

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Repič, U., 2015. Analiza hidravličnih razmer v strmi strugi na primeru ureditve struge Hotoveljščice. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Rusjan, S., somentor Sodnik, J.): 39 str.

Datum arhiviranja: 01-10-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Repič, U., 2015. Analiza hidravličnih razmer v strmi strugi na primeru ureditve struge Hotoveljščice. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Rusjan, S., co-supervisor Sodnik, J.): 39 pp.

Archiving Date: 01-10-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
VODARSTVO IN OKOLJSKO
INŽENIRSTVO

Kandidat:

URBAN REPIČ

**ANALIZA HIDRAVLIČNIH RAZMER V STRMI STRUGI
NA PRIMERU UREDITVE STRUGE HOTOVELJŠČICE**

Diplomska naloga št.: 48/B-VOI

**ANALYSIS OF HYDRAULIC CONDITIONS IN STEEP
RIVER CHANNEL ON THE CASE OF
HOTOVELJSCICA TORRENT**

Graduation thesis No.: 48/B-VOI

Mentor:

doc. dr. Simon Rusjan

Somentor:

viš. pred. mag. Jošt Sodnik

Ljubljana, 24. 09. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna«

IZJAVE

Spodaj podpisani Urban Repič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom
»Analiza hidravličnih razmer v strmi strugi na primeru ureditve struge Hotoveljščice«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ajdovščina, september 2015

Urban Repič

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN INZVLEČEK

UDK:	556.536:627.1(043.2)
Avtor:	Urban Repič
Mentor:	doc. dr. Simon Rusjan, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.
Somentor:	viš.pred. mag. Jošt Sodnik, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Analiza hidravličnih razmer v strmi strugi na primeru ureditve struge Hotoveljščice
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	39 str., 16 sl., 6 tab., 8 graf.
Ključne besede:	hidravlika, strme struge, modeliranje, Hec-Ras program, hidravlična analiza, predlog ureditve struge

IZVLEČEK

Obsežno območje velikih naklonov in neenakomerna porazdelitev padavin v Sloveniji imata za posledico velik delež vodotokov, ki imajo hudourniški značaj. Tako se vsak dan srečujemo in skušamo odpraviti težave, ki jih v grajeno okolje prinašajo hudourniki. Standardne enačbe za vodotoke z manjšimi padci na katerih slonijo tudi računalniški programi za modeliranje vodotokov pa na takih območjih pogosto ne dajejo pravih rezultatov. V diplomski nalogi je obdelana problematika hidravlike strmih strug pri uporabi klasičnih hidravličnih enačb in matematičnih hidravličnih modelov kot je npr. Hec-Ras. Na konkretnem izbranem odseku Hotoveljščice je v praktičnem delu naloge opravljen pregled stanja struge in analiza hidravličnih in erozijskih procesov. Predlagana je tudi idejna zasnova protipoplavne ureditve izbranega odseka struge.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	556.536:627.1(043.2)
Author:	Urban Repič
Supervisor:	Prof. Simon Rusjan, Ph.D.
Cosupervisor:	Assist. Jošt Sodnik, M.Sc.
Title:	Analysis of hydraulic conditions in steep river channel on the case of Hotoveljščica torrent
Document type:	Graduation Thesis – University studies
Scope and tools:	39 p., 16 fig., 6 tab., 8 graph.
Keywords:	hydraulics, steep streams, modeling, Hec-Ras program, a hydraulic analysis, preposition for regulation of river channel

ABSTRACT

Extensive areas of steep slopes and uneven distribution of precipitation in Slovenia result in a great number of watercourses which have torrential characteristics. That is why we are on a daily basis encountering and trying to deal with problems which torrents are bringing into built environment. Computer programs used for modeling of watercourses are based on standard equations for analysing hydraulic conditions in lowland watercourses; they might not give correct results in steep torrential watercourses. This graduation thesis focuses on the issue of hydraulics of steep stream channels and the limitations when using classic hydraulic equations and mathematical hydraulic models, such as Hec-Ras. In the practical part, a specific section of the Hotoveljščica torrent is examined in terms of river-bed and hydraulic conditions additionally, erosion processes are analyzed. An outline plan for flood protection measures at the analyzed section of the Hotoveljščica torrent is proposed.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Za vodenje, pomoč in vse popravke pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Simonu Rusjanu, za priskrbljene podatke za hidravlično analizo pa se močno zahvaljujem somentorju viš. pred. mag. Joštu Sodniku.

V največji meri pa se zahvaljujem mojim staršem, ki sta mi omogočila študij in tako prispevala velik delež k nastanku te diplomske naloge.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	Splošno o urejanju hudournikov	2
2.1	Prečne ureditve pri urejanju hudournikov	2
2.2	Vzdolžne ureditve pri urejanju hudournikov	3
2.3	Vegetacijske zgradbe pri urejanju hudournikov	3
3	Hidravlika strmih strug	4
4	Hidravlična analiza	8
4.1	Uvod v hidravlično analizo	8
4.1.1	Povratna doba in višina gladin	8
4.1.2	Mirni, deroči in mešani režim toka.....	9
4.1.3	Erozijski procesi-strižne napetosti.....	10
5	HEC-RAS program.....	11
5.1	Predstavitev programa Hec-Ras.....	11
5.2	Omejitve programa Hec-Ras	13
5.3	Priporočila glede uporabe programa Hec-Ras.....	14
6	Vrednotenje rezultatov hidravličnega modela HEC-RAS v bolj strmih strugah.....	16
6.1	Opis raziskave.....	16
6.2	Rezultati raziskave	17
7	Poplave leta 2014.....	19
8	HIDRAVLIČNA ANALIZA Potoka Hotoveljščica.....	21
8.1	Potok Hotoveljščica	21
8.2	Hec-Ras model Hotoveljščice.....	22
8.3	Primerjava višine gladin pri pretokih z različnimi povratnimi dobami.....	23
8.4	Primerjava mirnega, deročega in mešanega režima toka	26
8.5	Erozijski procesi-analiza strižnih napetosti	30
9	Zasnova protipoplavne ureditve izbranega odseka struge	31
9.1	Povzetek predloga predvidene ureditve potoka Hotoveljščica (VGP d.d. Kranj)	31
9.2	Predlog ureditve potoka Hotoveljščica (avtorjev predlog)	33
10	Zaključek.....	35
11	VIRI:.....	37

KAZALO SLIK

Slika 1: Energija v prečnem prerezu v odvisnosti od globine vode (Brilly in Šraj, 2005)	9
Slika 2: Členi energijske enačbe (Hladnik, 2007)	12
Slika 3: Priporočila za postavitev prečnih profilov na izbranem vodotoku (General guidelines..., 2014).....	15
Slika 4: Kanal reke Florida (May, Lopez, Brown, 2000).....	16
Slika 5: Naravna struga reke Florida (May, Lopez, Brown, 2000).....	16
Slika 7: Višina padavin od jutra 21. oktobra do zgodnjega popoldneva 22. oktobra na podlagi meritev meteoroloških postaj in radarskih meritev padavin (Hidrološko poročilo...,2014)	19
Slika 8: Posledice neurja v vasi Hotovlja, posneto 22.10.2014 (foto: Marjana Hanc).....	20
Slika 9: Poplavljanje in erozija Hotoveljščice v naselju Hotovlja, posneto 22.10.2014 (foto: Gašper).....	20
Slika 10: Lokacija Hotoveljščice na zemljevidu Slovenije(Atlas okolja, 2015)	21
Slika 11: Prispevno območje Hotoveljščice z vodotoki(Atlas okolja, 2015)	21
Slika 12: Hotoveljščica, primer pragu (avtor, terenski ogled 1.6.2015)	24
Slika 13: Urejena struga v spodnjem delu Hotoveljščice (avtor, terenski ogled 1.6.2015).....	32
Slika 14: Nedovoljena gradnja objektov preko struge (avtor, terenski ogled 1.6.2015)	32
Slika 15: Številne premostitve potoka Hotoveljščica (avtor, terenski ogled 1.6.2015)	33
Slika 16: Možne lokacije suhega zadrževalnika visokih vod ob Hotoveljščici.....	35

KAZALO TABEL

Tabela 1: Nakloni in pripadajoči $\cos\theta$ (povzeto po Hec-Ras Reference Manual, 2010).....	14
Tabela 2: Rezultati raziskave (May, Lopez, Brown,2000).....	18
Tabela 3: Pretok pri različnih povratnih dobah	22
Tabela 4: Maksimalne hitrosti v vodotoku pri različnih pretokih	25
Tabela 5: Maksimalne in minimalne vrednosti Froud-ovega števila pri različnih pretokih	27
Tabela 6: Višina gladin pri mirnem in deročem režimu	30

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Višina gladin pri različnih pretokih.....	23
Grafikon 2: Pretočne hitrosti pri različnih pretokih	25
Grafikon 3: Froudovo število pri različnih pretokih	27
Grafikon 4: Pretočne hitrosti pri različnih režimih(Q100).....	28
Grafikon 5: Pretočne hitrosti pri različnih režimih(Q20).....	28
Grafikon 6: Višina gladin pri različnih režimih(Q100).....	29
Grafikon 7: Višina gladin pri različnih režimih(Q20).....	29
Grafikon 8: Strižne izgube pri različnih pretokih	31

1 UVOD

Urejanje povirij voda in hudourniških območij je v Sloveniji stalna naloga pri urejanju in vzdrževanju vodnega režima kot sestavnega dela vodnega gospodarstva. Pomembno mesto zaradi vodotokov, ki imajo hudourniški značaj, njihova skupna dolžina je kar prek 8000 kilometrov, zavzema ustaljevanje in urejanje strmih hudourniških strug. To lahko storimo z zmanjševanjem padcev dna strug ter utrjevanjem dna in brežin, pri čemer pa moramo nujno določiti maksimalno hidravlično prevodnost hudourniških strug za vodo in plavine. (Mikoš, 1996). Pri tem si v današnjih časih, v veliki meri pomagamo z računalniško zasnovanimi modeli, ki pa slonijo na uporabi hidravličnih enačb, katerih teoretična uporaba je večinoma omejena na položnejše odseke vodotokov. Tako lahko pričakujemo, da pri izračunih zaradi vpliva večfaznosti toka in spreminjajočega se koeficienta trenja, z računalniškim programom zasnovan model daje netočne ali celo napačne rezultate. Dober primer tega je eden bolj uporabljenih programov za hidravlično modeliranje, Hec-Ras računalniški program.

Cilj in namen diplomske naloge:

Cilj diplomske naloge je, predstaviti način delovanja Hec-Ras programa, pri izračunu modela stalnega neenakomernega toka, kjer prevladuje tok v eni smeri oziroma lahko tak tok predpostavimo. Predstavljene bodo omejitve pa tudi priporočila glede uporabe programa. Predstavljen je postopek in rezultati raziskave, kjer so na primeru strme struge skušali ovrednotiti hidravlični model pridobljen z omenjenim programom. Nadalje smo se osredotočili na hidravliko strmih strug in se navezali na enačbe, ki so bolj primerne za oceno pretoka oziroma pretočne hitrosti v strmih strugah kot pa standardne enačbe za položne struge. V zadnjem delu naloge je na primeru strme struge potoka Hotoveljščica izvedena hidravlična analiza rezultatov prejetih od VGP d.d. Kranj in predlagana idejna zasnova ureditve vodotoka.

2 SPLOŠNO O UREJANJU HUDOURNIKOV

»Hudournik, je hribski vodotok z erodibilnim prispevnim območjem ali erodibilno strugo, relativno visokimi padci ali velikim razmerjem med pretoki visokih in nizkih voda«(Horvat, 1993). V Sloveniji jih delimo na hudournike visokogorja na eni strani in na drugi hudournike sredogorja in gričevja. Čeprav imajo prvi večje padce nivelete v zgornjih in tudi srednjih delih struge, navadno večjo nevarnost predstavljajo hudourniki sredogorja in gričevja, ki se nahajajo v gospodarsko pomembnejših in bolj poseljenih območjih. Ker je možnost velike gospodarske škode pa tudi smrtnih žrtev zelo velika je zelo pomembno, da hudournike na območjih kjer se hudourniki lahko razvijejo ustrezno uredimo. Takšnih območij pa v Sloveniji predstavlja kar 44% površine slovenskega ozemlja (Zalokar, 2015).

Pri delovanju hudournika je zelo pomemben pojem velikost vlečne sile oz. strižna napetost s katero vodni tok deluje na ostenje struge. V času nizkih in srednjih pretokov je vlečna sila vode v ravnovesju z odporom plavin proti premikanju. Stanje v strugi je v ravnovesju oziroma je ustaljeno. Večji padavinski dogodek, pripelje do povišanja pretoka oziroma do visokih vod in posledično do porušitve ravnovesja. Škodljivo delovanje hudournika je nato odvisno od povečanja vlečne sile.. Glavna naloga urejanja hudournikov je torej lahko zmanjšanje hitrosti toka vode oz. velikosti vlečne sile oziroma dejavnikov, ki na to silo vplivajo ali povečanje odpornosti dna in brežin struge. Tehnični ukrepi, ki se jih poslužujemo pri urejanju hudournikov so namenjeni preprečevanju poglobljanja dna, zaščiti brežin in pobočij, uravnavanju sproščanja, odplavljanja in transporta plavin ter razprševanju vodnih tokov. Poznamo tako vzdolžne kot pogostejše prečne objekte. Ob pravilni izbiri tehničnega ukrepa pa je pomembno zagotoviti tudi dovolj dobro mehansko odpornost oziroma trdnost in stabilnost objekta. To navadno dosežemo z uporabo materiala, ki se že v svoji osnovi nahaja ob vodotoku. Največ tako uporabljamo kamen, les in kamen v betonu (Suhadolnik, 2007).

2.1 Prečne ureditve pri urejanju hudournikov

Prečni objekti preprečujejo poglobljanje dna struge, zadržujejo plavine, podpirajo narušene bregove, zmanjšujejo visokovodne valove, zmanjšujejo padec nivelete struge. Delimo jih v pragove in pregrade. Čeprav imajo obojni podobno funkcijo, pregrade, ki so višje kot pragovi, navadno gradimo bolj v zgornjih delih hudournika, saj so tam erozijski procesi močnejši in je zato stabilnost brežin oziroma pobočij bolj ogrožena. Gradnji pregrad se sicer skušamo izogibati saj onemogočajo prehod ribjega življa, čeprav so za kontrolo oz. zaustavljanje transporta sedimentov nujne. Na drugi strani poznamo dve vrsti pragov in sicer take s stopnjami in take brez stopenj oziroma talne pragove. Oblikovani morajo biti tako, da hitrost vodnega toka preko njih ne presega mej, ki še omogočajo obstanek živih organizmov pa tudi

višina samih pragov zaradi prehajanja ribje populacije, ne sme biti prevelika. Za ureditev hudournika s prečnimi objekti uporabljamo tudi drče, ki se jih navadno gradi bolj v spodnjih in srednjih delih struge. Drče omogočajo migracijo rib in so primerno nadomestilo večjih stopenj (Suhadolnik, 2007).

2.2 Vzдолžne ureditve pri urejanju hudournikov

Z vzdolžnimi ureditvami močno posegamo v prostor zato se jih skušamo izogibati. Skušamo ohraniti staro strugo oziroma novo urediti čim bolj naravno. Zagotoviti moramo, da so ob visokih vodah odstranjene vse ovire, ki bi lahko potencialno zaradi vrtnčenja vode ob njih vplivale na povečanje možnosti poškodb struge. Običajno je potrebno urediti zunanje brežine v krivinah (konkavni del zavoja struge), saj je tu erozijska moč vode največja. Z vzdolžnimi ureditvami lahko ukrepamo točkovno, ko želimo povečati zaščito pred bočno erozijo, na daljšem odseku pa strugo uredimo takrat kadar želimo povečati hidravlično prevodnost struge hudournika. Na zelo strmih in poseljenih predelih, kjer želimo čim hitreje odvesti vodo se poslužujemo gradnje kinet, ki se uporabljajo predvsem za odvodnjavanje zalednih vod. Na ta način zavarujemo dno in brežine struge. Na nekaterih območjih strugo uredimo tako, da jo reguliramo. Pri dimenzioniranju trase struge moramo kolikor se le da upoštevati značilnosti naravnega vodotoka, zelo pomemben pa je tudi sam prečni prerez struge. V kolikor si želimo čim bolj sonaravne ureditve, se takemu posegu sicer skušamo izogniti. Tretja oblika vzdolžne ureditve struge vodotoka so vzdolžne obrežne zgradbe ali obrežni zidovi. Obrežna zavarovanja vplivajo na okolje izraziteje in zato se skušamo izogniti uporabi armiranobetonskih zidov in tako uporabljamo druge materiale kot so na primer kamen v suho, kamen v betonu, lesene kašte, žične košare itd. Poznamo tudi uporabo jezbic, ki predstavljajo prehod med prečnimi in vzdolžnimi zavarovanji. Z njimi usmerjamo vodni tok stran od določenih brežin ali objektov, ki jih želimo zaščititi (Suhadolnik, 2007).

2.3 Vegetacijske zgradbe pri urejanju hudournikov

Poleg bolj togih gradbenih ukrepov pri ureditvi struge hudournika, kjer se poslužujemo uporabe materialov kot so kamen, beton in les poznamo tudi gradnjo vegetacijskih zgradb, ki so najbližje sonaravni gradnji. Tak način gradnje lahko uporabimo na delih hudourniških strug, ki niso preveč izpostavljeni erodiranju, kjer vlečna sila ne preseže odpornosti vegetacijskih zgradb. Pomembno je tudi vedeti, da vegetacijske zgradbe ne morejo nuditi popolne zaščite takoj, ko so zgrajene, temveč šele ko se vegetacija dobro zakorenini in obraste (Suhadolnik, 2007). Poleg tega je pri načrtovanju vegetacijskih zgradb potrebno zelo dobro poznati omejitve takih objektov in njihovo občutljivost oz. odpornost na erozijske procese.

Kateri način ureditve bomo izbrali za določen vodotok pa je zelo pomembno poznavanje same hidravlike vodotokov. V nadaljevanju se bomo osredotočili na hidravliko strmih strug.

3 HIDRAVLIKA STRMIH STRUG

Pri analizi tokov v strmih ukrivljenih strugah je treba upoštevati posebnosti toka v strugah z velikim padcem dna. Manningova in De Chézyjeva enačba, ki nam za odprte vodotoke blažjih naklonov podata dokaj točne vrednosti pretočnih hitrosti, pri obravnavanju vodnih tokov v strmih strugah lahko dajeta zelo netočne rezultate.

Manningova enačba:

$$\bar{v} = \frac{1}{n_G} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{I_0} \quad (1)$$

\bar{v}	povprečna hitrost po prerezu
n_G	koeficient trenja(avtorji: Manning-Gauckler-Strickler)
R	hidravlični radij
I_0	vzdolžni padec(naklon) kanala

De Chézyjeva enačba:

$$\bar{v} = C \sqrt{RI_0} \quad (2)$$

Najpogosteje se za strme vodotoke še vedno uporablja Manningova enačba, čeprav je iz prakse razvidno, da le ta zaradi vpliva večfaznosti toka in nekonstantega koeficienta trenja daje napačne rezultate (Mikoš, 1996). Koeficient trenja, ki je odvisen od materiala iz katerega je sestavljena struga, zarasti prečnega prereza struge, spreminjanja geometrije prečnih prerezov, raznih ovir v vodotoku, poteka trase vodotoka, transporta plavin, izpodjedanja, vodostaja in pretoka se v takšnih strmih in navadno tudi zelo geometrijsko nepravilnih vodotokih neprestano spreminja in zato je potrebno to dejstvo tudi upoštevati in vključiti v vrednotenje pretočnih vrednosti. Uporabo Manningove enačbe, ki jo za svoje delovanje uporablja tudi računalniški program Hec-Ras, lahko iz zgoraj navedenih razlogov impliciramo le na struge majhnega naklona, odvisna pa je tudi od hrapavosti struge ali razmerja med velikostjo zrn plavin in hidravličnim radijem struge(Mohorič, 2012).

V strmih strugah je priporočljivo za vrednotenje pretočnih vrednosti uporabljati tudi druge enačbe in sicer poznamo empirične, semi-empirične in numerične računske postopke, ki pa so zaradi velikega vpliva tridimenzionalnosti in večfaznosti toka zelo zapleteni in dolgotrajni. Zato so v ospredju prenekatero empirično pridobljene enačbe, kjer pa je potrebno biti pazljiv pri izbiri saj vsaka enačba ustreza le določenemu intervalu uporabe.

V raziskavi(Rajar s sod.,1989), ki so jo leta 1989 izvedli na primeru reke Kokra, so skušali preveriti veljavnost enačb, ki jih razni avtorji predlagajo za račun stalnega toka v strmih strugah. Na štirih odsekih, kjer so bili parametri kot so prečni profili, širina ob dnu in na gladini, nagib dna, struktura hrapavosti, zakrivljenost v tlorisu ipd. močno različni so izvedli meritve pretoka in nato te primerjali z rezultati, ki so jih pridobili z uporabo različnih enačb. Enačbe so iz štirih velikih skupin za račun stalnega toka v strmih strugah(potenčne, logaritmične, režimske ter enačbe, zasnovane na fizikalnem pojavu toka) izbrali tako, da so imeli pri računu vsaj enega zastopnika iz vsake skupine.

Že po prvih primerjalnih izračuni, ki so pokazali, da je na treh odsekih dno struge z relativno veliko hrapavostjo, so morali zaradi tega izključiti uporabo enačb Keulegan-a, Gončarov-a, in tiste oblike Manningove enačbe, kjer koeficient n_G računamo na podlagi merodajnega zrna. Tako jim je ostalo še trinajst metod. Na podlagi primerjav med dobljenimi rezultati in vrednostjo pretočnih hitrosti iz terena so v nadaljevanju izločili še nadaljnje metode: Thompson-Campbell, Jaeggi, Kellerhals-Day, Ruf, Bretting.

V ožjem izboru je ostalo tako še osem metod: Manning, Jarrett, Ryabov, Smart, Jaeggi, Hey, 1. in 2. Bathurst-ova ter enačba VGI. Za drugo serijo izračunov so zaradi želje po tem, da bi videli, kolikšen je vpliv dokaj nezanesljive ocene zrn na splošno točnost računa, spremenili karakteristična zrna na posameznih odsekih, tako, da so jih tam, kjer je prvi račun dal po večini metod prevelike hitrosti, povečali, na odsekih s premajhnimi izračunanimi hitrostmi pa zmanjšali. Pokazalo se je, da do kakšne posebne spremembe ni prišlo. Iz tega so sklepali, da merodajno zrno pri večini metod ni zelo občutljiv podatek in se ga tako lahko bolj svobodno oceni.

Nadaljnje, so z obrazci, ki zahtevajo poznavanje karakterističnih zrn, računali vsako hitrost z minimalnimi, srednjimi in maksimalnimi ocenami karakterističnega zrnja. Za merodajno hitrost so potem izračunali povprečje vseh treh pridobljenih rezultatov. Na gladkem in ravnem odseku, brez motenj v toku, se je večina metod dobro obnesla, na drugih odsekih pa temu ni bilo tako.

Kot najzanesljivejšo so tako navedli Jarrett-ovo režimsko enačbo, ki kaže na bistveno zmanjšan vpliv padca dna struge I_0 na srednje pretočne hitrosti. Izračunane hitrosti na vseh odsekih so se od merjenih razlikovale za največ 27%. Dodatna prednost omenjene enačbe je tudi njena enostavnost. Primerna je za analizo strmih naravnih vodotokov, ki so ravni, enakomerni, s povezano gladino in minimalno vegetacijo na brežinah, s stabilnim dnom iz samic ali proda, brez vpliva zajezb in z malo lebdečimi plavinami. Poleg tega ne zahteva poznavanja karakterističnih zrn plavin, ki so pogosto zelo nezanesljiv podatek. Pogoji za njeno uporabo so dovolj široki, da večina primerov z naših vodotokov pade v njene meje uporabnosti.

Jarrett-ova enačba:

$$v = 3,11R^{0,83}I_0^{0,12} \quad (3)$$

Kot uporabne so navedli še tri logaritmične obrazce in sicer: VGI, Smart-Jaeggi in Hey. Uporabo VGI enačbe so navedli predvsem zato, ker je bila razvita na podlagi meritev in primerjav vodotokov v naših krajih. Vse tri enačbe so nekoliko bolj zapletene za uporabo, saj je potrebno poznavanje tudi 90%-nega ozr. 84% zrna.

Enačba VGI:

$$v = v_* 5,75 \log\left(\frac{6R}{k_s}\right) \left(1 - \left(0,4I_0 \frac{k_s}{R}\right)^{0,4}\right) \quad (4)$$

$k_s = d_{90}$ enakomerna peščena hrapavost v prodnatih vodotokih

Enačba Hey-a:

$$v = v_* 5,75 \log\left(12,27 \frac{R}{k_s}\right) \quad (5)$$

$k_s = 3,5d_{84}$ enakomerna peščena hrapavost v prodnatih vodotokih

Enačba Smart-Jaeggi:

$$v = v_* 2,5 \sqrt{gh_{wm}I_0} \sqrt{1 - e^{-0,05 \frac{z_{90}}{\sqrt{I_0}} * \ln(8,2z_{90})}} \quad (6)$$

h_{wm} globina toka mešanice vode in proda

$z_{90} = \frac{R}{d_{v90}}$ relativna hrapavost

Kot poslednjo omenjajo še klasično Manning-ovo enačbo, uporabo le-te pa priporočajo le tistim, ki se s takimi izračuni veliko srečuje in lahko na podlagi velikega števila izračunanih primerov po drugih metodah, pri korigiranju koeficienta n_G izbere ustrezno stopnjo korekcije.

Sicer pa za zelo strme in nepravilne struge priporočajo, da se ne uporablja zgoraj omenjenih enačb, temveč se točnejši pretok določi na podlagi parametrov kritičnega profila. Povprečenje vzdolžnega padca struge, relativne hrapavosti, velikosti zrn, hidravličnega radija ali širine gladine lahko postane tako nezanesljivo, da netočnost metode doseže tudi $\pm 100\%$ osnovne vrednosti. Tako priporočajo, da se uporabi metoda, kjer je potrebno izbrati profil, kjer je kritičen režim toka. Pri iskanju takega profila se osredotočamo na to, da v tem profilu odteka tok z minimalno energijo, vidimo pa to tako, da takoj pod tem profilom nastane bolj ali manj izrazit vodni skok. Paziti moramo, da prereza ne merimo preveč nizvodno, saj se gladina hitro zmanjšuje in sicer za približno 30%. Največja napaka pri takem postopku izračuna lahko torej nastane pri oceni lokacije kritičnega profila, a kljub temu le ta ne bo preseгла $\pm 25\%$. Seveda pa to velja le v primeru, če presek in širino gladine točno izmerimo. Po tem, ko je profil izbran izračunamo pretok po enačbi:

$$Fr = \frac{Q^2 B}{g S^3} = 1 \quad \text{ozr.} \quad Q = \sqrt{\frac{g S^3}{B}} \quad (7)$$

Fr Freudov-o število(za kritični tok je enako 1)

B širina gladine

Od novejših pristopov k reševanju problema pretočnih hitrosti v strmih strugah je potrebno izpostaviti še Rickenmann-ov prispevek. Predstavil je pet enačb, saj trdi, da ni možno z le enim izrazom opisati celotno območje padca dna strug. Vse Rickenmannove empirične enačbe temeljijo na terenskih meritvah strmih hribovskih in gorskih vodotokov, na odsekih brez izrazitih skokov ali stopenj. Uporabil je dva brezdimenzijska parametra in večkratno regresijo, da je določil srednjo pretočno vrednost. Kot vplivne parametre je izbral pospešek sile teže, pretok vode, padec dna struge in 90% zrno plavin. Enačba Rickenmann 1 je bila

razvita za položne vodotoke, Rickenmann 2 za strme struge, Rickenmann 3 in 4 za primerjavo z Manningovo enačbo in Rickenmann 5 za zablatare vodotoke.

4 HIDRAVLIČNA ANALIZA

4.1 Uvod v hidravlično analizo

V nadaljevanju diplomske naloge bo izvedena predstavitev rezultatov hidravlične raziskave na primeru reke Florida v ZDA in analize, na primeru potoka Hotoveljščica, še prej pa je potrebno predstaviti določene pojme, ki se navezujejo na samo analizo. V analizi bodo predstavljeni rezultati primerjave višine gladin pri pretokih z različnimi povratnimi dobami, primerjave rezultatov hidravličnega modela ob upoštevanju mirnega, deročega in mešanega režima ter rezultati analize strižnih napetosti.

4.1.1 Povratna doba in višina gladin

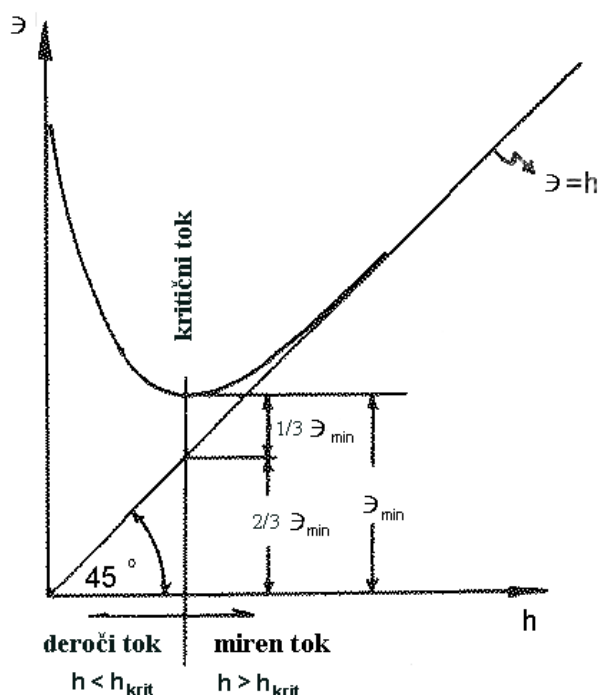
Odtok površinskih voda je del hidrološkega kroga, ki se dogaja na površini Zemlje. Površinski odtok imenujemo del padavin, ki se ne zadržijo na rastlinah, v tleh ali izhlapijo temveč odtečejo v mrežo vodotokov. Kmalu po pojavu večjega padavinskega dogodka, začne pretok v vodotoku naraščati, precej hitro doseže maksimum in nato postopoma upada (Brilly in Šraj, 2005).

Hidrološki procesi pa se v naravi v večini primerov zgodijo naključno, zato je uporaba verjetnostne teorije in matematične statistike v hidrologi neizogibna za reševanje hidroloških problemov in za boljši opis hidroloških procesov. Na podlagi predhodnih dogajanj skušamo dogodke v prihodnosti oceniti z vidika verjetnosti nastopa. Zaradi enostavnosti in lažjega razumevanja v praksi verjetnost nastopa prikazujemo z njeno recipročno vrednostjo, to je povratno dobo dogodka. Povratna doba je ocena časovnega intervala med dogodki. Pretok v povratno dobo 100 let je količinska ocena pretoka, ki se v povprečju pojavi enkrat na 100 let (Povratne dobe velikih in malih pretokov....., 2013).

Višina gladin pri različnih pretokih nam pove višino vode, ki jo bo nek vodotok po padavinskem dogodku dosegel. Pri določanju višine gladine si pomagamo tako s terenskimi podatki o gladinah ob poplavah in s hidravličnimi modeli, ki jih, če je le možno, umerimo na podatke pridobljene s terena. Glede na to višino se potem odločamo, do katere višine je potrebno nadvišati brežine struge oziroma kakšno hidravlično prevodnost struge moramo zagotoviti. Ker pa ima vsak projekt finančni in prostorski okvir, se je potrebno odločiti za dimenzioniranje struge vodotoka na pretok določene povratne dobe, pri čemer še vedno zagotavljamo zahtevano poplavno varnost.

4.1.2 Mirni, deroči in mešani režim toka

Če analiziramo energijo vodnega toka v prečnem prerezu v odvisnosti od globine vode pri stalnem pretoku dobimo graf na spodnji sliki 10. Ker je potencialna energija enaka višini gladine vode le-ta linearno narašča, medtem, ko ima kinetična energija obliko hiperbole. S seštevkom dobimo graf, ki ima izrazito točko-minimum, ki opredeljuje kakšen režim toka imamo v izbranem vodotoku. Če je tok miren, to kaže na majhne hitrosti in velike globine. Pri velikih hitrostih in majhnih globinah pa imamo deroči tok. V točki kjer imamo minimum na grafu govorimo o kritičnem toku. Tu je energija toka minimalna (Brilly in Šraj, 2005).



Slika 1: Energija v prečnem prerezu v odvisnosti od globine vode (Brilly in Šraj, 2005)

Mirni tok lahko opazimo v spodnjih delih vodotokov z bolj umirjenim tokom, v tolmunih in zajezenih vodotokih. Voda se tu giblje počasi in je pod vplivom dolvodnih pogojev, erozijska moč je manjša. Z deročim tokom se srečamo pri brzicah, lahko nastopi na daljših odsekih strmih strug. Značilen je torej za vodotoke z večjim vzdolžnim padcem, kar pomeni tudi višje hitrosti. Erozijska moč je tu precej večja kot v mirnem toku, prihaja do mešanja vode z zrakom, pri dnu struge pa do mešanja vode z trdimi delci. Govorimo o večfaznosti toka. Pri ugotavljanju kakšen režim toka imamo v izbranem vodotoku je zelo pomembno poznavanje Froudovega števila, ki izraža odnos med kinetično in potencialno energijo toka. Če je to število večje od 1 imamo deroči tok, če je manjše od 1 govorimo o mirnem režimu. V primeru, da je Froudovo število enako 1, vemo da gre za kritičen tok. Pri prehodih iz mirnega v deroči tok ni opaziti večjih sprememb, v obratnem primeru pa so te spremembe zelo očitne. Prihaja do vrtnčenja-pojav vodnega skoka in izgub izdatnih količin energije (Brilly in Šraj, 2005).

4.1.3 Erozijski procesi-strižne napetosti

Intenzivne padavine na manjšem območju povzročijo nenadne, velike odtoke, spodbudijo erozijske procese in z njimi povezan transport. Hiter vodni tok povzroča škodo zaradi sile upora oziroma gibalne količine, ki povzroča erozijske procese. Gibalna količina povzroči škodo predvsem na zgradbah z rušenjem, erozijski procesi pa so odločujoč dejavnik za škodo v kmetijstvu, vodnem gospodarstvu... Erozijske procese sestavljajo sproščanje, premeščanje ali transport in odlaganje oziroma naplavljanje erodiranega materiala. Dana geometrija in lastnosti inundacijske površine in struge nam za pretok vode določata pretočno globino, ki nadalje, preko strižne napetosti, določa premestitveno zmogljivost za plavine pri dejanskem pretoku vode (Banovec, 2003).

Enačba za izračun strižne napetosti(τ_0):

$$\tau_0 = \rho g R I \quad (8)$$

ρ	gostota vode
g	težnostni pospešek Zemlje
R	hidravlični radij
I	vzdolžni padec dna

V primeru večje prodonosnosti prihaja lokalno do odlaganja plavin, v nasprotnem primeru večje premestitvene zmogljivosti pa do erozije struge. V končni fazi dobimo spremenjene hidravlične razmere v vodotoku in proces se ponovi. Premestitvena zmogljivost nam torej s primerjavo podatkov o prodonosnosti, ki smo jih pridobili z meritvami pove, ali se bo na konkretnem mestu material nalagal ali erodiral. Načeloma povzroča tok v osnovni strugi večjo obremenitev na dno ter brežine in posledično večjo erozijo. Tok po inundacijah pa je počasnejši in premestitvena zmogljivost manjša od prodonosnosti, zato se tam erodiran material, lebdeče in v manjši meri ob primeru erodiranja struge tudi rinjene plavine, odlaga. Erozijska odpornost oziroma kritična strižna obremenitev je v strugi odvisna od mejnega zrna krovnega sloja, na ostalih predelih vodotoka pa je odvisna od vrste in vegetacije v prečnem prerezu struge (Banovec, 2003).

5 HEC-RAS PROGRAM

5.1 Predstavitev programa Hec-Ras

Računalniški program HEC-RAS (River Analysis System), razvit pod okriljem ameriške vojske (USACE- U.S. Army Corps of Engineers) v Hidrološkem inženirskem centru-HEC v kraju Davis v Kaliforniji, se odkar je bil prvič javno dostopen leta 1995 vedno znova izpopolnjuje in dopolnjuje z novimi verzijami.

Z prvimi različicami programa, s prvotnim imenom HEC-2 je bilo možno hidravlično analizirati le stalni enakomerni tok. S postopnimi nadgradnjami in izboljšavami programa pa je danes omogočena izdelava modela eno-dimenzijskega stalnega in nestalnega toka, transporta sedimentov in kakovosti vode. Ključni element je ta, da vse štiri komponente uporabljajo podobne geometrične podatke in podobne geometrične in hidravlične postopke za izračun modelov (Brunner, 2010).

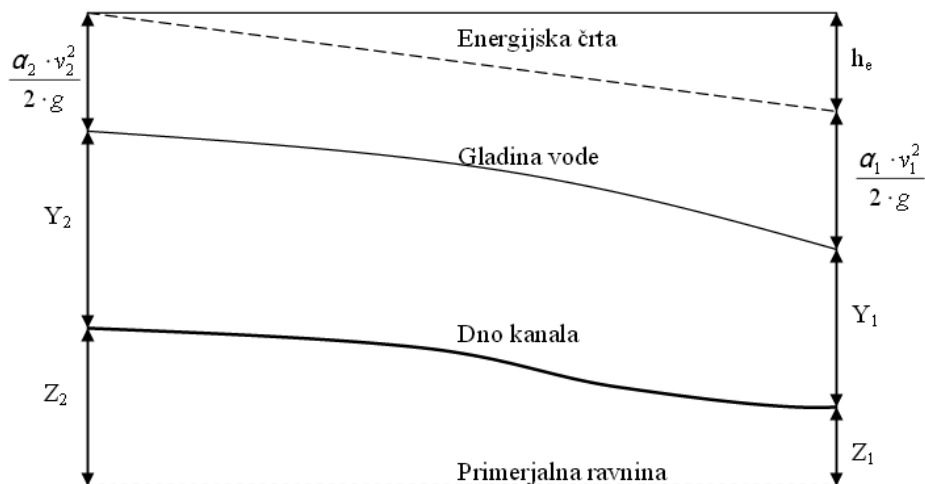
Za potrebe diplomske naloge se bomo osredotočili na postopek, ki ga HEC-RAS program uporablja za izračun modela stalnega enakomernega toka, kjer prevladuje tok v eni smeri oziroma lahko takšne razmere predpostavimo.

Postopek izračuna hidravličnega modela eno-dimenzijskega toka temelji na iteracijskem reševanju energijske enačbe.

$$\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + y_2 + z_2 = \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + y_1 + z_1 + h_e \quad (9)$$

α	utežni koeficient hitrosti
g	težnostni pospešek
Q	pretok [$\frac{m^3}{s}$]
A	površina prereza [m^2]
y	globina vode [m]
z	višina dna od primerjalne ravnine [m.n.m.v.]
h_e	energijske izgube
v	hitrost [$\frac{m}{s}$]

Številčni indeks predstavlja oznako prvega ali drugega prečnega profila, ki določata računski odsek vodotoka.



Slika 2: Členi energijske enačbe (Hladnik, 2007)

V členu enačbe, ki predstavlja energijske izgube so zajete trenjske izgube (Manningova enačba) in izgube zaradi razširitve ali zožitve. V izračunih je možno zajeti vplive različnih ovir kot so na primer mostovi, prepusti, prelivi...

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right| \quad (10)$$

L razdalja med stacionažama

\bar{S}_f povprečen naklon med profiloma $\left[\frac{m}{m}\right]$

C koeficient razširitve ali zožitve

Razdalja med stacionažama L je upoštevana kot:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (11)$$

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} dolžina vplivnega območja za levo poplavno območje, glavni kanal in desno poplavno območje

$\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}$ aritmetično povprečje pretokov skozi levo poplavno območje, glavni kanal in desno poplavno območje

Pretok se računa po Manningovi enačbi v naslednji obliki:

$$Q = KS_f^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$K = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

- K hidravlična prevodnost vodotoka
- A površina toka prereza
- R hidravlični radij ($R = \frac{\text{površina pretoka v prerezu}}{\text{omočeni obod}}$)
- n Manningov koeficient hrapavosti

5.2 Omejitve programa Hec-Ras

Omejitve programa pri izračunu modela stalnega neenakomernega toka.

- Tok je stalen.
- Tok se postopoma spreminja v odvisnosti od geometrije struge.
- Tok je eno-dimenzijski.
- Rečne struge imajo blag naklon (manj kot 1:10 oz 10%).

Tok mora biti stalen, ker v energijski enačbi iz katere izhaja celoten izračun modela ni člana, ki bi zajemal vpliv časa. Prav tako zaradi energijske enačbe postavimo pogoj, da se tok postopoma spreminja. Na lokacijah, kjer pa pride do nenadne spremembe toka, pa program začne računati po momentni enačbi oziroma po drugih empiričnih enačbah. Predpostavimo, da je tok eno-dimenzijski, saj je program primeren za izračun hidravličnih modelov, kjer prevladuje tok v eni smeri.

Pogoj, da morajo imeti rečne struge naklon blažji od 1:10, pride iz tega, da program izračuna navpični tlak po enačbi:

$$H_p = d \cos \theta \quad (14)$$

- H_p vertikalna globina vode
- d globina vode, merjena pravokotno na rečno dno
- θ naklon rečne struge v stopinjah

Če je tako naklon struge manjši od 1:10 (10% oz. 5.71°) predpostavimo, da je merjena globina vode, kar enaka dejanski globini vode, saj pri tem pride do zelo majhne napake. V kolikor pa HEC-RAS uporabljamo na rečnih strugah, kjer je naklon večji od 1:10 potem moramo biti pozorni na napako, ki jo lahko naredimo, če pri merjeni globini vode ne upoštevamo tudi člena $\cos \theta$. Dejansko pa se omejitve pri uporabi Manningove enačbe v literaturi navedene že pri 5 do 10-krat manjši vrednosti padca dna struge.

Naklon	Stopinje	$\cos \theta$
1:10	5,71	0,995
2:10	11,31	0,981
3:10	16,70	0,958
4:10	21,80	0,929
5:10	26,57	0,894

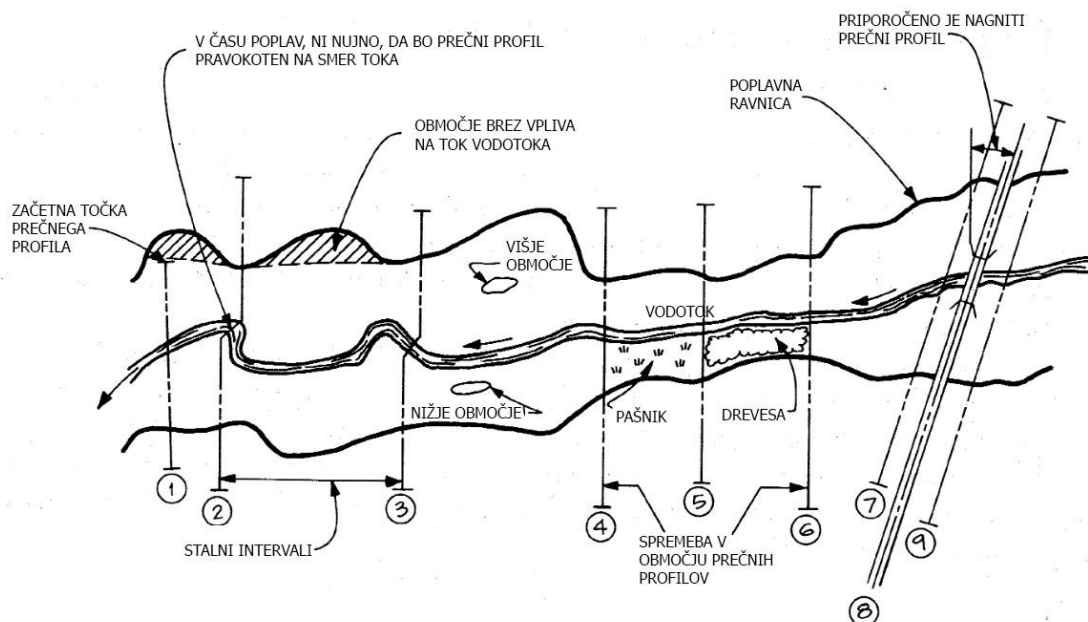
Tabela 1: Nakloni in pripadajoči $\cos\theta$ (povzeto po Hec-Ras Reference Manual, 2010)

Največja težava, ki jo je potrebno vzeti v obzir pri računanju hidravličnega modela z računalniškim program HEC-RAS, pa je pri strmih strugah ta, da program ne upošteva mešanja vode z zrakom, kar privede do nastajanja zračnih mehurčkov, premeščanja zaplavnega lesa, sedimentov. Zaplavni les sicer nima neposrednega vpliva na tok vode, razen v primerih, ko pride do zagozditve na npr. mostnih opornikih. Tako so lahko rezultati pridobljeni z izračunom modela precej drugačni od dejanskih razmer v naravi, kar bom na podlagi raziskave opravljene na reki Florida v Ameriki, predstavil v nadaljevanju.

5.3 Priporočila glede uporabe programa Hec-Ras

Da bo model pridobljen s HEC-RAS programom, čim bolj realno prikazal dejansko stanje v naravi, je potrebno zagotoviti dovoljšnje število izmerjenih prečnih profilov. Čim bolj bodo ti profili skupaj, bolj natančno je upoštevanje geometrije struge v modelu, kar pa še vedno ne pomeni da bo izračun bolj natančen v primerjavi z dejanskimi razmerami na terenu. Ker pa večje število profilov, pomeni tudi večjo porabo denarja za meritve, skušamo te profile postaviti na tistih točkah, kjer se le ti nujni, za zagotovitev čim boljšega ujemanja geometrije

struge upoštevane v modelu z dejanskim stanjem. Pri modeliranju strmih vodotokov je priporočljivo, da so profili zaradi velikih sprememb v energiji blizu drug drugega, saj program računsko interpolira gladine med posameznimi profili.



Slika 3: Priporočila za postavitev prečnih profilov na izbranem vodotoku (General guidelines..., 2014)

6 VREDNOTENJE REZULTATOV HIDRAVLIČNEGA MODELA HEC-RAS V BOLJ STRMIH STRUGAH

6.1 Opis raziskave

Za pridobitev znanja o tem, kako natančen je izračun hidravličnega modela, ustvarjen z računalniškim programom HEC-RAS v primerjavi z merjenimi terenskimi podatki, so na odsekih reke Florida leta 2000 izvedli raziskavo. V nadaljevanju je opisan postopek raziskave in njeni rezultati (May s sod., 2000).



Slika 4: Kanal reke Florida (May s sod., 2000)



Slika 5: Naravna struga reke Florida (May s sod., 2000)

Za ugotovitev kateri parametri najbolj vplivajo na razliko v rezultatih pridobljenih v naravi in iz računalniškega modela, so raziskovalci morali kontrolirati čim več spremenljivk. Tako so za raziskavo izbrali dva odseka reke Florida, kjer je glavna struga ravna, brez velikih sprememb v geometriji in strukturi rečnega materiala na dnu kanala. V času terenskih meritev, vodnega toka izven glavnega kanala ni bilo.

Prvi 380-meterski odsek Florida Canal, je umetni kanal, katerega maksimalna prevodna kapaciteta znaša $5 \text{ m}^3/\text{s}$ in napaja okoliške kmetije. Dno kanala je sestavljeno iz peska, mulja

in manjših prodnikov. Povprečni naklon je majhen (0,00078 m/m). Drugi, za diplomsko nalogo bolj bistven, izbran odsek gorske reke Florida dolžine 238 metrov je večjega naklona in sicer le ta znaša 0,0145 m/m. Pretok po rečnem kanalu je kontroliran s strani upravljalca zaježitve Lemon, ki se nahaja v neposredni bližini gorvodno od izbranega odseka. Dno kanala je sestavljeno iz manjših in večjih prodnikov.

Postopek meritev v naravi je potekal na tak način, da so na obeh izbranih odsekih izmerili gladino vode ob dveh različnih pretokih. Prve meritve ob manjšem pretoku so uporabili za to, da so s pomočjo iteracijskega računa ugotovili pravi Manningov koeficient hrapavosti, ki so ga nato uporabili za HEC-RAS model na primeru višjega pretoka. Na tem mestu je potrebno poudariti, da je avtor, navkljub izkušnosti, za začetni Manningov koeficient hrapavosti vedno izbral nižjo vrednost, kot je bil kasneje izračunan na podlagi terenskih meritev.

S takim načinom dela so zagotovili, da razlike med merjenim pretokom in izračunanim pretokom z uporabo HEC-RAS programa ne bodo pripadale spremenljivkam kot so: vijugavost kanalov, koeficient hrapavosti, tok izven glavnega kanala in geometrijskim spremembam prerezov kanalov. Razlike torej lahko v večini pripišemo le računskim nepravilnostim v algoritmu programa.

$$P = \left(\sum_{i=1,t} (E_i - E_{ci})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

P parameter s katerim številsko vrednotimo računsko točnost modela

E_i merjena višina vode

E_{ci} izračunana višina vode ob predpostavljenem Manningovem koeficientu

$$D = \left(\frac{\sum_{i=1,t} (E_i - E_{ci})^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

D povprečna razlika med merjenimi in izračunanimi vrednostmi

n število upoštevanih vrednosti

6.2 Rezultati raziskave

Kot je razvidno iz Tabele 2, je HEC-RAS model z le 1,2% napako izračunal pravilno višino gladine vode ob višjem pretoku v odseku Florida Canal, kjer je zelo nizek naklon struge, s počasnim tokom, prav tako ni opaziti večfaznosti toka. Na drugi strani pa je pri modeliranju

strmega odseka Florida River napravil kar 20.8% napako. Na nekaterih odsekih je program precenil višino gladine, na drugih pa podcenil. To veliko razliko med povprečnima napakama je moč pripisati predvsem v naklonu strug, kar pripomore k velikim energijskim razlikam med izbranimi stacionažami. Seveda pa se je potrebno zavedati, da je lahko prišlo zaradi velikih hitrosti, turbulence in neenotnega dna struge tudi do potencialnih napak pri meritvah opravljenih v naravi in posledičnega vpliva na rezultate raziskave.

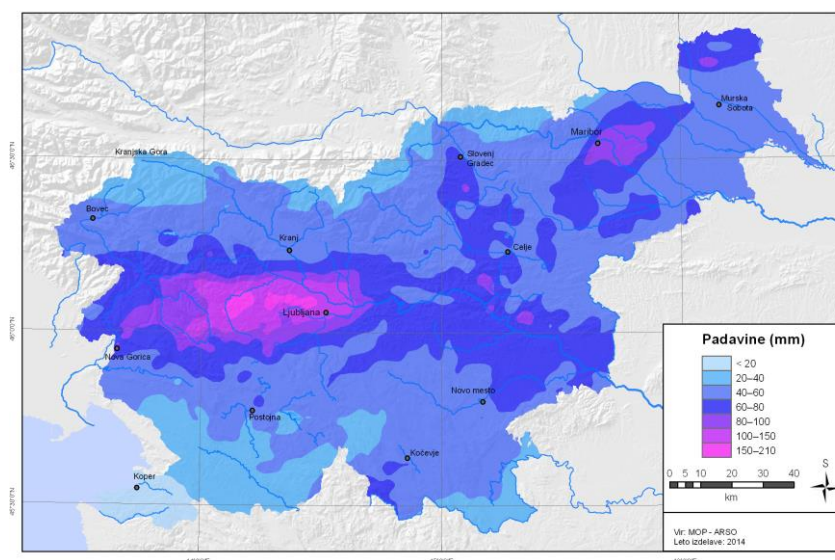
Pretok (m ³ /s)	Avtorjeva ocena Manningovega koeficienta-n			Popravljen vrednost Manningovega koeficienta-n			Ocena modela		
	n	D (cm)	Napaka	n	D (cm)	Napaka	n	D (cm)	Napaka
Florida Canal									
2.65	0.021	9.1	14.3%	0.030	1.7	2.7%	--	--	--
4.24	0.021	5.4	5.8%	0.030	1.1	1.2%	0.030	1.1	1.2%
Florida River									
6.94	0.050	19.8	43.3%	0.090	8.2	17.9%	--	--	--
16.28	0.050	14.8	22.4%	0.064	7.6	11.5%	0.090	13.7	20.8%

Tabela 2: Rezultati raziskave (May, Lopez, Brown,2000)

(*D predstavlja razliko v centimetrih med merjeno in izračunano višino vode)

7 POPLAVE LETA 2014

Ob prihodu hladne fronte s severa, so se v drugem delu noči na 22. oktober močno okrepile padavine v pasu od srednjega Posočja do Ljubljane in povzročile velik porast hudournikov in zalednih vod, ki so se v dolinah stekale v hitro naraščajoče reke, katerih pretoki so dosegli tudi 100-letno povratno dobo. Največji pretok na območju poplav je dosegla prav Poljanska Sora, čigar desni pritok je tudi potok Hotoveljščica. Skupni pretok Poljanske Sore je tisto noč dosegel $335\text{m}^3/\text{s}$. Pred porastom rek je bila vodnatost rek povečini srednja. Tla so bila relativno dobro namočena, kar je pomenilo hiter odtok in stekanje hudourniških in zalednih voda. Žledolom februarja istega leta je povzročil še višjo poplavno ogroženost zaradi dodatnega plavja (Hidrološko poročilo...,2014).



Slika 6: Višina padavin od jutra 21. oktobra do zgodnjega popoldneva 22. oktobra na podlagi meritev meteroloških postaj in radarskih meritev padavin (Hidrološko poročilo...,2014)

V naselju Hotovlja, skozi katerega teče hudournik Hotoveljščica je okrog 2. ure zjutraj na več odsekih začelo odnašati brežine struge, zasuvati cesto, sprožili so se zemeljski plazovi, voda je zalivala kletne prostore in prva nadstropja hiš, poškodovana je bila vodovodna infrastruktura, plavine so se odložile v položnejšem delu struge v naseljenem delu doline (Božič, 2014).



Slika 7: Posledice neurja v vasi Hotovlja, posneto 22.10.2014 (foto: Marjana Hanc)



Slika 8: Poplavljanje in erozija Hotoveljščice v naselju Hotovlja, posneto 22.10.2014 (foto: Gašper)

Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) leta 2007 pripravila opozorilno karto poplav. Na zemljevidu Slovenije je označila poplavno ogrožena območja in jih razdelila na tri skupine, glede na pogostost poplav. Skoraj celotno območje ob glavnem toku Sore je uvrstila v drugo skupino, kjer pomeni da so poplave redke in nastopijo enkrat v dvajsetih letih oziroma lahko tudi pogosteje. Zanimivo je, da naselje Hotovlja na tem zemljevidu ni posebej označeno, kar pa je verjetno posledica majhnosti razlivnih površin ob strugi (M.B.,D.P. 2014).

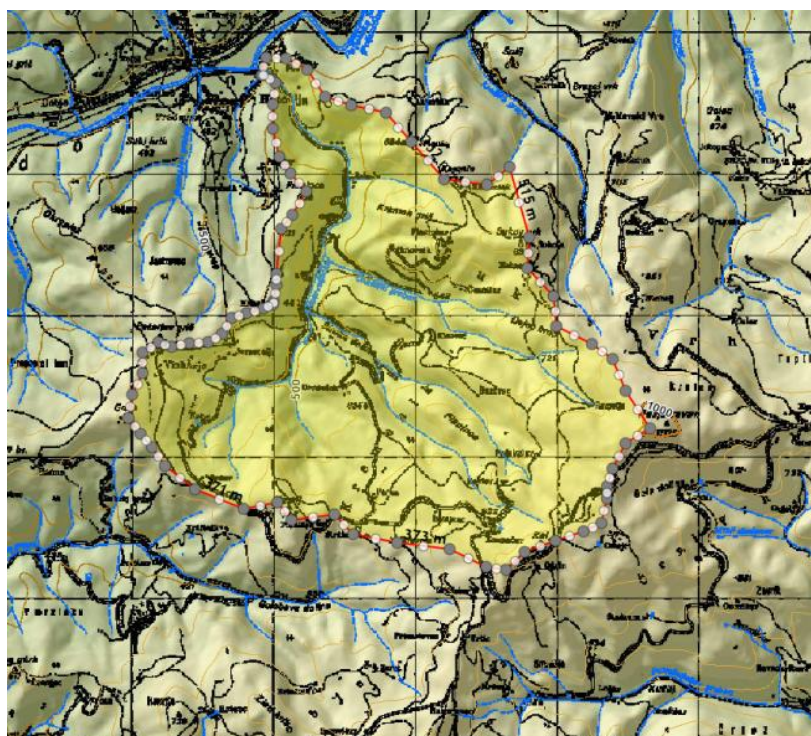
8 HIDRAVLIČNA ANALIZA POTOKA HOTOVELJŠČICA

8.1 Potok Hotoveljščica

Hotoveljščica je približno 4 kilometre dolg desni pritok Poljanske Sore. Izvira v Polhograjskem hribovju, izliva pa se v naselju Hotovlja, ki je s okrog 250 prebivalci del občine Gorenja vas-Poljane. Prispevno območje pridobljeno s pomočjo Atlasa okolja zavzema 7,10km², po podatkih ki sem jih dobil od podjetja Vodnogospodarsko podjetje d.d. Kranj, pa le to izmerjeno iz karte TTN 5000 znaša 6,85km². Večja pritoka Hotoveljščice sta potoka Čenciški graben in Izviršnik (VGP Kranj, 2015).



Slika 9: Lokacija Hotoveljščice na zemljevidu Slovenije(Atlas okolja, 2015)



Slika 10: Prispevno območje Hotoveljščice z vodotoki(Atlas okolja, 2015)

8.2 Hec-Ras model Hotoveljščice

Iz Hec-Ras modela Hotoveljščice, ki ga je pripravilo VGP d.d. Kranj in zajema podatke iz področja kjer Hotoveljščica priteče mimo prvih hiš pa do izliva v Poljansko Soro sem izračunal povprečni nagib struge, ki znaša 3,41% iz česar je razvidno, da gre za strmo hudourniško strugo. Maksimalna nadmorska višina dna struge na modelu je 456,38 metrov, minimalna pa znaša 380,14 metrov, dolžina izmerjenega odseka struge, ki je uporabljen v modelu pa je 2233 metrov. Za potrebe diplomske naloge smo se odločili, da bomo v analizo vključili spodnji del struge in sicer bo analiza obsegala 106 profilov, v dolžini 426,642 metrov. Število točk, ki določajo posamezen profil skozi izbrane profile niha in sicer od 6 do 10. Za izbran odsek struge je bil določen koeficient hrapavosti za strugo 0,035, za poplavne površine pa 0,01.

Za izračun pretokov za izbrane povratne dobe je bila uporabljena Kresnikova enačba, ki je primerna za hudourniška območja (Kestnar, 2012, VGP Kranj, 2015).

$$Q = \alpha * A \frac{30}{0,5 + \sqrt{A}} \quad (1)$$

Q največji pretok [$\frac{m^3}{s}$]

α koeficient, ki zajema vse faktorje, ki vplivajo na odtočnost

A vodozbirna površina [km^2]

Za izbrano območje je bil uporabljen koeficient $\alpha = 0,5$. Pretok Q_n pa je bil določen na podlagi enačbe:

$$Q_n = Q_{100} * \sqrt[4]{0,01 * n} \quad (2)$$

n izbrana vrednost povratne dobe(100, 20, 10, 5)

Za obravnavan spodnji odsek struge Hotoveljščice so bili tako od profila P1 pa do P88 izračunani naslednji rezultati:

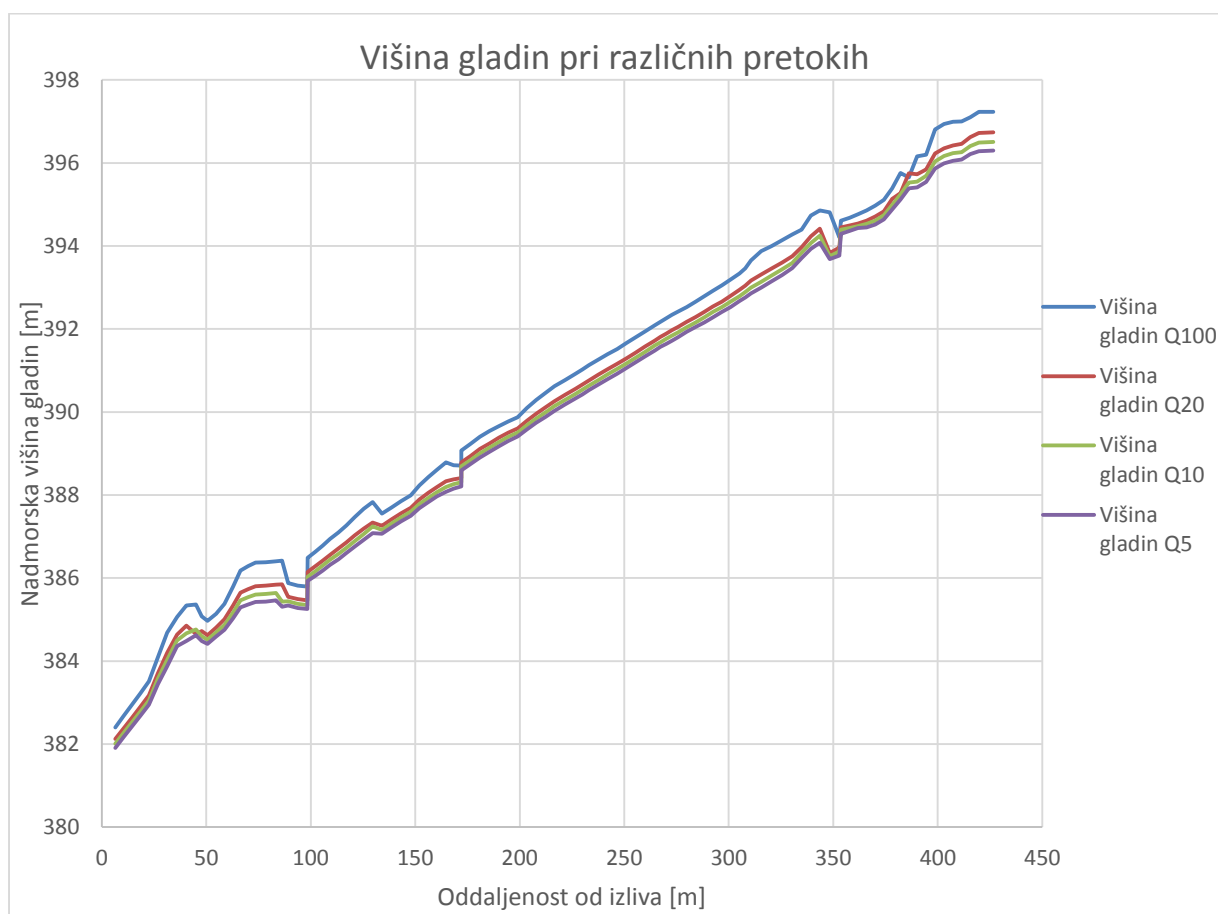
profil	Q100 [$\frac{m^3}{s}$]	Q20 [$\frac{m^3}{s}$]	Q10 [$\frac{m^3}{s}$]	Q5 [$\frac{m^3}{s}$]
Od P1 do P88	35,2	23,5	19,8	16,6

Tabela 3: Pretok pri različnih povratnih dobah

8.3 Primerjava višine gladin pri pretokih z različnimi povratnimi dobami

Na primeru potoka Hotoveljščica so se v projektu (VGP Kranj, 2015) zaradi finančnih okvirjev investicije odločili dimenzionirati pretočno sposobnost vodotoka na 20-letno povratno dobo, čeprav je v času vodne ujme jeseni 2014 prišlo do dogodka s 100-letno povratno dobo.

Iz grafikona 1, kjer so predstavljeni rezultati izračunov za predvideno ureditev struge pridobljenih s Hec-Ras programom za višino gladin ob pretokih s 5, 10, 20 in 100-letno povratno dobo vidimo, da višina gladin skupaj z padcem struge enakomerno pada skoraj čez celoten izbran odsek struge. Na nekaterih mestih pa opazimo, da prihaja do večjih preskokov v višini gladine. Po terenskem ogledu struge sem opazil, da so na teh mestih zgrajeni nizki pragovi. Na odseku med razdaljo 50 in 100 metrov od izliva opazimo, da pride do dviga gladine. Po terenskem ogledu je razvidno, da pride do tega zaradi višje ležečega pragu, ki premešča nekoliko višjo stopnjo kot ostali pragovi po strugi, kjer ni opaziti tako močnega dviga gladine.



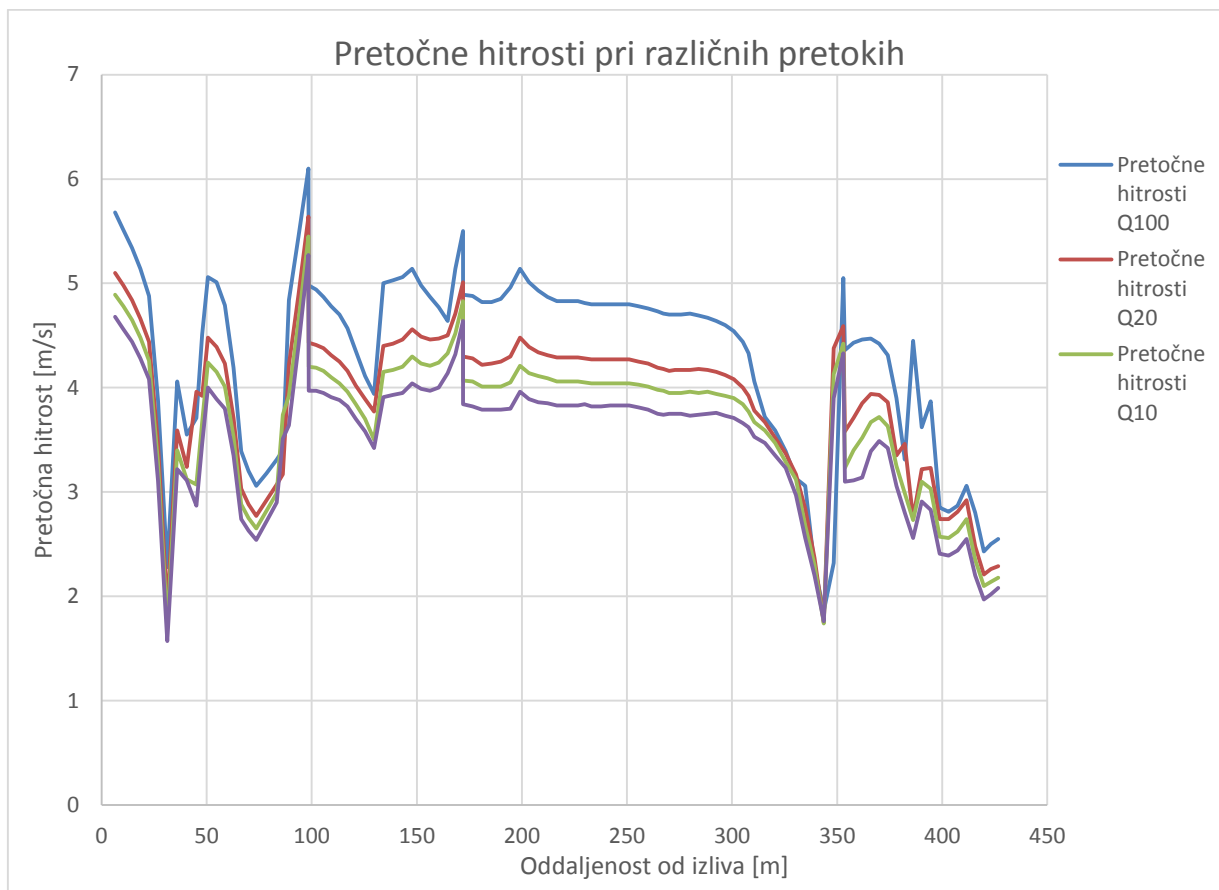
Grafikon 1: Višina gladin pri različnih pretokih



Slika 11: Hotoveljščica, primer pragu (avtor, terenski ogled 1.6.2015)

Z nizkimi pragovi in drugimi oblikami objektov stabiliziramo niveleto dna struge, zmanjšamo padec vodotoka nad njimi, s tem pa se zmanjšajo hitrosti in vlečne sile vode, ki delujejo na rečno dno. Skupaj s tem se zmanjša tudi erozijska in premestitvena sposobnost vodotoka. Posledica pragov je tudi ta, da lokalno prihaja do viškov energije vode, ki jim moramo s pravilno obliko in izvedbo objektov omogočiti disipacijo energije pri toku vode preko njih ali na čim krajši razdalji dolvodno. Lokalne padce hitrosti vodotoka lahko opazimo tudi na grafikonu 2, kjer krivulja hitrosti v odvisnosti od razdalje od izliva gorvodno najprej nekoliko naraste in nato močno pade. Pri primerjavi grafikona 1 in grafikona 2 opazimo, da se spremembe dogajajo na istih mestih, kar kaže na povezavo med računsko višino gladine v strugi in hitrosti vodnega toka.

Delovanje takih objektov pa je praviloma učinkovito le pri običajnih pretokih. Pri visokih vodah, ki jih spremljajo erozijski procesi, vodni tok s svojo veliko sposobnostjo premeščanja erodiranega materiala pogosto ustvari svojo niveleto padca dna. Prelivne višine nizkih pragov tako ni več, zato se tudi izniči njihov učinek disipacije energije. (Rak, Steinman...,2008)

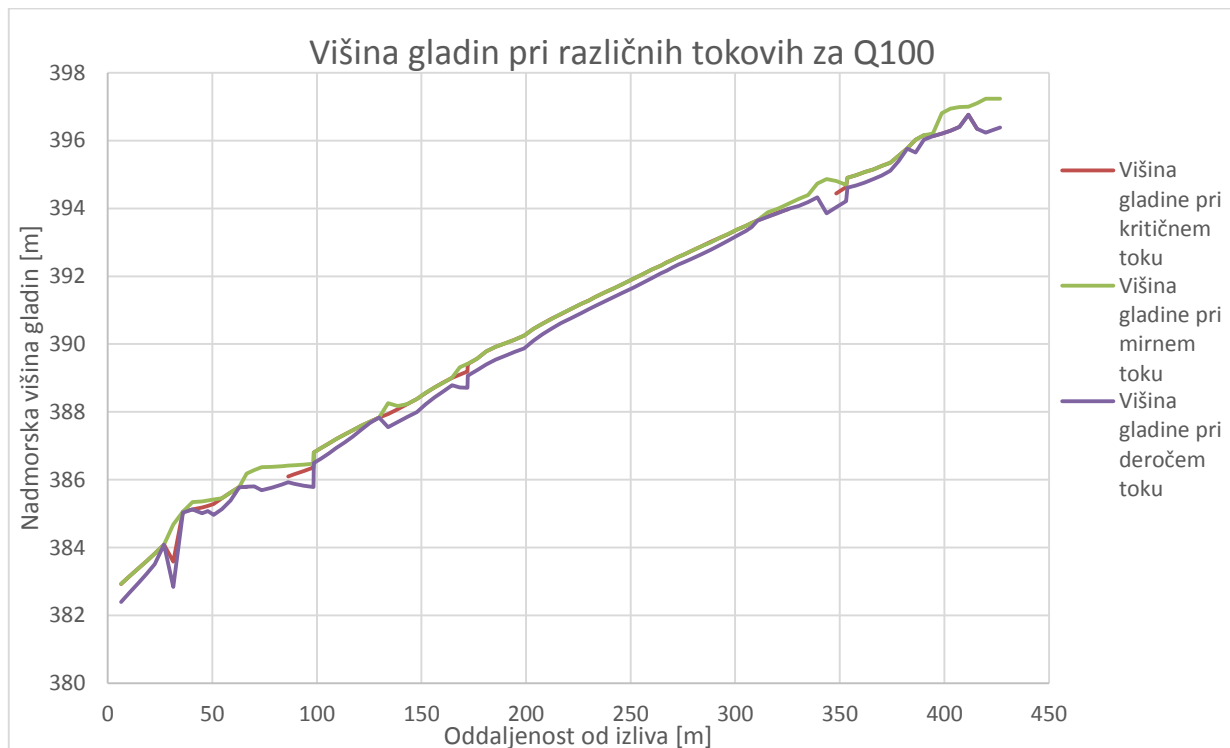


Grafikon 2: Pretočne hitrosti pri različnih pretokih

Pretok [m ³ /s]	Pretočna hitrost [m/s] na 98,417m od izliva
Q100 (35,2)	6,1
Q20 (23,5)	5,64
Q10 (19,8)	5,45
Q5 (16,6)	5,27

Tabela 4: Maksimalne hitrosti v vodotoku pri različnih pretokih

V tabeli 4 so prikazane maksimalne hitrosti v vodotoku, ki se na izbranem odseku pojavijo na 98,417 metrov oddaljenosti od izliva v reko Poljanska Sora. Da so hitrosti tu res največje je razvidno tudi iz grafikona 2. Po terenskem ogledu izvemo, da se na oddaljenosti 98,417 metrov od izliva tu nahaja nekoliko večji prag, kar pripomore k lokalnemu zvišanju hitrosti toka.

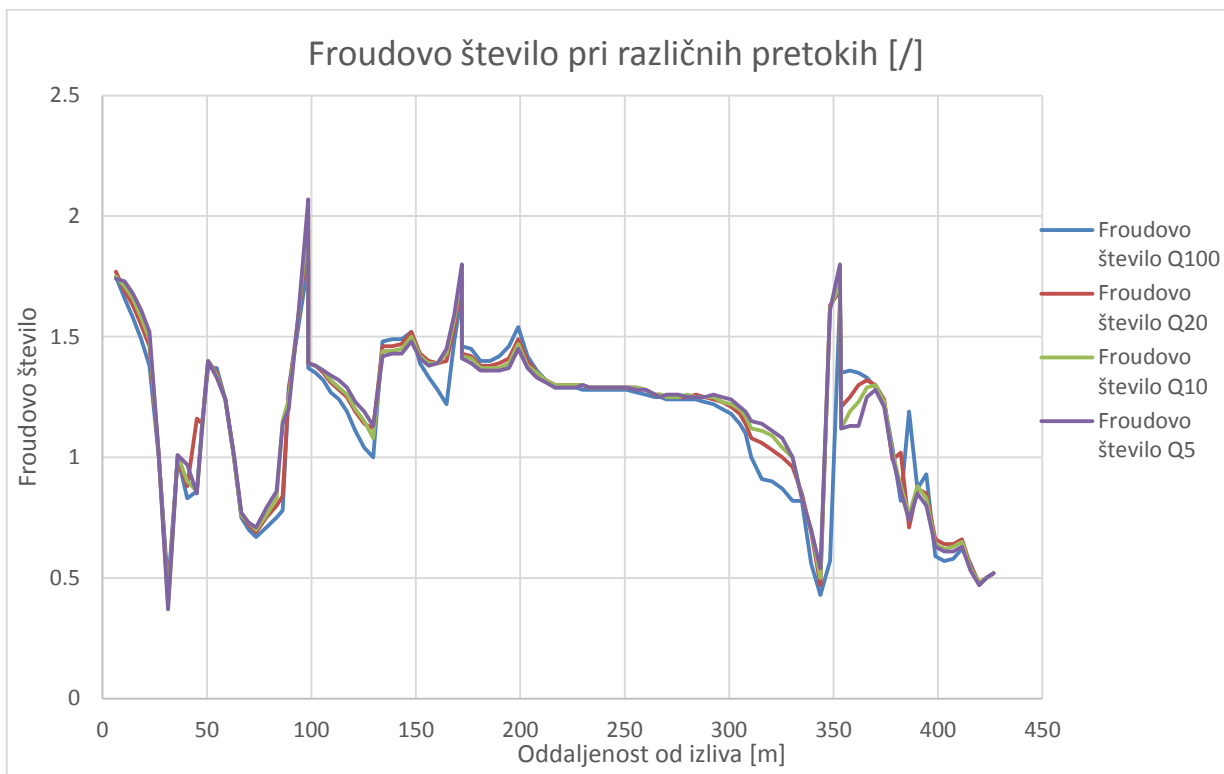


Grafikon 3: Višina gladin pri različnih tokovih

Na grafikonu 3 lahko vidimo višino gladin pri teoretičnem upoštevanju različnih režimov toka in sicer pri kritičnem, mirnem in deročem toku v hidravličnem modelu. Glede na hidravlične lastnosti struge bi najbolj verodostojne rezultate hidravličnega modela pridobili z upoštevanjem mešanega režima toka vode.

8.4 Primerjava mirnega, deročega in mešanega režima toka

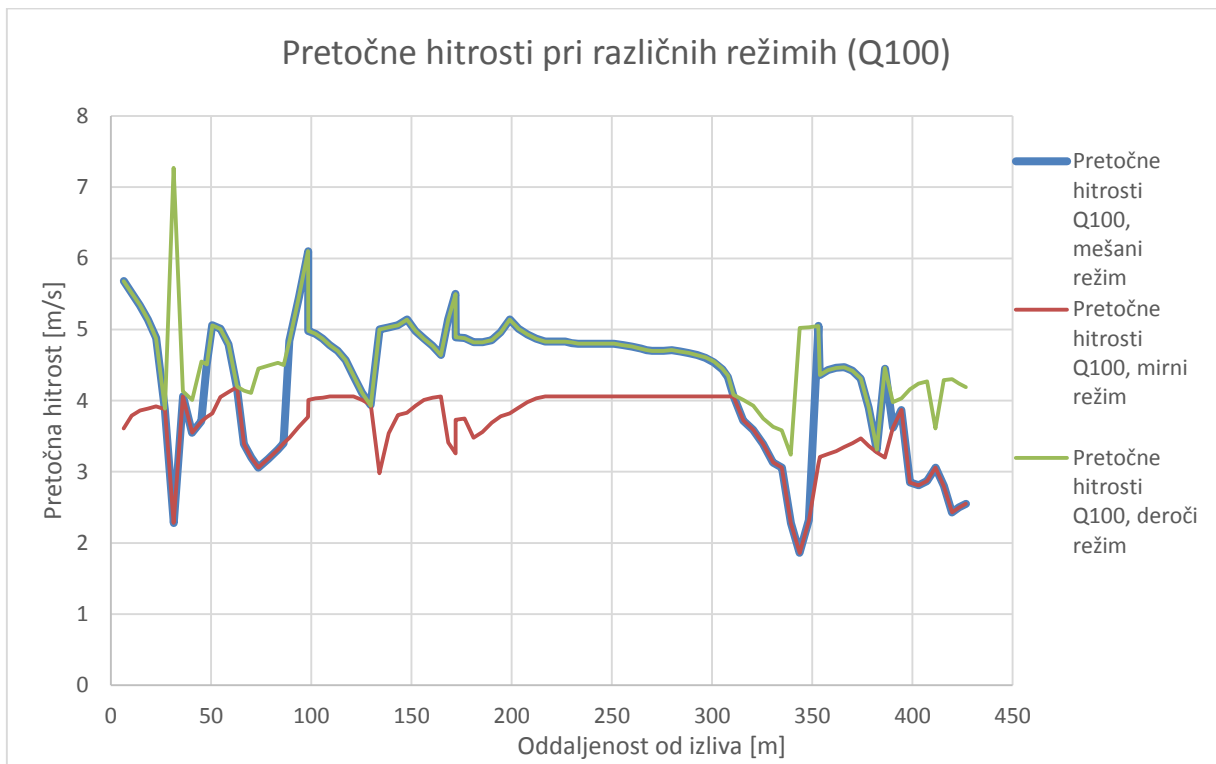
Z uporabo podatkov o vrednosti Froud-ovega števila, pridobljenih s pomočjo Hec-Ras programa, se nam izriše grafikon 3. Hitro lahko opazimo neposredno povezavo med pretočnimi hitrostmi, ki so prikazane na grafikonu 2 in vrednostmi Froud-ovega števila pri različnih pretokih, saj je Froud-ovo število izračunano iz pretočnih hitrosti. Opazimo, da do najvišjih vrednosti Froudovega števila, pride na oddaljenosti 98,417 metrov od izliva v reko Poljanska Sora, do najnižjih vrednosti pa na oddaljenosti 31,313 metrov. Zanimivo je, da maksimalne vrednosti Froud-ovega števila z nižanjem pretoka nekoliko narastejo, minimalne vrednosti pa nekoliko padajo, kar je razvidno tudi iz tabele 5, kar pa je najverjetneje posledica tega, da Hec-Ras program pri izračunu Froudovega števila upošteva formulo $D=S/\text{širina gladine}$, kjer D predstavlja hidravlično globino, S pa površino. Pri analizi vrednosti Fr števila v drugih profilih, pa ne odkrijemo podobnih povezav, tako da lahko trdimo, da na vrednost omenjenega števila, bolj vpliva širina gladine in prerez kanala, kot pa sam pretok oz. pretočna hitrost.



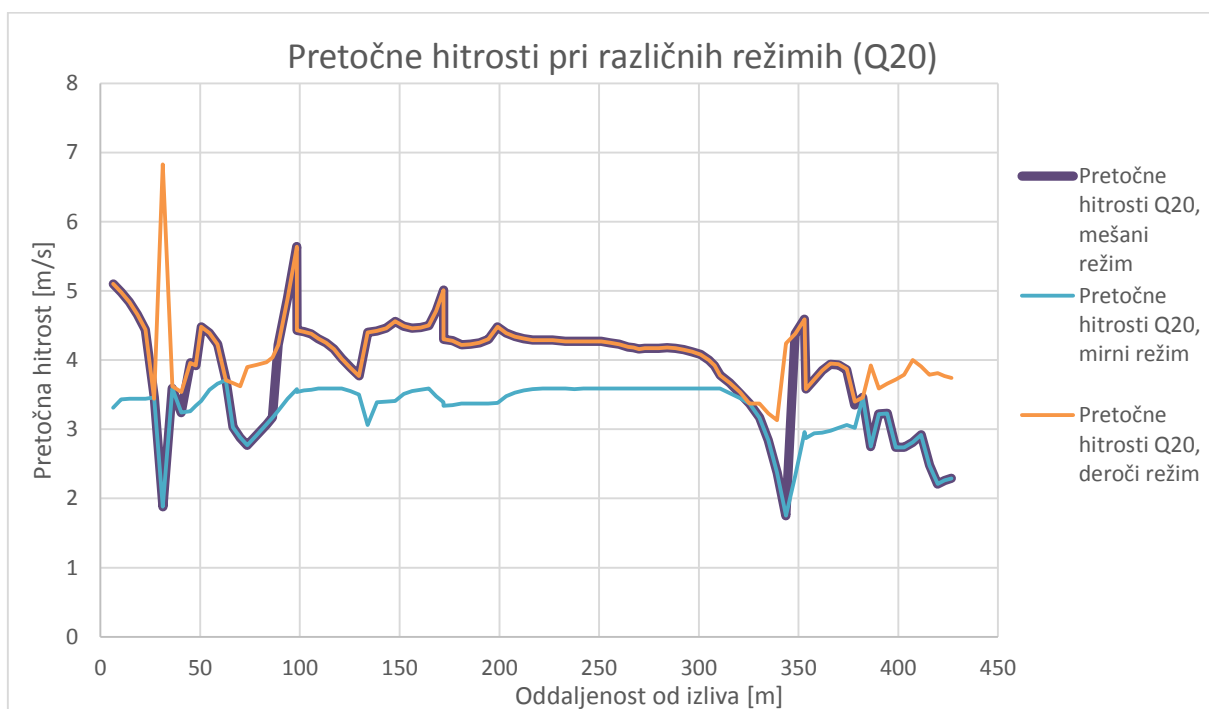
Grafikon 4: Froudovo število pri različnih pretokih

Pretok[m ³ /s]	Maksimalne vrednosti Fr	Minimalne vrednosti Fr
Q100 (35,2)	1,81	0,46
Q20 (23,5)	1,94	0,42
Q10 (19,8)	2	0,39
Q5 (16,6)	2,07	0,37

Tabela 5: Maksimalne in minimalne vrednosti Froud-ovega števila pri različnih pretokih



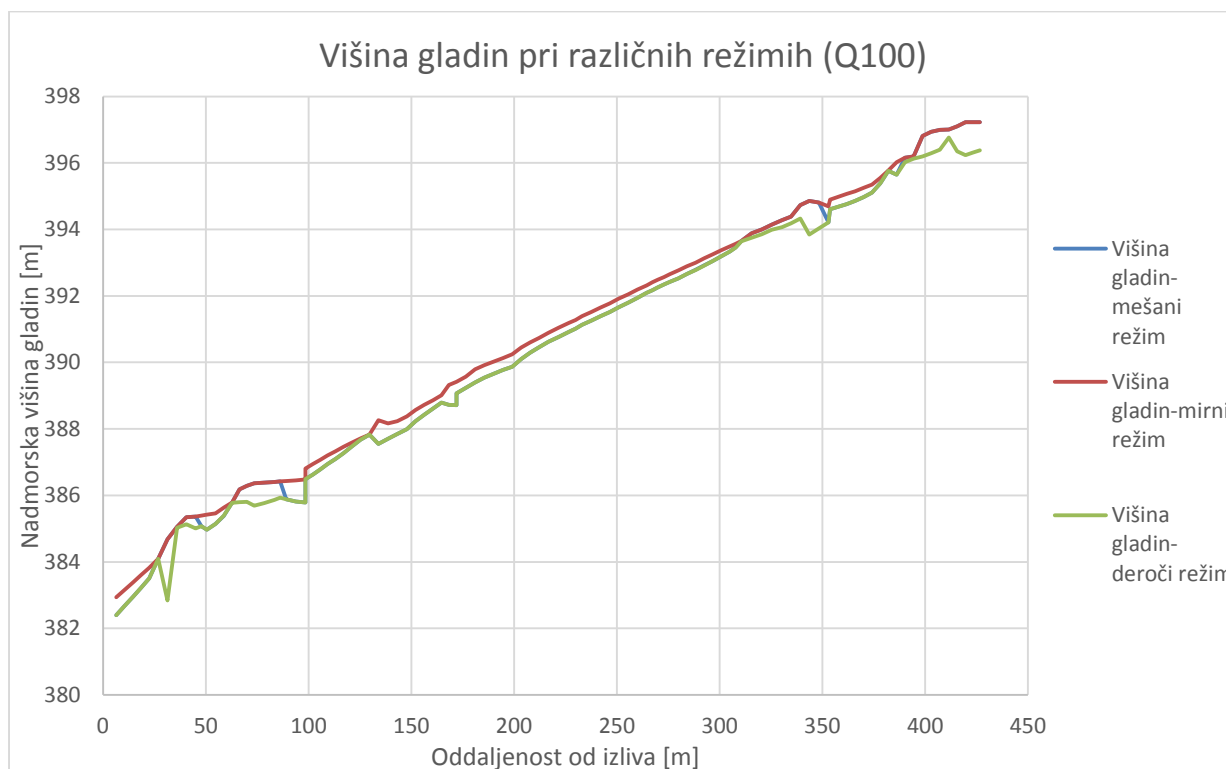
Grafikon 5: Pretočne hitrosti pri različnih režimih(Q100)



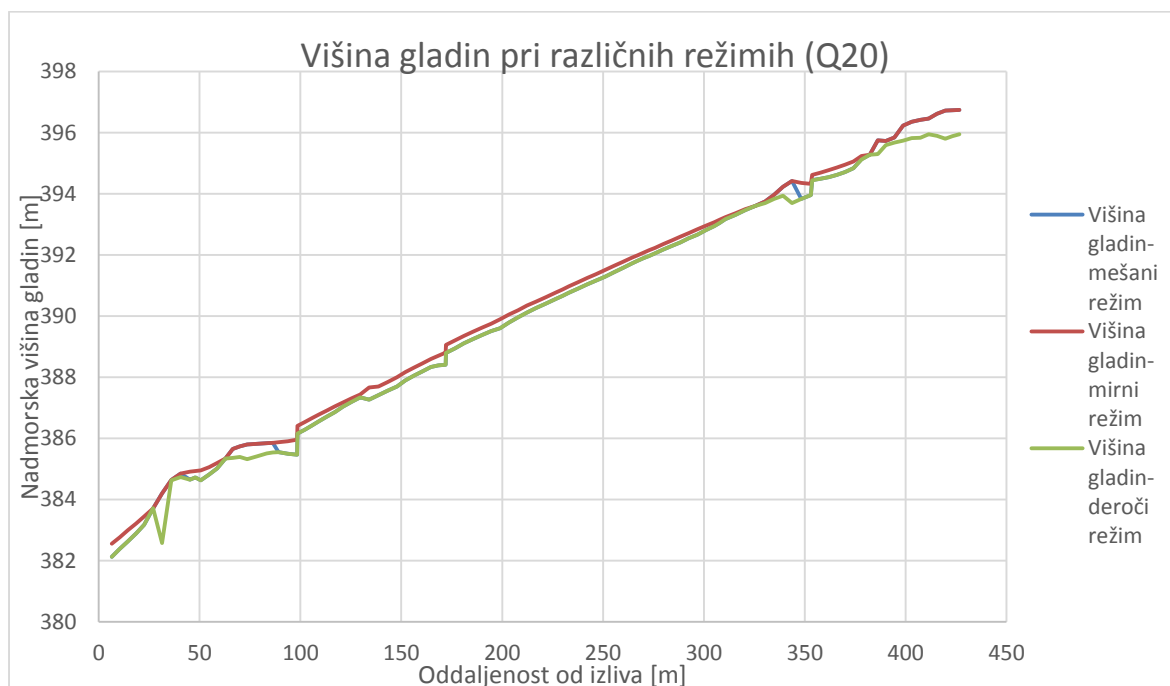
Grafikon 6: Pretočne hitrosti pri različnih režimih(Q20)

Na grafikonih 5 in 6 so prikazane pretočne hitrosti za pretoke s 100 in 20-letno povratno dobo, če predpostavimo različne režime toka in sicer deroči, mirni in mešani režim. Vidimo, da so na obeh grafih hitrosti pri deročem režimu vedno višje kot pri mirnem režimu. Iz grafov

lahko ugotovimo, da višji pretok po strugi vodotoka pomeni tudi izračun višje pretočne hitrosti in tudi višje absolutne razlike med hitrostmi pri mirnem in deročem režimu.



Grafikon 7: Višina gladin pri različnih režimih(Q100)



Grafikon 8: Višina gladin pri različnih režimih(Q20)

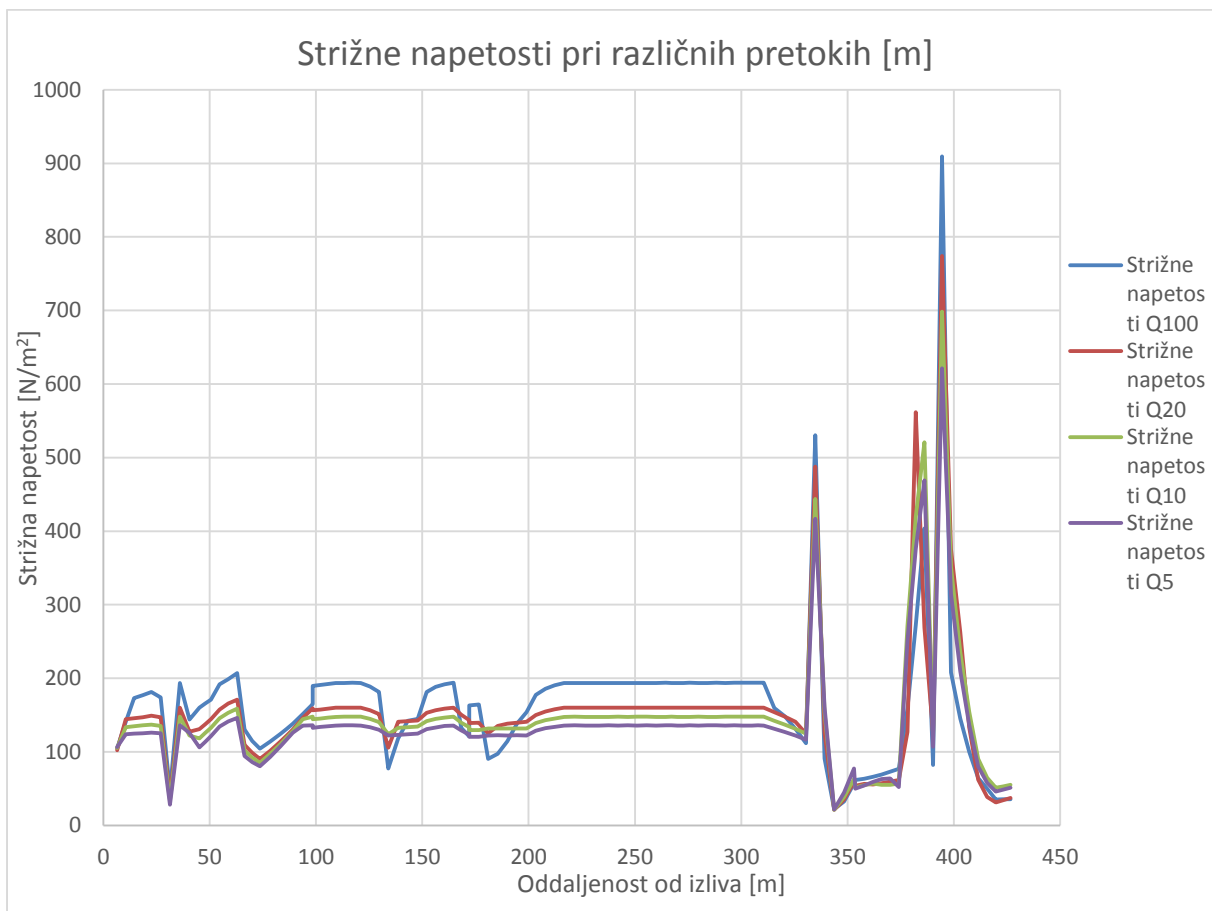
Na grafikonih 6 in 7 so prikazane višine gladin pri pretokih z 100 in 20-letno povratno dobo ob različnih predpostavljenih režimih. Hitro lahko opazimo, da v deročem režimu pride do nižjih gladin kot pri mirnem režimu. Vidimo, da so razlike med višinama gladin pri različnih režimih višje pri pretoku z višjo povratno dobo. V povezavi z grafikonoma 7 in 8, ki prikazujeta razliko višin gladin pri različnih režimih sem izvedel tudi analizo povprečnih razlik med deročim in mirnim režimom za vsak pretok posebej in jih prikazal v tabeli 6. Vidimo, da se razlike višin gladin gibljejo okrog 30 centimetrov.

Pretok [m^3/s]	Povprečna razlika v višini gladin med deročim in mirnim režimom [m]
Q100 (35,2)	0.36
Q20 (23,5)	0.28

Tabela 6: Višina gladin pri mirnem in deročem režimu

8.5 Erozijski procesi-analiza strižnih napetosti

Na grafikonu 8 so grafično prikazane strižne napetosti za pretoke s 100, 20, 10 in 5-letno povratno dobo, ki smo jih pridobili s pomočjo izračuna Hec-Ras programa. Vidimo, da so odstopanja grafov med strižnimi napetostmi pri pretokih različnih povratnih dob enakomerna čez cel grafikon. Na odseku 426,642-330,433 metrov oddaljenosti od izliva v reko Poljanska Sora opazimo veliko večje in nenadne spremembe v strižnih napetostih, kot v preostalem odseku izbranega potoka. To je najverjetneje posledica tega, da struga v tem delu nima neke urejene oblike, temveč je v tem delu struga precej nespremenjena oziroma naravna. Posledično lahko nepravilnosti oziroma hitre spremembe v geometriji struge vplivajo na velika nihanja v izračunanih strižnih napetostih. Spremembe v strižnih napetostih na tem odseku imajo za posledico tudi spremembe v pretočni hitrosti, kar je razvidno tudi iz grafikona 2. V nižje ležečem odseku struge strižne napetosti ne presežejo $200N/m^2$, v že omenjenem odseku pa le te segajo tudi do $900N/m^2$.



Grafikon 9: Strižne napetosti pri različnih pretokih

9 ZASNOVA PROTIPOPLAVNE UREDITVE IZBRANEGA ODSEKA STRUGE

9.1 Povzetek predloga predvidene ureditve potoka Hotoveljščica (VGP d.d. Kranj)

V naslednjem razdelku bom predstavil koncept ureditev, ki so bile predlagane s strani podjetja VGP d.d. Kranj v začetku leta 2015 in so bile do terenskega ogleda 1.6.2015 tudi že povečini izvedene.

Zaradi utesnjenosti struge med cesto in objekte so predlagane ureditve take, da struga prevaja pretoke z 20 letno povratno dobo. Območja z manjšo poplavno varnostjo so čez celotno obravnavano območje le tam, kjer ni objektov in se voda lahko razliva po travnatih površinah. Zgrajene zidove ob strugi se lahko nadviša na koto stoletnih voda, dno struge pa se na nekaterih odsekih poglobi in tam stoječe zidove podzida. Pred visokimi vodami se nekaj objektov zavaruje z visokovodnimi nasipi. Ob cesti in v bližini objektov se brežine lahko zavaruje z zidom iz kamna v betonu. Odvisno od prostora s katerim lahko razpolagamo se lahko zgradi brežine različnih naklonov. Z gradnjo talnih pragov, manjših stopenj ter drč dosežemo stabilizacijo nivelete. Čez obstoječo strugo je zgrajen mnogo premostitev, na teh

območjih je struga navadno tudi zožena. Predlagano je bilo, da bi strugo na območju premostitev razširili na isto širino kot je gorvodno in dolvodno po strugi in naredili nove betonske plošče. Vsa drugačna prekritja struge so prepovedana in bi jih bilo potrebno odstraniti.



Slika 12: Urejena struga v spodnjem delu Hotoveljščice (avtor, terenski ogled 1.6.2015)



Slika 13: Nedovoljena gradnja objektov preko struge (avtor, terenski ogled 1.6.2015)



Slika 14: Številne premostitve potoka Hotoveljščica (avtor, terenski ogled 1.6.2015)

9.2 Predlog ureditve potoka Hotoveljščica (avtorjev predlog)

V predlogu bodo predstavljeni ukrepi, ki bi bili potrebni za ureditev struge v spodnjem delu vodotoka, da bi le ta prevajala pretoke s 100-letno povratno dobo.

S pomočjo Hec-Ras programa in podatkov, ki so bili pridobljeni s strani VGP d.d. Kranj je skozi pregled prečnih profilov na katerih je prikazana struga vodotoka in višina vode, ki jo v posameznem profilu pri izbranem pretoku doseže, lahko razvidno, na katerih odsekih pride do prelivanja vode. Do prelivanj pride na odsekih 134,002-147,812; 181,000-199,034; 339,255-426,642 metrov oddaljenosti od izliva v Poljansko Soro. Na prvih dveh odsekih pride do manjšega prelivanja, medtem, ko je prelivanja na zadnjem odseku precej večje. Na teh odsekih bi bilo pomembno nadzidati že obstoječa brežine, do višine, ki bi zadržala pretoke s 100-letno povratno dobo v strugi. Na prvih dveh odsekih bi bilo potrebno nadvišati leve brežine za vsaj 0,8 metra, medtem, ko bi bilo potrebno pri zadnjem odseku, strugo razširiti in nadvišati, saj tu gladina vode s 100-letno povratno dobo sega tudi do 1m nad višino bregov, zato tu predlagam nadvišanje struge za 1,5 metra. Seveda se je potrebno zavedati, da je potok Hotoveljščica umeščen v ozko dolino, na eni strani utesnjen s strani hiš, na drugi pa s strani ceste, tako da so dodatne razširitve struge težko dosegljive. Tako je verjetno bolj učinkovit ukrep poglobitev struge. Dodatno težavo povzročajo številni mostovi in objekti ki so zrasli na premostitvah ter objekti, ki so stojijo neposredno ob strugi ali tudi delno čez samo strugo(npr. slika 13). Te objekte bi bilo potrebno porušiti, mostove pa nekoliko dvigniti nad trenutnim nivojem. Če je le možno, bi bilo pametno zmanjšati število mostov in tako za večje število hiš zgraditi skupen most.

Verjetno najbolj pomemben ukrep po ureditvi struge pa bi bil ustrezno vsakoletno čiščenje struge in obrežij, saj so prav plavine povzročile največ škode ob poplavih v letu 2014. Čez

strugo je postavljenih mnogo premostitvenih objektov, kjer so se plavine nalagale, čez čas zajezile strugo in onemogočile prost pretok vode proti izlivu v Poljansko Soro.

Na terenskem ogledu samega potoka Hotoveljščica, pa je bilo možno opaziti dve možni lokaciji, kjer bi lahko zgradili suhi zadrževalnik visokih vod. Primerni lokaciji sta sicer gorvodno od dela struge, ki smo si ga izbrali za analizo. Ocenjujem, da bi ob predpostavki, da sta zadrževalnika dobro zasnovana, lahko kljub utesnjenosti v ozko dolino, zadržala zahtevan volumen vode. Glavni namen visokovodnega zadrževalnika je učinkovito zmanjšanje poplavnega vala in zagotavljanje poplavne varnosti dolvodnega območja. Suhi zadrževalniki so zasnovani tako, da zadržijo odvečno vodo samo za kratko časovno obdobje, dokler se pretok po padavinskem dogodku ne ustali in vrne v normalnega. Suh zadrževalnik bi predlagal zato, da se lahko površino namenjeno za zadrževalnik uporablja še naprej v druge namene, v vasi Hotovlja je to predvsem kmetijska raba. Tak zadrževalnik lahko služi za kontrolirano zadrževanje erodiranega materiala in plavja, kar je ob poplavih v letu 2014 povzročilo največjo škodo v kraju Hotovlja. Seveda je potrebno poudariti, da so tu nujna vsakoletna čiščenja zadrževalnika, sicer le-ta kmalu ne bi več služil svojemu namenu.

Glede predlagane rešitve je viš. pred. mag. Jošt Sodnik, ki je sestavljal tudi predlog ureditve podan s strani VGP d.d. Kranj, komentiral, da je na samem terenu problem pri nadvišanju zidov ta, da bi v primeru prelivanja vode preko zidov, hiše ostale v bazenu vode, saj bi bilo onemogočeno normalno odtekanje vode. Sama poglobitev struge pa je nemogoča zaradi večkratnega prečkanja gravitacijskega voda kanalizacije, kjer spremembe nivelete niso možne. Tako bi bila najboljša rešitev suhi zadrževalnik, kjer pa se pojavi problem saj država nima mehanizma za odkup potrebnih zemljišč, na terenu pa je tudi nekoga težko prepričati, da bi dal svojo zemljo za suh zadrževalnik.



Slika 15: Možne lokacije suhega zadrževalnika visokih vod ob Hotoveljščici

10 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem se seznanil s problematiko hidravlike strmih strug pri uporabi klasičnih hidravličnih enačb in matematičnih hidravličnih modelov kot je npr. Hec-Ras. Pri obravnavanju strug s strmim padcem je treba biti pri uporabi Manningove enačbe zelo previden, zato je priporočljivo da se za kontrolo pretočnih vrednosti uporabijo tudi druge empirične, semi-empirične in numerične računske postopke. Računalniški program Hec-Ras s katerim je omogočena izdelava modela eno-dimenzijskega stalnega in nestalnega toka pa se pri izračunih opira na iteracijski postopek reševanja energijske enačbe, v kateri je neposredno vključena tudi Manningova enačba. Tako se je potrebno zavedati, da pri končnem modelu nastanejo določene napake. Kako velike so te napake je odvisno od lastnosti struge, tu je predvsem težko primerno oceniti hrapavost struge oziroma Manningov koeficient. V veliki meri pa je ustreznost modela odvisna tudi od števila in predvsem položaja posnetkov prečnih profilov struge. Raziskav na temo pravilnosti hidravličnih izračunov modelov pridobljenih s programom Hec-Ras je za strme struge, glede na množičnost uporabe programa zelo malo. Na reki Florida so leta 2000 izvedli primerno raziskavo in ugotovili, da v povprečju pride pri modeliranju nekoliko bolj strme struge do kar 20,8% velikih napak. Na nekaterih odsekih je program precenil višino gladine, na drugih pa podcenil.

V drugem delu je bila izvedena hidravlična analiza izbranega odseka struge potoka Hotoveljščica, ki je ob izjemnih padavinah oktobra 2014 dosegla pretok s 100-letno povratno dobo in preplavila vas Hotovlja. V analizo hidravličnih razmer je vključena primerjava višine gladin pri različnih pretokih, primerjava mirnega, deročega in mešanega režima ter analiza strižnih napetosti oziroma erozijskih procesov. Analiza modela je pokazala dobro ujemanje le tega z dejanskimi razmerami na terenu.

Za konec je bila predstavljena idejna zasnova protipoplavne ureditve izbranega odseka struge. Strugo bi dovolj dobro uredili že z nadvišanjem brežin oziroma s poglobitvijo struge, ki je na eni strani utesnjena s strani hiš na drugi pa z lokalno cesto. Na tem mestu je potrebno poudariti, da bi veliko dela opravili že z rednim vzdrževanjem struge kot je odstranjevanja zarastja v strugi, obnova lokalnih poškodb brežin, itd. Na žalost je praksa v Sloveniji glede vzdrževalnih del zelo slaba, kar pa je mogoče že tema za naslednjo diplomsko nalogo.

11 VIRI:

Banovec, P. 2003. Vrednotenje poplavnih škod ter analiza preventivnih ukrepov. Končno poročilo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 170 str.

Bl.,M. Š.,P., 2014. V Ljubljani in na Gorenjskem stoletne padavine. Delo(22. okt. 2014)
<http://www.delo.si/novice/slovenija/stevilne-nevsecnosti-zaradi-mocnih-nalivov.html>
(Pridobljeno 2.5.2014)

Božič, Z., K. 2014. Narasle vode pustile opustošenje. Podblegoške novice(november 2014)
http://www.obcina-gvp.si/assets/podblegaske_novice/podblegaske_14/podblegaskenovember.pdf (Pridobljeno 22.5.2014)

Brilly, M., Šraj, M., 2005. Osnove hidrologije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 286 str.

Brunner, Gary, W. (2010). HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, version 4.1 U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf#page=71&zoom=auto,0,216 (Pridobljeno 12.4.2014)

General guidelines for the hydrologic-hydraulic assessment.2014. Indiana Department of Natural Resources. Indiana. <http://www.in.gov/dnr/water/5710.htm> (Pridobljeno 18.5.2014)

Hidrološko poročilo o poplavih 22. oktobra 2014. 2014.Sektor za analize in prognoze površinskih voda. Ljubljana. Agencija Republike Slovenije za okolje: str. 15.

Hladnik, A. 2007. Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hladnik): 115 f.

Horvat, A. 1993. Ekološke osnove urejanja erozijskih območij. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 41, 2: 5-49.

Kestnar, K. 2012. Določanje največjih pretokov na nemerjenih porečjih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Kestnar) 50 f.

Kryzk, M., Klasinc, R., Četina, M. 2012. Dvodimenzijsko matematično modeliranje porušitvenega vala v ozki strmi strugi. Strojniški vestnik 58,4
http://sl.sv-jme.eu/data/upload/2012/04/14_2010_216_Krzyk_SLO_02.pdf (Pridobljeno 18.5.2014)

- M.B.,D.P. 2014. Bale in hlodi povzročali še dodatne težave. Podblegoške novice(november 2014) http://www.obcina-gvp.si/assets/podblegaske_novice/podblegaske_14/podblegaskenovember.pdf (Pridobljeno 22.5.2014)
- May, D.R., Lopez, A., Brown, L., 2000. Validation of the hydraulic-open channel flow model Hec-ras with observed data. Fort Lewis College, Durango, Colorado
http://faculty.fortlewis.edu/may_d/dmay_homepage_support/hecras%20paper.doc
(Pridobljeno 20.4.2015.)
- Mikoš, M.1996. Vrednotenje pretočnih hitrosti voda v strmih hudourniških strugah. Gradb. vestnik. 45,3-4:83-90.
- Mlačnik, J. 2003, Vloga hidravličnih modelov v vodarski inženirski praksi, Zbornik Mišičevega vodarskega dne 2003
- Mohorič, N. 2012. Pretočne hitrosti vode v hudournikih. Diplomaska naloga. Ljubljana,Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Mohorič): 32 f.
- Petje, U.,2015. Hotoveljščica-idejna zasnova ureditve struge, Kranj: VGP d.d. Kranj.:60 str.
- Povratne dobe velikih in malih pretokov za merilna mesta državnega hidrološkega monitoringa površinskih voda. 2013.Sektor za analize in prognoze površinskih voda. Ljubljana. Agencija Republike Slovenije za okolje: str. 33.
- Rajar, R., Širca, A., Mikoš, M., Četina, M., Steinman, F., Cvikl, M., Stegenšek, B. 1989. Določanje zakonitosti za hitrosti toka v strmih strugah, deročem toku in prehodnem režimu. Raziskovalno poročilo. Ljubljana, VTOZD Gradbeništvo in geodezija, Laboratorij za mehaniko tekočin: 193 str.
- Rak, G., Steinman F., Gosar, L.2008. Pomen nizkih pragov ob visokih vodah. Ujma. (številka 22,2008)
<http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2008/031.pdf> (pridobljeno 8.10.2015)
- Steinman, F.1999. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 295 str.
- Suhadolnik, P. 2007. Urejanje hudournikov in varstvo okolja na primeru Podlipščice. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta(samozaložba P. Suhadolnik): 66 str.

Šupek, M. 2008. Ekstrapolacija pretočne krivulje vodomerne postaje s hidravličnim modelom HEC-RAS. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Šupek): 68 f.

Zalokar, M. 2015. Prečni objekti na hudournikih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Zalokar): 69 str.