEC-RAS	67
Slika 23: Prikaz področij neefektivnega toka.	68
Slika 24: Trasa mostu in objekti izrisani na podlagi ortofoto posnetka.	69
Slika 25: Način določanja stacionaž in kot točk prečnih prerezov na podlagi DMT.	70
Slika 26: Prikaz geometrije rečnega korita dobljenega s pomočjo GIS.....	71
Slika 27: Prikaz obsega poplavljanja reke Soče pri pretoku 1000m³/s.....	73
Slika 28: Prikaz TIN izdelane na podlagi izohips.	74

Slika 29: Mreža DMT izdelana na osnovi izohips in točk prečnih profilov	75
Slika 30: Prikaz poplavljanja reke Soče pri pretoku 2500m³/s.	76
Slika 31: Prikaz razlike v velikosti poplavljenega območja pri istem pretoku vendar na modelih z različno resolucijo	77

KAZALO TABEL

Tabela 1: Vrednosti koeficienta razširitve oziroma zožitve	46
---	-----------

PRILOGE

PRILOGA A: Pregledna karta 1:5000 z vrisanim območjem za katerega so bili na voljo podatki zajeti s tehnologijo

PRILOGA B: Prikaz topografije z izohipsami z intervalom 1m izdelane na podlagi točk zajetih s tehnologijo LIDAR

PRILOGA C: Prikaz topografije z izohipsami z intervalom 2m izdelane na podlagi točk zajetih s tehnologijo LIDAR

PRILOGA D: Poplavljanje reke Soče pri pretoku 1000 m³/s.

PRILOGA E: Poplavljanje reke Soče pri pretoku 1500 m³/s.

PRILOGA F: Poplavljanje reke Soče pri pretoku 2000 m³/s.

PRILOGA G: Poplavljanje reke Soče pri pretoku 2500 m³/s.

PRILOGA H: Vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti za naravne vodotoke

PRILOGA I: Vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti za umetno preoblikovana rečna korita

PRILOGA J: Vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti za izkopana in očiščena rečna korita

1 UVOD

Voda je ena od posebnosti, ki loči Zemljo od ostalih znanih planetov. Voda pokriva kar tri četrtine zemeljske površine in zato imenujemo Zemljo tudi »vodni planet«. Večina, kar 95,5 odstotkov vode, je slane. Površinska sladka voda – to je voda jezer, rek, mokrišč, podzemna in voda v ozračju - od katere smo tudi najbolj odvisni, pa predstavlja le 0,26 odstotka. Sladka voda je ena od pojavnih oblik znotraj nepretrganega planetarnega kroženja vode¹. Na ta način se tudi obnavlja.

Slovenija je med najbolj humidnimi območji v Evropi. Ozemlje Slovenije predstavlja le tisočino ozemlja Evrope, odtok vode z njenega območja pa več kot odstotek. Povprečni odtok znaša okoli 590 m³/s. Skupaj s tranzitnimi vodami, ki pritečejo iz sosednjih držav, večinoma iz Avstrije (Drava, Mura), pa celo preko 1000 m³/s. Znotraj svetovnega kroženja vode se skozi lokalni krog naše dežele pretaka nadpovprečno veliko vode².

Človek se je od nekdaj naseljeval ob rekah, potokih, jezerih in drugih oblikah vode, ki so mu omogočala lažje življenje. Silo tekoče vode je izkoriščal za poganjanje vodnih koles, katera so gnala mline, žage in podobne obrate, ter v sušnih obdobjih vodo uporabljal za namakanje obdelovalnih površin.

Kakor je na eni strani voda nepogrešljiva za obstoj človeka in ostale narave, pa na drugi strani lahko predstavlja tudi veliko nevarnost v primeru poplav, udarne moči hudournikov in zemeljskih plazov ob izdatnejših padavinah.

Največja nevarnost poplav obstaja ob hudourniških rekah in potokih. V Sloveniji živi 7 % ljudi na območjih, kjer so poplave običajen pojav, in 24 % prebivalstva na območju velikih poplav. Območja z možnostjo poplav obsegajo velikost 300 000 ha površin, kar predstavlja 15 % površine Slovenije³.

¹ (Bat, M. in sod. 2003)

² (Bat, M. in sod. 2003)

³ (Bat, M. in sod. 2003)

Vzroki za poplavljanje vodotokov so najrazličnejši. Največkrat se pojavijo ob dolgotrajnejših obilnejših padavinah ko reke, potoki prestopijo bregove, podrejo nasipe, jezove in se voda razlije po površinah ob vodotokih, kjer lahko prihaja do nevarnosti naravnih nesreč. Količine vode se lahko v vodotokih znatno povečajo, posebej v kombinaciji z obilnejšim deževjem, tudi v obdobju intenzivnega topljenja snega v pomladanskem času. Pogostokrat pa so vzrok za poplave tudi kratke in izredno izdatne padavine, ko se pojavi velik površinski odtok in voda dere s pobočij, cest in poplavlja okoliške depresije, kleti, garaže itd (ti. Flash floods).

Človek zaenkrat še nima dovolj znanja, da bi lahko dolgoročno napovedoval čas poplav in njihov obseg. Lahko pa na podlagi izkušenj in meritev različnih hidrometeoroloških parametrov predvidi kraj in čas nastopa visokih voda, s hidravličnimi izračuni pa izlivanja vode iz rečnega korita, njeno količino ter obseg in potek poplavnih tokov. S poznavanjem količin poplavne vode, poteka njenega toka ter globine in hitrosti vode v posameznih točkah poplavnega območja lahko natančneje predvidevamo vplive poplav in izvedemo ukrepe za zaščito človeka in njegovega premoženja. Prav tako je tu treba analizirati faktorje, ki vplivajo na gibanje vode v poplavnih območjih, npr. rastje, postavitve objektov, konfiguracija terena, klimatski dejavniki idr. Ob dobrem poznavanju posameznih dejavnikov je potrebno tudi analizirati njihove medsebojne vplive in najti rešitve obravnavanih problemov.

Podobno kot v drugih znanostih se tudi v hidravličnem inženirstvu vedno bolj uveljavlja uporaba prostorskih informacijskih sistemov. V diplomski nalogi je obravnavana možnost priprave geometrijske podlage rečnega korita s pripadajočimi poplavnimi površinami za izdelavo hidravličnega izračuna v programu HEC-RAS ter možnost kartiranja območja poplavljanja na digitalnem modelu terena s pomočjo razširitve GIS programskega orodja ArcGIS *HEC-GeoRAS*. Pri tem so bili za izdelavo digitalnega modela terena uporabljeni prostorski podatki različnih virov, ki so zagotavljali tudi različen nivo natančnosti. Uporabljene so bile digitalizirane topografske karte, podatki izmerjenih prečnih profilov ter podatki zajeti s tehnologijo LIDAR, ki predstavlja najsodobnejšo tehniko snemanja topografije terena.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

Pri celovitem pristopu k reševanju problemov se je treba najprej soočiti s teoretičnimi izhodišči in pregledati že opravljeno delo na tem področju. Zato smo najprej preučili teoretično ozadje hidravlike odprtih vodotokov in faktorjev, ki imajo vpliv nanjo, ter se spoznali z načinom pridobivanja primernih topografskih podatkov za izdelavo zadovoljivo natančnega digitalnega modela terena za hidravlično analizo in kartiranja poplavnih površin. Delo je potekalo s kombinacijo GIS in hidravličnega orodja, zato je bilo treba podrobneje spoznati tudi programsko opremo ter načela, matematične enačbe in algoritme ter druga znanja, na katerih različna programska orodja temeljijo.

2.1 Hidravlika odprtih vodotokov

Za reševanje in opisovanje hidravličnih problemov odprtih vodotokov pri najpreprostejšem načinu uporabljamo enačbe stalnega enakomernega toka, ki se načeloma pojavlja v daljših prizmatičnih rečnih koritih z rahlim vijuganjem. S prevzemom nekaterih predpostavk pri uporabi teh enačb se lahko tudi pri reševanju problemov vodotokov, ki ne ustrezajo tem kriterijem, izognemo vnosu večjih napak. Prav tako si lahko s temi enačbami pomagamo pri obravnavi problemov iz prakse, kjer se pojavlja nestalni oziroma neenakomerni tok. V teh primerih je potrebno privzeti, da enačbe stalnega enakomernega toka veljajo v dovolj majhnem časovnem intervalu oziroma med sosednjima prečnima profiloma dovolj kratkega obravnavanega odseka. To pomeni, da se lahko privzame, da so globina, površina, pretok in hitrost na tem odseku oziroma intervalu konstantne.

Matematični model, ki je bil uporabljen v nalogi, je namenjen za izračune enodimenzionalnega stalnega neenakomernega toka. Pri takem modelu je treba uporabljati povprečne vrednosti parametrov v posameznem prečnem prerezu. Največje poenostavitve so povezane s hitrostmi v prečnem prerezu, saj je porazdeljenost hitrosti lahko zelo neenakomerna. Hrapavost ostenja, ovire v toku, vzdolžni potek trase, geometrija prečnega prereza so le del parametrov, ki vplivajo na porazdelitev hitrosti. Te hidravlične motnje zajamemo z različnimi parametri. Za izračune povprečne hitrosti enakomernega toka so bile

na podlagi eksperimentov razvite številne semi-empirične enačbe, ki pa imajo v osnovi podobno obliko, tj.:

$$\bar{v} = C * R^x * I_0^y \quad (1)$$

Kjer pomeni:

\bar{v} povprečna hitrost v prečnem prerezu

R hidravlični radij, ki predstavlja razmerje med površino in omočenim obodom

I_0 vzdolžni naklon kanala pri stalnem toku

C Chezyjev koeficient linijskih izgub energije

x,y eksponenta.

Prevodnost vodotoka narašča z naraščajočo globino ali hitrostjo vode. Če podrobneje pogledamo enačbo vidimo, da je hitrost oziroma pretok vode enakomernega toka funkcija oblike kanala, koeficienta hrapavosti, vzdolžnega naklona kanala in globine vode.

$$Q = Q (\Gamma, n_g, I_0, h_0) \quad (2)$$

Kjer pomeni:

Γ faktor oblike kanala,

n_g Manningov koeficient hrapavosti, ki je nadomestil Chezyjev koeficient

h_0 normalna globina vodnega toka.

Osnova za razumevanje in reševanje hidravličnih problemov je dobro poznavanje zakonitosti dinamike vodnega toka. Na teh načelih lahko iščemo ustrezne predpostavke in izberemo možne poenostavitve, ki omogočajo račun parametrov toka.

2.1.1 Zakon o ohranitvi mase

Osnovna kontinuitetna enačba ima obliko:

$$\iint_S \rho \cdot \vec{v} \cdot dS = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \cdot \vec{v} \cdot dV \quad (3)$$

kjer pomeni:

- S sklenjena ploskev,
- ρ gostota tekočine,
- v vektor hitrosti,
- t čas,
- V obravnavan volumen.

Za prostorski tok ima diferencialna kontinuitetna enačbe obliko:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

kjer pomeni:

- v_x komponenta hitrosti v x smeri,
- v_y komponenta hitrosti v y smeri,
- v_z komponenta hitrosti v z smeri.

Kot smo omenili, bomo uporabili poenostavljeno obliko, za kar bomo upoštevali nekatere predpostavke.

Predpostavke pri enodimenzionalnem, po prečnem prerezu povprečnem toku, ki omogočajo izračune, so sledeče:

- tok je v tlorisu enodimenzionalen;
- vertikalna komponenta hitrosti je zanemarljivo majhna oziroma $v_z \approx 0$;

- porazdelitev hitrosti po prečnem prerezu je enakomerna, zaradi česar je porazdelitev pritiskov po prerezu hidrostatična;
- naklon dna je majhen, tako da z zadovoljivo natančnostjo velja zamenjava:
- $I_0 = \operatorname{tg}(\beta) \approx \sin(\beta)$;
- notranjega trenja v tekočini ni; trenje med tekočino in steno kanala je obravnavano kot zunanja sila.

Na podlagi teh predpostavk se kontinuitetna enačba poenostavi in ima za enodimenzionalni tok sledečo obliko:

$$\frac{\partial(v_s \cdot h)}{\partial s} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

kjer pomeni:

s smer naravne koordinate v smeri toka (v vsaki točki tangenta na tokovnico),

v_s prevladujoča komponenta hitrosti (ostale komponente so zanemarljive).

V primeru stalnega toka, kar pomeni, da se količine s časom ne spreminjajo, se kontinuitetna enačba dodatno poenostavi v sledečo obliko:

$$\frac{\partial}{\partial s}(v_s \cdot S) = 0 \quad (6)$$

kjer S predstavlja površino prečnega preseka zapolnjenega z vodo.

2.1.2 Zakon o ohranitvi gibalne količine

Dinamična enačba ima v osnovi naslednjo obliko:

$$\iiint_V \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot \rho \cdot dV = \iiint_V \vec{F} \cdot \rho \cdot dV + \iint_S [\sigma] \cdot d\vec{S} \quad (7)$$

kjer pomeni:

- V obravnavan volumen,
- \vec{v} vektor hitrosti,
- t čas,
- ρ gostota tekočine,
- \vec{F} rezultanta delujočih sil,
- S sklenjena ploskev,
- $[\sigma]$ tenzor napetosti.

Če upoštevamo lastnosti tekočin ter preoblikujemo posamezne člene, dobi enačba obliko (imenovano Navier-Stokesova enačba za realne tekočine):

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} + \frac{1}{\rho} \cdot \text{div}[\sigma] = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}(p) + \nu \cdot \Delta \vec{v} + \frac{\nu}{3} \cdot \text{grad}(\text{div}(\vec{v})) \quad (8)$$

Kjer pomeni:

- ν koeficient kinematične viskoznosti,
- p tlak.

Če upoštevamo še predpostavko, da je tekočina

- nestisljiva: $\text{div}(\vec{v}) = 0$,
- idealna: $\nu = 0$,

- dobi dinamična enačba za prostorski tok naslednjo obliko:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}(p) \quad (9)$$

Z upoštevanjem predpostavk, katere smo upoštevali že za kontinuitetno enačbo, se tudi dinamična enačba poenostavi.

Dinamična enačba za globinsko povprečen enodimenzionalni tok tako dobi sledečo obliko:

$$\frac{dv_s}{dt} = F_s - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial s} \quad (10)$$

kjer pomeni:

- v_s prevladujoča komponenta hitrosti (ostale komponente zanemarimo),
- s smer naravne koordinate v smeri toka (v vsaki točki tangenta na tokovnico),
- F_s komponenta rezultante delujočih sil v smeri toka.

2.1.3 Zakon o ohranitvi energije

Pri upoštevanju zakona o ohranitvi energije velja, da se celotna energija sistema spreminja le ob dovajanju ali odvzemanju toplote oziroma pri opravljanju dela, ki ga opravi sistem na okolico. Tako ima enačba zakona o ohranitvi energije sledečo obliko:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA}{dt} \quad (11)$$

Kjer pomeni:

- E celotna energija sistema,
- Q energija dovedene toplote,

A odvzeta (dodana) energija zaradi dela.

Opravljenno delo lahko razčlenimo na segmente glede na izvor ter tako dobimo obliko enačbe:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA_p}{dt} - \frac{dA_{tr}}{dt} - \frac{dA_m}{dt} \quad (12)$$

Kjer pomeni:

A_p delo normalnih tlakov,

A_{tr} delo strižnih sil,

A_m mehansko delo.

Če pri tem upoštevamo predpostavko, da je tok stacionaren in enodimenzionalen, kar pomeni, da so količine parametrov enakomerno razporejene po prerezu, lahko operiramo z njihovimi povprečnimi vrednostmi. Tako dobimo obliko enačbe:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dA_m}{dt} = \rho \cdot Q \cdot \left(e_{ir} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h + \frac{v^2}{2} \right)_{izhodno} - \rho \cdot Q \cdot \left(e_{ir} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h + \frac{v^2}{2} \right)_{vhodno} \quad (13)$$

Pri čemer e_{ir} predstavlja nepovratno notranjo energijo na enoto mase.

Pri analiziranju hidravlike vodnega toka odprtih vodotokov, kjer ni hidravličnih ali hidroenergetskih strojev, razlike med dovedeno oziroma odvzeto energijo zaradi mehanskega dela ni. Energijsko bilanco med dvema prečnima prerezoma lahko tako predstavimo s pomočjo energijske enačbe. Pri tem preoblikujemo člene, da dobijo dimenzije oblike enote dolžine:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \Delta E_{ir} \quad (14)$$

kjer predstavlja ΔE_{ir} spremembo vseh oblik nepovratnih notranjih energij.

2.1.4 Enodimenzionalen hidravlični model

Na začetku razvoja programske opreme za reševanje hidravličnih problemov toka s prosto gladino so prevladovali enodimenzionalni (1D) modeli za račun poteka gladin pri stalnem enakomernem ali neenakomernem toku. Predpostavka je bila, da se večinoma pojavlja mirni režim toka, kjer razmere narekuje dolvodni robni pogoj. V primeru, ko je le mestoma nastopil deroči tok, je program avtomatično privzel globino vode kot kritično in jo povečal za deset procentov. S to globino je nato nadaljeval potek računa. Ta postopek pa je neuporaben v primeru stalnega ali prevladujočega deročega toka, pri katerem račun poteka s tokom (od zgornjega robnega pogoja). Slabost teh modelov je bila tudi v primerih, ko se obravnavajo poplavna območja. Modeli so, za razliko od dvodimenzionalni modelov, predpostavili enakomerno porazdelitev hitrosti po celotnem prečnem preseku, torej enako za glavno rečno korito in poplavna območja, kar ne odgovarja dejanskemu staju.

Razvoj računalniške programske opreme pa danes že omogoča obravnavanje nenadnih sprememb ob ovirah v toku in sprememb režima toka. To omogoča tudi računalniški program HEC-RAS, ki smo ga za hidravlične izračune uporabili v nalogi. V programu je reševanje teh hitrih sprememb izvedeno z uporabo enačbe gibalne količine. Kot hipne spremembe v površini prečnega preseka se obravnavajo tudi mostovi in prepusti. Program tudi odpravlja večino težav starejših enodimenzionalnih modelov pri netočnem izračunu hitrosti vode v strugi in na poplavnih območjih. Tu je namreč že možno razdeliti prečni presek na posamezne lamele in za njih določiti nekatere hidravlične parametre. Ker pa je model enodimenzionalen, so upoštewane le hitrosti vodnih delcev v smeri toka. V primerih, ko imata tudi drugi dve komponenti hitrosti pomemben vpliv, je treba uporabiti dvo- ali tri-dimenzijske modele.

Nivoje vodnih gladin se pri mirnem toku izračunava v proti točni smeri, saj se širijo motnje tudi v gorvodni smeri. Enačbo za protitočni račun vodnih gladin je leta 1828 razvil J. B. Belanger⁴. Protitočni račun zahteva znan spodnji robni pogoj (zadnji dolvodni prečni profil obravnavanega odseka). Nato poteka račun postopoma od profila do profila. V smeri toka se enačbo rešuje le na odsekih z deročim tokom. Kot smo omenili pri opisu teoretičnih osnov

⁴ (Merwade, 2004)

hidravlike odprtih vodotokov (poglavje 2.1.5), je glavni parameter, ki vpliva na izračunane količine, poleg geometrije in padca dna, vrednost koeficienta hrapavosti. Zato je naloga določanja trenjskih izgub kompleksna in zahteva dobro poznavanje posameznih vplivnih faktorjev in veliko izkušenj na tem področju. Ustreznost vrednosti koeficientov hrapavosti lahko, če poznamo nivoje vodne gladine za posamezne prečne profile pri že zabeleženih pretokih, preverjamo s postopkom umerjanja.

Enačba za protitočni račun energijskih izgub, ki jo je razvil J. B. Belanger, temelji na naslednjih predpostavkah:

- tok je enodimenzionalen,
- tok je stalen,
- tok je enakomeren ali blago neenakomeren,
- tok se spreminja postopoma,
- energijske izgube v prečnem profilu so enake energijskim izgubam pri stalnem toku pri enaki globini in pretoku.

Enačba ima sledečo obliko:

$$\frac{\partial E}{\partial s} = -I_0 = \frac{\partial}{\partial s} \left(z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \right) = -D \cdot \frac{1}{2 \cdot R} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (17)$$

Kjer pomeni:

- s koordinata naravnega koordinatnega sistema tangenta na os struge
- I_0 padec rečnega dna
- z višinska kota
- p tlak
- v povprečna hitrost toka
- D Darcijev koeficient
- R hidravlični radij.

Kasnejše raziskave enačbe (1) so pokazale, da je pri odprtih vodotokih ustrežneje uporabiti Manning-Stricklerjevo enačbo:

$$\bar{u} = \frac{1}{n_g} R^{2/3} \sqrt{I_0} \quad (18)$$

Kjer pomeni:

\bar{u} povprečna hitrost vodnega toka po prečnem prerezu

n_g Manningov koeficient hrapavosti

R hidravlični radij

I_0 padec rečnega dna.

Za praktične izračune je zato zelo pomembno, da ustrezno določimo (izberemo) vrednost koeficienta n_g .

2.1.5 Določanje Manning-ovega koeficienta (n_G) hrapavosti

Pri toku vodotokov je na eni strani prevladujoča sila sistema (imenovana tudi *driving force*) sila težnosti. Na drugi strani pa glavno nasprotno silo, (poleg odpora objektov, kot so mostovi in prepusti), predstavljajo sile, ki se pojavljajo zaradi hrapavosti ostenja rečnega korita in poplavnih površin. Hrapavost in relief ostenja rečnega kanala in poplavnih površin ima velik vpliv na hidravlične razmere v vodotoku. Za primerno ocenitev vrednosti Manning-ovega koeficienta hrapavosti, ki ga potrebujemo v izračunih, je potrebno kvalitetno poznavanje faktorjev, od katerih je hrapavost odvisna. Posebno pri naravnih vodotokih je le-ta funkcija večjega števila spremenljivk. S povečanjem vodostaja in pretoka se v večini vodotokov n_g zmanjša, saj so takrat mnoge nepravilnosti v rečnem koritu prekrte z vodo in nimajo tako velikega vpliva kot pri nižjih vodostajih. Nasprotno se lahko pri večjih pretokih pojavijo novi in močnejši faktorji, kot so večja hrapavost brežin, gostejše rastlinje. V primeru, da začne vodotok poplavlјati, se vrednost n_g spreminja v odvisnosti od globine vode na posameznih delih prečnega profila. Vplive posameznih faktorjev moramo pri 1D izračunih oceniti in jih združiti v vrednost Manningovega koeficienta hrapavosti. Tako dejavnike kot celoten n_g lahko določimo na podlagi meritev pretokov, poteka gladin in karakteristik vodotoka na

terenu ali pa jih določimo na podlagi izmerjenih hitrosti, saj je vertikalni razpored hitrosti odvisen od hrapavosti. Poleg meritev imamo možnost tudi empiričnih metod. Za natančno določitev vrednosti koeficientov hrapavosti obstaja več načinov. Morda najceloviteje zajema vse faktorje enačba W. H. Shen iz leta 1972, ki ima sledečo obliko:

$$n_G = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m^5 \quad (16)$$

Kjer pomenijo:

- n_0, n_1, n_2, n_3, n_4 vpliv materiala, ki sestavlja omočeni obod rečnega korita, stopnjo hrapavosti oboda, relativni vpliv ovir v koritu, zaraslosti z vegetacijo in
- m vpliv stopnje meandriranja osi vodotoka.

Osnovni parameter pri določanju Manningovega koeficienta (n_g) predstavlja hrapavost omočenega ostenja. Ta je predvsem odvisen od velikosti osnovnih gradnikov materiala oboda, npr. prodnikov, peskov ipd. Bolj kot so ti gradniki manjših granulacij, manjši je njihov vpliv. Seveda pa je vrednost (n_g) odvisna tudi od globine vode. Pri večjih globinah se ob ostenju manjše hrapavosti pojavi vodni film (mejna plast) in tako ti delci nimajo bistvenega vpliva. Povsem drugače je pri večjih granulacijah ter nižjih vodostajih.

Zarast zaustavlja tok in tako zvišuje vrednost koeficienta. Njen učinek je odvisen od gostote, porazdelitve in tipa rastja. Medtem ko se pri odsekih rečnih korit v zgornjem toku, kjer je padec dna večji in posledično tudi hitrost vode večja, zarast po samem omočenem obodu praktično ne pojavlja, pa se v bolj ravninskih delih, predvsem pa na poplavnih območjih lahko pojavlja gosta vegetacija. Na takih delih je tako vpliv zarasti, posebno pri nižjih vodostajih, zelo velik.

Nepravilnost korita opisuje spreminjanje prečnih presekov vodotoka, oblike in omočenega oboda vzdolž vodotoka. Bolj kot je sprememba nenadna, večji je njen vpliv. Sem lahko prištejemo tudi faktorje kot so dotok plavin, zdrsov zemljine in ostali učinki erozije in

⁵ (Steinman, 1999)

odlaganja materiala. Ti procesi se izraziteje pojavljajo v naravnih vodotokih. Med tem ko zavoji z velikimi radiji nimajo znatnega vpliva, pa meandri majhnih polmerov lahko močno povečajo energijske izgube. Pri zavojih majhnih polmerov sta erozija in odlaganje materiala še bolj izraziti. Meandriranje se pojavlja pri manjših padcih terena.

Večje ovire v vodnem toku obravnavamo kot lokalne energijske izgube. V linijske pa upoštevamo predvsem manjše ovire, ki se lahko občasno pojavljajo v rečni strugi. To so lahko posamezna zagozdena drevesa, zdrs večje količine zemljine, dotok plavin in podobno. Večja kot je njihova obsežnost, večji je vpliv le-teh. Največja težava je v tem, da je pojav ovir velikokrat povezan z dogodki ob obsežnih padavinah in večjimi pretoki. Zato so te ovire nepredvidljive in še dodatno zvišujejo nivo vodne gladine. Proces erozije in naplavljanja sta ves čas prisotna v vodotokih. To še posebno velja za naravne rečne sisteme. Proces predvsem spreminjajo obliko in potek rečnega korita, kar ima lahko posledično vpliv tudi na spreminjanje Manningovega koeficienta hrapavosti (n_g).

V prilogah so v tabelah zbrane vrednosti Manning-ovih koeficientov hrapavosti za različne tipe rečnih korit in poplavnih območij. V prvi tabeli so vrednosti za korita naravnih vodotokov brez antropogenih posegov ter vrednosti za poplavne površine, ki so predvsem odvisne od višine, gostote in tipa rastja. Podane so vrednosti tako za naravne kot obdelovalne površine. V drugi tabeli so vrednosti obloženih in grajenih rečnih korit, razdeljene glede na vrsto in grobost uporabljenega materiala. V tretji tabeli pa so vrednosti koeficientov hrapavosti v koritih, ki so bila bodi očiščena, izkopana ali obložena, vendar le z uporabo povsem naravnih materialov, kot so skale, kamenje, zemljina ipd.

2.2 Nevarnost poplavljanja

V Sloveniji so poplave dokaj pogost pojav, zato ni čudno, da v Slovarju slovenskega knjižnega jezika najdemo številne izpeljanke iz besede poplava. Bistvene so zagotovo naslednje:

popláva –e ž (â) **1.** *razlitje, razširjenje velike količine vode po kaki površini:* na tem polju so vsako leto poplave; poplava je naredila veliko škode; preprečiti poplavo; severne kraje so

zajele katastrofalne poplave; občasne, pomladanske poplave; *ekspr.* v kopalnici imajo pravo poplavo / poplava se širi, umika *voda ob takim razlitju, razširjenju* **2.** *ekspr.*, z roditeljskim *velika količina, množina*: poplava besed, vprašanj; jezi se nad poplavo slabe literature; poplava različnih podatkov / poplava luči, svetlobe

popláviti –im *dov.* (a â) **1.** *z razlivanjem, širjenjem pokriti kako površino*: narasla reka spomladi poplavi polje / morje večkrat poplavi obalno mesto; voda je poplavila več vasi / ladijske prostore, rudnik je poplavila voda *vdrta vanje, jih zalila*; *ekspr.* dim je poplaval sobo; *pren., eksp.* sonce poplavi travnike // *ekspr. pojaviti se kje v veliki količini, množini*: mesto poplavijo letaki proti vojni; deželo so poplavile sovražne čete **2.** *narediti, da pride na kako površino, v kak prostor voda, navadno v veliki količini*: riževa polja je treba poplaviti; zaradi požara so skladišče na ladji poplavalili // *ekspr. narediti, da se kaj pojavi kje v veliki količini*: poplaviti trg s tujim blagom **poplavljen** –a –o: poplavljen vasi, občasno poplavljen kraško polje; to področje je poplavljen vso zimo

prepláviti –im *tudi preplavíti* –ím *dov.* preplávil (a â, i í) **1.** *z razlivanjem, širjenjem pokriti kako površino*: narasli potok preplavi njive in travnike / valovi so preplavili obalo; prostor je preplavila voda *vdrta vanj, ga zalila* / *ekspr.* hladni zrak bo preplaval naše kraje / kri preplavi tkivo; *pren.* gozd preplavijo jesenske barve **2.** *ekspr. pojaviti se na določenem celotnem področju v veliki množini*: mesto so preplavili begunci // *pojavit se kje v veliki količini*: trg so preplavili ceneni izdelki // *pojavit se, nastopiti na kakem širokem področju*: kriza je preplavila vso celino ...

Poplava je izjemen dogodek, ko visoka voda začne prelivati vzdolž brežin in delno ali popolnoma poplavi območja, ki so v običajnih pogojih suha⁶. V primerih poplav gre lahko za poplavljanje vodotokov, morja ali vode iz drugih virov. Najobičajnejši vzrok za poplave so intenzivne nevihte, dolgotrajno deževje, intenzivno topljenje snega ali kombinacija posameznih faktorjev, kar povzroča presežek količin vode od tistih, ki jih lahko odvaja odvodnik v običajnih pogojih. S tehničnega stališča ločimo dva osnovna pojma, ki imata bistveno vlogo pri nastanku škode in jih moramo zato pravilno razumeti.

- **Poplavljanje** pomeni dvig vodne gladine nad višinsko koto, ki označuje začetek nastanka škode (npr. kletno okno, hišni prag, teren). Hitrost vode je majhna, zato

⁶(Nagwa, 2003))

lahko vpliv hitrosti na škodo zanemarimo. Na poplavnih površinah je povzročena škoda posledica zastajanja vode. Višina škode je odvisna predvsem od globine, časa trajanja poplavljanja in kvalitete oz. onesnaženosti vode.

- **Preplavljanje** podobno pomeni dvig vode, ki pa ima, zaradi dovolj velike hitrosti in posledično erozijske sile, na škodo drugačen vpliv. Na določitev škode najbolj vplivata globina in hitrost. Pomemben vpliv ima tudi geološko-morfološka zgradba preplavljenega območja. Ta določa, na katerem mestu bi lahko prišlo do erozijskega pojava, ki ima na nastanek škode občuten vpliv. Če odštejemo človeške žrtve, smo v najbolj neugodnih razmerah priča tudi porušitvi objektov zaradi spodkopavanja ali zasutja objektov. Ker sta oba pojava med seboj tesno povezana (erodiran material se nekje odloži), moramo pri ovrednotenju škode obravnavati širše prispevno področje vodotoka in ne le poplavljen predel⁷.

2.2.1 Vzroki poplav

Vzroke nastanka poplav bomo razdelili glede na vir, od koder priteče voda. Če se voda prelije iz struge, jo na poplavnem področju imenujemo tuja voda. Voda, ki poplavi kot posledica površinskega odtoka iz zaledja, se imenuje zaledna voda. Za poplavo kot posledica intenzivnega deževja na obravnavano področje pa pravimo, da nastopi zaradi lastnih voda. Po tem imenovanju razdelimo poplave v naslednje skupine:

- **Poplave zaradi neposrednega dviga vodne gladine v osnovni strugi vodotoka** in posledično poplavljanja obrežnih zemljišč. Glede na obliko prečnega profila ločimo osnovni oz. primarni tok in sekundarni tok. Prvi teče v strugi, drugi izven nje, po poplavnih območjih oz. inundacijah. Razlika med njima je v pretočni globini in hitrosti toka. Praviloma ima osnovni tok večje pretočne globine in hitrosti v primerjavi s sekundarnim tokom. Poplavna škoda je v veliki večini posledica sekundarnega toka, ki teče po mnogo bolj ranljivem območju. V osnovni strugi nastane škoda le na specifičnih objektih kot so vodnogospodarska infrastruktura, premostitve ipd. Velika intenziteta padavin na območju hudournikov, ob neugodnih razmerah pa tudi splošno

⁷ (Trček, 2003)

na vseh vodotokih, je lahko vzrok spreminjajočega poteka struge. Najbolj neugodne razmere nastopijo ob trenutni porušitvi naravnih in umetnih zajezev. Ločitev med osnovnim in sekundarnim tokom v tem primeru izgubi pomen. V takih primerih dobimo na celotnem prečnem prerezu pretočne globine in hitrosti, ki so značilne za osnovni tok.

Za vodotoke z manjšim padcem dna in posledično manjšimi hitrostmi vodnega toka so značilne dolgotrajne poplave (reda velikosti v dneh). Te poplave niso posledica le nedavnih velikih količin padavin. Lahko nastanejo kot rezultat tajanja snega in ledu na obsežnih visokogorskih površinah v zaledju. Značilne so za spodnje tokove rek, ki izvirajo v najvišjih gorstvih sveta (Jangtze, Ind ipd.). Take reke imajo t.i. snežni vodni režim, z enim samim viškom pretokov v poletnem času. Od naših rek ima snežni režim le Mura in v manjši meri tudi Drava.

Dežni vodni režim, z viški pretokov glede na padavine (npr. pomladno-jesenski), je značilen za vodotoke v zgornjem in srednjem toku. Dvig vodne gladine v strugi takih vodotokov je kratkotrajen (reda velikosti v urah), strmi padci strug in veliki pretoki pa imajo za posledico velike hitrosti vode.

Te vrste poplav niso odvisne le od količine vode (pretoka) ampak tudi od hidravlične prevodnosti na določenem mestu (prečnem profilu). Ob zmanjšanju hidravlične prevodnosti nastanejo poplave na določenem odseku pri manjših pretokih, kot je »projektirana« prevodnost struge. Na zmanjšanje prevodnosti vplivajo razmere tako v strugi (npr. zamašitev mostnih odprtih – poseben primer so poplave zaradi tajanja ledene skorje, zaradi odlaganja plavin dvignjeno dno, porušitev nasipa) kot tudi na poplavnem področju (npr. cesta v nasipu, večji industrijski objekti)⁸.

- **Poplavljanje zaradi zalednih voda** je posledica velike količine padavinske vode (Q_d), ki se steka z višjeležečega zaledja določenega območja in ga, v primeru manjše sposobnosti odtoka vode (Q_o) na tem predelu, poplavi. Pogosto so s preplavljanjem zalednih voda povezani nastanki vodnih tokov. V primerjavi s preplavljanjem iz

⁸ (Trček, 2003)

vodotokov je erozija sicer bolj lokalno omejena, a kljub temu intenzivna. Še posebej je izrazita v primeru, ko voda ne teče po predhodno izoblikovani strugi, oz. se je le-ta v obdobju, ko je bila brez vode, zarasla ali zamuljila. Poleg velikih količin padavin Q_d lahko sočasno erodiran material zamaši odtočni profil (cestni prepust, kanalizacijski in naravni oz. kraški požiralnik) in še zmanjša sposobnost odtoka Q_o . Razlika v bilanci dotoka in odtoka je lahko tudi posledica nepravilnega človeškega poseganja v prostor. Večanje količin neprepustnih površin (parkirišča, ceste, strnjena poselitev) z nepravilno oz. prehitro odvodnjo na eni in manjšanje sposobnosti odtekanja (divja odlagališča odpadkov ob strugah, agromelioracije naravnih požiralnikov ipd.) na drugi strani so pogosto vzrok poplavitve.

- **Poplave zaradi neprilagojenih kanalizacijskih sistemov**, ki jih delimo na dva primera:
 1. Poplave kot posledica lastnih voda oz. ekstremno visokih padavin in premajhne odtočne sposobnosti (poddimensioniranosti) kanalizacijskega sistema. Velika večina kanalizacijskih sistemov v Sloveniji je mešanega tipa. To pomeni, da odvajajo tako fekalno kot meteorno vodo. Zaradi ekonomičnosti ima tak sistem dimensioniran premer cevi na odtok, ki je statistično dokaj verjeten (pogost). V praksi se upošteva, da naj bi mešani kanalizacijski sistem odvajal padavine z intenziteto 2 do 5 let. Ob višjih pretokih v sistemu se presežki izlivajo iz sistema preko razbremenilnikov. Pri dimensioniranju cevi je potrebno upoštevati vrsto področja, iz katerega poteka kanalizacija. V primeru, da gre za poseljeno ali kako drugače pomembno področje (npr. glavni podvozi), mora biti stopnja oz. povratna doba, do katere naj bo še omogočen nemoten odtok, višja.
 2. Poplave kot posledica tujih voda, kjer je ob izrazitem dvigu vode v osnovni strugi in posledičnem prelitju iztoka iz kanalizacijskega sistema onemogočen prosti iztok iz sistema. V takem primeru je potrebno priključke na omrežje, ki se nahajajo pod maksimalno koto poplave, izvesti s povratnimi ventili in črpališči. Ob nepravilni

izvedbi voda udari po ceveh nazaj v kanalizacijsko mrežo in tako preplavi nižje ležeče predele⁹.

- **Poplave na t.i. depresijskih območjih**, kjer je lokalno teren najnižje. Tako je vodi, ki priteče vanj kot padavinski odtok (lastna ali zaledna voda) oz. iz vodotoka ali kanalizacije (tuja voda), odtok (po vodotoku, v požiralnik ipd.) onemogočen oz. je leta premajhen. Za razliko od naravnih depresijskih območij, ki jih pogojuje teren sam, poznamo tudi tista, ki jih je ustvaril človek, tako da je preprečil iztok vode (nasipi, podvozi ipd.). Na ta način nastanejo t.i. kasete, v katere priteče voda zaradi enega od predhodno naštetih razlogov, njen iztok pa je otežen ali celo popolnoma onemogočen. Vpliv erozije oz. hitrosti vodnega toka v primeru poplav zaradi neprilagojenih kanalizacijskih sistemov in poplav na depresijskih območjih lahko zanemarimo.
- **Poplavljanje morja** je tip poplav, ki je značilen za območja neposredno ob morju in predvsem na obalah oceanov, kjer se pojavljajo hurikani in druge vrste viharjev, ki porivajo vodo proti obali. Velika nevarnost predstavljajo tudi poplavni valovi, ki nastajajo zaradi potresov in aktivnosti vulkanov. V Sloveniji je poplavljanje morja majhnem obsegu in se pojavlja le ob kombinaciji močnega vetra južnih in zahodnih smeri, nizkega zračnega pritiska in višje plime.

2.3 Hidravlično modeliranje

Pri reševanju hidrotehničnih problemih si pomagamo fizičnimi in matematičnimi modeli. Predvsem v fazi priprave projekta lahko s simulacijami na teh modelih opravimo študije različnih variant.

S fizičnem modelom ponazorimo primer iz narave v pomanjšanem merilu za konkreten primer. Težko pa je na tem modelu opraviti kasneje večje spremembe. V takih primerih so bistveno primernejši matematični modeli, kjer lahko v fazi modeliranja preizkušamo različne variante vodovarstvenih objektov, hidroenergetskih objektov ipd.

⁹ (Trček, 2003)

Hidravlično modeliranje je zelo širok pojem, saj zajema vrsto področij. Sem spada tako reševanje problemov odprtih vodotokov in kanalov kot tudi zaprtih vodnih tokov. Pri odprtih vodotokih se obravnava hidravlika rečnih korit in hidrotehničnih objektov, kot so prelive, jezovi, podslapja, zadrževalniki, prepusti, mostovi, nasipi ipd. Med zaprte sisteme pa štejemo vodovode, cevovode, tlačne tunele ipd. Prav tako pa se s pomočjo modeliranja rešujejo hidravlični problemi na morju in ob obali. Sem štejemo pristanišča, mostove, protipoplavne objekte, objekte za zaščito pred udarno močjo valovanja ipd.

Kljub temu, da so si problemi med seboj zelo različni, pa je osnovni potek modeliranja enak za vsa področja, ne glede na to, ali gre za matematični ali fizični model. Za uspešno delo je potrebno natančno določiti problem, cilj modeliranja ter robne in začetne pogoje. Tako bo lahko model prinesel zelene rezultate in odgovore.

2.3.1 Zbiranje podatkov

Na osnovi natančno določenega bistva problema, gonilnih sil in ocene sprejemljivih poenostavitev in predpostavk lahko začnemo z zbiranjem podatkov potrebnih za izdelavo modela. V nalogi bo obravnavana hidravlika rečnega odseka, za katerega je treba najprej zbrati in obdelati geometrijske podatke rečne struge in poplavnih površin ob vodotoku. Geometrija bo dobljena na osnovi digitalnega modela terena, zato je treba za izdelavo le-tega zbrati topografske podatke dobljene s pomočjo različnih kart in tehnik daljinskega zaznavanja.

Največkrat gre za klasične geodetske meritve, radarsko snemanje, aerofoto in satelitske posnetke, fotogrametrijo itd. Te metode prinašajo zadovoljive rezultate, ko gre za samo prikazovanje terena ne pa tudi za opis struge. Praksa pa je pokazala, da so v primeru, če želimo izvesti natančno hidravlično analizo, razpoložljivi podatki premalo natančni¹⁰. Zato si lahko pomagamo s samostojno izmerjenimi prečnimi profili, kar bistveno izboljša natančnost na samih lokacijah prečnih profilov, ne reši pa problema natančnosti celotnega digitalnega modela terena (v nadaljevanju DMT). Tehnika, ki danes zagotavlja zelo natančno topografsko

¹⁰ (Rak, 2005)

podobo terena širšega območja, je lasersko skeniranje (tehnologija LIDAR). Z njo dosežemo natančnost do nekaj centimetrov ter lahko posnamemo tudi konfiguracijo terena pod vodno gladino do globine nekaj metrov¹¹.

V naslednji fazi so potrebni podatki, ki opisujejo lastnosti vodnega toka, kar podajo meritve vodostaja, meritve gladin, pretoka in hitrosti vode. Ko obravnavamo poplavne situacije, je dobro poznati sledi predhodnih visokih voda oz. območja, ki so bila poplavljeni v teh primerih. Za posamezne pretoke potrebujemo tudi zunanje in notranje robne pogoje. Vrsto in obseg podatkov določimo glede na namen naloge. Natančnost pa ni odvisna le od količine in kakovosti podatkov, temveč tudi od njihove merodajnosti za konkreten primer.

2.3.2 Izbira primernega modela

Na podlagi definicije problema in podatkov, ki so nam na voljo, se izbere ustrezna vrsta modela. Najprej se treba odločiti med fizičnim ali matematičnem modelom. Vsak ima svoje prednosti in slabosti.

Fizični model je pomanjšan prikaz situacije v naravi brez popačenj, razen če se namenoma izbere (npr. po višini) popačen model. Omogoča vizualizacijo in s tem dobro predstavo, zato se uporabljajo pri načrtovanju objektov na vodotoku. S simulacijami na fizičnih modelih lahko ugotovljamo vplive teh objektov na vodni tok in na podlagi teh ugotovitev sprejemamo odločitve za optimizacijo objektov v efektivnem kot tudi varnostnem smislu. Oblikujemo lahko tako trdna ostenja kot tudi korita z gibljivim dnom, kjer lahko v simulaciji upoštevamo prodonosnost. Slabost fizičnih modelov je predvsem zahtevna in dolgotrajna izdelava. Prav tako se težave pojavljajo zaradi viskoznosti tekočine in sil, ki nastajajo pri tem. Sile zaradi viskoznosti v naravi nimajo posebnega vpliva in jih običajno lahko zanemarjamo, česar pa ne smemo storiti pri modelih v pomanjšani obliki. V času, ko je postavljen fizični model, je treba izvesti resnično vse potrebne meritve, saj po podrtju le-tega nikoli več ne dobimo identičnih pogojev. Za razliko pa pri matematičnih modelih, ki jih lahko shranimo na nekem mediju, kadarkoli ponovimo ali dodamo simulacije.

¹¹ (Gosar in sod., 2006)

Kot omenjeno, imamo na drugi strani matematične modele različnih zmožnosti analiziranja. Ti modeli so bistveno hitrejši in cenejši. Glede na zahtevnost problema in zahtevane natančnosti rezultatov se lahko odločimo za eno, dvo ali tridimenzionalni model. Matematični model je v bistvu računalniški program sestavljen iz dveh delov. Prvi del je sklop matematičnih enačb, ki opisujejo hidravlične pojave, zapisanih v numeričnem algoritmu. Ta del, navadno uporabniku nedostopen, je preko vmesnikov, ki predstavljajo drugi del, povezan z uporabnikom. Tako je drugi del namenjen vnosu hidravličnih in geometrijskih podatkov in prikazu rezultatov obravnavanega odseka. Prav tako kot s fizičnim modelom simuliramo pojave, le da lahko spreminjamo geometrijske in hidravlične podatke hitreje, enostavnejše in precej bolj ekonomično. Matematični modeli so danes že izjemno razviti in omogočajo obravnavanje najrazličnejših problemov, med drugim tudi račun gladin in hitrosti vode v rečnih koritih in poplavnih območij, račun poplavnih tokov, hidravliko objektov na vodotoku ipd. Žal pa matematični modeli lahko prikažejo le procese, katerih enačbe so zapisane v algoritmu, ne pa morebitnih procesov, ki se lahko izkažejo kot pomembni.

2.3.3 Validacija modela

Validacija ali potrditev veljavnosti modela za določene pogoje je postopek za ugotavljanje zanesljivosti (natančnosti in realnosti) modela. V njem primerjamo rezultate, dobljene v modelu, z izmerjenimi vrednostmi v naravi. Na podlagi primerjav teh vrednosti ocenjujemo verodostojnost simulacij modela. Večje, kot je ujemanje, širša je možnost uporabe modela. Pomanjkljivo ujemanje pa kaže na to, da je potrebno spremeniti vrednosti določenih parametrov (npr. koeficient hrapavosti) ali na neprimernost modela za obravnavanje določenega problema. Postopek, ko na podlagi meritev v naravi (npr. nivo vode v določenem prečnem profilu) popravljamo posamezni parameter, imenujemo umerjanje (kalibracija) modela.

V kolikor ugotovimo ustrezno visoko veljavnost rezultatov, lahko model uporabimo tudi za raziskave situacij, ki se sicer še niso zgodile, a je njihov pojav možen (npr. izreden pretok, porušitev pregrade ipd.).

2.3.5 Viri napak v hidravličnem modeliranju

Z razvojem hidrodinamičnih modelov je bila rešenih veliko problemov in težav, vendar pa se hkrati tudi pojavljajo novi izzivi. Predvsem je danes težnja razviti čim večjo zanesljivost modelov in eliminirati glavne vzroke, iz katerih izhajajo napake modelov. Glavni vzroki za nenatančnost modela so lahko:

- sistematične napake pri pridobivanju in zapisu podatkov; npr. nivoji vodne gladine,
- sistematične napake pri vhodnih podatki; npr. padavine, topografski podatki,
- napake, pri določitvi vrednosti parametrov; npr. n_g ,
- napake, zaradi nepopolne strukture modela in posplošitev ter predpostavk.

Napake se pojavljajo pri določanju vrednosti meritev in pri samih simulacijah ter so lahko tako pozitivne kot negativne. Pri uporabi nepovezanih modelov se karakteristike sistema prevzamejo kot homogene znotraj domene posameznih elementov¹². Omejitve merilnih tehnik in opreme onemogočajo zagotovitev optimalnih podatkov in vrednosti parametrov, kar ima za posledico rezultate, ki se lahko razlikujejo od pričakovanih. Kaj je za nas še sprejemljivo odstopanje določimo sami, glede na zahtevnost primera (objekta). Predvsem je težava določiti natančne vrednosti koeficientov hrapavosti, attribute topografije obravnavanega območja itd. Pri metodi dela uporabljeni v nalogi je bila natančnost najbolj odvisna predvsem od natančnosti prikaza topografije z digitalnim modelom terena, kot podlage za pripravo geometrije hidravličnega modela struge in priobrežnih zemljišč ter za kartiranje poplavnih območij.

Marsikatero napako bi lahko zmanjšali, vendar pa bi to povzročilo bistveno zvišanje stroškov analize. Stroški pa ravno tako lahko predstavljajo omejitveni faktor. Reševanja problemov, ki jih povzročajo napake, se lahko lotimo tudi z druge strani in sicer tako, da napake naprej prepoznamo, spoznamo njihov izvor ter pravilno ovrednotimo njihov vpliv na rezultat. Ker posameznih napak ne moremo enostavno sešteti, moramo hkrati posvetiti pozornost tudi temu, kako napake (tolerance) posameznih parametrov vplivajo na ostale in kako na celoten model.

¹² (Alemseged, 2005)

2.4 Prostorski podatki

Pri uporabi GIS orodja za pripravo geometrije rečenega korita in poplavnih površin ter za kasnejši prikaz poplavnih poligonov predstavljajo osnovo prostorski podatki. Prikazati podobo terena v naravi je že stoletja star problem, s katerim se ukvarjajo kartografi. Do razvoja računalniške opreme in sodobnih GIS programskih orodij so se uporabljale tiskane karte, ki so na različne načine poskušale prikazati vse tri dimenzije prostora v ravnini. Pri tem so bili kartografi bolj ali manj uspešni. Najbolj se je uveljavil način prikaza razgibanosti in naklona terena z izohipsami (slika 1) in z metodo senčenja (slika 2).



Slika 4: Prikaz reliefa z izohipsami.



Slika 5: Uporaba metode senčenja za upodobitev razgibanosti terena.

Te karte so še danes eden glavnih virov za pridobitev digitalnih podatkov, ki se uporabljajo v GIS orodjih. Uporaba te tehnologije, ki je doživela pravi razcvet na koncu prejšnjega stoletja, je močno olajšala shranjevanje, vizualizacijo (tudi v 3D obliki) in opravljanje analiz z geografskimi podatki. Danes glavna naloga kartografov ni več izdelava kart, temveč priprava dostopnih in razpoložljivih prostorskih podatkov, kar omogoča interaktivno odločanje¹³ o izbiri

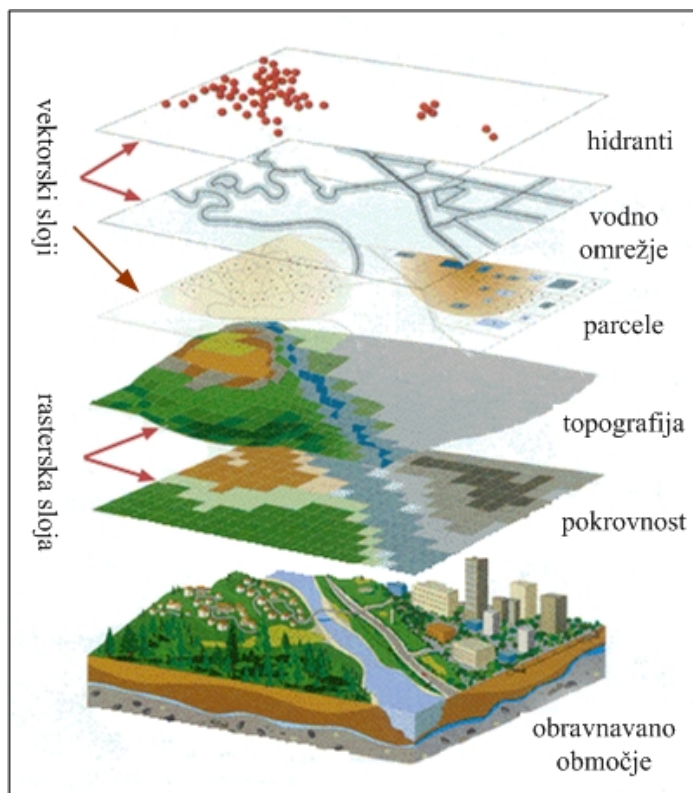
najprimernejšega orodja ali tehnike. Po digitalizaciji podatkov so ti zapisani v vektorski ali rastrski obliki. Na osnovi tako enih kot drugih lahko izdelamo digitalni model terena.

¹³ (Krušič, M. 2005)

2.4.1 Vrste prostorskih podatkov

Prostorski podatki podajajo opisne, lokacijske in kartografske lastnosti v enotnem georeferenčnem sistemu, ki so shranjeni v integrirani GIS-podatkovni bazi. Geografski informacijski sistem (GIS) je računalniško podprt podatkovno procesni sistem, ki omogoča integracijo, shranjevanje, obdelavo in zlasti učinkovito analizo in prikazovanje prostorskih podatkov.¹⁴

Baza podatkov sestoji iz tematskih podatkov in grafične baze podatkov, ki zajema lokacijske, grafične in topološke podatke. Podatki obravnavanega območja so razdeljeni na tematske sloje, od katerih vsak podaja določene lastnosti območja, kot kaže slika 3. Opis in atributni



podatki so shranjeni ločeno v atributni podatkovni bazi, ki je s skupnimi identifikatorji integralno povezana s geografskimi objekti. Glede na primernost za prikaz posameznih slojev se odločimo za rastersko ali vektorsko obliko zapisa objektov.

Slika 6: Prikaz območja s posameznimi sloji, ki nosijo opis določene lastnosti.

2.4.1.1 Rasterski objekti

Osnovni gradnik rasterskega objekta je celica, ki nosi informacije ali vrednosti enotnega podatkovnega tipa. Celice so povezane v stolpce in vrstice matrike, ki predstavlja posamezen podatkovni sloj. Od velikosti celice je odvisna ločljivost prikaza entitete, vendar pa se z zmanjšanjem povečuje količina podatkov. Rasterski tip podaja vrednosti celic s številom pomnilniških bitov (2, 4, 8, 16 ali 32 bitni zapisi). Ta način prikaza entitet se navadno

¹⁴ (Šumrada, 2005)

uporablja za zvezne ploskovne podatke, simulacije, kvantitativne analize. V primeru, ko je pri analiziranju linijskih pojavov pomembna velika prostorska natančnost, pa se raster ne pokaže kot najbolj primeren.

2.4.1.2 Vektorski objekti

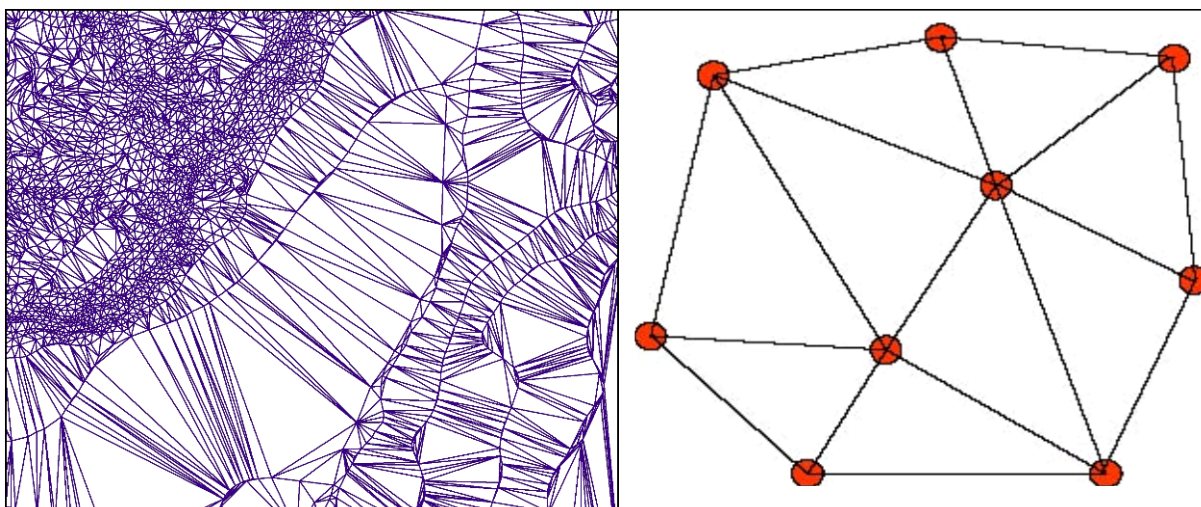
Pri vektorskih objektih je osnovni gradnik točka, ki je lahko samostojna ali pa so točke povezane v linije oziroma poligone. Na posamezne gradnik so vezani različni atributi (časovni, topološki ...). Vektorski GIS je primeren predvsem za naloge, v katerih je pomembna prostorska natančnost, za linijske oziroma omrežne analize, manj primeren ali celo neprimeren pa je za kvantitativne analize in modeliranje številnih slojev podatkov hkrati ter za daljinsko zaznavanje in prostorsko zvezno spreminjajoče se pojave.¹⁵

TIN (*mreža neenakih trikotnikov*) je na vektorski osnovi razvita metoda, s katero prikažemo topografijo terena z mrežo trikotnikov, njihovih stranic in oglišč. Vozlišča trikotnikov so natančno izmerjene točke iz narave, stranice pa povezujejo med seboj najbližje višinske točke. Posamezen trikotnik predstavlja približen naklon, videz površine terena. Neenakost trikotnikov mreže izhaja iz razporeditve izmerjenih točk terena. TIN je izdelan iz različnih virov podatkov: iz niza podatkov koordinat točk (X,Y,Z), izohips (digitaliziranih na podlagi topografskih tiskanih kart) ali iz digitalnega modela terena.

TIN sestavljajo vozlišča (definirana z X, Y, Z), stranice trikotnikov in ploskve trikotnikov samih. Stranice povezujejo vozlišča - najbližje višinske točke, kar se izvede s pomočjo Delanuayjeve triangulacije. Vsaka daljica tudi predstavlja stranico trikotnika. TIN - struktura je opredeljena tako, da za izbrani niz vozlišč obstaja samo ena mreža "najlepših" možnih trikotnikov, kar pomeni, da je število ostrokotnih trikotnikov minimalno. Oblika posameznega trikotnika naj bi bila čim bližje enakostraničnemu trikotniku¹⁶. Slika 5 prikazuje osnovno zgradbo TIN-a in TIN v diplomu obravnavanega območja.

¹⁵ (Krevs, 2001)

¹⁶ (Šumrada, 2005)



Slika 7: Struktura mreže neenakih trikotnikov. Velikost trikotnikov in posledično natančnost DMT je odvisna od gostote posnetih točk. Med tem, ko so točke zelo zgoščene v zgornjem levem kotu, pa je število le-teh v sredini bistveno manjše.

Glavne prednosti mreže neenakih trikotnikov v primerjavi z rastrskim digitalnim modelom terena so:

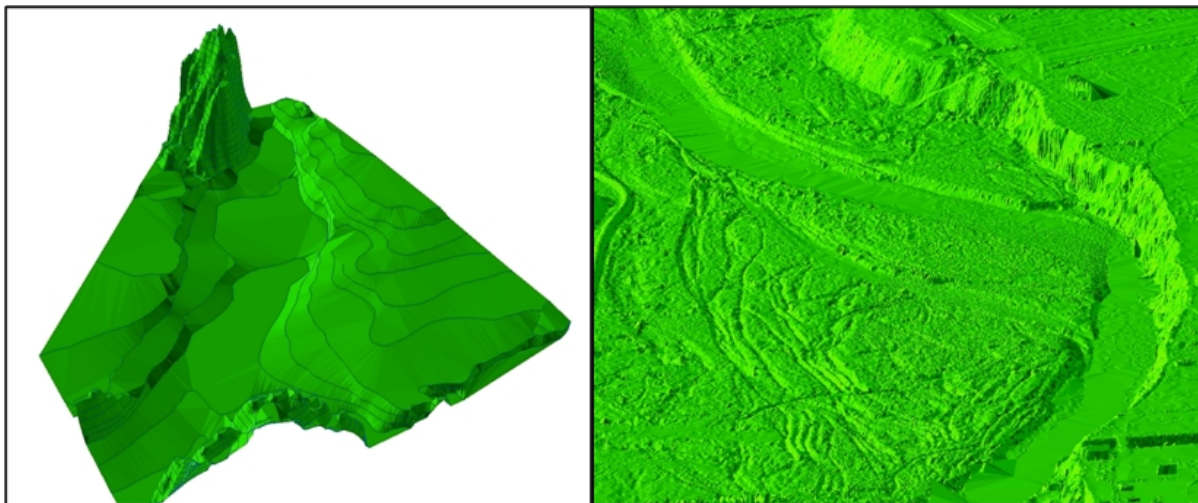
- Manjša potrebna količina podatkov in posledično manjša potrebna (uporabljena) kapaciteta pomnilnika računalnika.
- Prilagodljiva resolucija – omogoča uporabo večjega števila točk za območja, kjer je potrebna večja natančnost.
- Linijski objekti, kot so ceste ali reke, so prikazani bolj natančno. Možna je uporaba različnih vhodnih podatkov (niz podatkov koordinat točk (X,Y,Z) , izohipse, digitalni model terena).
- Določanje poplavnih območij je pri uporabi HEC-GeoRAS-a mogoče le z uporabo TIN-a.

Z GIS orodji lahko prikazujemo 3-dimenzionalno podobo terena s pomočjo starejših tehnik, kot so uporaba izohips, senčenje, idr.

DMT (*digitalni model terena*) je metoda, ki temelji na rastrski strukturi podatkov. Raster je element podoben matriki in je navadno sestavljen iz celic kvadratne oblike. Vsaka celica nosi informacije. V primeru prikaza topografije terena je to višina točk terena, ki sovpadajo s

posamezno celico. DMT je le ena od mnogih okrajšav, ki imajo podoben ali enak pomen (DHM- digital height model = digitalni višinski model, DGM - digital ground model = digitalni model zemeljskega površja, ipd). Termin digitalni model je pogosto uporabljen pri digitalni predstavitvi topografije terena, čeprav se bolj podrobno termin nanaša na rastrski model¹⁷.

Za pripravo podatkov o prečnih profilih lahko uporabimo digitalni model terena (DMT). DMT je model terena, kateremu so dodane glavne topografske značilnosti terena, kot so to denimo padnice, kote, grape, grebeni itd.¹⁸ DMT je izdelan na podlagi obsežnih meritev na terenu s pomočjo različnih metod daljinskega zaznavanja in klasičnih geodetskih meritev. Najnatančnejše modeliranje lahko izvedemo iz točk izmerjenih s pomočjo LIDAR tehnike (*Light Detection and Ranging*). Zajem podatkov tu poteka s pomočjo aktivnega senzorja v obliki laserskega tipala pritrjenega na letalo, helikopter ali vesoljsko plovilo. Na ta način dobljeno bazo podatkov, ki opisujejo topografijo terena, sestavljajo točke zapisane v obliki XYZ koordinat posameznih točk terena. S pomočjo teh podatkov lahko dovolj natančno ponazorimo teren tudi za hidravlično analizo.



Slika 8: Na levi je prikazan model terena izdelan na podlagi izohips, na desni pa model detajla istega območja izdelan s podatki merjenimi s tehnologijo LIDAR.

TIN ima nekaj izrazitih prednosti v primerjavi z rastrskim DMT (slika 5). TIN podaja obravnavano območje s pomočjo mreže sklenjenih in neprikrivajočih se trikotnikov, ki se

¹⁷ (Burdziej, 2003)

¹⁸ (Šumrada, 2005)

stikajo in se razlikujejo po obliki in velikosti. Iz točkovnih višinskih vrednosti lahko tako mrežo ustvarimo precej hitreje kot z ustrezno mrežno interpolacijo. Takšna oblika je tudi bolj primerna za shranjevanje podatkov o črtah spremembe naklona (npr. brežine, nasipi, ipd.), višinskih točkah itd. Pri TIN lahko tudi poljubno zgostimo točke s katerimi predstavljamo relief, kar je prav tako ena večjih prednosti modela TIN.

Večina DMT je zadovoljivo natančnih za splošen prikaz terena. Pri zajemu geometrijskih podatkov za hidravlično analizo pa je potrebna večja natančnost. LIDAR tehnika rešuje poleg problema natančnosti tudi težavo, ki se pojavlja pri DMT izdelanih na podlagi digitaliziranih kart. Te namreč niso vsebovale natančnih podatkov o konfiguraciji, rečne struge pod vodno gladino in posledično njene globine. Navadno so prečni profili izmerjeni na precej velikih medsebojnih razdaljah, kar privede do napak pri interpolaciji točk ob izdelavi TIN s samo izmerjenimi točkami, ki jo program izvaja med seboj najbližjimi višinskimi točkami. Veliko naravnih prvin (npr. skalna stena, soteska,...) in tudi grajenih (npr. zidovi, mostovi ..) objektov ima lahko različno vrednost višine, ki se nahajajo v prostoru z istimi koordinatami x in y. Običajni DMT tega problema ne more popolnoma rešiti, lahko pa ga izboljšamo z večjo gostoto točk. Takšen DMT je ponekod imenovan tudi 2,5-dimenzionalen.

2.4.2 Tehnike pridobivanja prostorskih podatkov za izdelavo DMT

Danes so na voljo številne tehnike zajema podatkov topografije terena. Nekatere med njimi so preproste in hitre, druge precej kompleksne in zahtevajo veliko časa. Na kratko opišimo nekatere:

- **Zajem podatkov iz obstoječih kart**

Linije izohips ali točke z znanimi višinskimi kotami lahko digitaliziramo ter s pomočjo ene od tehnik interpolacije izdelamo DMT. Ta metoda je sicer cenovno ugodna in tudi relativno hitra, natančnost pa je odvisna od kvalitete in natančnosti kart, ki pa je navadno premajhna za izdelavo DMT, ki bi omogočal natančnejše analize.

- **Geodetske meritve**

Tahimetrski inštrumenti, kot so klasični distometri, teodoliti in sodobnejše naprave (npr. GPS) omogočajo meritve koordinat X, Y, Z točk terena ter sestavo mreže točk s primerno medsebojno razdaljo. Ob dovolj veliki gostoti izmerjenih točk takšen način sicer omogoča izdelavo natančnega DMT, vendar pa je ta tehnika zaradi velike porabe časa dokaj neuporabna za posnetek večje površine.

- **Foto-grametrija**

Foto-grametrija preučuje in obdeluje metode merjenj dimenzij predmetov, ki se nahajajo na perspektivnih fotografskih in digitalnih posnetkih. Na podlagi kombinacije aerofoto ali satelitskih posnetkov lahko določimo koordinate X, Y, Z točk površja. Na voljo so programska orodja, ki omogočajo avtomatično triangulacijo, kar občutno zmanjša čas obdelave in je zato metoda primerna tudi za masovno pridobivanje geografskih podatkov na podlagi ortofoto posnetkov. Največ se uporablja zlasti pri izdelavi zemljevidov.

- **Aktivni senzorji**

Poznamo različne vrste aktivnih senzorjev, ki jih lahko uporabimo za pridobivanje podatkov o terenu. Pridobivanje slik terena s pomočjo mikrovalovnega radarja temelji na oddajanju in sprejemanju dveh mikrovalovnih signalov iz dveh ločenih anten montiranih na isti platformi. Na podlagi izmerjenih odbitih signalov in v naprej poznane lokacije senzorja je določena višina in lokacija posamezne točke.

Sodobnejša tehnika je lasersko skeniranje (LIDAR). Deluje na podoben način, le da uporabljamo tu laserske signale. S pomočjo GPS naprave je določena natančna lokacija platforme, kar nudi osnovo za lociranje ostalih točk. Zajem podatkov z LIDAR tehnologijo je podrobno opisan v poglavju 2.4.4.

2.4.3 Tehnike snemanja batimetrije

Običajno je potrebno batimetrijo, tj. geometrijo dna vodnih teles, posneti posebej, saj prihaja na vodni gladini do loma ali celo odboja signalov. Zato uporabimo druge ustrezne metode in sicer:

- Geodetske meritve z uporabo tahometra ali GPS naprav. Ta metoda je primerna za plitvejša in manjše odseke.
- Meritve iz plovila s pomočjo merilnih lat. To je zelo počasen postopek, ki je prav tako zelo omejen glede globine vode.
- Uporaba ultrazvočnih inštrumentov na plovilih, kjer s pomočjo zvočnih signalov, ki se v vodi gibljejo zelo hitro in se odbijajo na rečnem dnu, na podlagi meritve časa med oddajo in prejetjem signala določamo globino. Prav tako je potrebna oprema za določanje točne lokacije merilnih naprav, kar nudi osnovo za določitev koordinat X, Y, Z posameznih točk.
- Posebna vrsta laserskega skeniranja, kjer se uporabljajo tako infrardeči kot tudi modro-zeleni žarki. Med tem ko se infrardeči žarki odbijejo na vodni gladini pa modro-zeleni prodrejo skozi vodo in se odbijejo šele na dnu. Bistvena predpostavka pri tem postopku je, da je voda dovolj bistra in kar se da mirna. V nasprotnem primeru se žarki odbijejo na disperzijskih delcih, kar privede do napak. To je tudi vzrok, da metoda ni primerna za reke, kjer se pojavlja turbulentni tok, ki povzroča dviganje in lebdenje delcev.

Kratek pregled pokaže, da je priprava geometrijskih podatkov za hidravlične analize lahko zahtevna naloga. Sodelovanje pri mednarodnem projektu je omogočilo dostop do LIDAR tehnologije, zato smo ta način priprave podatkov uporabili za hidravlične izračune.

2.4.4 LIDAR tehnologija

Tako kot večina tehnik, kot so GPS ipd., je bil tudi LIDAR (*LIDAR tehnologija - Light Detection and Ranging*) v prvi vrsti razvit za vojaške potrebe, kasneje pa se je njegova uporaba razširila tudi na področje civilnih potreb, kjer se prav tako močno uveljavila. Ta hitro

razvijajoča se tehnika temelji na daljinskem zaznavanju s pomočjo laserskega tipala, ki je lahko pritrjeno na zračna plovila (letala, helikopterji) ali na vesoljsko plovilo. Takšno tipalo spada med aktivne senzorje daljinskega zaznavanja, kjer je sistem sam sebi vir energije in ni odvisen od zunanjih virov, kot so npr. optični sistemi.

Uporabnost in razširjenost je botrovala številnim sistemom, ki so danes na voljo tudi za komercialno uporabo. Sistem laserskega skeniranja sestoji iz komponent na plovilu in komponent za obdelavo podatkov. Lasersko tipalo, ki je sestavljeno iz laserja, oddajnika, sprejemnika, detektorja signala, ojačevalca in ostalih elektronskih komponent, je le del sistema na plovilu. Prav tako nepogrešljivi so tudi radarska antena, GPS (Global positioning system), IMU (inercijska merilna enota) ter video kamera ali fotografski aparat za dodatno dokumentiranje snemanja terena.

Za merjenje topografije terena pod vodno gladino, še zlasti pri večjih globinah, se uporablja posebna vrsta tehnologije LIDAR, ki temelji na principu DIAL – Different Absorption LIDAR. Razvit je bil za merjenje koncentracije posameznih plinov v atmosferi. Pri tem sistemu se uporabljata dva laserja z različnima valovnima dolžinama poslanih signalov in sicer infrardeči ter modro-zeleni žarki. Deluje podobno kot sonar le da namesto zvočnih uporablja svetlobne signale. Med tem ko se infrardeči žarki odbijejo na vodni gladini, pa modro-zeleni prodrejo skozi vodno telo in se odbijejo od rečnega ali morskega dna.

2.4.4.1 Delovanje sistema LIDAR

Osnova enote za zajem podatkov je aktivni skener, ki deluje na principu impulzne telemetrije z laserjem v bližnjem infrardečem delu svetlobnega spektra. Inštrument pošilja laserske impulze proti tlorisu ter prejema odbite signale. Na podlagi časa potovanja signala, ki je merjen z natančnostjo 10^{-10} sekunde, je določena razdalja med plovilom in terenom. Z napravo GPS se določi natančna pozicija višinometra. Navadno se uporablja še dodatni, na površini zemlje lociran GPS prejemnik, katerega lokacija je določena s točkami na zemeljskem površju. Ta sprejemnik skupaj s sprejemnikom na plovilu sestavlja DGPS sistem, ki zagotavlja natančnejše določeno pozicijo. IMU sistem meri višino plovila. Kombinacija teh treh sistemov omogoča poznavanje natančne pozicije letala in razdalje med plovilom in površjem

ob vsakem pulzu in na podlagi tega vsaka izmerjena točka dobi absolutne koordinate v 3-razsežnem prostoru. Celotni sistem LIDAR prikazuje spodnja slika.



Slika 9: Sistem LIDAR¹⁹.

Celota je visoko natančen in avtomatiziran sistem, ki omogoča pridobivanje podatkov terena velikih površin z natančnostjo 10 do 15 centimetrov. Pri LIDAR inštrumentih je navadno izmerjena ena točka na površino, veliko od 4 m² do 12 m². Za izdelavo natančnega DMT pri najnižjih stroških se meritve opravljajo z višine 900 m nad tlemi s kotom skenerja 32°, pri čemer je pokrit pas površja širine 500 m. Laserski skener zapiše vsaj 1000 podatkov na sekundo. Za natančnejše meritve se navadno uporablja LIDAR, pritrjen na helikopter, kar omogoča nižjo višino leta, manjšo hitrost in izmero koordinat 10 do 20-tih točk na kvadratni meter.

Na z gozdovi poraščenih in urbanih območjih lahko pulz zadane v več kot en objekt, kar ima za posledico več odbitih signalov. Takšni večkrat odbiti signali lahko služijo za ugotavljanje višine in oblike nekega objekta ali vegetacije. Zadnji odbiti signal se upošteva kot točka terena za DMT. Avtomatična ekstrakcija objektov in razvoj modela terena je še vedno v

¹⁹ (Alemseged, 2005)

razvoju in je odvisna od aerofoto posnetkov. Ko bo tehnika dovolj napredovala, bo gotovo tudi na tem področju prišla v uporabo, saj bi zaradi natančnosti lahko dobili dobre modele zgradb.

2.4.4.2 Natančnost sistema LIDAR

Natančnost lahko ločimo na dve veji in sicer: natančnost samega merilca in natančnost lociranja, ki je predvsem odvisna od natančnosti GPS naprave. Glavni faktor, ki najmočneje vpliva na laser, je atmosfera. Zaradi vlage in prašnih delcev prihaja do lomljenja, absorpcije, razprševanja laserskih žarkov ter do podaljševanja časa potovanja signalov na poti do zemeljskega površja in nazaj. Iz tega vzroka je glavni faktor, ki vpliva na natančnost, višina letenja nad opazovanim terenom. Natančnost se bistveno zmanjšuje z večanjem višine leta. Navadno se upošteva standardna sestava atmosfere, kar prav tako prispeva k napaki meritev, in sicer okoli 5 cm pri višini leta na deset tisoč metrov. Ostali dejavniki, ki vplivajo na natančnost, so napaka GPS, kot skeniranja, topografija terena in pokrovnost površja.

Prednosti, ki jih prinaša LIDAR, predstavljajo potencial za reševanje problemov povezanih z nenatančnimi topografskimi podatki. Glavna prednost je natančna digitalna narava podatkov, ki je manj podvržena horizontalnim napakam kot podatki točk dobljenih s pomočjo izohips. S pomočjo LIDAR naprav dobimo točke terena z natančnostjo okoli 15 cm in prostorsko resolucijo 1 m. Pri hidravličnem modeliranju se kot prednost pokaže tudi možnost hitre pridobitve podatkov in ponavljajočih preletov nad poplavnimi območji in s tem spremljanje morebitne spremembe topografije terena v času poplav. Na ta način dobimo praktično *in-line* spremljanje sprememb topografije in razvoj dogodkov ob poplavah.

Visoko resolucijski model prinaša prednosti tudi v primeru, ko ima lahko majhen element terena, kot so nasipi, manjše zajeze, jarki, velik vpliv tako na vodotok sam, kot tudi na začetek in na način poplavljanja. LIDAR omogoča tudi gosteje izmerjene točke na takšnih mestih, kot je to prikazano v naslednjem poglavju na sliki 17, kjer so točke zgoščene na brežinah kanalov. To so točke prelivanja vode iz glavnega korita in so zato pomembne za natančnejše določanje pretoka, pri katerem reka prestopi bregove in začne poplavljeni.

2.4.5 Pomembnost natančnosti DMT za hidravlične analize

Ko želimo uporabiti GIS orodje za pripravo geometrijske podlage za izvedbo hidravličnih analiz, je zelo pomembna natančnost DMT. Predvsem vertikalna natančnost neposredno vpliva na hidravlične izračune. To je še posebej pomembno pri obravnavi bolj ravninskih območij, kjer prihaja do majhnih razlik v nadmorski višini na velikih površinah. V primeru poplav na takšnih območjih lahko voda prodre tudi do razmeroma zelo oddaljenih mest oz. področij. V primeru, da je model odvisen od natančnosti podatkov topografije terena, je visoko natančen DMT nujno potreben za kartiranje območij, ki so izpostavljena nevarnostim poplav. Takšen model, predvsem ko gre za analiziranje obsežnejših površin terena, lahko zagotovimo le s podatki, zajetimi s pomočjo tehnologije laserskega skeniranja - LIDAR. Rezultati te naloge bodo hkrati tudi prikaz uporabe tega pristopa na ravninskih področjih v Republiki Sloveniji.

2.5 Opis programskega orodja

V diplomski nalogi je bila izdelana primerjalna analiza hidravličnih modeliranj lastnosti vodotokov in poplavnih območij s pripravo geometrije na podlagi različnih virov topografskih podatkov za izdelavo digitalnega modela terena in posledično geometrije odseka vodotoka. Pri tem je bilo uporabljeno GIS orodje ArcGIS z razširitvijo HEC-GeoRAS. Dolgo časa je zahtevalo predvsem vnašanje geometrije pri matematičnih modelih v obliki podajanja X,Y,Z koordinat posameznih točk prečnih profilov in razdalj med njimi. V primeru, ko mreža prečnih profilov ni dovolj gosta, je takšen postopek dokaj nenatančen. To težavo bi lahko rešili s pomočjo izdelanega dovolj natančnega DMT in prostorskega informacijskega sistema. Zaradi zapletenosti postopkov in potrebi po dodatni usposobljenosti inženirjev ta postopek dolgo ni prišel v veljavo. V želji izboljšati natančnost modelov so pritegnili strokovnjake s področja prostorskih informacijskih sistemov. Tako je bil prav v ta namen razvit programski komplet, ki omogoča pripravo prostorskih podatkov, primernih za uporabo v programih za hidravlične izračune. Postopki omogočajo zajeti rečno geometrijo tudi tistim, ki nimajo veliko izkušenj z delom na GIS področju.

2.5.1 ESRI ArcGIS

Programsko orodje ArcGIS je razvil ameriški inštitut *ESRI (Environmental System Research Institute)*, ki se že od leta 1969 ukvarja z reševanjem geografskih problemov s pomočjo računalniške programske opreme. Tako so razvili tehnologijo za uporabo na najrazličnejših področjih, kar nam pomaga pri vizualnem prikazu, analizah, raziskovanju, obdelavi GIS podatkov in iskanju rešitev. Danes nam nudi možnost za izdelavo različnih kart. Za poljubno območje lahko izdelamo topografske karte, rastrske izrise, prikaze infrastrukture in drugih podatkov. Lahko izvedemo zahtevnejše naloge, kot je izdelava tako imenovanih inteligentnih kart, ki poleg zunanjega izgleda ponujajo tudi prikaz medsebojnih vplivov dejavnikov na zemeljskem površju. Nudi nam programska orodja, s pomočjo katerih lahko izvedemo na podlagi obstoječih prostorskih podatkovnih baz najrazličnejše transformacije v nove sklope podatkov.

Za nekatera posamična področja so razvili dodatne razširitve, ki uporabniku na eni strani olajšajo delo, ter mu po drugi nudijo še več možnosti pri obdelavi podatkov in prikazu rezultatov. Pri hidravličnih modelih lahko izboljšamo kvaliteto analiz z razširitvama *3D Analyst* in *Spatial Analyst*.

2.5.1.1 Razširitev *3D Analyst*

Razširitev *3D Analyst* omogoča uporabniku izdelavo dveh vrst modelov, izdelanih v obliki pravilne mreže ali nepravilne triagonalne mreže. S pomočjo le-teh lahko izdelamo realistične modele terena ali pa prikažemo različne gradiente. *3D Analyst* nam omogoča kreiranje modela površin na podlagi podatkov različnih formatov. S pomočjo interpolacije omogoča izdelavo modela TIN na osnovi podatkov točk, linij ali poligonov. Na modelu neke površine lahko dobimo višine posameznih točk, izrise izohips, dobimo podatke o naklonih površin, perspektivo poljubne točke ali pa z njim interpretiramo rezultate, ki so tako lažje razumljivi. Tudi kadar imamo podatke le za 2D model, si lahko pomagamo s *3D Analystom*. Prikaz lastnosti poljubnih tematskih podatkov si lahko olajšamo s prikazom v obliki 3D diagramov. Tak primer je prikaz gostote prebivalstva in podobno.

2.5.1.2 Razširitev *Spatial Analyst*

Spatial Analyst je razširitev ArcView-ja, ki pomaga uporabniku pri odkrivanju in raziskovanju povezave med posameznimi podatki. Z njegovo pomočjo izdelamo rastrske modele za ponazoritev najrazličnejših podatkov, kot na primer hitrost rasti gostote prebivalstva. *Spatial Analyst* nudi orodja za oblikovanje podobe zemeljskega površja in analiziranje značilnosti le-tega.

2.5.1.3 HEC-GeoRAS

HEC-GeoRAS je razširitev programskega orodja *ArcGIS*, ki omogoča pripravo prostorskih podatkov za hidravlično obdelavo s programom *HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System)*. V slednjem nato dopolnimo manjkajoče hidravlične podatke in opravimo izračune. Rezultate najprej analiziramo s *HEC-RAS-om* ter jih kasneje prenesemo nazaj v *HEC-GeoRAS*. Le-ta nam omogoča kartiranje poplavnih površin in ne le bolj natančnega izrisa rečnega sistema in poplavnih območij v 3D obliki, temveč nam nudi tudi izris mreže izobat (linije, ki povezujejo točke z enako globino vode) in izotah (linije, ki povezujejo točke z enako hitrostjo vode). Na ta način dobimo vsak trenutek lahko globino oz. hitrost vode v poljubni točki rečnega korita in poplavnih območij ter izvedemo različne simulacije procesov zaradi poplavnih tokov. Profili vodne gladine in podatki o hitrosti vode, ki jih izračunamo v *HEC-RAS-u* in jih prikažemo s *HEC-GeoRAS-om*, nam dajejo možnost za kreiranje kart poplavnih območij (slika 7), predvidevanje poteka poplavnih tokov, pravočasno opozarjanje ljudi nanje in ocenjevanje škode, do katere bi prišlo v primeru zvišanja vodostaja.

HEC-GeoRAS je zbirka orodij razširitve programa *ArcGIS*, ki ga vedno uporabljamo v kombinaciji s *3D Analyst* in *Spatial Analyst*, s katerimi na podlagi *DTM* pripravimo *HEC-RAS* vhodno datoteko. Medtem ko nam *3D Analyst* omogoča interpolacijo podatkov digitalnega modela, lahko s pomočjo razširitve *ArcGIS-a Spatial Analyst* prikažemo rezultate vodnih globin in hitrosti vode v modelu po končanih izračunih s pomočjo rastrske mreže ali pa oblikujemo histograme. Digitalni model terena obravnavanega območja mora biti za obdelavo s *HEC-GeoRAS-om* podan v obliki nepravilne triagonalne mreže (*TIN - triangulated irregular*

network) in predstavlja površinsko razgibanost tako rečnega kanala kot pripadajočih poplavnih površin.



Slika 10: Prikaz kartiranja poplavnih površin reke Soče pri pretoku 2000 m³/s na digitalnem modelu terena.

Glavna zahteva pri modelu terena je dovolj velika natančnost, ki omogoča vnos podatkov in linij, potrebnih za izdelavo modela. Ko je model terena v TIN formatu pripravljen, se lahko začne vnos podatkov rečnega sistema. Vnašamo podatke o celotnem rečnem sistemu - potek glavnega in stranskih rečnih kanalov, linij rečnega toka, bregov, nasipov, linije prečnih profilov, področja neefektivnega toka in področja, kjer se voda zaustavlja in ne odteka površinsko – seveda, če le-ta obstajajo. Program omogoča oblikovanje posameznih področij znotraj rečnega sistema, za katere definiramo njihovo rabo, kar nam daje osnovne podatke za določevanja Manning-ovih koeficientov. Vsak sklop podatkov v program vnašamo in oblikujemo kot samostojni sloj podatkov.

2.5.1.4 Dodatne razširitve uporabljene pri delu s programom ArcGIS

Poleg zgoraj omenjenih razširitev sem v nalogi uporabil še dodatne razširitve za podporo programu ArcView, ki je starejša različica programa ArcGIS, saj omogočajo dodatne funkcije, ki jih v osnovnem paketu ni mogoče izvajati. Starejša verzija je bila uporabljena le

za izdelavo modela terena, ko sem za dodatni vir podatkov uporabil točke v HEC-RAS-u interpoliranih prečnih profilov. Proizvajalec računalniške GIS opreme ESRI je eden močnejših na tržišču, vendar pa se pri uporabnikih vedno pojavljajo zahteve, ki jih določen program ne pokriva. Pri programu ArcView pa ima uporabnik možnost, da sam zapiše kodo-zapis v računalniškem jeziku *Avenue*, v katerem je zapisan tudi sam program, kar omogoča izvajanje zelenih ukazov. Večina teh razširitev je na voljo vsem uporabnikom preko internetne strani firme ESRI. V našem primeru sta bili uporabljeni možnosti:

- **RASGeoConverter:** Ta razširitev je bila oblikovana za pretvorbo geometrijskih podatkov iz programa HEC-RAS v datoteke, ki nosijo zapise točk prečnih profilov (tudi interpoliranih), in jih lahko prebere GIS orodje²⁰. Podatke teh datotek lahko uporabimo za izboljšanje DMT v obliki nepravilne triagonalne mreže na območju rečnega kanala.
- **Poly2point:** S pomočjo te razširitve smo pretvorili linijske podatke izohips v točkovne, kar omogoča način, ki naj bi zmanjšal vpliv posameznih točk na okoliške razmere pri izdelavi TIN-a.

2.5.2 HEC-RAS

Ameriški center za hidrologijo (Hydrologic Engineering Center; HEC), ki je oddelek Inštituta za vodne vire (Institute for Water Resources; IWR), že dalj časa razvija programsko opremo za hidravlične izračune. Prve izvedbe (HEC-2) so omogočale le računanje hidravlike enodimenzijskega modela s stalnim tokom. V sredini devetdesetih let pa so začeli razvijati nove verzije, ki bi omogočile čim širšo paleto možnosti pri izračunih.

Verzija nastala konec leta 2002 in omogoča izvajanje izračuna stalnega in nestalnega toka za poljubno kompleksen rečni sistem. Analiziramo lahko tudi vpliv različnih objektov na vodotoku, kot so mostovi, prepusti, kanali, nasipi in drugo. Ena največjih prednosti novejših verzij je gotovo možnost izvedbe modela eno dimenzijskega nestalnega toka v odprtih

²⁰ (Shi, 1999)

vodotokih za različne režime toka. Dobljeni rezultati nam pokažejo razmere v posameznih prečnih profilih, mostovih, prepustih, krivulje pretokov in energijskih izgub, nivojev vodne gladine idr. v grafični kot tudi v tabelarični obliki. Na voljo so nam grafični rezultati v dvodimenzijski obliki za prečne prereze, shema rečnega sistema, hidrogrami, pa tudi tridimenzijski prikaz rečnega korita skupaj z nivoji vodne gladine izračunanih pretokov.

Z našo metodo dela pa bomo lahko oblikovali geometrijo vodotoka s pomočjo ArcGIS razširitve HEC-GeoRAS, kjer bomo tudi analizirali rezultate. Izračuni, prikazani s pomočjo HEC-GeoRAS-a v obliki poligonov gladine vode, nudijo veliko boljše prostorsko predstavbo, saj jih lahko povezujemo tudi z drugimi prostorskimi podatki v GIS sistemu. Dandanes, ko je mnenje javnosti o izvedbi posameznih projektov vse bolj pomembno, lahko s simulacijami zelo nazorno predstavimo poseg v prostor tudi širši javnosti.

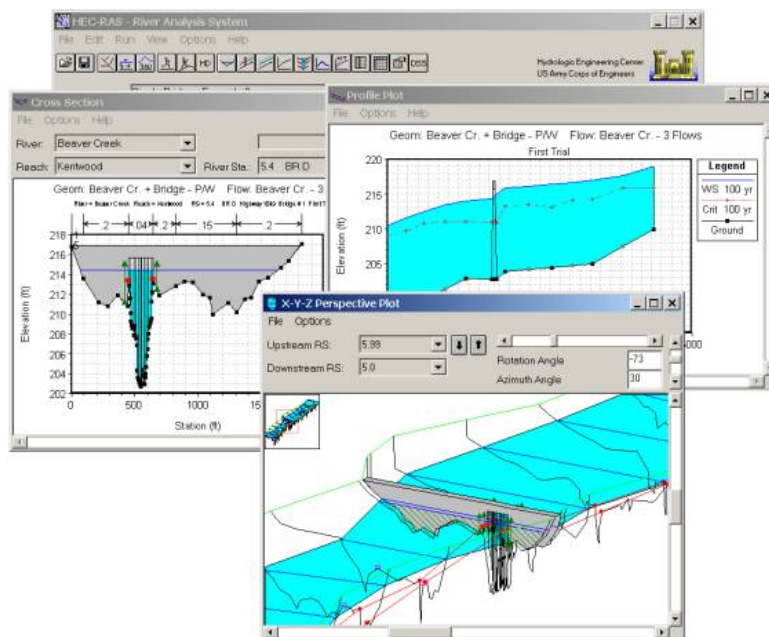
2.5.2.1 Račun 1D stalnega toka

V nalogi je bil uporabljen izračun nivojev vodne gladine ob stalnem enakomernem toku. Omogoča obravnavo mirnega in deročega toka v mreži kanalov razvejanega rečnega sistema ali posameznega odseka vodotoka.

Predpostavke na katerih je zasnovan program:

- tok je stalen,
- tok je enodimenzionalen,
- tok se spreminja postopoma (op. $Q=\text{konst.}$, $S=S(x)$), (razen pri prepustih, mostovih ipd.),
- vzdolžni padec vodotokov naj ne bo večji od 10%.

Pri toku so upoštevane le komponente hitrosti v smeri toka. Omejitve pri padcih so pogojene z globinami vode, katere so merjene vertikalno.



Slika 11: Orodna okna programa HEC-RAS.

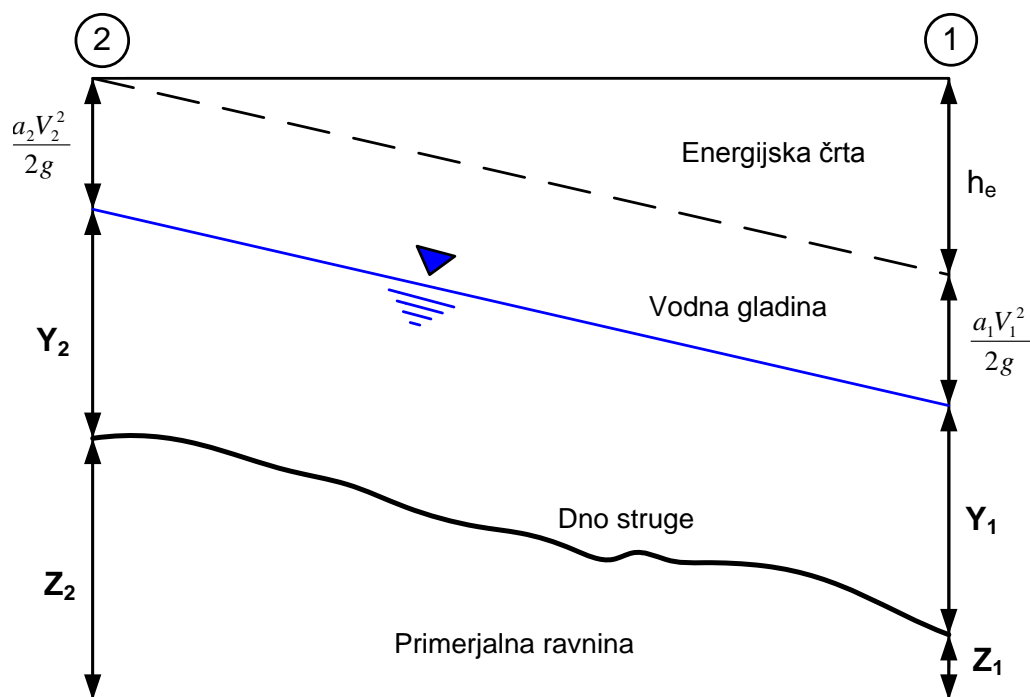
Računanje hidravličnih lastnosti vodotokov temelji na energijski enačbi:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} - Y_1 - Z_1 - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} = h_e \quad (18)$$

kjer pomeni:

- $Y_{1,2}$ globina vode v prečnem prerezu,
- $Z_{1,2}$ kota najnižje točke tal posameznega profila,
- $V_{1,2}$ srednja pretočna hitrost,
- $\alpha_{1,2}$ Corrollisov energijski koeficient,
- g težnostni pospešek,
- h_e energijska izguba med profiloma,

Posamezne parametre prikazuje tudi slika 10.



Slika 12: Grafični prikaz parametrov energijske enačbe.

Padec energije med dvema prečnima profiloma h_e vsebuje izgube zaradi hrapavosti in sprememb kinetične energije zaradi razširitve oz. zožitve prereza in je izračunan po sledeči enačbi:

$$h_e = L \cdot \bar{S}_f + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} \right| \quad (19)$$

Kjer pomeni:

L razdalja med profiloma,

\bar{S}_f povprečni energijski padec zaradi hrapavosti,

C koeficient razširitve oz. zožitve

Padec energije zaradi hrapavosti se izračuna po enačbi:

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad (20)$$

Q predstavlja pretok K pa prevodnost in je določena na podlagi enačbe:

$$K = \frac{1}{n_g} \cdot A \cdot R^{2/3} \quad (21)$$

kjer pomeni:

- n_g Manningov koeficient hrapavosti,
- A površina prečnega preseka,
- R hidravlični polmer.

Glavna enačba velja za situacije, kjer prihaja do postopnih sprememb nivoja vodne gladine v posameznih profilih. Izračun vodnih gladin v profilu se računa iz enega prečnega profila v naslednjega s pomočjo reševanja energijske enačbe z interaktivno metodo imenovano standardna metoda koraka. Za mirni tok je potrebno podati robni pogoj dolvodno, saj poteka račun gladin vode od profila do profila v nasprotni smeri toka, torej gorvodno. Glavni parameter, ki vpliva na vrednosti izračunanih količin, je Manningov koeficient hrapavosti. Program predpostavi miren režim toka. Če je predpostavka pravilna, preverja s Froudovim številom v vsakem prečnem profilu.

Froudovo število se določi na podlagi sledeče enačbe:

$$Fr = \sqrt{\frac{V^2}{gY}} \quad (22)$$

Kjer pomeni:

- Fr Froudovo število,
- V srednja pretočna hitrost,
- Y globina vode v prečnem profilu,
- g težnostni pospešek.

$Fr < 1$	<i>Mirni režim toka</i>
$Fr = 1$	<i>Kritični tok</i>
$Fr > 1$	<i>Deroči režim toka</i>

V teoriji hidravlike velja, da je meja med mirnim in deročim tokom vrednost Froudovega števila $Fr = 1$. Vendar je Froudovo število (Fr) za naravne vodotoke, kjer rečna korita niso

pravilnih oblik, možno izračunati le nenatančno. Zato program uporablja mejo med mirnim in deročim tokom pri vrednosti $Fr = 0.96$. Dokler je režim toka miren, kar je običajno za tok v odprtih vodotokih, poteka izračun, kot smo omenili od dolvodnega profila (spodnji robni pogoj) proti gorvodnemu. V primeru, da nastopi deroči tok, poteka izračun v obratni smeri. Program je primeren za analiziranje poplavnih tokov in ugotavljanje primernosti možnih proti poplavnih ukrepov proti njim, kot so izgradnja kanala in nasipov.

Lokalne izgube

V primerih, ko prihaja do bistvenih hipnih sprememb, med katere sodijo izračun neenakomernega vodnega toka (pragovi, prepusti, mostovi..), hidravlike ob mostovih in račun vodnega nivoja na sotočjih, se izračun izvede s pomočjo enačbe gibalne količine. V teh primerih je energijska enačba neuporabna. Mostove, prepuste, jezove in druge objekte, ki povzročajo večje motnje vodnega toka, lahko obravnavamo v sklopu simulacije hidravličnih razmer na lokalnih ovirah. Pri vodnih objektih moramo biti pazljivi, da imamo vedno definiran prečni profil tik pred in za samim objektom.

Enačba za račun gibalne količine ima obliko:

$$\sum F_x = m * a \quad (\text{drugi Newton-ov zakon}) \quad (23)$$

kjer pomeni:

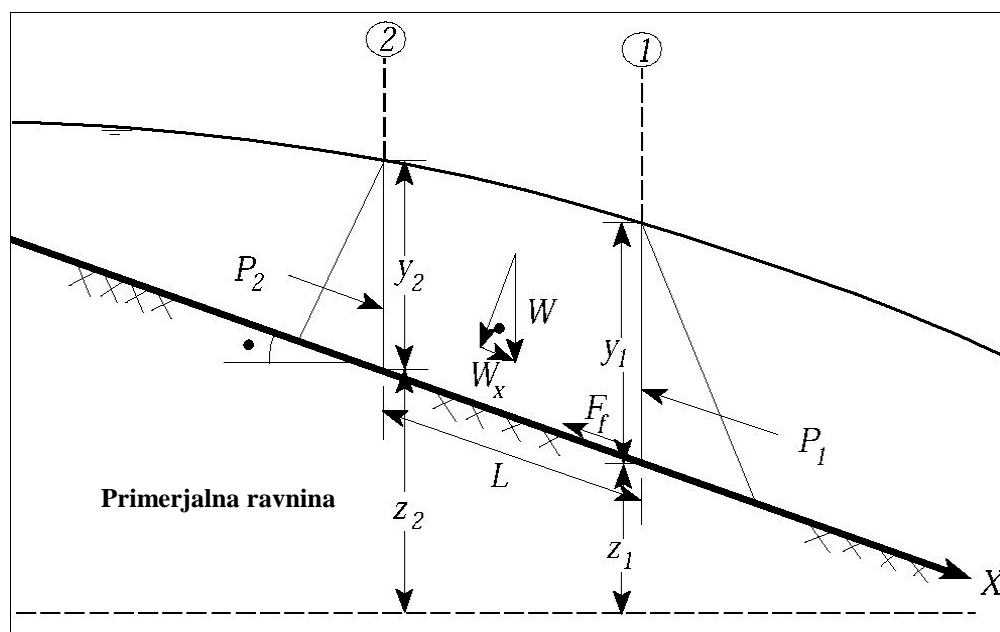
F_x	sila,
m	masa,
a	pospešek

Spremembo gibalne količine v časovni enoti lahko po 2. Newton-ovem zakonu za delček tekočine v presekih 1 in 2 zapišemo:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad (24)$$

kjer pomeni:

- P hidrostatični pritisk v presekih 1 in 2,
- W_x sila teže vode v smeri x,
- F_t sila trenja,
- Q iztok,
- ρ gostota vode,
- ΔV sprememba hitrosti v x smeri.



Slika 13: Prikaz osnovnih elementov, ki nastopajo v enačbi gibalne tekočine.

Enačba za izračun izgub, ki so posledica razširitve oziroma zožitve računskih prerezov tako dobi obliko:

$$h_0 = C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} \right| \quad (25)$$

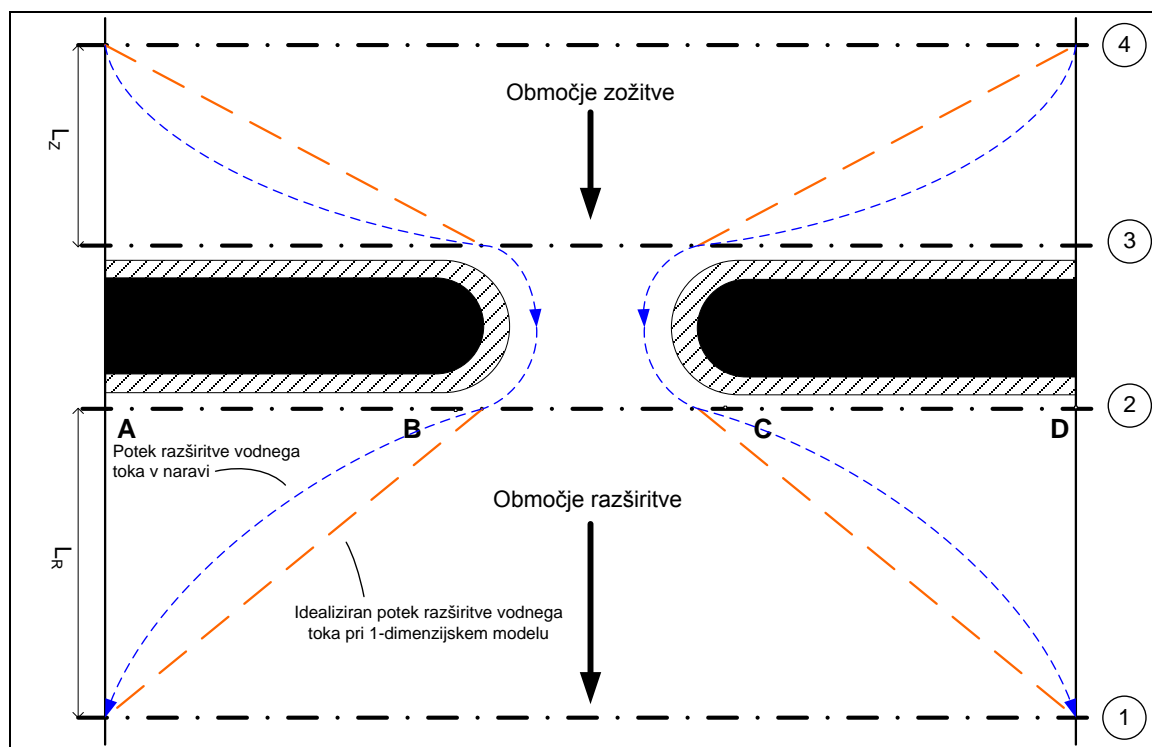
Kjer pomeni:

- h_0 energijska izguba
- C koeficient razširitve oz. zožitve.

Tip spremembe prečnega prereza	Koeficient C	
	Razširitev	Zožitev
Postopna sprememba	0.3	0.1
Običajna oblika mostu	0.5	0.3
Hipna sprememba	0.8	0.6

Tabela 1: Vrednosti koeficienta razširitve oziroma zožitve za posamezne primere.

Objekti predstavljajo motnjo vodnemu toku, zato je potrebno na teh mestih zgosti prečne profile, da lahko program natančneje izračuna spremembe vodnega toka in s tem povezane energijske izgube (slika 11).



Slika 14: Potek razširitve oziroma zožitve vodnega toka v naravi in idealiziranega v matematičnem modelu. S številkami od 1 do 4 so prikazane lokacije, kjer naj bi bili definirani prečni profili za natančnejšo analizo.

Izgube sestavljajo trije elementi in sicer:

1. Izgube nastale tik gorvodno od objekta zaradi nenadne zožitve pretočnega prereza, ki jo povzroča objekt.
2. Izgube zaradi samega objekta. Te so lahko izračunane z več metodami za različne vrste toka in za enako geometrijo objekta in sicer:
 - Tok s prosto gladino pod mostom,
 - prosti tok pod mostom in preliv čez objekt,
 - tok pod pritiskom,
 - tok pod pritiskom in preliv čez objekt,
 - tok pod pritiskom z uporabo energijske enačbe.
3. Izgube nastale tik dolvodno od objekta zaradi nenadne razširitve pretočnega prereza glede na zožitev toka, ki jo povzroča objekt.

2.5.2.2 Simulacije nestalnega toka

Z zadnjo verzijo programa HEC-RAS je možno obravnavati tudi enodimenzionalni nestalni tok. Omogoča nam, da najprej izdelamo model vodotoka, v njem opravimo izračune stalnega neenakomerne toka in nato pri istih vhodnih podatkih geometrije izvedemo še simulacijo nestalnega neenakomerne toka, tako za mirni kot tudi za deroči vodni tok. Vsi izračuni za prečne profile, mostove, prepuste in druge objekte znotraj območja toka so vključeni v analizo nestalnega toka. Ker lahko simuliramo tok v rečnem kanalu in na poplavni ravnici ločeno, ima hidravlična analiza navidezno dvodimenzionalno predstavo.

3 PRIPRAVA PODATKOV IN IZDELAVA MODELA TERENA KOT PODLAGE ZA IZDELAVO REČNE GEOMETRIJE

Izračun nivojev vodne gladine v posameznih točkah obravnavanega vodotoka in njegovih poplavnih površin poteka v več fazah. V prvi fazi je treba zbrati in obdelati potrebne podatke. To poglavje je namenjeno opisu posameznih sklopov podatkov, potrebnih za izvedbo modela. Podatki se delijo v dva večja sklopa in sicer:

- podatki geografsko informacijskega sistema obravnavanega območja z izdelavo digitalnega modela (prostorski podatki),
- hidravlični podatki.

Hidravlične podatke lahko nadalje razdelimo v podskupine:

- geometrijski podatki (prečni profili, geometrija mostov, prepustov in drugih objektov v in ob vodotoku),
- podatki koeficientov izgub (hrapavost ostenja, zožitev oz. razširitev),
- podatki o pretokih, robnih pogojih in začetnih pogojih.

Navadno pri hidravličnih modelih podajamo podatke koeficientov izgub istočasno z geometrijo, saj podajamo vrednosti *Manningovega* koeficienta hrapavosti za vsak prečni profil posebej.²¹ Pri modeliranju s kombinacijo GIS in hidravličnega orodja pa se lahko vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti podaja v enem ali drugem okolju.

Koeficiente izgub zožitev oziroma razširitev ob objektih na vodotoku podajamo skupaj s vnašanjem geometrije prečnih objektov v program HEC-RAS, saj model terena ne vsebuje vseh podatkov objektov, kot so premostitve, jezovi, prepusti ipd. Lahko pa DMT vsebuje podatke o vzdolžnih objektih, npr. železniških in cestnih nasipih, ali o nasipih za obrambo pred visokimi vodami. V primeru, da želimo analizirati vpliv npr. načrtovanih nasipov (varovalni, cestni..), moramo tudi podatke le-teh vnesti posebej, kot variantne ukrepe (scenarije).

²¹ (HEC-RAS, Hydraulic Reference Manual, 2002)

3.1 Topografski podatki

Morfologijo zemeljskega površja imenujemo topografija. Relief terena in terenske objekte delimo na naravne in antropogene elemente. Med naravne prištevamo tiste, ki so nastali izključno pod vplivom naravnega delovanja. Prav tako pa imajo na topografijo močan vpliv tudi elementi nastali s posegi človeka, kot so naselja, dnevni rudniški izkopi, kamnolomi. Natančnost izmer elementov, ki so del rečnega korita in površin, kjer se razliva voda pri višjih vodostajih, je v našem primeru bistvena. Večja natančnost zagotavlja boljšo natančnost priprave geometrije in posledično boljšo natančnost hidravličnih analiz.

3.1.1 Baza topografskih podatkov

V Sloveniji za vzpostavljanje, vzdrževanje in vodenje baze topografskih podatkov skrbi Geodetska uprava Republike Slovenije. Baza vsebuje zapise podatkov geodetskih točk, zemljiških katastrov, topografskih kart različnih meril, ortofoto posnetke in aerosnemanja itd., kar predstavlja vir poljubnih informacij za različne veje inženirskih strok.

V nalogi so bili za izdelavo digitalnega modela terena uporabljeni trije različni sklopi osnovnih topografskih podatkov terena. Prvi je bil izdelan iz digitaliziranih topografskih kart v merilu 1:25000. Te karte vsebujejo izmerjene točke, ki predstavljajo oglišča kvadrata s stranico 25 m. Ta model se je izkazal kot popolnoma neuporaben, saj je natančnost za hidravlične analize premajhna, hkrati pa tudi ne vsebuje podatkov topografije terena rečnih korit pod vodno gladino.

Težavo smo želeli rešiti z vnosom točk prečnih profilov, ki jih je izmeril Geodetski zavod Maribor leta 1982 po naročilu Soških elektrarn Nova Gorica. S temi točkami so bile nadomeščene točke kart na območju samega rečnega korita, s čimer naj bi dobili natančnejšo podobo le-tega.

Prav tako je bila za določanje rečnega sistema uporabljena na podlagi topografskih kart merila 1:25000 digitalizirana hidrografska mreža. Podatki hidrografske mreže so v kartografski bazi razdeljeni v tri sloje. Prvi sloj je točkovni in vsebuje podatke izvirov, slapov, ipd. Drugi sloj,

ki je nosilec informacij vodotokov, je linijski, tretji pa je poligonski. Kot poligoni so predstavljena jezera, akumulacije itd.

Nazadnje smo za izdelavo DMT uporabili še točke, izmerjene s sodobno tehnologijo LIDAR. Ti podatki dosegajo visoko natančnost in omogočajo izdelavo primerne DMT za pripravo geometrijske podlage za hidravlični model z dovolj visoko natančnostjo. Ker za slovensko stran nismo imeli na voljo takšnih podatkov, so bili uporabljeni podatki z italijanskega odseka reke Soče, ki so nam bili na voljo v sklopu INTERREG III.A programa SIMIS (Sistem Integriranega Monitoringa reke Isonzo – Soča).

Kot smo omenili so bili topografski podatki uporabljeni za izdelavo digitalnega modela terena, ki bo predstavljal podlago za pripravo geometrije rečnega korita in pripadajočih pribrežnih oz. morebitnih poplavnih površin.

Geometrijski podatki so sestavljeni iz:

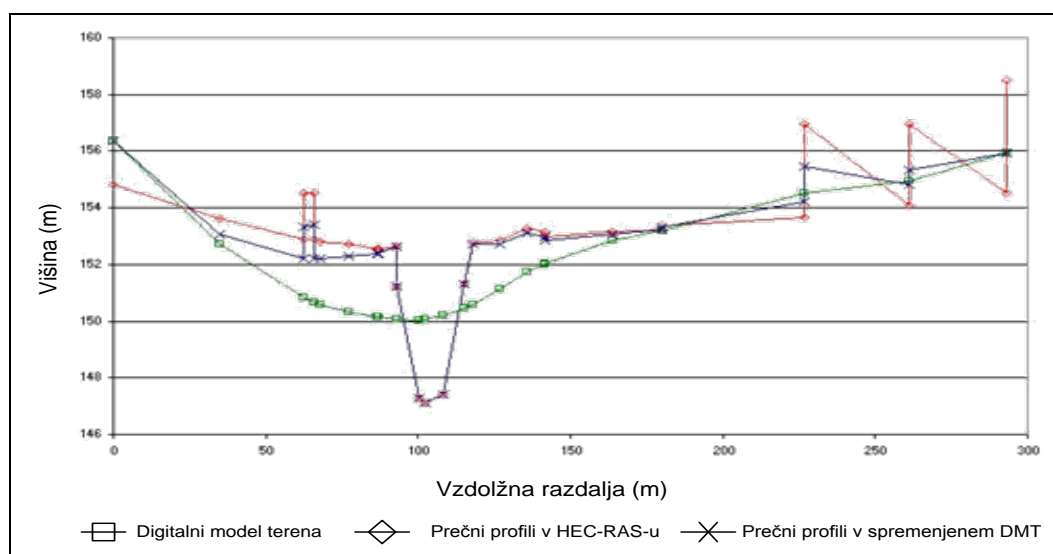
- tlorisne situacije vodotoka,
- podatkov prečnih profilov,
- podatkov koeficientov hrapavosti in
- podatkov o hidravličnih objektih (prepusti, mostovi ..).

Razširitev programskega orodja ArcGIS HEC-GeoRAS nam omogoča ekstrakcijo podatkov tlorisne situacije, rečnih bregov, prečnih profilov, nasipov, območij neefektivnega toka, določitev rabe tal itd. na podlagi digitalnega modela terena. Torej je primrni korak izdelava DMT.

3.1.2 Izdelava digitalnega modela terena

Kot že omenjeno, je bil digitalni model najprej izdelan s pomočjo GBK 25 digitaliziranih topografskih kart v merilu 1:25000. Ta natančnost je zadovoljiva za splošen prikaz terena, manj pa za natančnejše analize, kakršne so hidravlične, kjer lahko tudi objekti majhnih dimenzij močno vplivajo na dinamiko vodnega toka. Podatki GBK 25 so zapisani v vektorski

zapisu. Datoteka z podatki terena vsebuje zapise s skupinami ravninskih koordinat prelomov plastnic, ki jih združuje ista nadmorska višina.²² Podatki kart o samem rečnem koritu so zelo nenatančni in ne predstavljajo dejanske topografije terena pod vodno gladino, kar bistveno zmanjša natančnost geometrije rečnega korita. Navadno imajo točke korita na kartah prikazane višje višinske vrednosti, kar ima za posledico lahko manjšo globino korita. Napaka se pokaže pri volumnu rečnega korita, ki je precej manjši od dejanskega. Na sliki 13 je prikazana razlika med prečnim profilom dobljenim na podlagi DMT, izdelanega na osnovi digitaliziranih kart, in dejanskim prečnim profilom na istem mestu. Jasno se vidi, kakšno napako vsebuje digitalni model terena, če bi bil izdelan le na podlagi digitaliziranih geodetskih kart. Zato bi pri hidravlični analizi vodostaji dosegali višje vrednosti pri posameznih pretokih in posledično bi rezultati simulacije prikazali poplavljanja že pri manjših pretokih, kot se to zgodi v resnici. Iz tega razloga so bili za izdelavo DMT dodatno uporabljeni podatki prečnih profilov. Te prečne profile je izmeril Geodetski zavod Maribor leta 1982 po naročilu Soških elektrarn Nova Gorica, ki podatke hrani v svojem arhivu.



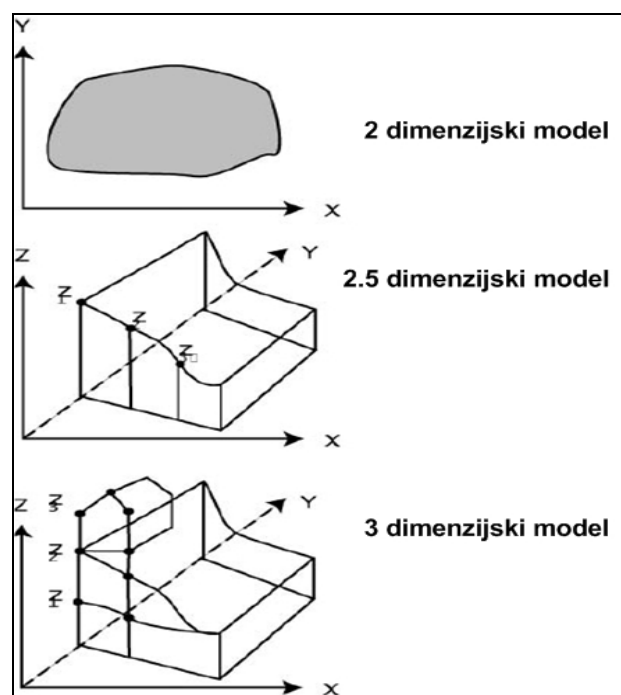
Slika 13: Čelni prikaz poteka prečnega profila dobljenega na isti lokaciji a na podlagi DMT izdelanega s pomočjo različnih sklopov podatkov.

Pri tem je treba upoštevati, da ima reka Soča od izvira dolvodno dolgo časa značaj gorske reke z velikim padcem, ponekod skupaj z njenimi pritoki celo hudourniške lastnosti. Zato

²² (Gosar, 1996)

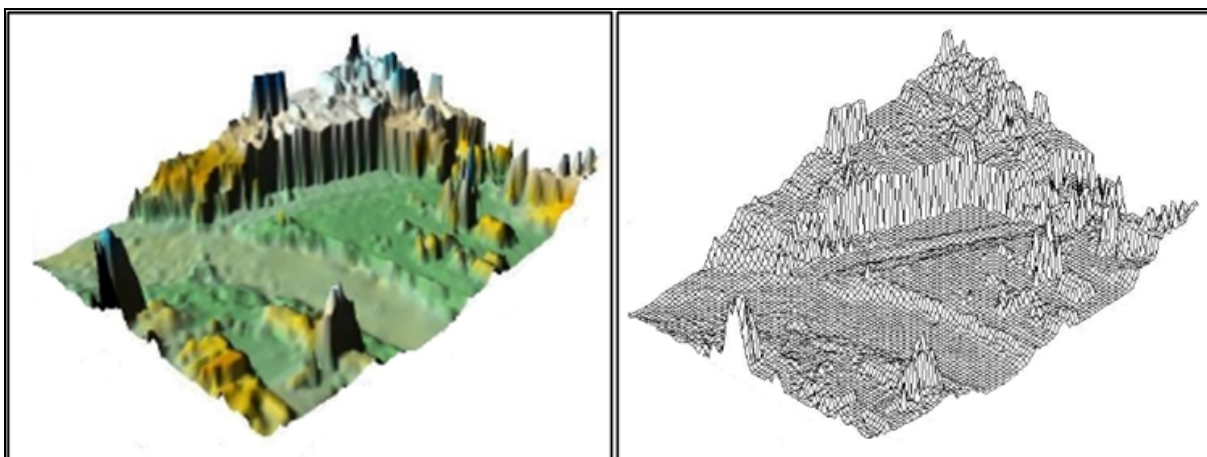
lahko ti izmerjeni podatki prav tako vsebujejo precejšnjo napako. Močno izraziti procesi erozije in naplavljanja plavin, kakršni so značilni za vodotoke z takšnimi lastnostmi, lahko relativno hitro privedejo do bistvenega preoblikovanja konfiguracije terena rečne struge in posledično do sprememb geometrije in hidravličnih lastnosti, tako v času trajanja visokih voda kot tudi sicer.

Pri izdelavi digitalnega modela terena se pojavi še ena napaka, ki lahko bistveno zmanjša natančnost. TIN je izdelan s pomočjo interpolacije vrednosti parametrov točk. DMT lahko predstavlja samo eno višinsko vrednost za posamezno točko, kar pa v resnici ni popolnoma res. Veliko naravnih (npr. skalna stena) in tudi umetnih (npr. most, zgradbe) objektov ima lahko različno vrednost višine, ki se nahajajo na točki z istimi koordinatami X in Y. Običajni DMT tega problema ne more rešiti, zato je tak model ponekod imenovan kot 2,5-dimenzionalen. Na spodnji sliki so prikazani modeli, ki se razlikujejo glede na število dimenzij, ki jih dejansko prikazujejo. O tem problemu bi lahko podrobneje razpravljali v posebni študiji. Tudi ta napaka lahko vpliva tako na volumen korita kot tudi na druge parametre.

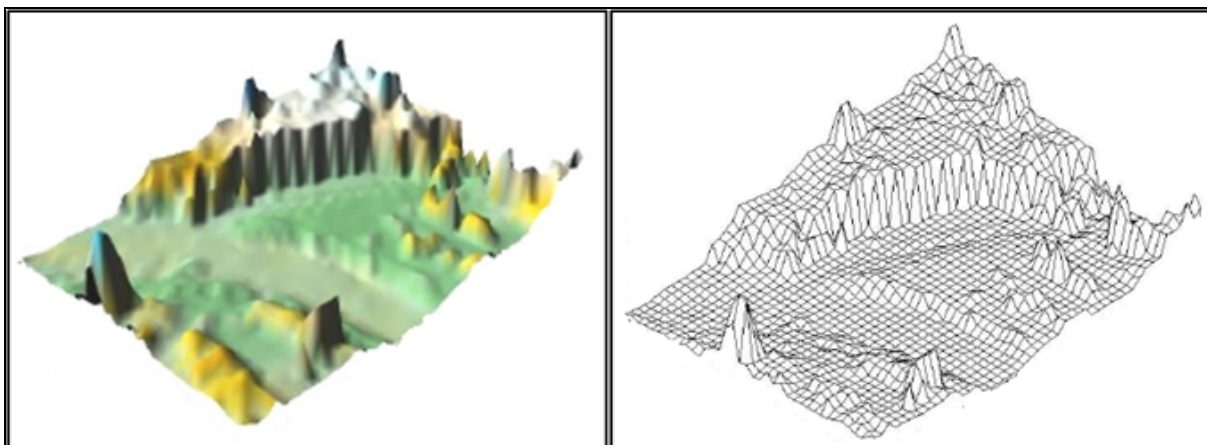


Slika 15: Delitev modelov glede na število dimenzij, ki jih prikazujejo.

Na spodnjih slikah so prikazani digitalni modeli terena istega območja. Jasno se vidi, kako velikost osnovne celice vpliva na natančnost prikaza konfiguracije terena. To posledično vpliva tudi na natančnost geometrijskih podatkov, ki jih s pomočjo GIS orodja dobimo na podlagi DMT in jih uporabimo v hidravličnem modelu. Manjša kot je osnovna celica, manjše strukture terena so lahko modelirane (primerjava slik 13, 14 in 15). Prav tako je bolj natančen opis naklona površin, ki tudi vpliva na geometrijo in volumen rečnega korita. Kljub večji natančnosti pa ni mogoče oblikovati navpičnih sten, vendar pa se z gostoto točk večja natančnost opisa naklona površin. Večanje celice povzroči generalizacijo terena in posledično manjšo natančnost.



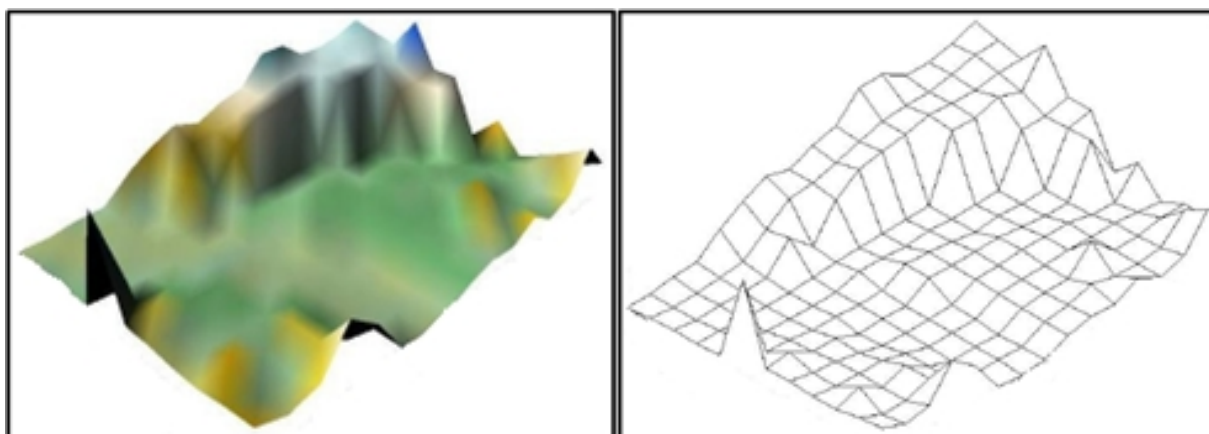
Slika 16: Prikaz DMT in strukturne mreže DMT z velikostjo celice 2.5m.²³



Slika 17: Prikaz DMT in strukturne mreže DMT z velikostjo celice 5m.²⁴

²³ (Alemseged, 2005)

²⁴ (Alemseged, 2005)



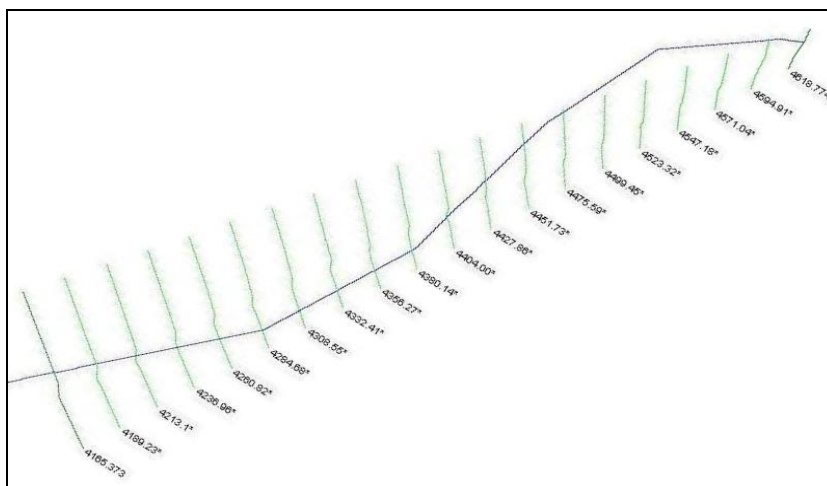
Slika 18: Prikaz DMT in strukturne mreže DMT z velikostjo celice 15m.²⁵

Ena izmed idej je bila izboljšati natančnost modela terena z vnosom točk prečnih profilov. Na ta način dobimo sicer na mestih prečnih profilov natančne vrednosti, pri interpolaciji pa se popači pa se digitalni model terena med prečnimi profili. Popačenje je posledica triangulacije pri izdelavi TIN, kjer program išče med seboj najbližje višinske točke.

Da bi rešili težavo, smo želeli prečne profile interpolirati v programu HEC-RAS, točke interpoliranih prečnih profilov prenesti nazaj v GIS orodje ter tudi te točke upoštevati pri izdelavi DMT. S tem bi izboljšali natančnost modela na območju rečnega korita in ožjih območij ob njem. V ta namen sem uporabil starejšo verzijo programa ArcGIS in sicer ArcView, za katerega je bila razvita dodatna razširitev *RASGeoConverter* za prenos točk geometrije iz HEC-RAS-a nazaj v GIS orodje. Pri tem je treba poudariti, da morajo biti točke v HEC-RAS-u geopozicionirane, kar pomeni, da ne moremo vnesti katerekoli v HEC-RAS-u izdelane geometrije.

Postopek je bil učinkovit na ravninskih odsekih, manj pa tam, kjer vodotok med izmerjenimi prečnimi profili meandrira. Program HEC-RAS pri interpolaciji prečnih profilov, izdelanih s HEC-GeoRAS-om, upošteva le zunanje prečne profile in interpolacijo izvede direktno med njima in ne sledi središčnici (slika 16).

²⁵(Alemseged, 2005)



Slika 19: Prikaz interpolacije prečnih profilov, ki poteka direktno med posameznimi prečnimi profili in ne sledi središčnici.

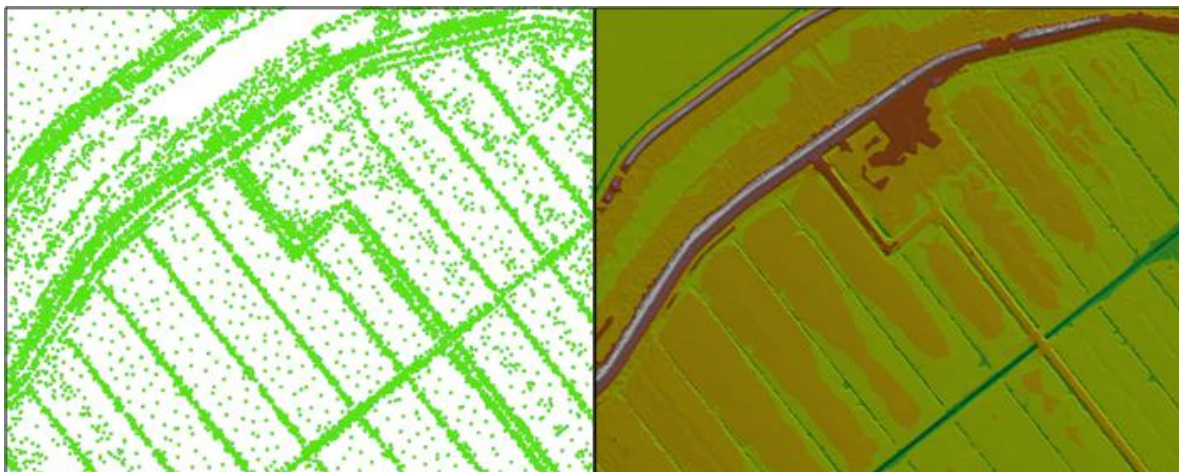
Tako ne upošteva meandriranja vodotoka med posameznima sosednjima prečnima profiloma. Pri interpolaciji se pojavi tudi težava, kadar je izvedena linearno med točkami, kar prav tako ne ustreza naravnim vodotokom.

3.1.3 Uporaba podatkov LIDAR

Tretja varianta, v kateri smo uporabili podatke X,Y,Z koordinat točk terena izmerjenih s tehnologijo LIDAR, je pokazala številne prednosti. Takšni podatki za slovensko stran še niso na voljo, zato so bili uporabljeni LIDAR podatki odseka reke Soče pod mestom Gorica na italijanski strani. Prednosti, ki jih prinaša LIDAR, predstavljajo velik potencial za reševanje problemov, povezanih z nenatančnimi topografskimi podatki, ki so vhodni podatek za modeliranje naravnih procesov. Glavna prednost je natančna digitalna narava podatkov, ki je manj podvržena horizontalnim napakam kot so podatki točk, dobljenih s pomočjo izohips.

S pomočjo LIDAR zajema podatkov dobimo točke terena z natančnostjo med 10 in 15 cm. Pri hidravličnem modeliranju se kot prednost pokaže tudi možnost hitre pridobitve podatkov s kontinuiranimi preleti nad poplavnimi območji in s tem spremljanje morebitnih sprememb topografije terena zaradi poplav. Visoko resolucijski model prinaša prednosti tudi v primeru, ko ima lahko majhen element terena, kot so nasipi, manjše zajezebe, jarki, velik vpliv tako na vodotok kot tudi na začetek in način poplavljanja. LIDAR omogoča tudi gosteje izmerjene

točke na takšnih mestih (prikazano na sliki 17), kjer so točke zgoščene na brežinah kanalov. To so točke prelivanja vode iz glavnega korita in so zato pomembne za natančnejše določanje mejnega pretoka, ko reka prestopi bregove.



Slika 20: Prikaz točk posnetih s sistemom LIDAR (levo) in iz njih izdelan TIN (desno). Na mestih, ki so pomembnejša pri hidravličnih analizah, so točke zgoščene.

Za natančno hidravlično analizo potrebujemo prečne profile na dovolj majhni medsebojni razdalji oziroma na mestih, ki močneje vplivajo na hidravlične lastnosti. Ker takšen model terena prikazuje celotno podobo območja, lahko dobimo natančne prečne profile za poljubno lokacijo. To je prav tako prednost v primerjavi s prečnimi profili, izmerjenimi z geodetskimi meritvami, ki so velikokrat izmerjeni na velikih razdaljah ter pogosto ne vsebujejo celotno poplavno območje.

3.2 Pretoki in robni pogoji

Osnovna podpora celotni hidrološki dejavnosti je merilna mreža postaj za hidrološki monitoring. Sistem opazovanj in meritev temelji na klasični mreži vodomernih postaj, zato morajo biti ustrezno izbrane, reprezentivne in s primerno merilno opremo. Na razvoj sistema opazovanj so vplivali predvsem nameni uporabe, kot so varstvo naselij pred poplavami, uporaba vode v energetske, tehnološke in vodooskrbne namene, v zadnjem času pa vse bolj tudi za potrebe preučevanja naravnih danosti in varstva okolja. V Sloveniji meritve vodostajev in ostalih hidroloških parametrov opravlja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO).

Ker smo obravnavali nevarnost poplavljanja Soče, smo potrebovali hidravlične robne pogoje pri večjih pretokih. Poleg samega pretoka je namreč ključni podatek spodnji robni pogoj, saj poteka pri mirnem toku hidravlični izračun poteka gladin od spodaj navzgor.

3.2.1 Rečni režim

Rečni režim je kolebanje vodnega stanja v rečni strugi preko leta. Na visok in nizek vodostaj vplivajo predvsem podnebne razmere, kot so temperatura, količina in časovna obdobja padavin, taljenje snega itd. Večina slovenskih rek ima kombinirane rečne režime, saj nanje vplivajo tako pomladanska in jesenska deževja kot tudi taljenje snega. Vodotoki visokogorskega sveta Slovenije in njenega neposrednega predgorja (Julijske Alpe, Kamniško Savinjske Alpe, Pohorje) imajo večinoma snežno dežni rečni režim. Zanj sta značilna dva viška. Primarni višek nastopi v pozni pomladi, maja in začetku junija. Sekundarni porast nastopi ob jesenskih deževjih, ki pa vseeno ne dosega ravni spomladanskega viška. Najnižji vodostaji se pojavljajo zimskem času, s poudarkom na pozni zimi in poletnem času. Poteze snežno dežnega režima se poznajo pri reki Soči vse do sotočja z Idrijco. V tem delu pa vedno bolj prevladuje dežni rečni režim. Pestre podnebne in reliefne razmere se odražajo tudi v vodnih režimih levih soških pritokov Idrijce in Tolminke, ki se predhodno združita še s Trebuščico in Bačo. Če lahko za Tolminke trdimo, da je najbolj snežna po svojem rečnem režimu, pa tega ne moremo reči za Idrijco, ki krepí in preoblikuje rečni režim Soče v smeri večje deževnosti. Zaradi teh razlik tudi odtočni količnik voda ni enoznačen, lahko pa ugotovimo, da imajo vse reke hudourniški značaj. Značilna so velika in hitra nihanja vodostaja in tudi občasne hude poplave.

3.2.2 Specifični odtoki in odtočnost

Specifičen odtok nam pove, koliko vode odteče v eni sekundi s površine 1 km². Pri normalnem odtoku je največji specifičen odtok v zgornjem toku in postopoma upada ob toku navzdol, torej obratno sorazmerno s pretokom. Specifičen odtok se izračunava s pomočjo vodne bilance in zahteva izredno dobro hidrološko preučitev površinskega in podpovršinskega odtoka.

Na območju zgornjega Posočja znašajo vrednosti specifičnega odtoka nad 70 l/s/km^2 in v od 40 do 55 l/s/km^2 srednjem delu, kar velja tudi za Vipavo v zgornjem toku. Nižje vrednosti specifičnih odtokov so zastopane v spodnjih delih Soče in njenih pritokov. Razlike med ekstremnimi najnižjimi in najvišjimi specifičnimi odtoki so zelo velike, na kar vpliva vrsta dejavnikov, predvsem količina in intenziteta padavin in geološka zgradba. Meritve se opravljajo zadnjih 30 let in ekstremne vrednosti so dosegle v Julijskih Alpah od 1500 do 2000 l/s/km^2 , na reki Koritnici (postaja Kal) pa celo preko 3500 l/s/km^2 .

Odtočnost izraža odtočni količnik, ki predstavlja razmerje med količino padavin in odtekle vodo. Ponavadi ga navajamo v deležu od povprečne količine padavin. Podobno kot specifični odtok je tudi odtočnost izračunana za posamezne vodomerne postaje in njim pripadajoča vodozbirna območja, ki so omejena z elementi porečja. Natančnost določitve odtočnega količnika je odvisna od lastnosti povodja, pravilnosti omejitve vodozbirnega zaledja in določitve padavin, kar je znatno težje od izmere odtoka v merskem profilu. V primerjavi z ostalo Slovenijo v Posočju odteče največ padavin. Odtočni količnik se v zgornjem Posočju med posamezni vodotoki in elementi vodozbirnih zaledij giblje med 75 in 85 %. Podobno kot specifični odtok tudi količnik odtočnosti nižje ob toku pada in doseže vrednosti med 60 in 70%. Najnižji pa je na območju Vipave in Mirne.

3.2.4 Gostota rečne mreže

Večina območja porečja reke Soče se sestoji v glavnem iz močno zakraselih kamnin. Te pa imajo izredno majhno zadrževalno sposobnost. Odraz geološke zgradbe in visoke vodoprepustnosti je tudi gostota rečne mreže. Ta znaša za zgornji del nad Solkanom $1,73 \text{ km/km}^3$. Za njene pritoke, kot so Bača, Cerknica in Idrijca, znaša med 1,5 in $1,9 \text{ km/km}^2$. Obratno temu znaša gostota za pritoka Koritnico in Tolminko med 0,9 in $1,1 \text{ km/km}^2$. Podobno majhno gostoto ima tudi Vipava z $1,12 \text{ km/km}^2$.

3.2.5 Pretoki

Reka Soča ima izrazito hudourniška značaj z več kot stokratno razliko med najnižjim in najvišjim pretokom. Povprečni letni pretoki znašajo od dobrih $10 \text{ m}^3/\text{s}$ v zgornjem delu do

okoli 100 m³/s pri Solkanu. Najnižji pretoki dosegajo vrednosti le nekaj m³/s, med tem ko stoletna voda presega 3500 m³/s. Kljub temu, da se višji pretoki večinoma pojavljajo ob jesenskih in spomladanskih obsežnejših padavinah in ob topljenju snežne odeje v hribovitih delih, pa zaradi izrazite hudourniške narave pretoki dosegajo visoke vrednosti tudi ob kratkotrajnih a izdatnih padavinah. Porečje Soče ima večinoma velik naklon in s tem velik površinski otok, zato voda hitro odteče in se koncentrira v koritih Soče in njenih pritokov. Za vodostaje reke Soče obstajajo razmeroma dobri podatki za daljše časovno obdobje, saj imamo kar nekaj merilnih postaj in sicer v Logu pod Mangartom, Krševcu, na Logu Čezsoškem, v Kalu nad Kanalom, v Kobaridu, v Tolminu, na HE Dobljar in v Solkanu. Dobra je tudi pokritost z merilnimi postajami na pritokih Soče. Predvsem je dobra pokritost na Vipavi, kjer so merilne postaje v Vipavi, Ajdovščini in Mirnu, ter na Idrijci s postajami v Bači, Idriji in Dolenji Trebuši.

4 HIDRAVLIČNA ANALIZA Z INTEGRACIJO HIDRAVLIČNEGA MODELA IN DIGITALNEGA MODELA TERENA NA ODSEKU REKE SOČE

Za preizkus možnosti analiziranja hidravličnih lastnosti smo se odločili za reko Sočo, saj smo imeli zanjo na voljo tudi podatke pridobljene s pomočjo LIDAR tehnologije. V Sloveniji zaenkrat še nikjer ni bila uporabljena ta tehnika za hidravlično analizo vodotoka, za reko Sočo pa so nam bili na voljo podatki za del reke Soče na italijanskem delu.

Reka Soča izvira iz kraškega brezna v osrčju Julijskih Alp. Njen tok poteka v zgornjem delu po ozki alpski dolini Trenti, nato skozi tektonsko udorino Bovške kotline, kasneje pa se menjajo ozki odseki s strmimi pobočji ter širši odseki doline s prodnimi terasami. Za porečje Soče je značilna izrazita zakraselost, tako da veliko vode prihaja iz kraških izvirov, kot je slap Boke. V zgornjem delu reke Soče, kjer prevladujejo karbonatne kamnine, je voda izdolbila zanimivo globoko korito, marsikje v obliki kanjona polnih tolmunov nenavadnih in slikovitih oblik. V tem delu je tudi zelo lepo ohranjeno prvotno stanje vodotoka.



Slika 21: Porečje reke Soče na ozemlju Slovenije²⁶.

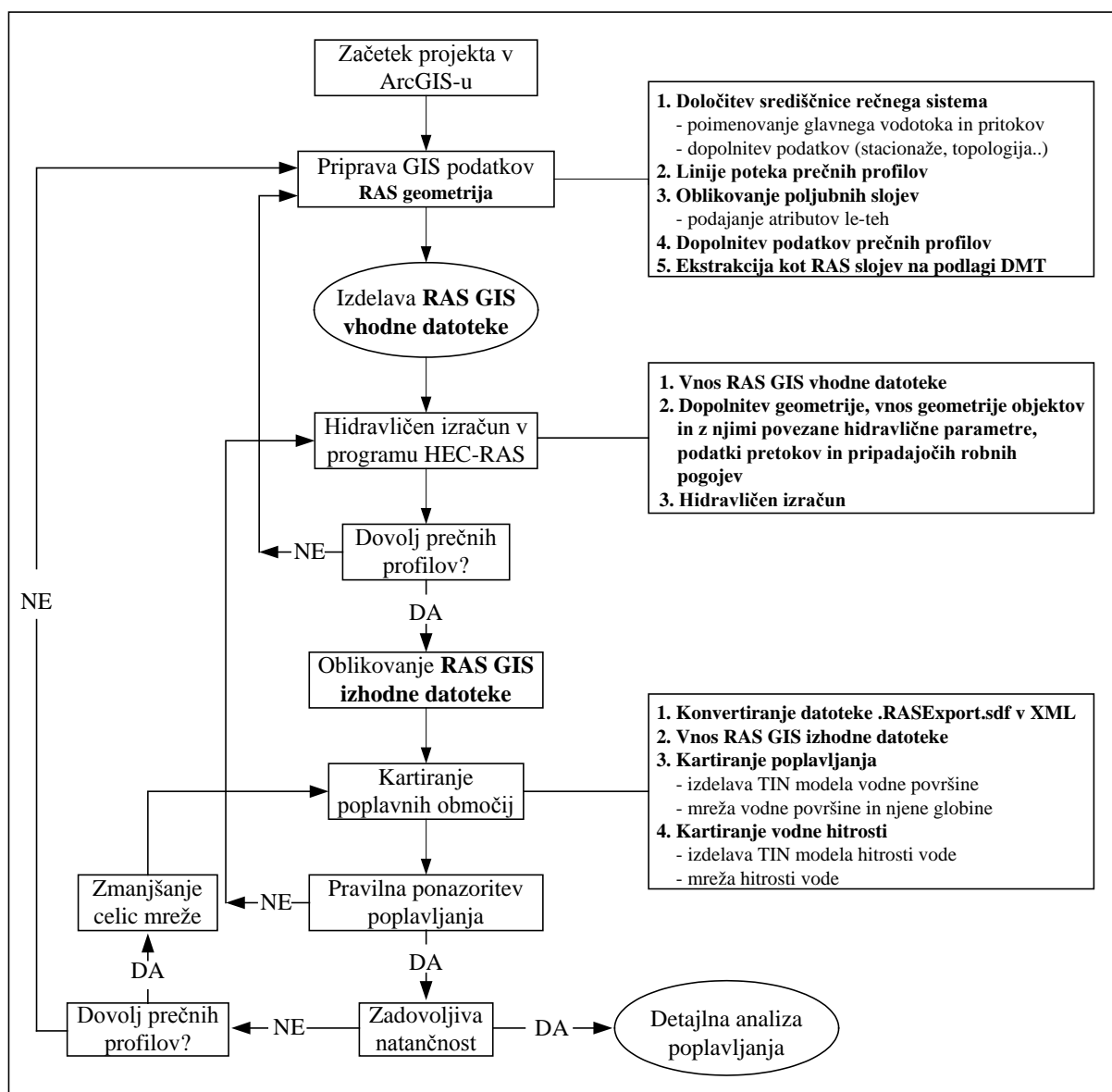
²⁶ (SENG, 2005)

Ker je večina alpskih rek regulirana ali energetsko izkoriščena, je naravna ohranjenost Soče izjemno pomembna za celotni alpski prostor, saj v Alpah ni nobene druge tako velike in tako lepo ter sklenjeno ohranjene reke. Dolina Soče med Tolminom in Kobaridom je pravi tektonski jarek, domnevno podaljšek idrijske prelomnice, kjer naj bi tudi potekala ločnica med alpskim in dinarskim svetom. Do Gorice Soča vrezuje svojo strugo v obliki ozkih korit zaradi tektonskega dvigovanja površja in bližine erozijske baze. Kasneje se padec reke močno zmanjša čez Soško ravan proti samemu deltastemu izlivu. Tu se le še pojavlja naplavljanje proda.

Za kar najboljše analize hidravličnih lastnosti vodotoka je potrebno čim boljše poznati tudi ostale parametre, ki posredno ali neposredno vplivajo na naravo vodotoka. Na podlagi le-teh lažje in predvsem natančneje obravnavamo obstoječi problem, kar nam pomaga pri usmeritvi iskanja rešitev. Parametri okolja, kot so geološka zgradba, naklon pobočij in padavine, imajo tako kot drugi tehnični parametri velik vpliv na robne pogoje, ki predstavljajo osnovne podatke hidravličnega izračuna. Opisani so bili na koncu prejšnjega poglavja.

4.1 Modeliranje terena in priprava geometrijskih podatkov

Delo je potekalo s kombinacijo dveh računalniških programov. Za pripravo geometrijske podlage terena, prikaz in analizo rezultatov uporabljamo orodje ArcGIS z razširitvami. Hidravlični izračun pa opravimo s programom HEC-RAS. Postopek dela prikazuje shema 1. Ko je model terena v TIN pripravljen, lahko začnemo oblikovanje točkovnih, linijskih in poligonskih slojev za pripravo geometrijskih podatkov za HEC-RAS. Nekateri sloji so obvezni, nekateri izbirni. Med obvezne sloje poleg samega DMT, na osnovi katerega program izvede ekstrakcijo podatkov točk geometrije, sodijo središčnica vodotoka ter linije in profili prečnih prerezov (slika 21). Ta dva sloja, ki jih oblikujemo najprej v 2D, kasneje pretvorimo v 3D obliko. Na podlagi DMT program določi potrebne razdalje in višinske vrednosti posameznih točk. Uporabnik ima na voljo še številne druge sloje, s katerimi lahko izpopolni geometrijski model. Lahko izrisujemo linije prečnih bregov, nasipov in mostov, poti poplavnih tokov, poligonske sloje in sicer območja neefektivnega toka, zgradbe ob rečnem koritu, ki jih je zajel vodni tok in tako zmanjšujejo površino prečnega prereza, območja akumuliranja vode ipd.



Shema 1: Prikaz poteka dela z opisano metodo.

Program tudi omogoča povezavo s slojem v katerem določimo rabo tal. Oblikovanje tega sloja nam je v veliko pomoč pri definiranju Manningovih koeficientov hrapavosti n_g , predvsem na poplavnih območjih. Program določi spreminjanje n_g vzdolž prečnega profila. Če se ortofoto posnetki dovolj natančno prekrivajo z DMT, si lahko z njimi pomagamo pri natančnem določanju lokacij posameznih objektov, pri določanju n_g itd. Pri tem moramo biti pozorni, saj DMT vsebuje podatke le za nekatere odseke, kot so akumulacijska območja, področja neefektivnega toka itd. Pri nekaterih objektih pa si lahko na ta način pomagamo le z določanjem natančnejše lokacije objektov, samo geometrijo pa definiramo že v ArcGIS-u

(npr. hiše, nasipi, ipd) ali kasneje v HEC-RAS-u. Med slednje sodijo mostovi, prepusti, načrtovani nasipi ipd. Po oblikovanju vseh slojev oblikujemo datoteko s celotnimi geometrijskimi podatki, ki je primerna za hidravlično analizo v programu HEC-RAS.

4.1.1 Določitev rečnega sistema

Ko imamo izrisan teren, moramo oblikovati rečni sistem, s katerim opišemo shemo odtočnega režima. Začnemo z določanjem osi glavnega vodotoka in sicer vedno v smeri toka, morebitnih rokavov ter ostalih pritokov manjših rek in potočkov. Posamezne pritoke, ki jih zajamemo v analizi, kot tudi glavno reko poimenujemo, kar nam pomaga pri indentifikaciji pri celotnem modelu. Določitev glavnine toka ima vpliv tako na hitrost kot tudi na druge parametre hidravlike. Zato moramo biti pri določitvi centralnega poteka toka pozorni na dejanski potek v naravi, kajti matica toka se ne nahaja vedno na sredini rečnega kanala. Pri zavojih je na primer bližji zunanjemu robu. Boljšo predstavo o situaciji lahko dobimo na podlagi ortofotoposnetka ali ogleda situacije na terenu.

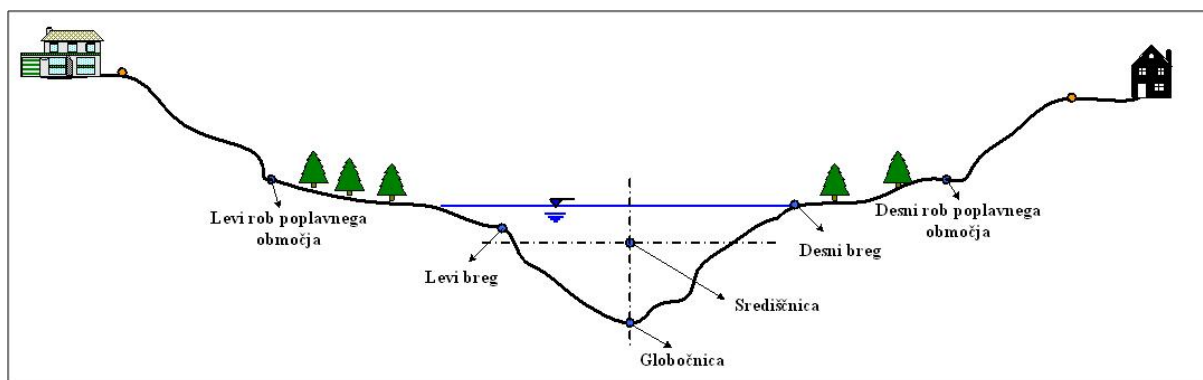
4.1.2 Prečni profili

Naslednji korak je določevanje linij prečnih profilov na zelenih lokacijah. Potek prečnih profilov mora biti vedno pravokoten na smer vodnega toka. Ko vrišemo linijo prečnega profila, s tem določimo le njegovo lokacijo in potek, medtem ko so podatki o vertikalnih kotah poteka profila avtomatično določeni na podlagi terena (*DMT*). Risanje prečnih profilov poteka vedno od leve proti desni gledano v smeri toka. Prečni profili se med seboj ne sekajo, kar je jasno, glede na to, da sekajo vodni tok v vsaki točki pravokotno. Pomagamo si lahko tudi z na terenu izmerjenimi prečnimi profili. Te profile lahko vnesemo kot samostojen sloj ali naredimo korekcije kasneje v HEC-RAS-u. Meritve na terenu zagotavljajo natančnejše podatke, saj nam situacija diktira lokacije, kjer so meritve najbolj potrebne. Vendar pa takšni podatki niso vedno na voljo ter pogosto ne vsebujejo podatkov o poplavnih območjih. Gostoto prečnih profilov si izberemo glede na razgibanost terena. Kasneje lahko mrežo profilov še zgostimo v *HEC-RAS-u* s pomočjo interpolacije, ki pa grafično ne sledi središčnici (slika 18) in zato ni vedno uporabna. Pozorni moramo biti pri prečnih profilih ob mostovih, prepustih, prelivih in drugih objektih v vodotoku. V teh primerih moramo imeti dovolj blizu podatke,

tako gorvodno kot tudi dolvodno, za vsaj še en prečni profil. Objekti predstavljajo motnjo v vodnem toku, zato moramo v takšnih območjih zgostiti mrežo prečnih profilov, da dobimo kar se da natančne hidravlične izračune.

4.1.3 Rečni bregovi

Rečni sistem in konfiguracijo terena imamo izrisano tako, da lahko oblikujemo potek pripadajočih rečnih bregov na levi in desni strani reke. Pozorni moramo biti, da nam linija posameznega brega seka posamezno linijo prečnega profila v eni sami točki. Linije bregov izrišemo za vse odseke reke in pritoke.



Slika 22: Ključne karakteristične točke prečnega prereza.

Kadar imamo opravka z rečnim kanalom in imamo na razpolago tudi aerofoto posnetek, lahko določimo potek bregu, torej točke, kjer pride do prelivanja. Veliko težje pa je to na naravnem vodotoku, kjer imamo opravka z razgibano konfiguracijo bregov, rastjem itd. Z linijo brega poleg točk prelivanja določimo tudi meje do koder program upošteva koeficient hrapavosti struge oz. kanala, od tu dalje pa n_g poplavnih območij, lahko tudi glede na dejansko rabo. Že v programu ArcGIS imamo tudi možnost izrisa prečnih profilov.

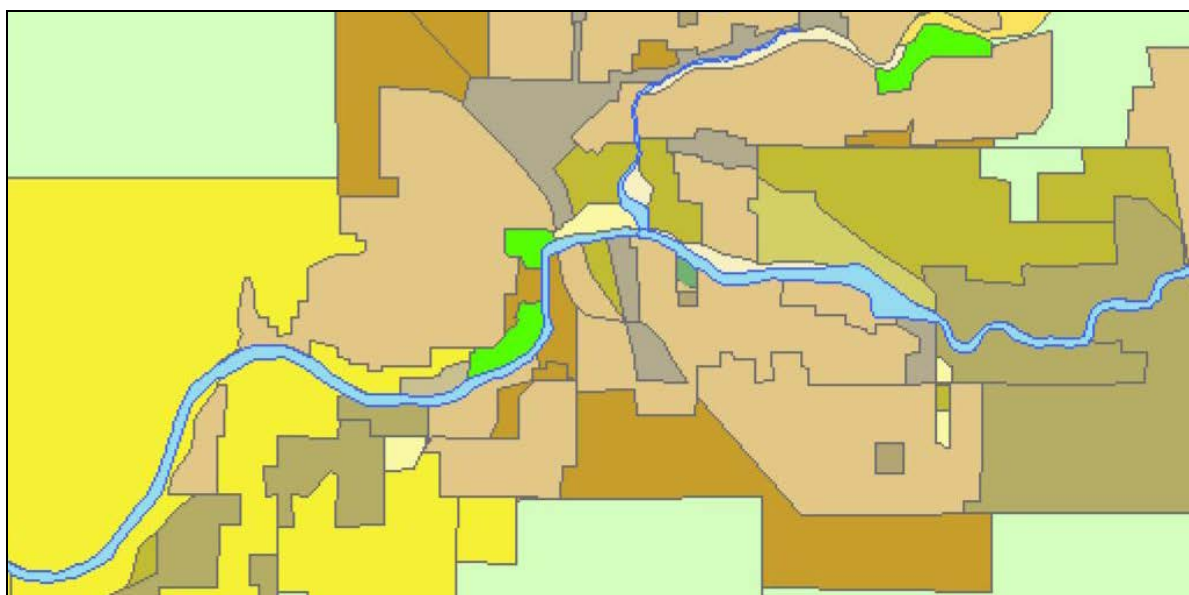
4.1.4 Območja glavnega poplavnega toka

Ko imamo določen glavni rečni kanal, lahko začnemo risati obseg področja, kjer se v primeru poplavljanja reke pojavlja vodni tok. Tudi tu pazimo, da nam linija seka posamezen prečni profil v natanko eni točki. Seveda pa moramo biti pozorni pri centralni liniji, katere potek je

lahko pri visokih vodostajih drugačen, posebej ko se pojavijo poplave bistveno drugače kot pri nižjih viskovodnih pogojih. Te probleme lahko obravnavamo zadovoljivo le, če imamo dovolj podatkov o preteklih dogodkih.

4.1.5 Raba površin

Pri definiranju rabe površin gre predvsem za analizo dejanske hrapavosti površin in s tem posredno za določanje Manningovih koeficientov, ki so potrebni za hidravlični izračun. Koeficiente hrapavosti lahko sicer določimo tudi kasneje v *HEC-RAS*-u, vendar pa lahko dobimo ustrezne začetne podatke tudi s pomočjo analize rabe tal ali pokrovnosti. Območja oblikujemo s pomočjo poligonov. Kjer želimo določiti rabo zemljišča, moramo v posebno tabelo vnesti tudi z njimi povezane vrednosti Manning-ovih koeficientov. Te vrednosti ocenimo na podlagi rabe in pokrovnosti tal iz izkušnjami s podobnih primerov.



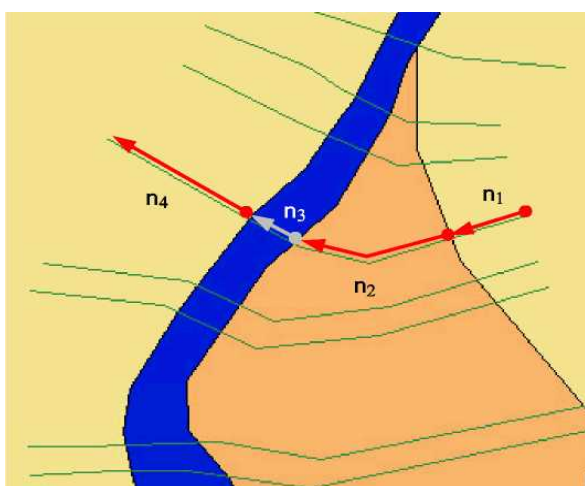
Slika 23: Razdelitev obravnavanega območja na podobmočja za katera definiramo rabo ali pokrovnost.

Na sliki so prikazana glede na pokrovnost obarvana podpodročja. Poligoni morajo biti tesno skupaj tako, da lahko program določi spreminjanje Manningovega koeficienta hrapavosti vzdolž celotne linije prečnega profila.

4.2.6 Določanje Manning-ovega koeficienta (n_g) hrapavosti

Določanje vrednosti koeficientov hrapavosti ima velik vpliv na hidravliko vodotoka, zato je potrebna čim bolj natančna ocenitev le-teh, kar pomeni poznavanje in upoštevanje faktorjev, ki vplivajo nanje. Faktorjev vpliva je posebno pri naravnih vodotokih več. Osnovni parameter je gotovo sama hrapavost omočenega oboda kanala. Ta je predvsem odvisen od materiala struge (glina, prod, pesek,...). Naslednji parameter je vegetacija. Zarast zaustavlja tok in tako zvišuje vrednost koeficienta. Njen učinek je odvisen od gostote, porazdelitve in tipa rastja. Zato je ta vpliv največji gotovo v nevdrževanih vodotokih. Nepravilnost korita opisuje spreminjanje prečnih presekov vodotoka, oblike in omočenega oboda vzdolž vodotoka. Bolj kot je sprememba nenadna, večji je njen vpliv. Sem lahko prištejemo tudi faktorje, kot so dotok plavin, manjših zdrsov zemljine ipd. Prav tako vpliva tudi spreminjanje smeri vodotoka. Med tem ko zavoji z velikimi radiji nimajo znatnega vpliva, pa meandri majhnih polmerov lahko močno povečajo Manningov koeficient. Vrednosti so odvisne tudi od višine vodostaja, ki se pri večjih pretokih zmanjša, saj so takrat mnoge nepravilnosti v rečnem koritu prekrite z vodo in nimajo tako velikega vpliva kot pri nižjih vodostajih. Hkrati pa se pojavijo novi faktorji, npr. gostejše rastline višje na brežinah in izven rečnega korita.

Na podlagi vrednosti, ki jih določimo za posamezna območja, program izračuna spreminjanje n_g vzdolž prečnega profila (slika 21). Tako se določi vrednost za n_g v rečnem koritu ter povprečno vrednost za vsako poplavno (levo in desno) poplavno območje. Pogoji, da je postopek v celoti izpeljan in popoln, je, da mora biti raba tal definirana na območju vsakega prečnega profila in v vsej njegovi dolžini. Vrednosti lahko korigiramo kasneje z umerjanjem modela v HEC-RAS-u, kjer si pomagamo z znanimi vrednostmi nivojev vodne gladine v posameznih prečnih profilih, izmerjenih pri prejšnjih visokovodnih dogodkih.

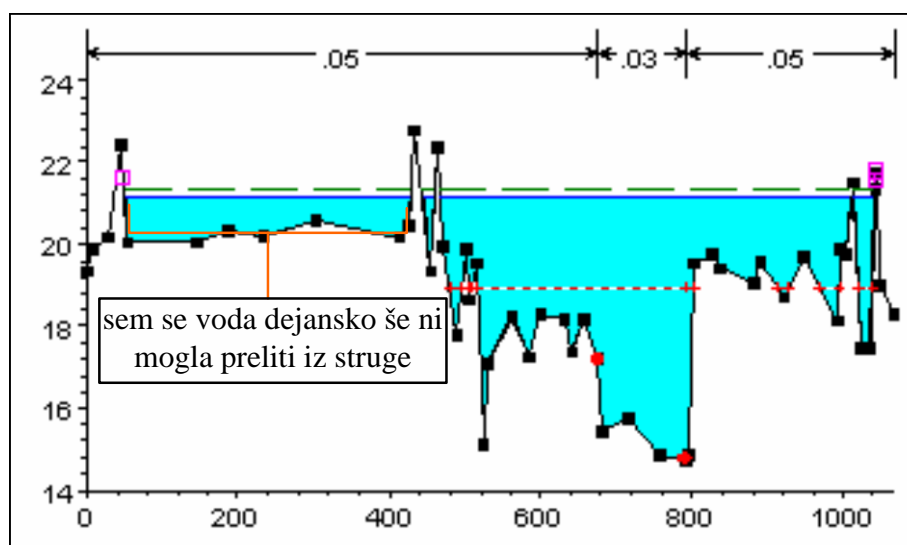


Slika 24: Spreminjanje koeficientov hrapavosti vzdolž prečnega prereza.

4.1.7 Nasipi ob rečnem koritu

Pasivni ukrep preventive za zaščito pred poplavami je graditev nasipov. Pri obravnavanju vodnega toka in še posebno pri analizi razlivanja vode ob visokih vodostajih so pomembni podatki o nasipih, ki močno vplivajo in usmerjajo vodni tok. Z uporabljenim hidravličnim modelom lahko obravnavamo le po en nasip na levi ter enega na desni strani. Pri tem moramo biti pozorni na to, da kot nasipe ne obravnavamo le objektov, ki so grajeni izključno za preprečevanje prelivanje vode in zaščito pred poplavljanjem, temveč lahko na vodni tok podobno vplivajo tudi cestni in železniški nasipi, mostovi ipd., ki potekajo vzdolž vodotoka.

Tako kot linije naravnih bregov tudi linije nasipov sekajo prečne profile izključno enkrat. V primeru, da želimo s projektom obravnavati razmere, ki bodo nastale z nekim posegom v prostor, podatkov o nadvišanju ne moremo razbrati iz poteka terena. Zato moramo oblikovati tabelo, kjer podamo podatke o naklonih brežin nasipa, višine, dolžine, širine vznožja in krone idr.



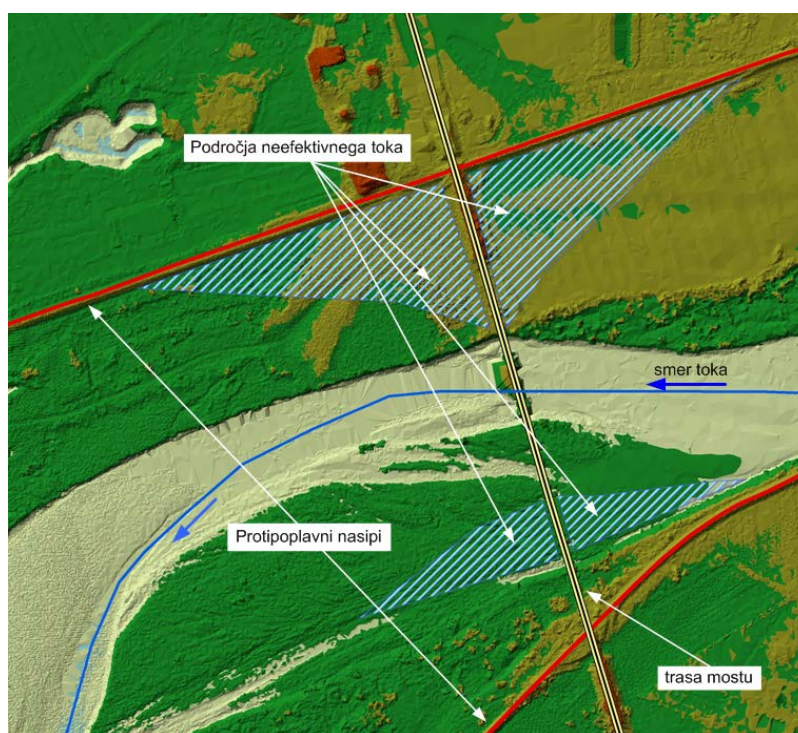
Slika 25: Razvidna je napaka HEC-RAS-a, ki kot efektivno površino prečnega profila upošteva od točk prelivanja nižje ležeča območja izven osnovnega korita, kljub temu, da je nivo vode pod nivojem, ko se začne poplavljanje.

Pomanjkljivost programa HEC-RAS je, da upošteva kot površino prečnega prereza, ki prevaja določen pretok vsa od nivoja vode nižje ležeče predele, tudi izven rečne struge kljub temu, da

je vodostaj takšen, da še ne povzroča prestopa bregov (slika 22). Eliminiranje takšnih delov je možno z definiranjem nasipov, kar omogoča, da se upošteva poplavitvev teh območjih šele takrat, ko je nivo vode višji od krone nasipa. Takšnih predelov je lahko v posameznem prečnem profilu več, HEC-RAS pa omogoča definiranje le enega nasipa na levi in enega nasipa na desni strani.

4.1.8 Področja neefektivnega toka

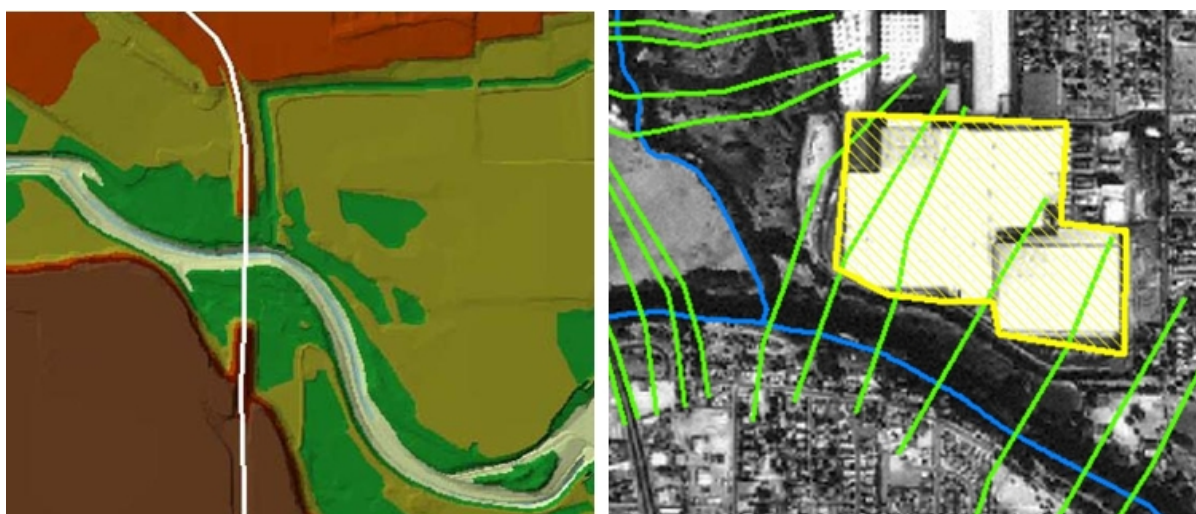
Ob prelivanju vode preko bregov prihaja voda v različne kotanje in druge terenske depresije, kjer zastaja. Področja neefektivnega toka so območja, ki jih voda sicer poplavi, ne predstavljajo pa aktivnega dela prečnega profila, torej tam ni znatnejšega pretoka vode. Najpogostejše lokacije so poleg depresij na poplavnih območjih, predvsem lokalno razlivanje pred mostovi, prepusti in drugimi območjih razširitev in zožitev rečne struge (slika 23). Za določitev področij neefektivnega območja ob mostovih, prepustih ipd. potrebujemo natančno poznavanje situacije na terenu in/ali številne izkušnje, saj so odvisni od čelne geometrije mostu, hitrosti vodnega toka itd.



Slika 26: Prikaz področij neefektivnega toka, ki se pojavijo ob premostitvi vodotoka.

4.1.9 Mostovi in drugi objekti

Navadno digitalni model terena ne vsebuje podatkov o objektih. Lahko vsebuje vzdolžne objekte, npr. cestne, železniške nasipe ali nasipe za obrambo pred visokimi vodami, ne pa podatkov o mostovih, vodnih zgradbah in podobnem. Imamo pa možnost, da na podlagi ortofoto posnetka določimo natančno lokacijo in potek mostov, samo geometrijo pa nato dopolnimo v HEC-RAS-u.



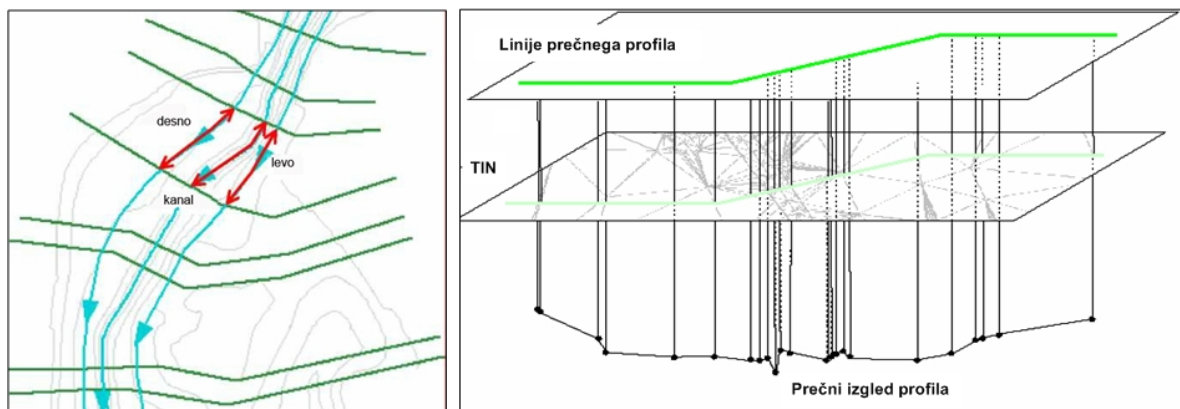
Slika 27: Na levi je prikazana izrisana trasa mostu, s čimer na podlagi ortofoto posnetka natančno določimo njegovo lego vzdolž vodotoka. Na desni so z rumeno izrisana (obkroženi objekti), ki jih program ne upošteva kot efektivno površino prečnega prereza.

Pri analizi poplavljanja poseljenih območij moramo upoštevati tudi zgradbe (npr. hiše, industrijski objekti itd.), ki predstavljajo veliko oviro vodnemu toku in zmanjšanje prevodne sposobnosti v določenem prečnem profilu (slika 24). Dvig gladine zaradi tega vzroka lahko upoštevamo z izredno velikim koeficientom hrapavosti ali z izločitvijo določenega dela prečnega profila, s čimer zmanjšamo prevodno površino profila. To najlažje storimo s pomočjo ortofoto posnetka ali z ogledom terena.

4.1.10 Dopolnitev podatkov

Po izrisu vseh linij in območij lahko začnemo z ekstrakcijo podatkov posameznih točk na osnovi digitalnega modela terena, s čimer dobimo 3D model korita in pripadajočih poplavnih

površin. Na mestih, kjer DMT vsebuje podatke o objektih (npr. potek nasipov), lahko izvedemo tudi ekstrakcijo le-teh. Hkrati se izvede tudi izračun dolžin in stacionaž med in vzdolž prečnih profilov (slika 25).



Slika 28: Način določanja stacionaž in kot točk prečnih prereзов na podlagi DMT.

S tem je postopek priprave geometrijske podlage za hidravlični izračun končan in jo lahko prenesemo v program za hidravlične analize HEC-RAS.

4.2 Hidravlična analiza s HEC-RAS-om

Z vnosom datoteke z geometrijskimi podatki je geometrija za hidravlično analizo pripravljena, zato jo po potrebi le še dopolnimo s hidravličnimi posebnostmi. Predvsem moramo definirati dimenzije objektov in določiti parametre, ki vplivajo na hidravlične lastnosti vodotoka ob njih (vpliv obrežnih zavarovanj, koeficienti razširitve/zožitve korita ipd.). V naslednjem koraku določimo pretoke in pripadajoče robne pogoje za dogodke, za katere želimo izvesti hidravlično analizo.

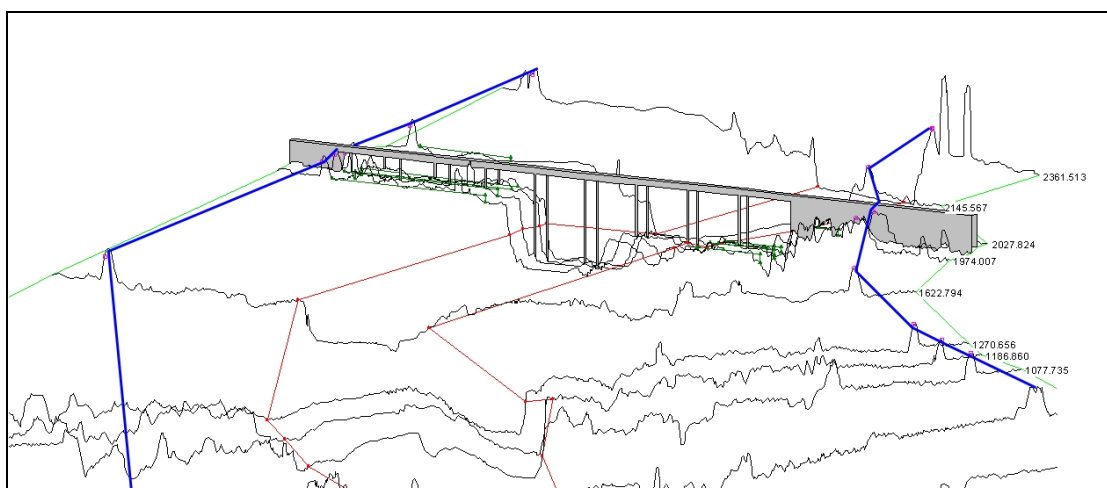
Robni in začetni pogoji se lahko razlikujejo glede na vrsto toka (možnost stalnega in nestalnega toka). Po opravljenem izračunu lahko rezultate v grafični in tabelarični obliki analiziramo še v programskem orodju HEC-RAS. Seveda pa je končni namen prenesti rezultate hidravlične analize v GIS orodje ter jih prikazati na podlagi DMT, da bi bili na voljo drugim analizam danosti v prostoru.

4.2.1 Dopolnitev geometrije

Geometrija rečnega korita in poplavnih območij je v celoti pripravljena na opisan način, vedno pa lahko izvedemo korekcije v posameznih prečnih profilih. V primeru, da imamo na razpolago na terenu izmerjene prečne profile na istih lokacijah, kot smo jih dobili na osnovi DMT, lahko primerjamo kote točk.

Kot smo omenili pri delu z GIS orodjem, tam ni mogoče vnesti podatkov o objektih, kot so mostovi in prepusti, zato je potrebno to storiti v hidravličnem modelu. Podati je treba natančne dimenzije objektov in zgostiti mrežo prečnih profilov na tem območju, saj lahko objekti predstavljajo veliko motnjo vodnemu toku. Na ožjem odseku vodotoka ob objektu so potrebni vsaj štirje prečni profili.

Potrebno oddaljenost prečnega prereza dolvodno določimo na terenu ob času visokih voda oziroma na podlagi eksperimentalnih metod. Oblika in dolžina objekta, ki ovira tok, velikost pretoka in hitrost so glavni faktorji, ki vplivajo na to razdaljo. Prečni prerez tik pred mostom oziroma prepustom mora biti na čim krajši razdalji gorvodno objekta, da zajamemo vplive nenadne zožitve in pospeška toka ob odprtini. Druga dva prečna profila sta na razdalji gorvodno in dolvodno, kjer še ni oziroma ni več čutiti vpliva mostu.



Slika 29: Prikaz geometrije rečnega korita dobljenega s pomočjo GIS orodja ter potek mostu, katerega geometrijo podamo v programu HEC-RAS. Z modrima črtama je prikazan potek protipoplavnih nasipov.

Možna je tudi interpolacija prečnih profilov, vendar se pojavi težava, saj interpolacija v kombinaciji GIS orodja in HEC-RAS poteka direktno med profiloma in ne sledi središčnici. Ta posebnost je izrazitejša posebno pri meandriranih vodotokih in praktično ni uporabna, kar je bilo opisano že v prejšnjih poglavjih.

4.2.2 Pretoki voda in hidravlični robni pogoji

Po zaključku urejanja geometrije vnesemo še pretoke, za katere bomo izvedli hidravlično analizo, in pripadajoče robne pogoje. Običajno zadostuje že pretok (vodotoka in pritokov) ter robni pogoj na spodnjem robu vodotoka, vendar pa je priporočljivo predvsem pri daljših odsekih podati pretoke in nivoje vodne gladine (če so le-ti poznani) tudi znotraj odseka (notranji robni pogoji), saj lahko pretok znatno naraste vzdolž toka. Za Sočo obstajajo dokaj dobri podatki, saj je vzdolž toka več merilnih postaj.

Z vnosom vseh potrebnih podatkov geometrije, pretokov in robnih pogojev je model pripravljen za hidravlični izračun. Odločimo se lahko za mirni, deroči ali izmenjujoči tok. V programu HEC-RAS je možna tudi kalibracija modela. Na podlagi izmerjenih vrednosti pretokov in nivojev gladine na posameznih merilnih mestih, kar predstavlja spodnji ali notranji robni dobimo vrednosti za umerjanje modela. Umerjanje modela, v primeru da imamo dovolj natančno geometrijo, poteka s spreminjanjem vrednosti koeficientov hrapavosti.

4.3 Prikaz rezultatov s programskim orodjem HEC-GeoRAS in ugotovitve

Po končani hidravlični simulaciji prenesemo izračunani potek gladin nazaj v HEC-GeoRAS, kjer izvedemo kartiranje obsega poplavljanja za obravnavane dogodke. Poleg poplavljenih območij dobimo s postopki v okolju HEC-GeoRAS tudi prikaz porazdelitve vodne globine. Za prikaz poligonov vodne gladine moramo le-te pretvoriti v obliko TIN. Ta postopek se izvede z interpolacijo višin vodne gladine med prečnimi profili. Naklon ploskev poligonov med profili predstavlja padec vodne gladine. Ker je bila geometrija izdelana s pomočjo programskega orodja HEC-GeoRAS, so poligoni prav tako tudi že umeščeni v prostor. Pri

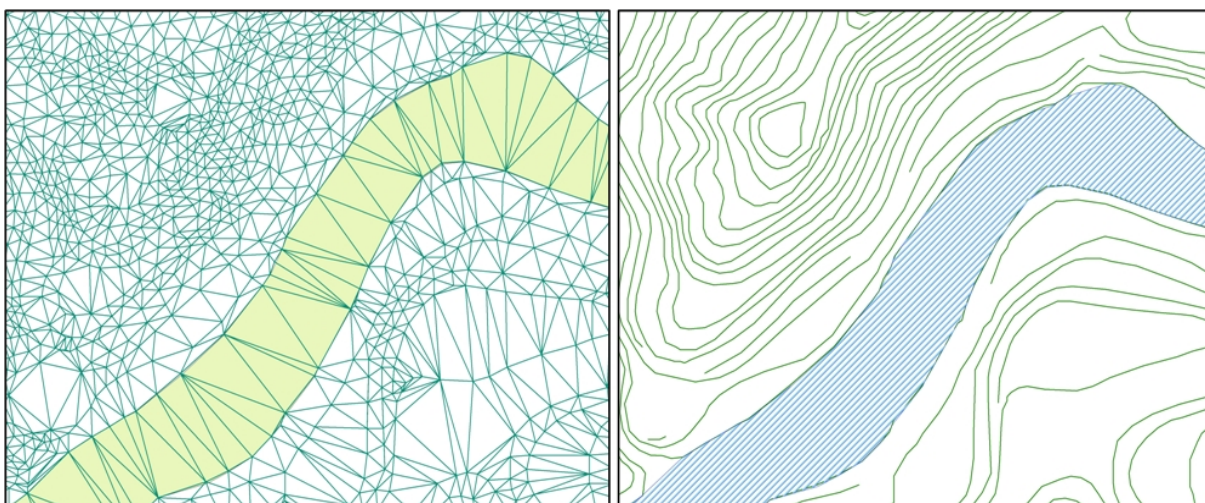
tem je potrebno poudariti, da poligonov, ki niso geopozicionirani, ni mogoče prenesti v GIS. Različna globina vode je prikazana z različnimi odtenki barv (slika 27).



Slika 30: Prikaz obsega poplavljanja reke Soče pri pretoku $1000\text{m}^3/\text{s}$. Večino vode še vedno prevaja glavna struga.

Če rečno korito ni v izgonu, je voda v koritu tudi ob poplavljanju najgloblja, kar je tudi lepo razvidno iz slike 29 in 32. V samem rečnem koritu je odtenek modre barve temnejši, kar prikazuje večjo globino. Program lahko na podlagi nepravilne trikotniške mreže topografije terena in vodne gladine natančno določi globino vode za poljubno točko. Različica programa HEC-GeoRAS, ki deluje v povezavi s starejšo verzijo programa ArcGIS, omogoča tudi prikaz hitrosti vode za obravnavano območje. Ta možnost še ni podprta pri uporabljeni verziji, kljub temu pa ArcGIS predstavlja močno orodje in omogoča učinkovito predstavitev rezultatov, tudi v 3D.

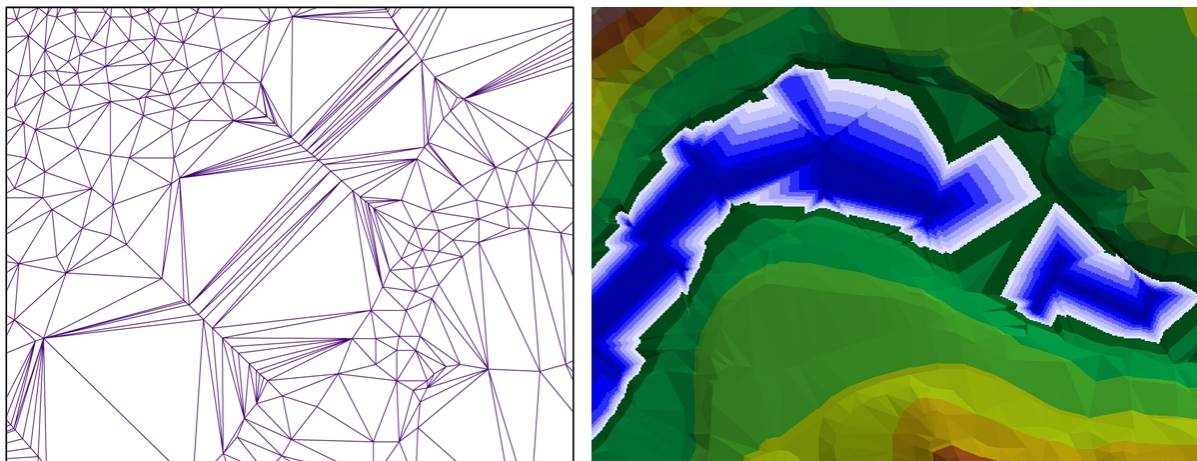
Analiza možnosti vključitve GIS orodja v postopke priprave geometrijske podlage za hidravlično modeliranje je pokazala, da je natančnost takšne analize predvsem odvisna od natančnosti digitalnega modela terena. Pokazalo se je, da lahko že majhne spremembe topografije vplivajo na hidravliko vodotoka. Za območja, kjer so na voljo le digitalizirane karte večjih meril, te metode dela praktično ni mogoče uporabiti. Takšen model je premalo natančen, predvsem pa je težava to, da ne prikazuje konfiguracije rečne struge (slika 28). Zaradi posledično višjega dna je tudi gladina vode višja. Ko geometrijsko podlago prenesemo v HEC-RAS, lahko rečno korito poglobimo s korekcijo točk posameznih prečnih profilov, če so le-te znane z meritev struge na terenu. S tem bi sicer dobili pravilno korito in tudi bolj natančne nivoje vodne gladine za posamezen pretok. Vendar pa to velja le, dokler je sposobnost struge zadostna za prevajanje robnega pretoka (angl. Bankfull discharge).



Slika 31: Prikaz TIN izdelane na podlagi izohips. Obarvan del prikazuje rečno korito in ker le-to ni pokrito z izohipsami, program pri triangulaciji direktno poveže točke nasprotnih bregov.

Preizkušena je bila tudi ideja o uporabi točk na terenu izmerjenih prečnih profilov v GIS orodju kot dodaten vir podatkov za izdelavo DMT. Izdelava DMT iz točk profilov s kombinacijo izohips se je prav tako izjalovila, saj poteka izdelava mreže neenakih trikotnikov DMT s pomočjo triangulacije, kjer program išče rešitev v mreži trikotnikov, ki so čim bližji enakostranični obliki. Prečni profili so izmerjeni na dokaj velikih medsebojnih razdaljah, zato prihaja do velikega popačenja. Takšen model terena je tako popolnoma neuporaben za prikaz vodne gladine, kot je razvidno iz spodnje slike. Za prikaz vodnih gladin program namreč naredi presek mreže DMT in vodne površine. Ker je DMT popačen in imajo točke med prečni

profili prevelike višinske vrednosti, je izris vodne gladine nenatančen in kaže nepovezano vodno površino celo v rečnem koritu kljub temu, da je bil izračun izveden za izredno velik pretok Soče (2000 m³/s).



Slika 32: Mreža DMT izdelana na osnovi izohips in točk prečnih profilov in na DMT prikazana vodna gladina.

Omenili smo, da natančnost digitalnega modela terena direktno vpliva na natančnost modeliranja, saj je dejanska topografija terena eden ob ključnih faktorjev, ki vpliva na vodni tok v strugi in izven nje (slika 30). Konfiguracija terena diktira smer toka, ga po eni strani ovira in drugi strani pa ga s svojim padcem omogoča in pospešuje. Kot edina možnost, ki bi zadostila natančnosti, se je pokazala izdelava DMT iz točk zajetih s tehnologijo LIDAR. Glavna prednost tehnologije LIDAR je v njeni natančni digitalni naravi, ki je veliko manj inherentna z horizontalnimi napakami v primerjavi s podatki dobljenimi iz izohips. Mreža DMT z velikostjo stranice osnovne celice od enega do nekaj metrov lahko resnično podaja dovolj natančno podobo terena z majhnimi topografskimi detajli, gradientom površin in podobno. LIDAR tudi omogoča kontinuirano zbiranje podatkov ter tako ponuja možnost vključitve morebitnih topografskih sprememb poplavnega območja ali rečnega korita v modeliranje že v času dogodka.

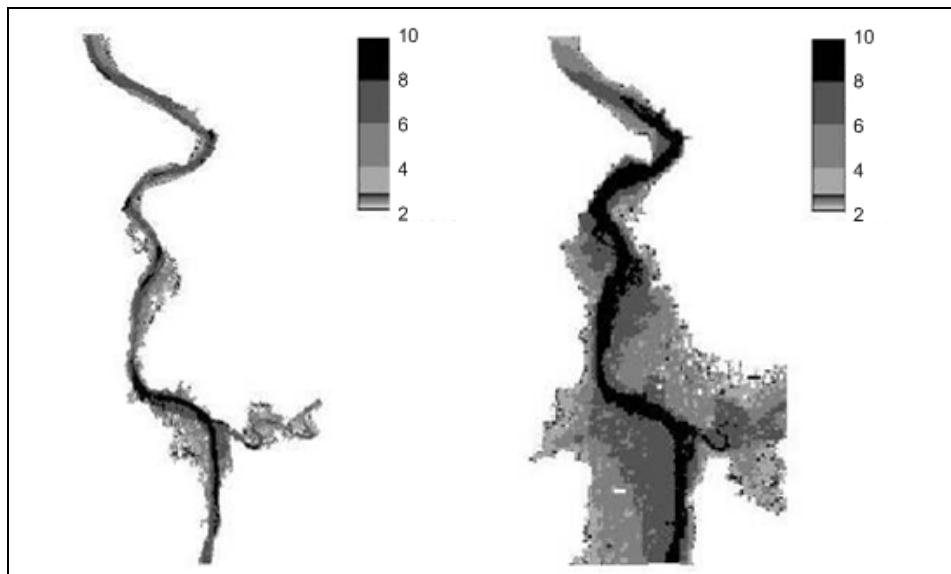
Na drugi strani pa se pojavljajo tudi pomankljivosti. Z takšnimi meritvami namreč dobimo ogromno količino podatkov, saj sistem vsako sekundo zapiše do tisoč podatkov. Za obdelavo takšnih količin podatkov, še posebej kadar želimo obravnavati obsežnejše območje, je zato

potrebna velika računalniška zmogljivost. Tu se ponuja rešitev v metodah interpolacije točk, s katerimi se zmanjša resolucija modela, posledično pa je manjša tudi natančnost. V primeru uporabe metod interpolacije se zato pojavlja vprašanje, do kakšnega nivoja smemo zmanjševati resolucijo modela, da bi kljub temu še obdržali zadovoljivo natančnost oziroma, ali je bolje uporabiti visoko resolucijski model in za obdelavo porabiti več časa.



Slika 33: Prikaz poplavljanja reke Soče pri pretoku $2500\text{m}^3/\text{s}$. Jasno se vidi kako protipoplavni nasipi predvsem na desnem bregu ščitijo industrijski obrat pred preplavitvijo.

Zaradi popačenja terena, ki je posledica slabe ponazoritve topografije, lahko pride do velike razlike v rezultatih pri istem pretoku, kar je razvidno iz slike 31. Za isto območje in isti pretok, vendar na modelu z različnima resolucijama prikaza terena, je metoda prikazala veliko razliko o velikosti poplavljenega območja. Težava je v tem, da metode za interpolacijo točk pri zmanjšanju resolucije upoštevajo premajhno število točk za določitev vrednosti vzdolž nove mreže. Zato bo potrebno, v primeru uporabe teh metod za integracijo lokalne topografije, le-te v bodoče izboljšati.



Slika 34: Prikaz razlike v velikosti poplavljenega območja pri istem pretoku vendar na modelih z različno resolucijo. Na levi je resolucija modela 5m, na desni pa 15m.

V nalogi so bili uporabljeni različni modeli terena, vendar pa nobeden od njih ne upošteva objektov na poplavnih območjih. Njihov vpliv lahko zajamemo s koeficienti hrapavosti, kar pa ne daje popolnega odgovora na vprašanje o hidrodinamičnem obnašanju na poplavnih površinah. V opisani metodi sicer lahko upoštevamo posamezne objekte s tem, da njihove površino, gledano v smeri toka, izločimo iz površine prečnega profila, vendar pa je lahko objekt popolnoma neprepusten, delno ali povsem prepusten za vodni tok. Objekti imajo tudi številne druge vplive na dinamiko vodnega toka znotraj poseljenih območij.

Za takšne primere pa je že treba uporabiti 2D hidravlične modele. Primere teh je pokazal Trček v svoji magistrski nalogi (Ocenjevanje poplavnih škod, 2003), kjer se vidijo tudi območja povratnih tokov, zastoje in povečane hitrosti ob ovirah ipd. Logično nadaljevanje tega dela je zato uporaba 2D modelov.

5 ZAKLJUČEK

Učinkovito preventivno ukrepanje in učinkovito ravnanje ob pojavu visokih voda je v veliki meri odvisno tudi od natančnosti določanja stopnje z vodami povezanimi nevarnostmi na posameznih lokacijah. Natančne karte, ki prikazujejo območja poplavljenih ob pretokih z različnimi povratnimi dobami, predstavljajo osnovne podatke organom zaščite pred nevarnostmi visokih voda in načrtovalcem različnih ukrepov ob in na vodotokih, kot so nasipi, zaježitve, kanali, razbremenilniki, ipd. Posebno pri bolj ravninskih območjih lahko že manjša nenatančnost v izračunu vodne gladine povzroči ugotovitev, da naj bi računsko obstajala poplavitve na večjih območjih. Ker za območja, ki jih voda "občasno poplavlja", predpisi določajo znatne omejitve rabe, so lastniki nepremičnin zelo zainteresirani za čim večjo točnost.

Za analiziranje obsežnejših območij so fizični modeli praktično neuporabni, saj bi bili modeli večjih meril, ki bi zagotavljali zadovoljivo natančnost, preveliki za običajne prostorske kapacitete hidravličnih laboratorijev. Rešitev za analiziranje problemov poplavljanja vodotokov na obsežnejših območjih predstavljajo zato matematični modeli. Za matematične modele so dolgo časa kot osnovno bazo podatkov predstavljali na terenu izmerjeni prečni profili. Le-ti navadno niso izmerjeni na dovolj majhnih razdaljah, kar bi zagotavljalo dovolj natančno predstavitev konfiguracije rečne struge. Hkrati pa tudi pogosto ne vsebujejo celotnih poplavnih območij, saj se njihov obseg šele mora izračunati. Da bi dobili natančno ponazoritev terena potrebujemo ustrezno število posnetih značilnih točk terena s prostorskimi koordinatami. V preteklosti to zaradi metod, ki so bile na voljo, praktično ni bilo mogoče ali pa bi za takšno nalogo potrebovali ogromno časa in predvsem finančnih sredstev. Konfiguracija rečne struge in poplavnih območij je eden glavnih dejavnikov, ki vplivajo na hidravlične lastnosti vodotoka, zato se je učinkovita rešitev za njihovo opisovanje ponudila v uporabi geografskih informacijskih sistemov. Slednji poleg ostalih podatkov o lastnostih prostora vsebujejo tudi topografijo terena.

Izkušnje dobljene pri združitvi hidravličnih in GIS modelov so kmalu pokazale potrebo po izredno natančnih digitalnih modelih terena, ki predstavljajo podlago za izdelavo geometrije. Pri uporabi digitaliziranih izohips klasičnih geodetskih kart za izdelavo DMT so se namreč

pojave številne slabosti. Karte GKB 25, ki so bile v našem primeru najprej uporabljene, vsebujejo za natančen prikaz topografije premalo točk terena, saj je osnovna celica mreže prevelika, hkrati pa tudi ne prikazujejo topografije rečne struge. Napaka pri opisu terena se pokaže kot previsoko rečno dno in pojav poplavljanja pri manjših pretokih, saj izračun nepravilno upošteva manjši volumen korita. Posledično se ugotovi manjša pretočna prevodnost struge. Tako je nivo, pri katerem voda prestopi bregove, hitreje dosežen kot je to v dejanskih razmerah. Omenjeno težavo zelo uspešno rešuje novejša tehnologija LIDAR, ki omogoča tudi pridobivanje podatkov topografije terena pod vodno gladino (seveda le do določene globine). Zaenkrat so meritve s tehnologijo LIDAR precej drage in zato še niso širše uporabljene. Poleg stroškov je omejitveni faktor tudi precejšnja obsežnost zajetih in procesiranih podatkov, zato je potrebna za obdelavo in izdelavo DMT na podlagi LIDAR tehnologije precej zmogljiva računalniška oprema. Kljub omenjenim pomanjkljivostim pa tehnologija prinaša številne prednosti in zato postaja nepogrešljiva na področjih, kjer imajo natančni prostorski podatki velik pomen. Sem sodi tudi hidravlika odprtih vodotokov. V Sloveniji na področju opazovanja in analiziranja odprtih vodotokov omenjena tehnologija še ni bila uporabljena. Pri nastajanju diplomske naloge so bili zato uporabljeni podatki, ki so nam bili na voljo v sklopu Interreg programa IIIA z naslovom SIMIS (Sistem integriranega monitoringa reke Isonzo - Soča).

Podatki so bili predhodno obdelani in shranjeni v obliki, ki je omogočala uporabo v GIS orodju ESRI ArcGIS, kjer je bil izdelan DMT. Na podlagi DMT je bila s pomočjo razširitve HEC-GeoRAS pripravljena geometrija rečnega korita in poplavnih območij, ki je bila prenesena v hidravlični matematični model HEC-RAS. V programu HEC-RAS je bilo potrebno geometrijo dopolniti s podatki, ki jih s tehnologijo LIDAR ni mogoče dovolj natančno zajeti. Sem sodijo predvsem objekti, kot so mostovi in prepusti. Po opravljenem hidravličnem izračunu so bili poligoni vodne gladine preneseni nazaj v GIS orodje, kjer so bili izrisani na podlago DMT. Izrisane karte poplavljanja omogočajo nadalje analiziranje obravnavanega območja.

Številne raziskave po svetu so pokazale izredno učinkovitost omenjenega pristopa k analiziranju vodotokov, predvsem ob ekstremnih dogodkih, ki se le redko pojavijo in o katerih imamo le malo podatkov, moramo pa biti nanje čim boljše pripravljeni. S takšnimi analizami

pa lahko tudi ugotovimo vplive posegov v območje vodotokov, učinkovitost protipoplavnih ukrepov itd. V našem primeru se je pokazala možnost detajlnega modeliranja in doseganja dobrih rezultatov pri nižjih vodostajih. Natančnost rezultatov analiziranja dogodkov velikih pretokov pa je bistveno težje pravilno ovrednotiti, saj nam niso bili na voljo podatki izmer višin doseženih nivojev vode ob ekstremnih dogodkih, ki so se že zgodili. Tehnologija LIDAR omogoča tudi kontinuirano zbiranje podatkov med posameznimi dogodki ali v času dogodkov in tako istočasni vnos morebitnih topografskih sprememb, ki se pogosto pojavljajo ob ekstremnih dogodkih (npr. zdrsi zemljine, močnejša erozija itd), in njihov vnos v analize. Takšen pristop lahko še poveča natančnost analiz in skupaj z modeli napovedovanja visokovodnih dogodkov omogoča predvidevanje in napovedovanje poplavljanja ter obseg in potek le-tega.

6 VIRI IN LITERATURA

Uporabljeni viri:

Samostojne publikacije

- Bat, M. in sod. 2003. Vodno bogastvo Slovenije. Ljubljana : Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija Republike Slovenije za okolje: 131 str.
- Chanson, H. 1999. The Hydraulics of open Channel Flow. Hodder Headline. London: 585 str.
- Gosar, L. 1996. Povezava računa gladin v odprtih vodotokih in CAD sistema Diplomski naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 60 str.
- Gosar, L in sod. 2006. Analiza hidravličnih lastnosti vodotokov z uporabo GIS orodja. GIS v Sloveniji 2005-2006.
- Krušič, M. 2005. Povezanost prostorskih podatkov o vodnih sistemih. Diplomski naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 86 str.
- Rak, G. 2005. Analiza hidravličnih lastnosti vodotokov z uporabo GIS orodja. Seminar. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 70 str.
- Steinman, F. 1999. Hidravlika. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana. 295 str.
- Šumrada, R. 2005. Strukture podatkov in prostorske analize. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana: 284 str.
- Šumrada, R. 2005. Tehnologija GIS. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana: 330 str.
- Trček, R. 2003. Ocenjevanje poplavne škode. Magistrski naloga. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana: 130 str.
- US Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center 2002. HEC-RAS, River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, Version 3.1.3. Davis, CA: 250 str.

Elektronski viri

- Alemseged, T. H. 2005. Integrating Hydrodynamic Model and High Resolution DEM For Flood Modelling. Enshede, Netherlands. 84 str.
http://www.itc.nl/library/Papers_2005/msc/wrem/haile.pdf#search=%22Integrating%20Hydrodynamic%20Model%20and%20High%20Resolution%20DEM%20For%20Flood%20Modelling.%22 (4.1 2006)
- Burdziej, J. 2003. GIS and 3-Dimensional Digital Terrain Modeling. Nicholas Copernicus University, Torun, Poland: 15 str.
http://www.giscentrum.lu.se/www_summeruniversity/projects2003/Burdziej.pdf
- Krevs, M. 2001. Analize z geografskim informacijskim sistemom.
<http://zavod.zrsss.si/ppt/1> (20. 12. 2005)
- Merwade, V. M. 2004. Geospatial Description of River Channels in Three Dimensions. Austin, University of Texas: 251 str. <http://www.crwr.utexas.edu/reports/pdf/2004/rtp04-08.pdf> (20. 2. 2006)
- Nagwa, E. A. 2003. Refined Modelling For Flood Extent Predictions Using Laser Scanning. . Enshede, Netherlands. 80 str.
http://www.itc.nl/library/Papers_2003/msc/gfm/nagwa.pdf#search=%22nagwa%20flood%20modelling%22 (11.11. 2006)
- Soške elektrarne Nova Gorica. <http://www.seng.si/core.php?ID=2003170710000008> (10. 6. 2005)

Ostali viri

Samostojne publikacije

- Environmental System Research Institute, 2000. ArcGIS, The Geographic Information System for Everyone, Using ArcGIS, Redland, CA: 528 str.
- Environmental System Research Institute, 1996. ArcView 3D Analyst, 3D Surface Creation, Visualization and Analysis, Using the ArcView 3D Analyst, Version 3.2a, Redland, CA: 118 str.

- Environmental System Research Institute, 1996. ArcView Spatial Analyst, Advanced Spatial Analysis Using Raster and Vector Data; Using the ArcView Spatial Analyst, Redland, CA: 148 str.
- Mikoš, M.; Mastnak, M. 1998. Navodila za program HEC-RAS, verzija 2.1. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana: 97 str.
- Mikoš, M. 2000. Urejanje vodotokov. Učbenik. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana: 182 str.
- Petkovšek, G.; Brilly, M.; Mikoš, M. 1999: Poplavna varnost notranje Mure, Mišičev vodarski dan 1999, skripta referatov.
- Prešeren, T. 2005. Hidravlično modeliranje obratovanja hidroenergetskega objekta. Diplomski naloga. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana: 116 str.
- Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana: 279 str.
- Trček, R. 1999. Zadrževalniki na Selški Sori za zmanjšanje poplavne škode. Diplomski naloga. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana: 147 str.
- Zadnik, B. (1997): Tehnični slovar za pregrade. Slovenski komite za velike pregrade, Ljubljana: 425 str.

Elektronski viri

- Ackerman, C., Evans, T.; Brunner, G. 2002. Linking GIS to Hydraulic Analysis Using ARC/INFO and HEC-RAS, Texas
<http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap682/p682.htm> (20.11.2005)
- Ackerman, C. 2002. Hydraulic Modeling of the Salt River, Arizona Using HEC-GeoRAS, Davis, CA
<http://gis.esri.com/library/userconf/proc00/professional/papers/PAP953/p953.htm>
(20.11.2005)
- Agencija RS za okolje, Hidrometeorološki zavod Slovenije, napovedi in podatki za reke po Sloveniji. <http://www.arso.gov.si/podrocja/vode> (20.4. 2005)
- Alemseged, T.H., Rientjes, T. H. M. 2005. Effects of LIDAR DEM resolution in flood modelling.

<http://www.commission3.isprs.org/laserscanning2005/papers/168.pdf#search=%22Effects%20of%20LIDAR%20DEM%20resolution%20in%20flood%20modelling%20%22> (11.1.2006)

- Andrysiak, P. B. 2000. Visual floodplain modelling with geographic information system GIS. <http://www.crrw.utexas.edu/reports/2000/rpt00-4.shtml> (4.4.2006)
- Barr, T. 2000. Application of GIS tools for Hydraulic Modeling, Texas <http://ceprofs.tamu.edu/folivera/TxAgGIS/Spring2002/Barr/Barr.htm> (20.4.2006)
- Bates, P., Marks, K. 1998. Integration of High Resolution Topographic Data with Floodplain Flow Models. http://divcom.otago.ac.nz/SIRC/GeoComp/GeoComp98/92/gc_92.htm (10.11.2005)
- Brandt, S. A. 2005. Resolution issues elevation data during inundation modeling of river flood. http://www.hig.se/~sab/publications/papers/brandt_2005b.pdf (3.3.2006)
- Chae Kwan, L. 2003. Applying GIS to Hydraulic Analysis, Texas <http://ceprofs.tamu.edu/folivera/TxAgGIS/Spring2003/Lim/Lim.pdf#search=%22Applying%20GIS%20to%20Hydraulic%20Analysis%22> (8.12. 2005)
- Colby, J.; Mulcahy, K.; Wang, Y. 2001. Modeling flooding extent from Hurricane Floyd in the coastal plains of North Carolina, East Carolina <http://www.colorado.edu/hazards/qr/qr126/qr126.html> (30.11.2005)
- Jones, J. L. In sod. 2001. Updating flood maps efficiently using existing hydraulic models, very-high accuracy elevation data, and geographic information system. <http://wa.water.usgs.gov/pubs/ofr/floodgis/> (2.10.2005)
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Maidment, D. R. 2005. Regionale scale flood modelling using NEXRAD rainfall, GIS and HEC-HMS/RAS: a case study for for the San Antonio River Basin Summer 2002 Storm Event. <http://www.geo.utexas.edu/climate/Research/Reprints/FloodModeling05.pdf#search=%22Regionale%20scale%20flood%20modelling%20using%20NEXRAD%20rainfall%2C%20GIS%20and%20HEC-HMS%2FRAS%20%20%22> (20.1. 2006)
- Maidment, D. R., Tate, E., Olivera, F. 1998. GIS for floodplain mapping in design of highway drainage facilities. http://www.utexas.edu/research/ctr/pdf_reports/1738_4.pdf#search=%22GIS%20for%20flood

[oodplain%20mapping%20in%20design%20of%20highway%20drainage%20facilitis.%22](#)

(8.12.2005)

- McMaster, K. 2000. Stream Modeling: Channel Stabilization and Visualization Using ArcView
<http://gis.esri.com/library/userconf/proc04/docs/pap1044.pdf#search=%22Stream%20Modeling%20Channel%20Stabilization%20and%20Visualization%20Using%20ArcView%22> (20.3. 2006)
- NASA Facts, Airborne UV Differential Absorption Lidar (DIAL): Measuring Ozone and Aerosols in the Atmosphere. <http://oea.larc.nasa.gov/PAIS/DIAL.html> (10. 1.2006)
- Natek, K. 1998. Možnosti nadaljnega sonaravnega razvoja ob treh južnoalpskih rekah: Piavi, Tilmentu in Soči. Ljubljana
http://www.ff.uni-lj.si/oddelki/geo/publikacije/dela/files/dela_13/15_karel_natek.pdf
(3.8.2005)
- Olivera, F.; Endres, B. (2003): Processing Geospatial Data with HEC-GeoRAS, Texas
<http://ceprofs.tamu.edu/folivera/TxAgGIS/Spring2003/Endres/Endres%20Term%20paper.htm>
(30.11. 2005)
- Sauer, A. 2002. Stormwater Master Plannig with GIS. A Case Study of the Blue River Watershed
<http://gis.esri.com/library/userconf/proc01/professional/papers/pap946/p946.htm> (10. 10. 2005)
- Shamsi, S. 2000. GIS Applications in Floodplain management, Pittsburgh
<http://gis.esri.com/library/userconf/proc02/pap0490/p0490.htm> (20.5.2005)
- Snead, D., Maidment, D. 2000. Flood Visualization Using HEC-GeoRAS, Texas
<http://www.crrw.utexas.edu/gis/gishydro01/Class/exercises/georas.html> (24.6. 2005)
- Tate, E., 1999. Floodplain Modelling and Terrain Modelling Using HEC-RAS and ArcView GIS.
<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/grad/tate/research/Floodmap/webfiles/floodmap.html> (3.4.2006)
- Ulaga, F. 2002. Trendi spreminjanja pretokov Slovenskih rek, Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija RS za okolje, Ljubljana

http://www.ff.uni-lj.si/oddelki/geo/publikacije/dela/files/dela_18/10%20ulaga.pdf

(15.6.2006)

- US Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center, 2003. Susquehanna River Flood Warning and Response System.

http://www.stormwatch.com/2003nhwc/s3b_Hanbali.pdf#search=%22Susquehanna%20River%20Flood%20Warning%20and%20Response%20System%22 (20.2. 2006)

- Werner, M. 2004. Spatial Flood Extent Modeling, A Performance-Based Comparison.

<http://repository.tudelft.nl/consumption/idcplg?IdcService=GET> (20. 11.2005)

**PRILOGA H: VREDNOSTI MANNINGOVIH KOEFICIENTOV HRAPAVOSTI ZA
NARAVNE VODOTOKE**

VRSTA IN OPIS KANALA IN POPLAVNIH POVRŠIN	Minimum	Običajno	Maksimalno
1. Naravni vodotoki			
Rečno korito			
a. Čisto, ravno, polno in brez tolmunov	0.025	0.03	0.033
b. Enako, kot zgoraj, s kamenjem in zarast	0.03	0.035	0.04
c. Vijugast, čist kanal s tolmoni in prodom	0.033	0.04	0.045
d. Enako, kot "c" s kamenjem in pleveli	0.035	0.045	0.05
e. Enako, kot "d" z manjšim padcem in nižjo gladino	0.04	0.048	0.055
f. Podobno kot "d" z večjo količino kamenja	0.045	0.05	0.06
g. Počasni ravni del, z večjo količino pleveli in tolmunov	0.05	0.07	0.08
h. Korito močnejše poraščeno s plevelom in z globokimi tolmoni oziroma gosteje zaraščene poplavne poti	0.075	0.1	0.15
i. Gorski vodotok (strme brežin, brez zarasti) s peščenim ali prodnatim dnom	0.03	0.04	0.05
j. Enako kot "i" z večjimi skalami v koritu	0.04	0.05	0.07
Poplavne površine			
Travniki brez grmičevja			
a. Nizka pokošena trava	0.025	0.03	0.035
b. Visoka trava	0.03	0.035	0.05
Obdelovalne površine			
a. Brez rastlinja	0.02	0.03	0.04
b. Zreli, v vrstah gojeni pridelki	0.025	0.035	0.45
c. Zreli, po vsej površini gojeni pridelki	0.03	0.04	0.05
Grmičevje			
a. Posamezni grmi, goste pleveli	0.035	0.05	0.07
b. Redko grmičevje in drevje brez listja (pozimi)	0.035	0.05	0.06
c. Redko grmičevje in drevje z listjem (poleti)	0.04	0.06	0.08
d. Srednje gosto grmičevje in drevje brez listja (pozimi)	0.045	0.7	0.11
e. Srednje gosto grmičevje in drevje z listjem (poleti)	0.07	0.1	0.16
Drevje			
a. Čistina z drevesnimi štori in brez mladik	3	0.04	0.08
b. Čistina z drevesnimi štori in gostimi mladikami	0.05	0.06	0.12
c. Gostejši gozdovi z malo podrtimi drevesi, podrasti z gladino pod krošnjami dreves	0.08	0.1	0.16
e. Enako kot c., le da nivo vode sega do krošenj	0.1	0.12	0.16
f. Gost gozd z listjem (poleti)	0.11	0.15	0.2

**PRILOGA I: VREDNOSTI MANNINGOVIH KOEFICIENTOV HRAPAVOSTI ZA
UMETNO PREOBLIKOVANA REČNA KORITA**

VRSTA IN OPIS KANALA IN POPLAVNIH POVRŠIN	Mininum	Običajno	Maksimalno
2. Obložena ali grajena rečna korita (delitev glede na vrsto uporabljenega materiala)			
Beton			
a. Zglajen in ometan beton	0.011	0.013	0.015
b. Ometan	0.013	0.015	0.016
c. Ometan s peskom na dnu	0.015	0.017	0.02
d. Nedokončan	0.014	0.017	0.02
e. Brizgan beton, gladek	0.016	0.019	0.023
f. Brizgan beton, valovit	0.018	0.022	0.025
g. Beton na izkopani dobri skali	0.17	0.02	
h. Beton na izkopani slabi skali	0.022	0.027	
Dno iz betona, brežine..			
a. prevlečene z obdelanim kamnom v malti	0.015	0.017	0.02
b. prevlečene z neobdelanim kamnom v malti	0.017	0.02	0.024
c. zidane z gruščem v cementu in malti	0.016	0.02	0.024
d. zidane z gruščem v cementu	0.02	0.025	0.03
e. zidane z suhim gruščem ali odpadnim kamenjem	0.02	0.03	0.35
Prodnato dno, brežine..			
a. iz opaženega betona	0.017	0.2	0.25
b. iz neobdelanga kamna v malti	0.02	0.23	0.026
c. suhega gruščča ali odpadnega kamenja	0.023	0.033	0.036
Opeka			
a. glajena	0.011	0.013	0.015
b. galjena v cementni malti	0.12	0.015	0.018
Kovina			
a. Gladka kovinska površina	0.11	0.012	0.014
b. Valovita pločevina	0.21	0.025	0.03
Asfalt			
a. Gladek	0.013	0.013	
b. Grob	0.016	0.016	
Raslinska obloga			
	0.03		0.5
Tesan kamen			
	0.013	0.015	0.017
Cement			
a. Čista površina	0.01	0.012	0.013
b. Ometana površina	0.011	0.013	0.015
Les			
a. Raven nevzdrževan	0.01	0.12	0.014
b. Raven, smoljen	0.011	0.013	0.015
c. Opaž z deskami	0.012	0.015	0.018
d. Opaž z deskami, prekrit	0.01	0.014	0.017

**PRILOGA J: VREDNOSTI MANNINGOVIH KOEFICIENTOV HRAPAVOSTI ZA
IZKOPANA IN OČIŠČENA REČNA KORITA**

VRSTA IN OPIS KANALA IN POPLAVNIH POVRŠIN	Minimum	Običajno	Maksimalno
3. Izkopani in očiščena naravna korita			
Zbita, poravnana zemljina			
a. Čista, pred kratkim končana	0.016	0.018	0.02
b. Čista, po preperevanju	0.018	0.022	0.025
c. Prod, zbita področja, čist	0.022	0.025	0.03
d. Nizka trava, malo plevli	0.022	0.027	0.033
Vijugast in iz zemljine			
a. Brez rastlinja	0.023	0.025	0.03
b. trava, nekaj plevli	0.025	0.03	0.033
c. Gosti plevel ali gosto vodno rastje v globokih kanalih	0.03	0.035	0.04
d. Zemeljsko dno in kamnite brežine	0.028	0.03	0.035
e. Kamnito dno in z plevelom zarasle brežine	0.025	0.035	0.04
f. Tlakovano dno in čiste brežine	0.03	0.04	0.05
Izkopana ali očiščena korita			
a. Brez vegetacije	0.025	0.028	0.033
b. Redko grmičevje na brežinah	0.035	0.05	0.06
Skalnat korito			
a. Gladko in nespremenljivo ostenje	0.025	0.035	0.04
b. Nazobčano in nepravilno ostenje	0.035	0.04	0.05
Nevzdrževani kanali, porasčena z plevli in grmičevjem			
a. Čisto dno, grmičevje na brežinah	0.04	0.05	0.08
b. Enako kot "a", grmičevje do gladine vode	0.045	0.07	0.11
c. Goste plevli do gladine vode	0.05	0.08	0.12
d. Gosto grmičevje, visok nivo vode	0.08	0.1	0.14