

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:

Prah, L., 2016. Analiza hidravličnih razmer v strmi hudourniški strugi Kuzlovca. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Rusjan, S., somentor Sodnik, J.): 45 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5828/>

Datum arhiviranja: 17-10-2016

University  
of Ljubljana  
Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Prah, L., 2016. Analiza hidravličnih razmer v strmi hudourniški strugi Kuzlovca. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Rusjan, S., co-supervisor Sodnik, J.): 45 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5828/>

Archiving Date: 17-10-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM PRVE STOPNJE  
VODARSTVO IN OKOLJSKO  
INŽENIRSTVO

Kandidatka:

**LUCIJA PRAH**

**ANALIZA HIDRAVLIČNIH RAZMER V STRMI  
HUDOURNIŠKI STRUGI KUZLOVCA**

Diplomska naloga št.: 63/B-VOI

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

Graduation thesis No.: 63/B-VOI

**Mentor:**

doc. dr. Simon Rusjan

**Somentor:**

viš. pred. mag. Jošt Sodnik

Ljubljana, 15. 09. 2016

## STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

Spodaj podpisani/-a študent/-ka LUCIJA PRAH, vpisna številka 26300346, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: ANALIZA HIDRAVLIČNIH RAZMER V STRMI HUDOURNIŠKI STRUGI KUZLOVCA

### IZJAVLJAM

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

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
  
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Podpis študenta/-ke:

\_\_\_\_\_



»Ta stran je namenoma prazna.«

**BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	556.536:627.1(043.2)
<b>Avtor:</b>	Lucija Prah
<b>Mentor:</b>	doc. dr. Simon Rusjan, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.
<b>Somentor:</b>	viš. pred. mag. Jošt Sodnik, univ. dipl. inž. grad.
<b>Naslov:</b>	Analiza hidravličnih razmer v strmi hudourniški strugi Kuzlovca
<b>Tip dokumenta:</b>	diplomska naloga – univerzitetni študij
<b>Obseg in oprema:</b>	45 str., 21 sl., 12 tab., 3 graf.
<b>Ključne besede:</b>	strma struga, HEC-RAS, modeliranje, hidravlične analize, hidravlika, hudournik

**IZVLEČEK**

Enačbe za tiste vodotoke, ki imajo blažji padec oz. za položne struge, ki se navadno uporabljajo pri modeliranju z računalniškimi programi nam pri vodotokih, ki so hudourniškega značaj, ne podajo rezultatov, ki bi bili pravilni. V strmih strugah gre za bolj kompleksno obnašanje vodotoka, kjer prihaja do večfaznosti toka in spreminjajočega se Manningovega koeficienta v odvisnosti od pretoka oz. vodostaja v strugi. Prav določitev tega koeficienta pa je bistvenega pomena pri hidravličnem modeliranju.

V diplomski nalogi sem poskušala čim bolj opredeliti hidravlične razmere v strmi strugi izbranega vodotoka ter obdelati hidravliko takšnih strug. Podrobneje so opisane klasične hidravlične enačbe (Manningova, De Chezyjeva, Jarrettova enačba, ipd.) in računalniški program HEC-RAS. Namen naloge je bilo preveriti ali hidravlični model deluje v ekstremnih hidravličnih pogojih zelo strme hudourniške struge s povprečnim padcem 16%.

V praktičnem delu diplomske naloge je bolj podrobno narejena analiza hidravličnih razmer za hudournik Kuzlovec v Polhograjskem hribovju, katerega oblikujejo strmejša pobočja, številne kaskade ter skale. Hidravlični model je bil izdelan na podlagi terestičnega lidarskega posnetka struge ter petih različnih pretokov. Namen je bil ugotoviti vpliv koeficienta hrapavosti v strmih strugah.



»Ta stran je namenoma prazna.«

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	556.536:627.1(043.2)
<b>Author:</b>	Lucija Prah
<b>Supervisor:</b>	Assist. Prof. Simon Rusjan, Ph.D.
<b>Co supervisor:</b>	Senior Lecturer Jošt Sodnik, M.Sc.
<b>Title:</b>	Analysis of hydraulic conditions in steep river channel on the case of Kuzlovec torrent
<b>Document type:</b>	Graduation Thesis – University studies
<b>Scope and tools:</b>	45 p., 21 fig., 12 tab., 3 graph.
<b>Keywords:</b>	steep stream, HEC-RAS, modelling, a hydraulic analysis, hydraulics, high-gradient stream

**ABSTRACT**

Equations for flat or low land rivers, which are usually used for modelating with special computer programs, do not act well in steep (torridental) streams. In this kind of streams we have a complex behaviour, because it comes to a multistage stream flow and to a changing rough Manning coefficient as a function of a flow or water level in the river. The correct determination of this coefficient is essential in hydraulic modeling.

In my thesis I was trying to define the hydraulic conditions in the selected high-gradient steep stream Kuzlovec as much as possible. I described some conventional hydraulic equations (Manning, De Chezy, Jarrett equation, etc.) and computer program HEC-RAS. The main purpose of this task was to verify the operation of the hydraulic model in extreme hydraulic conditions of steep torrential channel with an average fall of 16%.

In the practical part I presented detailed analysis of hydraulic conditions for a steep stream Kuzlovec in Polhograjsko hribovje, which are forming with steep slopes, cascades and rocks. Hydraulic model was created based on terestic lidar track channel and five different flow rates.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju doc. dr. Simonu Rusjanu za vso pomoč, popravke in vodenje pri pisanju diplomske naloge. Hvala tudi somentorju viš. pred. mag. Joštu Sodniku.

Posebna zahvala gre mojima staršema in bratu, ki so mi omogočili študij in mi v vseh letih nudili neizmerno oporo.

*Bilo je napeto, razburljivo, nasmejano in včasih tudi žalostno...a z voljo in vztrajnostjo je mogoče premagati vse.*

»Ta stran je namenoma prazna.«

**KAZALO VSEBINE**

<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....</b>	<b>VI</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....</b>	<b>VIII</b>
<b>KAZALO SLIK.....</b>	<b>XIV</b>
<b>KAZALO PREGLEDNIC.....</b>	<b>XV</b>
<b>KAZALO GRAFIKONOV .....</b>	<b>XVII</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 HUDOURNIKI.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Kaj je hudournik.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Delovanje hudournika.....</b>	<b>2</b>
<b>2.3 Procesi hudourniškega sistema .....</b>	<b>2</b>
2.3.1 Vodna erozija.....	2
2.3.2 Odlaganje.....	2
<b>2.4 Poglobljanje hudourniške struge.....</b>	<b>3</b>
<b>2.5 Ureditveni ukrepi na hudournikih .....</b>	<b>3</b>
2.5.1 Prečni objekti.....	4
2.5.2 Vzдолžni objekti .....	4
2.5.3 Vegetacijske zgradbe .....	5
<b>2.6 Problematika rečnih plavin.....</b>	<b>5</b>
<b>2.7 Hudourniške poplave.....</b>	<b>5</b>
<b>3 HUDOURNIKI V SLOVENIJI .....</b>	<b>6</b>
<b>3.1 Delitev hudournikov v Sloveniji .....</b>	<b>6</b>
<b>3.2 Zgodovina urejanja hudournikov .....</b>	<b>6</b>
<b>3.3 Urejanje hudournikov v Sloveniji.....</b>	<b>7</b>
3.3.1 Varstvo pred škodljivim delovanjem voda .....	8
<b>4 HIDRAVLIKA STRMIH STRUG.....</b>	<b>9</b>
<b>4.1 Osnovne enačbe uporabljene v strmih strugah.....</b>	<b>9</b>
4.1.1 Manningova enačba .....	9
4.1.2 De Chezyjeva enačba .....	11
4.1.3 Jarrettova in Rickenmannove enačbe .....	12
<b>4.2 Ocena koeficienta hrapavosti <math>n_G</math> v strmih strugah .....</b>	<b>13</b>
<b>4.3 Froudovo število .....</b>	<b>15</b>
<b>5 HIDRAVLIČNE ANALIZE .....</b>	<b>16</b>
<b>6 PROGRAMI .....</b>	<b>16</b>

<b>6.1 HEC-RAS .....</b>	<b>16</b>
6.1.1 Prednosti programa .....	17
6.1.2 Omejitve programa .....	17
6.1.3 Primer hidravlične analize delovanja modela na bolj strmih odsekih struge .....	18
<b>7 LASERSKO SKENIRANJE .....</b>	<b>19</b>
<b>7.1 Lasersko skeniranje in lidarski podatki .....</b>	<b>19</b>
<b>7.2 Obdelava podatkov laserskega skeniranja .....</b>	<b>20</b>
<b>7.3 Lasersko skeniranje Slovenije (LSS).....</b>	<b>20</b>
<b>7.4 SAGA GIS .....</b>	<b>21</b>
<b>8 HIDRAVLIČNA ANALIZA KUZLOVCA.....</b>	<b>22</b>
<b>8.1 Hudournik Kuzlovec .....</b>	<b>22</b>
8.1.1 Opis lokacije Kuzlovca .....	22
8.1.2 Pokrovnosti in raba prostora.....	25
8.1.3 DMV in meritve .....	26
8.1.4 Terestično lidarsko skeniranje Kuzlovca .....	27
<b>8.2. Hidravlična analiza.....</b>	<b>28</b>
8.2.1 HEC-RAS model Kuzlovca .....	28
8.2.2 Opredelitev hidravlične analize.....	29
8.2.3 Primerjava višine gladin .....	31
8.2.4 Primerjava pretočnih hitrosti v obravnavanem hudourniku.....	33
8.2.5 Strižne napetosti v obravnavanem hudourniku.....	35
8.2.6 Primerjava režima toka .....	37
<b>9 ZAKLJUČEK .....</b>	<b>39</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>41</b>

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Poglobljanje hudourniške struge in stabilnost pobočij (Mikoš, 2008).....	3
Slika 2: Prvi zakon o urejanju hudournikov (1884) ( <a href="http://www.pedsava.si/p49/zgodovina">http://www.pedsava.si/p49/zgodovina</a> ) ....	7
Slika 3: Zakonski predpisi s področja varstva pred škodljivim delovanjem voda (Program ukrepov upravljanja voda 2011-2015) .....	8
Slika 4: Primer določitve koeficienta hrapavosti v stmih strugah (Flow resistance estimation in high gradient streams) .....	14
Slika 5: Primer določitve koeficienta hrapavosti v stmih strugah (Flow resistance estimation in high gradient streams) .....	15
Slika 6: Naravni koordinatni sistem skenerja (Urbančič, Grigillo; 2015) .....	19
Slika 7: Shematski prikaz delovanja zračnega laserskega skenerja (Naročnik snemanja: MOP, 2011) .....	20
Slika 8: Območja različnih gostot snemanja (Urbančič, Grigillo; 2015) .....	21
Slika 9: Lokacija porečja Gradaščice na karti Slovenije z označenimi hidro-geografskimi območji ter označeno lokacijo prispevnega območja Kuzlovca (Bezák et al.; 2013).....	22
Slika 10: Prikaz razmer na območju struge Kuzlovca pred in po ekstremnem padavinskem dogodku (Projekt SedAlp) .....	23
Slika 11: Raba tal na območju Kuzlovca (2012) (Rusjan).....	25
Slika 12: Digitalni model višin (DMV) porečja Kuzlovec (Rusjan) .....	26
Slika 13: Postavitev merske opreme na prispevnem območju Kuzlovca (Google earth).....	26
Slika 14: Lokacija vodne ter zračne sonde na eksperimentalnem porečju Kuzlovec (Bezák et al.; 2013).....	27
Slika 15: Lokacija Hydrolab MS5 sonde na eksperimentalnem porečju Kuzlovca (Bezák et al.; 2013).....	27
Slika 16: Situacija obravnavanega hudournika v programu HEC-RAS .....	28
Slika 17: Prikaz vodnega skoka (Mikoš, 2008) .....	29
Slika 18: Določitev Manningovega koef. hrapavosti v Canyon Mountains (Flow resistance estimation in high gradient streams).....	30
Slika 19: 3D prikaz poteka struge.....	31
Slika 20: Struga Kuzlovca s pregrado pred in po ekstremnem padavinskem dogodku leta 2014 (Projekt SedAlp) .....	33
Slika 21: Shieldsov diagram .....	36



## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vrednost Manningovega koeficienta za različne površine (Julien, 2002) (Sodnik, 2009) .....	11
Preglednica 2: Vrednost Manningovega koeficienta za različne površine (O'Brien, 2006) (Sodnik, 2009) .....	11
Preglednica 3: Osnovne lastnosti Kuzlovca (Bezak et al.; 2013).....	24
Preglednica 4: Šifre rabe tal (Rusjan) .....	25
Preglednica 5: Uporabljeni Manningov koeficient hrapavosti $nG$ .....	31
Preglednica 6: Lokalni padci na kratkih odsekih izbranega prečnega prereza.....	33
Preglednica 7: Pretočne hitrosti na sedmih izbranih stacionažah izračunane s HEC-RASom .....	34
Preglednica 8: Pretočne hitrosti na sedmih izbranih stacionažah izračunane po Jarretovi enačbi.....	34
Preglednica 9: Pretočne hitrosti na sedmih izbranih stacionažah izračunane po Rickenmannovi enačbi.....	35
Preglednica 10: Povprečna strižna napetost in pripadajoča kritična zrna plavin .....	35
Preglednica 11: Približne minimalne in maksimalne strižne napetosti odsekov, ki niso pod vplivom pregrad .....	37
Preglednica 12: Minimalne in maksimalne vrednosti Froudovega števila za različne pretoke .....	39

»Ta stran je namenoma prazna.«

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Višine gladin pri treh različnih pretokih z različnimi Manningovimi koeficienti .....	32
Grafikon 2: Strižne napetosti pri različnih pretokih .....	36
Grafikon 3: Froudovo število pri različnih pretokih [1] .....	38

»Ta stran je namenoma prazna.«

## 1 UVOD

Upravljanje z vodami je opredeljeno v Zakonu o vodah iz leta 2002. Med glavne cilje upravljanja z vodami uvrščamo doseganje dobrega stanja voda, in pa vseh drugih ekosistemov, ki so povezani z vodami. Ob različnih vrstah vodne rabe je potrebno upoštevati dolgoročno varstvo vodnih virov, ki so nam razpoložljivi in varstvo njihove kakovosti.

»Urejanje povirij voda in hudourniških območij je v Sloveniji stalna naloga pri urejanju in vzdrževanju vodnega režima kot sestavnega dela vodnega gospodarstva. Pomembno mesto pri tem zavzema ustaljevanje in urejanje strmih hudourniških strug« (Mikoš, 1996).

Pri iskanju pravilne inženirske rešitve je najprej potrebno določiti maksimalno hidravlično prevodnost strme struge, za katero pa potrebujemo oceno ali pa meritev pretočnih hitrosti voda (Mikoš, 1996).

Živimo v informacijsko tehnološkem obdobju, kjer se lahko pri inženirskem delu v veliki meri upiramo na računalniške programe oz. modele, kateri slonijo na uporabi različnih hidravličnih enačb.

Pri vodotokih s strmim padcem struge, kjer gre za kompleksno obnašanje vodotoka ter prihaja do večfaznosti toka in spreminjajočega koeficienta trenja, pa nam ti programi ne podajo pravih rezultatov. Pravilna ocena Manningovega koeficienta hrapavosti je ena izmed najtežjih nalog pri hidravliki strmih strug. Prav ta ocena pa je bistvenega pomena za hidravlično modeliranje in tudi analize erozijskega delovanja vodnega toka. Največkrat uporabljeni program za hidravlično modeliranje je HEC-RAS, ki je tudi predstavljen v nadaljevanju diplomske naloge.

Glavni namen naloge je predstaviti kako deluje program HEC-RAS pri izračunu modela stalnega neenakomernega toka, kjer predpostavimo, da tok deluje v eni, prevladujoči smeri. Opisane so slabosti oz. pomanjkljivosti programa ter prednosti. Predstavljene so tudi enačbe, Manningova, De Chezyjeva, Jarrettova, Rickenmmanove enačbe, ipd., katere so bolj primerne za oceno pretočnih hitrosti v strugah z večjim padcem.

V praktičnem delu moje diplomske naloge je bolj podrobno narejena analiza hidravličnih razmer za hudournik Kuzlovec, ki se nahaja v Polhograjskem hribovju.

## 2 HUDOURNIKI

### 2.1 Kaj je hudournik

»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).

### 2.2 Delovanje hudournika

Vlečna sila oz. njena velikost je ključna pri hudournikih. Ravnovesne razmere imamo, kadar je vlečna sila v ravnovesju z odporom plavin proti premikanju. Največkrat se to zgodi pri manjših pretokih voda oz. kadar je stanje v strugi vodotoka ustaljeno.

Stanje v strugi se pri nastopu visokih voda spremeni, ker se poveča vlečna sila. V takšnem primeru govorimo o porušitvi ravnovesja. Zaradi tega pride do škodljivega delovanja hudourniškega vodotoka.

Na to kakšna bo velikost vlečne sile vplivajo: naklon nivelete, hitrost vode, globina in količina vode, zaraščenosti in oblika struge ter zasičenost struge s plavinami.

Glavna naloga pri urejanju s hidrotehničnega vidika je umiriti oz. zmanjšati dinamiko vlečne sile vode ter povečati odpornost brežin in dna struge (Suhadolnik, 2007).

### 2.3 Procesi hudourniškega sistema

#### 2.3.1 Vodna erozija

Izraz vodna erozija opisuje spiranje, razjedanje, odnašanje gradiva, dolbenje ter odnašanje preperline zaradi delovanja tekočih voda. Je normalen proces, pri katerem gre za zmožnost vode, da lahko zaradi svoje hitrosti mehanično erodira. Čez čas se tu razvije struga oz. hudourniška dolina. Sam proces erozije ima različne intenzitete.

Za hudourniške vode je značilno veliko in nenadno naraščanje vlečne sile, ki vodi v porušitev ravnovesja in povzroči erozijske procese. Erozija v hudourniških strugah lahko deluje v več smereh. Ločimo globinsko, čelno in bočno erozijo (Šifrar, 2011).

#### 2.3.2 Odlaganje

To je proces gibanja nanosa, kar povzroča nastajanje sedimentacijskih oblik na površju. Te se pojavljajo v obliki vršajev v nižinskih predelih.

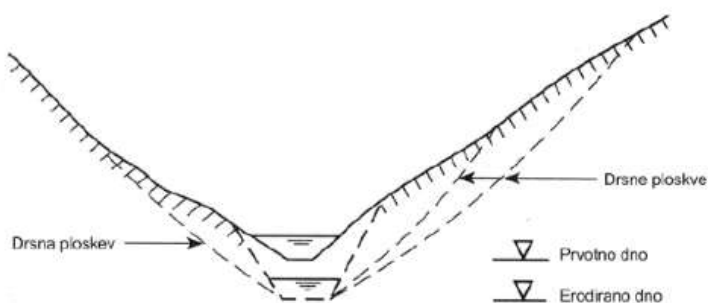
Proces akumulacije se dogaja na izbranem mestu oz. prostoru, ki ga imenujemo naplavna ravnica ali prodna retenzija. Velikosti takšnih ravníc so po obsegu različne, saj so odvisne od vnosa sedimentov, ki pa se spreminjajo v odvisnosti od velikosti delcev, ki jih lahko prenese (Charlton, 2008; povzeto po Šifrar, 2011).

## 2.4 Poglobljanje hudourniške struge

V hudournikih velja ozka povezava med erozijskimi procesi v sami strugi in stabilnostjo brežin hudournika. V strmih strugah hudournika v nevezanih sedimentih prihaja do poglobljanja in širitve struge oz. do bočne in globinske erozije. Erozijsko delovanje povzroča spodkopavanje spodnjih delov pobočij, katerega posledica je nevarnost plazanja brežin hudournika.

Poglobljanje struge preprečimo z gradnjo pregrad in pragov. Ker pa posamezna hudourniška pregrada ali prag stabilizira le nek odsek struge oz. pobočja, izvedemo stabilizacijo s sistemom pregrad ali pragov v obliki stopnic.

Velikokrat se poskuša brežine pred erodiranjem utrditi z živimi rastlinami oz. živim gradivom, kar pa v hudournikih z izrazitim hudourniškim režimom in večjimi maksimalnimi pretoku ni najboljša rešitev. Tu bi bile rastline oz. biološka zaščita brežin premočno obremenjena. Rešitev je uporaba kombiniranih tehnično-bioloških ukrepov.



Slika 1: Poglobljanje hudourniške struge in stabilnost pobočij (Mikoš, 2008)

## 2.5 Ureditveni ukrepi na hudournikih

Ureditveni ukrepi se delijo na tiste ukrepe, ki so umeščeni prečno, vzdolžno ali oboje hkrati. Ukrepi so narejeni z namenom da preprečujejo poglobljanja dna, stabilizacijo nivelete, zaščito brežin, ipd. Pomembno je, da se vse ukrepe oz. hudourniške objekte redno vzdržuje, saj s tem ohranjamo njihovo varovalno funkcijo.

V nadaljevanju so opisani osnovni načini obvladovanja vodne erozije v hudourniških strugah, ki jih v grobem delimo toge oz. umetne zgradbe (prečne in vzdolžne) ter vegetacijske zgradbe.

### **2.5.1 Prečni objekti**

Prečne zgradbe preprečijo poglobljanje struge, zadržujejo vodo, zmanjšujejo padec nivelete struge, zmanjšujejo njeno vlečno silo ter zadržujejo plavine. Delimo jih v pregrade in pragove.

Pregrade so višje kot pragovi in jih po navadi gradimo v bolj zgornjih delih hudournika, saj je tu stabilnost pobočij ogrožena bolj kot v spodnjem delu. Pregrade imajo to slabost, da onemogočajo prehod rib, čeprav so za zaustavljanje transporta sedimentov potrebne. Glede na funkcijo se delijo na zaplavne in ustalitvene. Zaplavne so namenjene zadrževanju plavin, ustalitvene pa so namenjene stabilizaciji nivelete in zmanjševanju padca v strugi.

Pragove delimo na stopenjske in brez stopenjske oz. talne pragove. Pomembno je, da so oblikovani tako, da hitrost toka preko njih ne presega mej, katere še zagotavljajo obstoj živečih organizmov. Paziti je potrebno tudi na samo višino pragov, ki ne sme biti prevelika (Suhadolnik, 2007).

### **2.5.2 Vzdolžni objekti**

Z vzdolžnimi zgradbami lahko ukrepamo točkovno ali pa strugo uredimo na daljšem odseku. S to vrsto objektov zavarujemo vznožja pobočij oz. brežine pred spodjedanjem, usmerjamo tok vode v želeno smer ter podpiramo narušena pobočja. S temi ureditvami je poseg v prostor velik, zato se jim skušamo izogniti ter čimbolj ohraniti staro strugo oz. je potrebno ukrepati na način, ki je čimbolj sonaraven in je vpliv na okolje najmanjši. Ponekod lahko strugo uredimo z reguliranjem.

Strugo hudournika lahko uredimo tudi z vzdolžnimi obrežnimi zgradbami ali obrežnimi zidovi. Zidovom iz armiranega betona se skušamo izogniti, saj izrazito vplivajo na okolico. Armirani beton lahko nadomestimo z drugimi materiali, kot so: lesene kašte, žične košare, kamen v betonu itd. Uporabimo lahko tudi jezbece, ki so prehod med prečnimi in vzdolžnimi zgradbami (Suhadolnik, 2007).



### **2.5.3 Vegetacijske zgradbe**

Prečne in vzdolžne zgradbe na hudournikih, kjer se kot material za gradnjo uporablja beton in kamen, spadajo v skupino togih ukrepov. Lesene kašte niso tog objekt, in ravno to je njihova največja prednost, pred ostalimi togimi ukrepi. Za bolj sonaravno ureditev pa se poslužujemo tudi gradenj vegetacijskih zgradb, ki jih lahko uporabimo na območjih, kjer struga ni preveč izpostavljena erodiranju. Potrebno je poznavanje omejitev takšnih zgradb ter občutljivost le-teh na erozijske procese.

Pri izbiri takšne ureditve je pomembno vedeti, da takšne zgradbe ne nudijo popolne zaščite takoj ko jih zgradimo, ampak šele čez čas ko je vegetacija zakoreninjena (Suhadolnik, 2007).

### **2.6 Problematika rečnih plavin**

Procesi premeščanja plavin se v vodotokih odvijajo kot posledica površinske erozije tal v porečjih in erozije vzdolž brežin struge. Pomembno je poznavanje procesov sproščanja sedimentov iz povirnih območij ter prav tako, sposobnost vodotokov, da te sedimente premeščajo dolvodno vzdolž struge.

V vodotokih z večjim padcem takšno sproščanje oz. premeščanje plavin poteka zelo intenzivno in je pomembno za obvladovanje okoljskih tveganj in nevarnosti. V povezavi z zagotavljanjem poplavne varnosti lahko premeščanje sedimentov povzroči večjo poplavno ogroženost. Projekt SedAlp je predvsem usmerjen v upravljanje s sedimenti v alpskem porečju (SedAlp, 2015).

### **2.7 Hudourniške poplave**

Slovenija je povirna dežela, kjer je čas koncentracije majhen in odtoki precej hipni. S tem je povezano hitro naraščanje pretokov. Pri nas merimo poplave v urah in/ali dnevih.

Hudourniški tip poplav je prognostično najzahtevnejši, saj se vse zgodi zelo hitro, lahko le v nekaj urah. Hudourniške poplave se pojavljajo v višje ležečem svetu ter ob nekaterih večjih rekah. Pri takšnih poplavah gladina vode najprej zelo hitro naraste in potem prav tako hitro upade. Praviloma so posledica burnih vremenskih dogajanj in intenzivnih padavin v gorskem svetu ter so kratkotrajne in silovite. Trajajo lahko od nekaj ur do nekaj deset ur. Hiter vodni tok ima veliko razdiralno moč, odnaša kamenje, zemljino, mulj, pesek ter pa tudi drevesa in drugi erozijski drobir, ki ga potem odlagajo na ravnini. Zaradi velike moči lahko spodjedajo bregove, odnašajo jezove in mostove, predstavljajo struge ter uničujejo cela naselja. Vse to dogajanje je izrazitejše v ozkih strmih dolinah, ki v Sloveniji prevladujejo. Voda odteka po pobočjih po površini in se združi v ozkih grapah ter nato nenadzorovano odteče. Ta vodni tok

je hiter, silovit. Povzroča nasipavanje v spodnjem toku. Prihaja lahko do zamašitve pretoka in nato preboja ter nastanka močnejših poplavnih valov. Zaradi naplavljanja gradiva na ravnice uničujejo dobrine in zmanjšujejo rodovitnost obdelovalnih zemljišč. Zaradi hitrega naraščanja vode prihaja do človeških žrtev ter porušitve ali poškodb objektov. Ob obilnih padavinah prinašajo velik del gradiva v hudourniške struge tudi zemeljski plazovi (Polajnar, 2005).

»Pogosto pozabljamo, da so ozka, praviloma le nekaj deset metrov široka dolinska dna ob manjših potokih v hribovitih in gričevnatih pokrajina zelo aktivna (ogrožena) območja hudourniških poplav« (Komac et al.; 2007).

### **3 HUDOURNIKI V SLOVENIJI**

#### **3.1 Delitev hudournikov v Sloveniji**

»V Sloveniji delimo hudournike na hudournike visokogorja ter hudournike sredogorja in gričevja« (Pintar, 1969).

Razlika med njimi je predvsem v ortografskih značilnostih. Strm padec nivelete imajo hudourniki v višje ležečih predelih, a le v zgornjih delih struge. Nižje, v srednjem in spodnjem delu pa imajo majhen podolžni padec nivelete.

#### **3.2 Zgodovina urejanja hudournikov**

Prvi zakon o urejanju hudournikov, ki je zelo podrobno določeval urejanje in vzdrževanje gorskih voda, je bil uveljavljen leta 1884 in je bil osnova za urejanje hudournikov na celotnem področju Avstro-Ogrske. Na podlagi prvega zakona so bili v naslednjih nekaj letih sprejeti številni izvršilni zakoni. Z ustanovitvijo Gozdarsko-tehniškega oddelka za urejanje hudournikov se je začelo organizirano delo na področju urejanja. Dejavnost je spadala pod okrilje gozdarske uprave. Zavedali so se, da je pri varstvu pred hudourniki pomembno celovito upravljanje s prostorom.



Slika 2: Prvi zakon o urejanju hudournikov (1884) (<http://www.pedsava.si/p49/zgodovina>)

46 let kasneje, leta 1930, so v Beogradu sprejeli "novi" Zakon o urejanju hudournikov. Zakon je vseboval 44. členov, v katerih je bil opredeljen pojem hudournik, vrste del in ukrepi pri urejanju, izvajalci del ter razmerja med izvajalci del in lastniki, kazni, odškodnine, pomožni objekti na hudournikih, ipd. V naslednjih dveh letih je bilo izdanih še nekaj pravilnikov, ki so podrobneje določali izvajanje zakona.

Po drugi svetovni vojni je področje urejanja hudournikov vodil Odsek za urejanje hudournikov na Ministrstvu za gozdarstvo Ljudske Republike Slovenije. Leta 1950, natančneje 17.1.1950, je bilo ustanovljeno Podjetje za urejanje hudournikov (PUH), ki je prevzelo delo, ki ga je pred tem upravljal Odsek za urejanje hudournikov. Vlada LR Slovenije je podjetju dodelila potrebna obratna in osnovna sredstva ter natančneje določila predmet njihovega poslovanja. Kasneje je Skupščina SRS določila območja, na katerih je varstvo površin pred hudourniki, plazovi in erozijo zagotavljalo podjetje PUH.

Prvi zakon o vodah je bil izdan leta 1966, ki pa so ga tri leta kasneje spremenili oz. nadomestili z Zakonom o spremembah in dopolnitvah zakona o vodah (<http://www.pedsava.si/p49/zgodovina>).

### 3.3 Urejanje hudournikov v Sloveniji

Še nekaj let nazaj je delovalo podjetje PUH, d. d. - Podjetje za urejanje hudournikov. Delovali so na področju zmanjševanja in odpravljanja ogroženosti prebivalstva, materialnih dobrin in okolja pred naravnimi nevarnostmi.

Pri svojem delu so uporabljali preverjene metodologije in tehnologije, ki so jih nadgrajevali z uporabo najnovejših orodij, postopkov in spoznanj znanosti. Opozarjali so, da mora Slovenija za varstvo pred naravnimi nevarnostmi bistveno večjo skrb namenjati preventivnim



## 4 HIDRAVLIKA STRMIH STRUG

V diplomski nalogi bomo bolj podrobno obravnavali teorijo hidravlike strmih strug.

Manningova in DeChezyjeva enačba sta empirični enačbi za odprte vodotoke z blažjimi nakloni, po katerih računamo pretoke in hitrosti.

V primerih, kjer je struga vodotoka položna, ni težav pri računanju. Pri hudourniških vodotokih pa je uporaba standardnih enačb (Manningova, De Chezyjeva, ipd.) močno omejena, saj nam ne dajo pravilne rezultate. V strmih strugah gre za kompleksno obnašanje vodotoka, prihaja do spremenljivega koeficienta trenja in večfaznosti toka v odvisnosti od vodostaja vode v hudourniški strugi.

### 4.1 Osnovne enačbe uporabljene v strmih strugah

V strmejših strugah pride do velikega vpliva transporta plavin ter zajemanja zraka, zato moramo vpeljati nove enačbe, po katerih bomo računali.

Poznamo empirične, semi-empirične (pol-eksperimentalne) in teoretične pristope k reševanju. Negativna stran teh je, da so zelo zahtevni in zamudni zaradi večfaznosti toka ter izrazitega tri dimenzionalnega problema. Vse te enačbe pa niso enako uporabne, saj nam nekatere lahko podajo precej napačne rezultate (Mohorič, 2012).

Enačbe, ki se najpogosteje uporabljajo so Manningova, De Chezyjeva, Jarrettova ter Rickenmannove enačbe.

#### 4.1.1 Manningova enačba

Manningova enačba, ki se uporablja pri računu povprečnih hitrosti, je nastala kot rezultat eksperimentalnih raziskav. Razvita je bila leta 1889. Enačbo povezujemo z De Chezyjevo enačbo, kajti obe morata pri enakih pogojih dajati enake rezultate. Povezani sta s koeficientom hrapavosti  $n_G$  in koeficientom C (De Chezyjev koeficient) (Steinman, 1999).

Pri hidravličnih analizah je najpogosteje uporabljena Manningova enačba, kljub temu da lahko pri računanju dobimo nenatančne oz. nezanesljive rezultate, zaradi vpliva večfaznosti in nekonstantnega koeficienta  $n_G$ . Manningova enačba velja zgolj za grobi prod oz. za gladek beton. Enačba je bila razvita za majhne hrapavosti ( $R/d_{90} > 20$ ). Za izračun hidravličnega radija R je potrebno poznavanje srednje pretočne globine, kar je v naravni strugi relativno težko določiti.

Po Manningovi enačbi, ki jo lahko impliciramo le na struge z majhnim naklonom oz. padcem, računa program HEC-RAS. Enačba je odvisna tudi od razmerja med velikostjo kritičnih zrn plavin, hrapavosti struge in radija  $R$  (Mohorič, 2012).

#### Manningova enačba:

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

$\bar{v}$  ...povprečna hitrost merjena na prerezu [m/s]

$n_G$  ...koeficient trenja [ $s \cdot m^{-1/3}$ ].

$R$  ...hidravlični radij [m]

$I_0$  ...vzdolžni padec oz. naklon kanala [°]

Manningova enačba nam poda povprečno hitrost iz katere lahko izračunamo pretok.

$$Q = v \cdot A$$

$Q$  ...pretok [ $m^3/s$ ]

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

$A$  ...površina [ $m^2$ ]

#### 4.1.1.1 Manningov koeficient hrapavosti $n_G$

Koeficient hrapavosti je številka, ki predstavlja vpliv hrapavosti struge na povprečno hitrost v prečnem prerezu obravnavanega vodotoka (Mikoš et al., 2002).

Prav določitev Manningovega koeficienta izgub, ki jih povzroči hrapavost, pa nam pri hidravlični analizi vodotoka oz. pri modeliranju, povzroča največ težav.

Manningov koeficient lahko enotsko izrazimo kot [ $s \cdot m^{-1/3}$ ], kar pa nima nobenega fizikalnega pomena.

Pri določitvi  $n_G$  si pomagamo z uporabo enačb in preglednic, ki so podane spodaj. Vrednosti koeficienta za različne površine po O'Brienu (Preglednica 2.) veljajo večinoma za plitek površinski tok vode.

Osnova v praksi, pri določitvi  $n_G$  se večinoma določa na podlagi izkušenj s terenskim ogledom inženirja. Vrednost pa vedno variira in je odvisna od samega avtorja ter od izbrane spremenljivke. Ta spremenljivka je običajno premer plavin ali njihovega deleža.

Najboljši način za ustrezno določitev hrapavosti je s povratnim računom pri znanem pretoku in višini gladine, saj koeficient umerimo.

Za pravilno oceno koeficienta  $n_G$  je potrebno kvalitetno poznavanje faktorjev, od katerih je hrapavost odvisna. Pri naravnih vodotokih je ta vrednost odvisna od večjega števila spremenljivk.

Vrsta površine	Vrednost koeficienta $n_G$ [ $\text{ms}^{-1/3}$ ]
Beton, asfalt	0,01 - 0,013
Pesek	0,01 - 0,016
Prod	0,012 - 0,03
Redka vegetacija	0,053 - 0,13
Nizka travnata površina	0,10 - 0,20
»Bluegrass« okrasna zelenica	0,17 - 0,48
Cesta	0,013 - 0,02
Gozd	0,15 - 0,25
Njiva	0,42 - 0,58
Travnik	0,03 - 0,035
Urbane površine	0,05
Naravna vegetacija	0,10

Preglednica 1: Vrednost Manningovega koeficienta za različne površine (Julien, 2002) (Sodnik, 2009)

Gosta ruša	0,17 - 0,80 $\text{ms}^{-1/3}$
Gosta trava	0,17 - 0,48 $\text{ms}^{-1/3}$
Grmovje in gozdna podrast	0,30 - 0,40 $\text{ms}^{-1/3}$
Povprečna travnata površina	0,20 - 0,40 $\text{ms}^{-1/3}$
Slabo zaraščena travnata površina	0,20 - 0,30 $\text{ms}^{-1/3}$
Kratka trava	0,10 - 0,20 $\text{ms}^{-1/3}$
Redka vegetacija	0,05 - 0,13 $\text{ms}^{-1/3}$
Površine prekrte z ostanki drobirja	
0% pokritost	0,09 - 0,34 $\text{ms}^{-1/3}$
20% pokritost	0,05 - 0,25 $\text{ms}^{-1/3}$
Polja (odvisno od vrste posevka)	0,008 - 0,47 $\text{ms}^{-1/3}$
Odrpte površine z drobirjem	0,10 - 0,20 $\text{ms}^{-1/3}$
Neobdelana polja	0,08 - 0,12 $\text{ms}^{-1/3}$
Odrpte površine brez ostankov drobirja	0,04 - 0,10 $\text{ms}^{-1/3}$
Asfalt ali beton	0,02 - 0,05 $\text{ms}^{-1/3}$

Preglednica 2: Vrednost Manningovega koeficienta za različne površine (O'Brien, 2006) (Sodnik, 2009)

#### 4.1.2 De Chezyjeva enačba

De Chézyjeva enačba:

$$\bar{v} = C\sqrt{RI_0}$$

$$R = S/O$$

$\bar{v}$  ...povprečna hitrost merjena na prerezu [m/s]

C... De Chezyjev koeficient [ $m^{1/2} \cdot s^{-1}$ ]

R...hidravlični radij [m]

$I_0$  ...vzdolžni padec oz. naklon kanala [°]

S...površina prečnega prereza [ $m^2$ ]

O...omočeni obod [m]

De Chezyjevo enačbo, katera je bila razvita leta 1769, izpeljemo iz definicije enakomernega toka, če privzamemo ustrezne predpostavke. Enakomerni tok se pojavi takrat ko so sile upora toka v ravnotežju s silami, ki povzročajo gibanje. Na omočeni obod kanala deluje sila upora toka na enoto površine, ki pa narašča sorazmerno s kvadratom povprečne hitrosti (Steinman, 1999).

#### 4.1.3 Jarrettova in Rickenmannove enačbe

##### Jarrettova enačba

Jarrettova enačba je ena izmed pogosteje uporabljenih enačb. Zahteva poznavanje srednjih pretočnih globin. Njena uporaba je najbolj zanesljiva v strmih vodotokih s stabilnim dnom in stabilnimi brežinami, kjer je malo lebdečih plavin ter majhen vpliv zajezeb. Enačba kot parameter upošteva hidravlični radij, kar je največja slabost enačbe (Mohorič, 2012).

$$v = 3,11R^{0,83}I_0^{0,12}$$

R...hidravlični radij [m]

$I_0$ ...padec dna struge [°]

##### Rickenmannove enačbe

Rickenmannove enačbe temeljijo na terenskih ogledih ter meritvah in so narejen posebej za struge z majhnim padcem, struge s strmim padcem ter za zablatane tokove. Enačbe so manj primerne za struge z izrazitimi skoki ali za kaskadne struge ter struge tipa stopnja-tolmun. Narejenih je 5 Rickenmannovih enačb: Rickenmann 1 za vodotoke z majhnim padcem, Rickenmann 2 za struge s strmim padcem, Rickenmann 3 in 4 za primerjavo z Manningovo enačbo ter Rickenmann 5 za zablatane vodotoke. Za Rickenmannovi enačbi 1. in 2. so narejene tabele, ki olajšajo računanje (Mohorič, 2012).

$$\text{Rickenmann 1 (območje uporabe: } 0,008 < I_0 < 0,63 \text{): } v = 0,79Q^{0,34}I_0^{0,20}d_{90}^{-0,35}$$



Rickenmann 2 (območje uporabe:  $I_0 < 0,008$ ):  $v = 2,18Q^{0,29}I_0^{0,35}d_{90}^{-0,23}$

Q...pretok vode [ $m^3/s$ ]

$I_0$ ...padec dna struge [°]

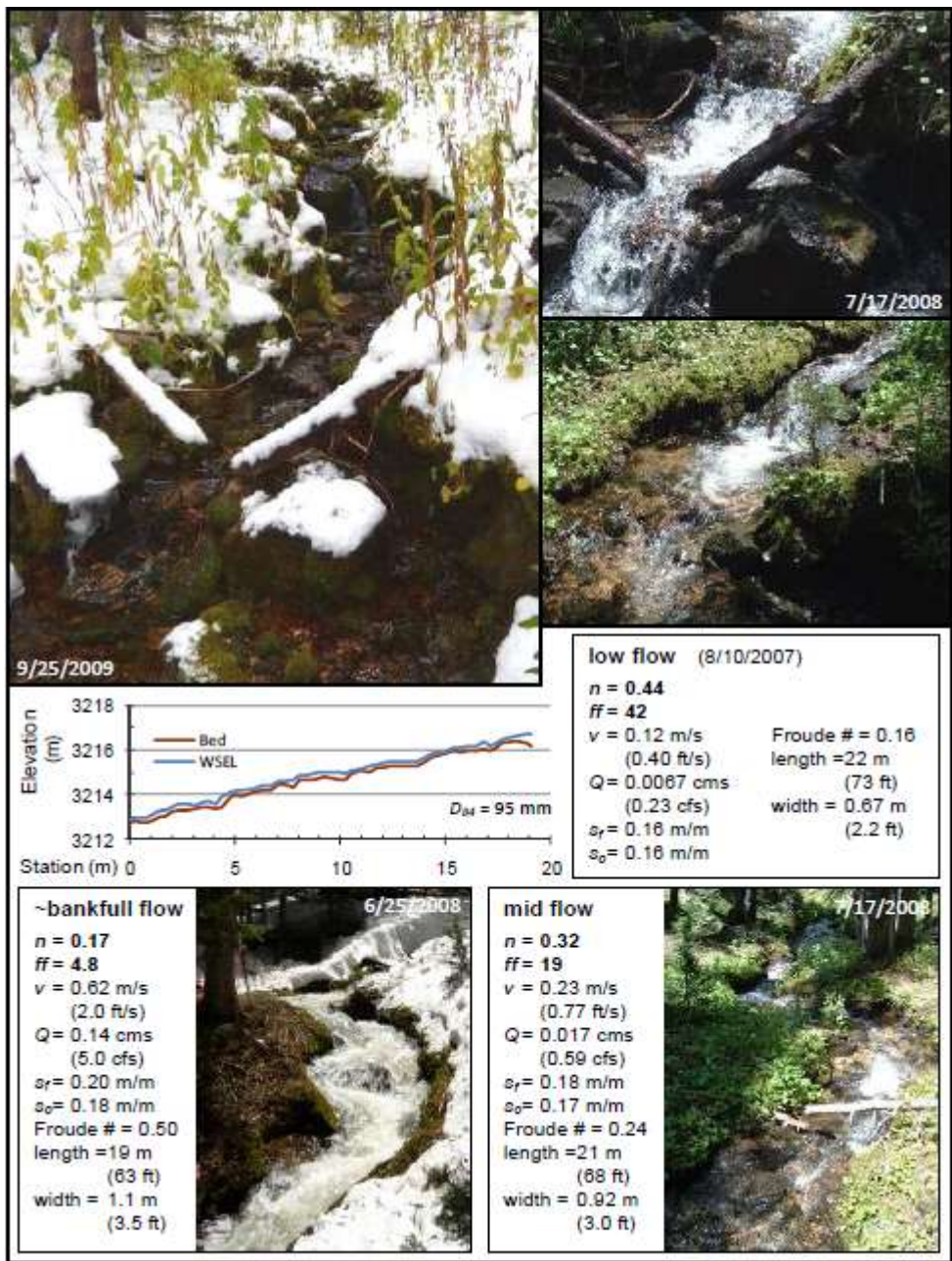
$d_{90}$ ...90-odstotno zrno plavin [m]

## 4.2 Ocena koeficienta hrapavosti $n_G$ v strmih strugah

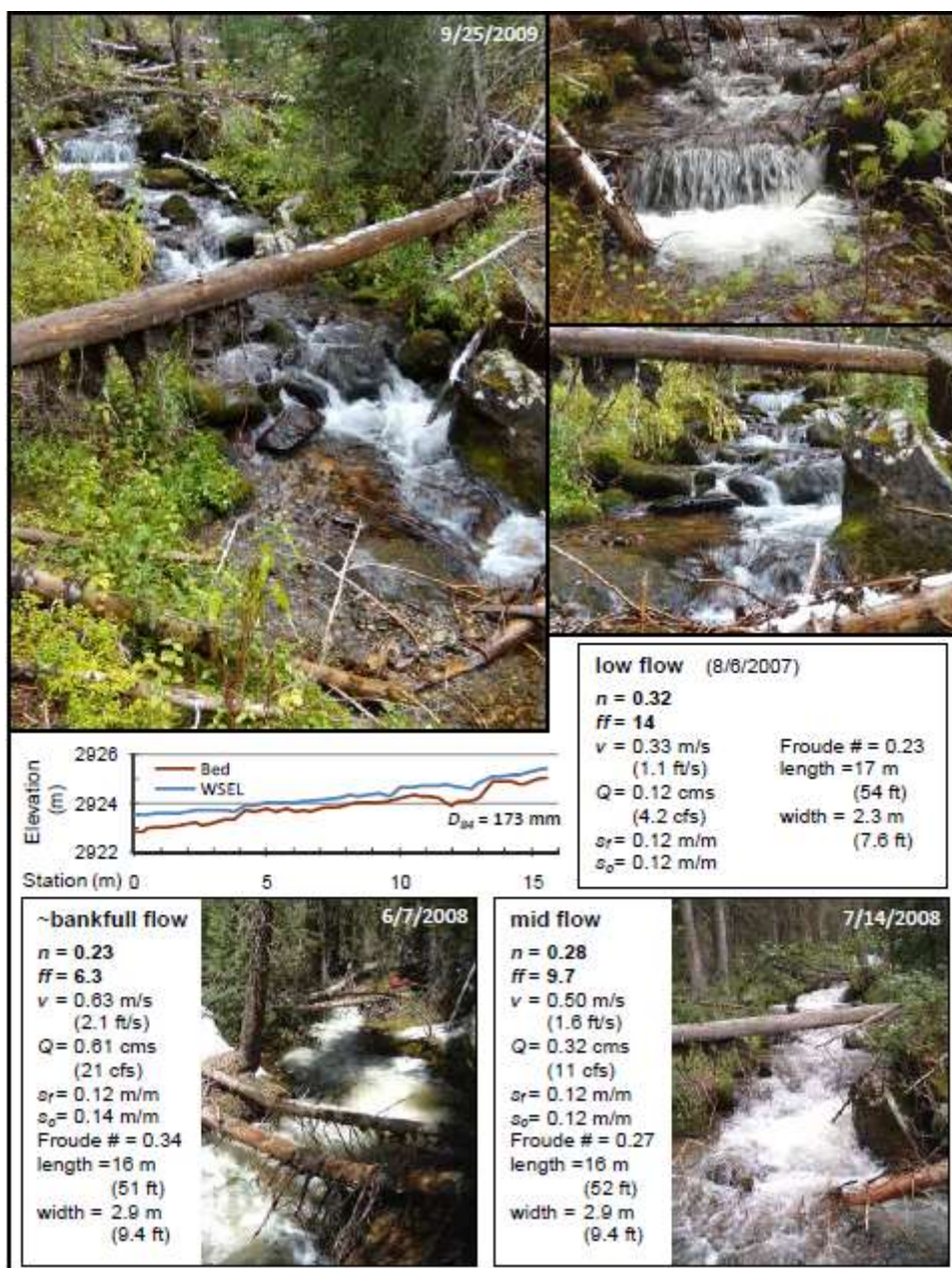
Največ težav pri hidravličnem analiziranju nam povzroča določitev Manningovega koeficienta hrapavosti, katerega določitev pa je glavnega pomena pri hidravličnem modeliranju. Pri določitvi tega si lahko pomagamo s člankom Flow resistance estimation in high gradient streams (Yochum, 2010), ki je bil napisan v sklopu raziskave na Univerzi v Coloradu.

Narejenih je bilo devet raziskav in sicer za nizke, srednje ter visoke pretoke. Vodotoki, vključeni v raziskavo, imajo padec od 1,5 do 20% ter določen Manningov koeficient od  $n_G = 0,048$  ter vse do  $n_G = 0,52$ .

Spodaj sta podana dva primera raziskave, ki je bila narejena leta 2007. Prvi primer je bil narejen v gorovju Fool Creek, drugi pa v East Saint Louis Creek.



Slika 4: Primer določitve koeficienta hrapavosti v strmih strugah (Flow resistance estimation in high gradient streams)



Slika 5: Primer določitve koeficienta hrapavosti v strmih strugah (Flow resistance estimation in high gradient streams)

### 4.3 Froudovo število

Froudovo število nam pove kakšen je tok, miren, deroči ali kritičen. Odseki vodotokov z mirnim tokom in manjšo erozijsko močjo, so najbolj zaželeni pri urejanju. Hudourniki pa so vodotoki s strmim padcem in veliko erozijsko močjo, tako da je urejanje le-teh veliko bolj zahtevno. Prav zato želimo z različnimi objekti (hudourniške pregrade) zmanjšati padec dna struge in s tem umiriti vodni tok.

Število je definirano kot razmerje med hitrostjo in globino. Enačba je brezdimenzijski koeficient (Mikoš, 2008).

Njegova vrednost pomeni:

$Fr < 1$  miren tok

$Fr = 1$  kritičen tok

$Fr > 1$  deroči tok

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

Fr...Froudovo število [/]

v...hitrost [m/s]

g...gravitacijski pospešek  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

h...globina [m]

## 5 HIDRAVLIČNE ANALIZE

Vsa programska oprema, ki se jo uporablja za reševanje hidravličnih modelov toka s prosto gladino deluje kot enodimenzionalni model za račun poteka gladin pri stalnem enakomernem ali neenakomernem toku.

Računalniški program HEC-RAS, ki je opisan v nadaljevanju diplomske naloge, nam omogoča obravnavanje nenadnih sprememb ob ovirah v toku in sprememb režima toka. Kot poseben primer nenadnih sprememb v površini prečnega preseka obravnavamo prepuste in mostove. Program odpravlja večino težav, ki so se pojavljale pri starejših eno dimenzionalnih modelih. V prečnem prerezu je možno razdeliti pretočni presek na posamezne lamele in za vsako posebej določiti določene hidravlične parametre.

## 6 PROGRAMI

### 6.1 HEC-RAS

HEC-RAS je računalniški program, katerega so razvili na ameriškem centru za hidrologijo (HEC). Vse odkar je bil leta 1995 prvič javno dostopen, so program izpopolnjevali in dopolnjevali z novimi verzijami.



Prve izvedbe programa (HEC-1 in HEC-2) so omogočale le računanje hidravlike eno dimenzijskega modela s stalnim tokom. Zadnja verzija, ki mogoča izračun stalnega in nestalnega toka, je nastala konec leta 2002. Analiziramo lahko tudi vpliv različnih objektov na vodotoku (mostovi, prepusti, kanali, nasipi, itd.). Ena največjih prednosti novejših verzij je gotovo možnost izvedbe modela 1D toka v odprtih vodotokih za različne režime toka ter transporta sedimentov in kakovost vode. Rezultati, ki jih pri tem dobimo nam nudijo podatke v posameznih prečnih profilih, prepustih, mostovih, krivuljah pretokov in energijskih izgub (Markič, 2008).

Program ima veliko prednosti, a hkrati tudi nekaj slabosti oz. omejitev, katere so opisane v nadaljevanju.

### 6.1.1 Prednosti programa

Čeprav je program HEC-RAS dokaj enostaven za uporabo, je zanj vseeno potrebno veliko predznanja iz hidravlike, predvsem če želimo model ustrezno umeriti s podatki s terena. Program ima zagotovljen relativno stabilen nadaljnji razvoj, saj je to programska veja, ki jo podpira tudi vlada združenih držav Amerike kot glavni financer raziskav, tako da je v prihodnje pričakovati nekaj izboljšav in dodatnih novosti.

Potrebno je zagotoviti dovolj veliko število prečnih profilov, da bomo z modelom iz HEC-RAS-a lahko čim bolj prikazali dejansko stanje v naravi. Kljub temu, da postavimo profile dovolj skupaj in da je natančno upoštevana geometrija struge, to ni zagotovilo, da bo izračun natančen. Iz ekonomskega vidika običajno podatke prečnih prerezov struge pridobimo le kjer so nujno potrebni.

Pomembno je, da so pridobljeni podatki o geometriji struge kakovostni. Te pridobimo z Lidarskim skeniranjem, katerega proces je opisan v nadaljevanju.

### 6.1.2 Omejitve programa

Tok, ki ga obravnavamo s programom mora biti stalen ( $Q=\text{konst.}$ ). Vedno predpostavimo, da je tok eno dimenzionalen, tako da je HEC-RAS primeren za izračun hidravličnih modelov, kjer imamo prevladujoči tok le v eni smeri.

Računamo v vodotokih z naklonom, ki je manjši od 1:10 oz. 10%. Ta pogoj pride iz tega, da program HEC-Ras izračuna navpični tlak po naslednji enačbi.

$$H_p = d \cos\theta$$

$H_p$ ... vertikalna globina vode [m]

$d$ ... globina vode, ki je merjena pod pravim kotom na dno reke oz. vodotoka [m]

$\theta$ ... naklon rečne struge [°]

V primeru, da je naklon rečne struge manjši od 10% potem predpostavljamo, da je globina ( $d$ ), ki smo jo izmerili, enaka dejanski globini vode, kar v računu ne povzroči velike napake. Kjer pa je naklon večji od 10% moramo paziti na napako, katera se pojavi pri uporabi programa, če ne upoštevamo člena  $\cos\theta$ .

Omejitev programa HEC-RAS je tudi ta, da pri računanju hidravličnega modela v strmih strugah program kot velika večina drugih hidravličnih modelov ne upošteva mešanja vode z zrakom.

Zaradi teh omejitev pride pri rezultatih, pridobljenih na podlagi izračuna do večjih odstopanj v primerjavi z dejanskimi razmerami v naravi, kar je bilo dokazano z Ameriško raziskavo na reki Floridi, katera je na kratko opisana v naslednji točki 6.1.3.

### 6.1.3 Primer hidravlične analize delovanja modela na bolj strmih odsekih struge

V nalogi so predstavljeni rezultati na primeru reke Floride v ZDA ter rezultati lastne hidravlične analize na primeru hudournika Kuzlovec.

Ena redkih raziskav, narejenih na temo natančnosti izračunov hidravličnih modelov v programu HEC-RAS v primerjavi s terenskimi podatki, je bila narejena leta 2000 na reki Floridi. Namen raziskave je bilo ugotoviti, kateri parametri so tisti, ki v največji meri vplivajo na razliko v rezultatih, ki so bili dobljeni v naravi in tistih pridobljenih iz modela, narejenega v računalniškem programu. Kontrolirati je bilo potrebno več spremenljivk.

Raziskava je potekala na dveh izbranih odsekih reke Floride. Prva je bila izvedena na odseku umetnega kanala reke, katere dno kanala, z majhnim povprečnim naklonom (0,00078 m/m), v glavnem sestavljajo mulj, pesek ter razpršeni, manjši prodniki. Druga raziskava pa je bila izvedena na odseku gorske reke Floride, katere dno kanala sestavljajo večji in manjši prodniki ter je večjega naklona (0,0145 m/m).

Meritve so potekale tako da so izmerili gladino vode ob dveh različnih pretokih.

Kalibracija na kanalu reke Floride se je začela z izkušnjami oz. ocenami, ki so temeljile na vrednosti Manningovega koeficienta  $n_G=0,021$ .

Program HEC-RAS je le z 1,2% napako izračunal pravilno višino gladine vode ob najvišjem pretoku na obravnavanem odseku kanala reke Floride, kjer je tok počasen in naklon struge nizek. Pri modeliranju na strmem odseku reke Floride, pa je HEC-RAS model naredil kar 20,8% napako.

Razliko med napakama (1,2% in 20,8%) je moč pripisati predvsem naklonu struge. Le-ta pripomore, k temu, da se pojavijo velike energijske razlike med stacionažami. Napake pri meritvah v naravi pa so povzročile tudi turbulenca, velike hitrosti ter neenotno dno struge (May et al.; 2000).

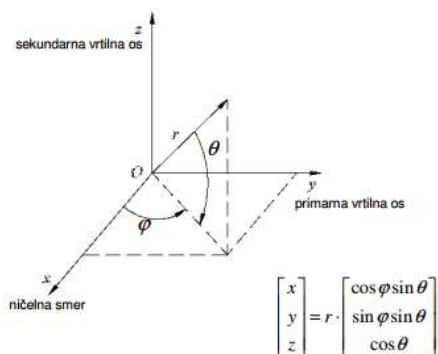
## 7 LASERSKO SKENIRANJE

### 7.1 Lasersko skeniranje in lidarski podatki

Lasersko skeniranje je sodobna tehnologija, ki zajema podatke površja z aktivnim senzorskim sistemom, kateri za merjenje uporablja laserske žarke. Za to tehnologijo uporabljamo izraz LIDAR. Beseda izvira iz angleščine- Light detection and ranging. Ozko usmerjena laserska svetloba ima neko določeno frekvenco valovanja. Tehnologija omogoča zelo veliko količino meritev. Najpogosteje jo uporabljamo za zajem podatkov o površju ter zajem grajenih objektov in naprav.

Podatki pridobljeni z laserskim skeniranjem so uporabno za izdelavo hidrološko hidravličnih študij, spremljanje sprememb v okolju, načrtovanje ukrepov za povečevanje poplavne varnosti, energetiko, arheologijo, kmetijstvo, gozdarstvo, obrambo ipd. (Naročnik snemanja: MOP, 2011).

Lidarski podatki oz. njihova natančnost je odvisna od višine snemanja oz. skeniranja, gostote točk, nagiba in vrste terena, divergence laserskega žarka idr.

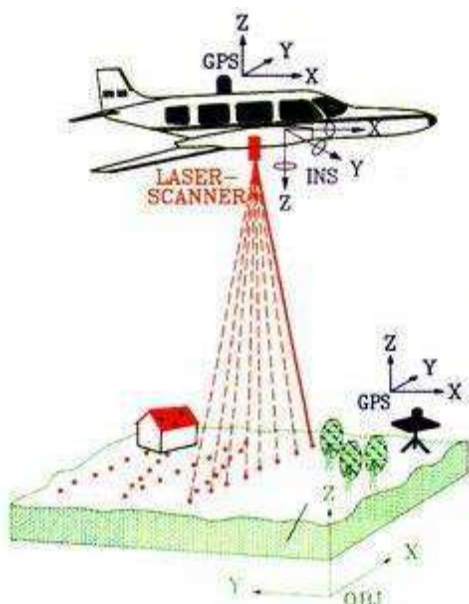


Slika 6: Naravni koordinatni sistem skenerja (Urbančič, Grigillo; 2015)

## 7.2 Obdelava podatkov laserskega skeniranja

Podatke pridobljene z lidarjem obdelujemo v dveh oblikah: vektorski (X, Y, Z) ali rastrski. Rezultat, ki ga dobimo s tem skeniranjem je oblak neomejenega števila georeferenciranih točk, ki jih je potrebno dodatno obdelati in odstraniti napake v zajemu podatkov. Točke z dodatno klasifikacijo opredelimo glede na to, od kod se je laserski signal odbil. Signal se lahko odbije od tal, stavb, vode ter nizke, srednje ali visoke vegetacije. S to klasifikacijo se nato izdelata digitalni model terena, katerega natančnost je odvisna predvsem od gostote odbitih točk, ki se merijo na kvadratni meter terena.

Avtomatsko filtriranje se izvede v računalniških programih, ki odpirajo datoteke formata ALS ali TIFF/BMP (Naročnik snemanja: MOP, 2011).

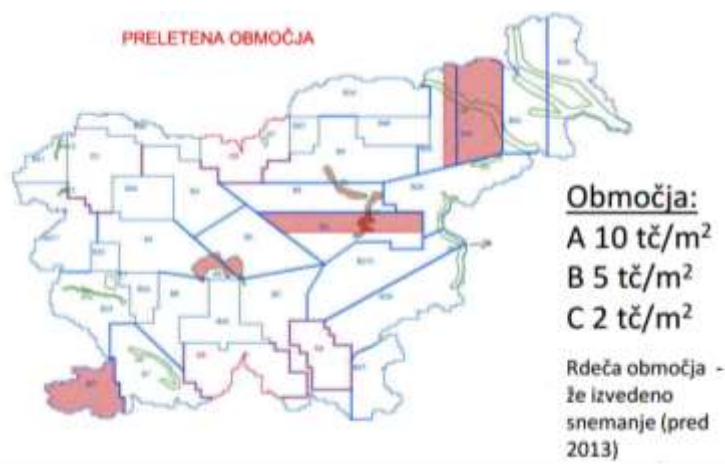


Slika 7: Shematski prikaz delovanja zračnega laserskega skenerja (Naročnik snemanja: MOP, 2011)

## 7.3 Lasersko skeniranje Slovenije (LSS)

V Sloveniji se je leta 2011 začelo izvajati državno aerolasersko skeniranje, ki je bilo potem za nekaj časa prekinjeno. Nadaljevanje projekta, ki vsebuje celotno Slovenijo in 250 m širok čezmejni pas, se je začelo leta 2014. Celotno ozemlje je razdeljeno na območja A, B in C z različnimi gostotami točk.





Slika 8: Območja različnih gostot snemanja (Urbančič, Grigillo; 2015)

Skeniranje poteka z laserskim skenerjem, ki je pritrjen na letalo. Zajemanje podatkov deluje tako, da skener odda in potem ujame od terena odbiti žarek in na podlagi časa potovanja žarka določi višino točke, od katere se je žarek odbil.

Pri delu se uporabljajo še navigacijske naprave GNSS (Global Satellite Navigation System) in inercialni sistem (INS). Namenjena sta umestitvi podatkov v prostor ter samega laserskega sistema, ki oddaja laserske žarke in sprejema njihove odboje od terena in objektov na terenu.

Digitalni model reliefa (DMR) vsebuje velikost celice 1 m, srednjo višinsko točnost 15 cm ter srednjo horizontalno točnost 30 cm.

#### 7.4 SAGA GIS

Program SAGA GIS je geografski informacijski sistem, ki se uporablja za urejanje prostorskih podatkov, ki so pridobljenih s skeniranjem. Računalniški program je bolj uporaben za pripravo DMR podatkov in prikaz le-teh. Ime izhaja iz kratic- **S**ystem for **A**utomated **G**eoscientific **A**nalyses (sistem za avtomatizirane geo-znanstvene analize). Zasnovan je bil za enostavno in učinkovito izvajanje prostorskih algoritmov. Uporablja se lahko skupaj z drugo GIS programsko opremo.

Program ponuja celovit, vedno večji nabor geo-znanstvenih metod. Deluje v operacijskih sistemih Windows in Linux ter je na voljo v treh jezikih (Angleški, Nemški in Češki) (SAGA GIS).

## 8 HIDRAVLIČNA ANALIZA KUZLOVCA

### 8.1 Hudournik Kuzlovec

#### 8.1.1 Opis lokacije Kuzlovca

Kuzlovec je majhen del celotnega porečja reke Gradaščice, ki izvira v Polhograjskem hribovju, zahodno od Ljubljane. Je hudourniški gozdni potok, ki ga oblikujejo strma pobočja, skale in številne kaskade ter ozke doline. Dolžina vodotoka je približno 1300 m. Na obravnavanem eksperimentalnem porečje Kuzlovec ima Katedra za splošno hidrotehniko postavljeno sodobno mersko opremo. Gozd na območju Kuzlovca predstavlja več kot 80% celotne površine. Najvišja točka vodotoka je na 800 m n.v. Izteka se v Veliko Božno, ki pa se pri Polhovem Gradcu združi z Malo vodo. Reka se od sotočja naprej imenuje Gradaščica. Kuzlovec se v Gradaščico izliva na nadmorski višini 394 m. Slednja teče v osrednjem delu Slovenije, med dinarskim in alpskim svetom. Pri Bokalškem jezu v Ljubljani se razdeli na Mestno Gradaščico ter Mali Graben. Mestna Gradaščica in Mali Graben se v Ljubljani izlivata v reko Ljubljanico, ki je del porečja reke Save.



Slika 9: Lokacija porečja Gradaščice na karti Slovenije z označenimi hidro-geografskimi območji ter označeno lokacijo prispevnega območja Kuzlovca (Bezjak et al.; 2013)



a) Situacija v Kuzlovcu leta 2012

b) Situacija v Kuzlovcu leta 2014

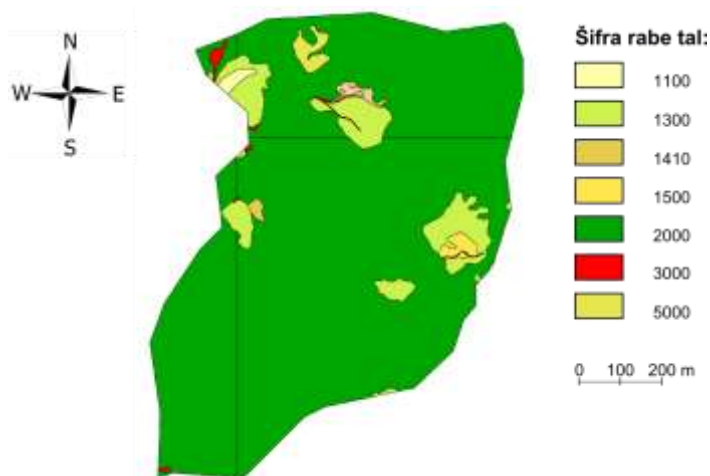
Slika 10: Prikaz razmer na območju struge Kuzlovca pred in po ekstremnem padavinskem dogodku (Projekt SedAlp)

Na sliki, kjer je prikazana struga Kuzlovca, lahko vidimo, da je v neposredni bližini struge veliko kamninskega drobirja, zapadlega lesa in usedlin. Ves ta material Kuzlovec ob ekstremnih vremenskih dogodkih premešča dolvodno v Božno. Na porečju Kuzlovca sta postavljeni dve hudourniški pregradi, katerih zaplavni prostor zapolnjujejo hudourniške plavine. V strugi Kuzlovca je voda prisotna v vseh letnih časih, kar pomeni da je zanj značilen stalni tok (Bezák et al.; 2013).

<b>Prispevna površina</b>	0,71 km <sup>2</sup>
<b>Nadmorska višina</b>	
○ min	394 m n. v.
○ srednja	631 m n. v.
○ max	847 m n. v.
<b>Naklon porečja</b>	
○ max	46,5° (105,3 %)
○ povprečje	27,3° (51,6 %)
<b>Lega</b>	SW
<b>Letna količina padavin</b>	1600-1800 mm
<b>Dolžina glavne struge</b>	1300 m
<b>Naklon struge</b>	
○ povprečje	22,2 %
<b>Pokrovnost in raba prostora (CLC)</b>	
○ mešani gozd	38,3 %
○ listnati gozd	43,7 %
○ pretežno kmetijske površine z večjimi območji naravne vegetacije	18 %
<b>Geologija</b>	Laporni apnenec, dolomit, peščen skrilavec, oolitni apnenec; neplastovit Rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat; temno siv apnenec in dolomit
<b>Pedologija</b>	Rendzina na apnencu in dolomitu

Preglednica 3: Osnovne lastnosti Kuzlovca (Bezák et al.; 2013)

### 8.1.2 Pokrovnosti in raba prostora



Slika 11: Raba tal na območju Kuzlovca (2012) (Rusjan)

Šifra	Opis rabe tal	Površina [km <sup>2</sup> ]	Delež [%]
2000	Gozd	0.633	90.1
1300	Trajni travnik	0.050	7.1
1410	Kmetijsko zemljišče v zaraščanju	0.002	0.3
1500	Drevesa in grmičevje	0.004	0.5
1600	Neobdelano kmetijsko zemljišče	0.002	0.3
3000	Pozidano in sorodno zemljišče	0.003	0.4
1100	Njive	0.003	0.4
5000	Odperto zemljišče s posebnim rastlinskim pokrovom	0.006	0.8

Preglednica 4: Šifre rabe tal (Rusjan)

Najpogostejša raba tal na območju izbranega hudournika je gozd, kjer prevladuje bukev. Rendzina na apnencu in dolomitu je vrsta prsti, ki prevladuje. Geološka podlaga je relativno erodibilna. To pomeni, da se ob ekstremnih hidrometeoroloških pogojih pojavljajo erozijski procesi. Na celotnem območju hudournika Kuzlovec ni antropogenih vplivov (npr.: dejanja človeka- namakanje, gnojenje, izsuševanje,...) (Bezák et al.; 2013).





Na iztoku obravnavanega vodotoka so se poleti leta 2013 začele izvajajo meritve vodostajev ter temperature vode in zraka. Za merjenje se uporablja sonda Onset HOB0. Ena sonda meri vodni, druga pa zračni tlak. V obeh porečjih sta postavljeni po dve sondi, saj je s pomočjo teh dveh podatkov mogoče določiti vrednost vodostajev. Izbran je desetminutni interval merjenja.



Slika 14: Lokacija vodne ter zračne sonde na eksperimentalnem porečju Kuzlovec (Bezak et al.; 2013)

Slika 15: Lokacija Hydrolab MS5 sonde na eksperimentalnem porečju Kuzlovca (Bezak et al.; 2013)

Motnost merimo s Hydrolab MS5 sondo, katera meri različne parametre. Te parametri so: stopnja motnosti, pH, temperatura vode.

#### **8.1.4 Terestično lidersko skeniranje Kuzlovca**

S terestičnim laserskim skenerjem je bil izdelan DMR (Digitalni model reliefa) za hudournik Kuzlovec.

S TLS-jem je bil skeniral spodnji del hudournika od 500 m n.v. do izliva. Padec nivelete na omenjenem območju je približno 10°.

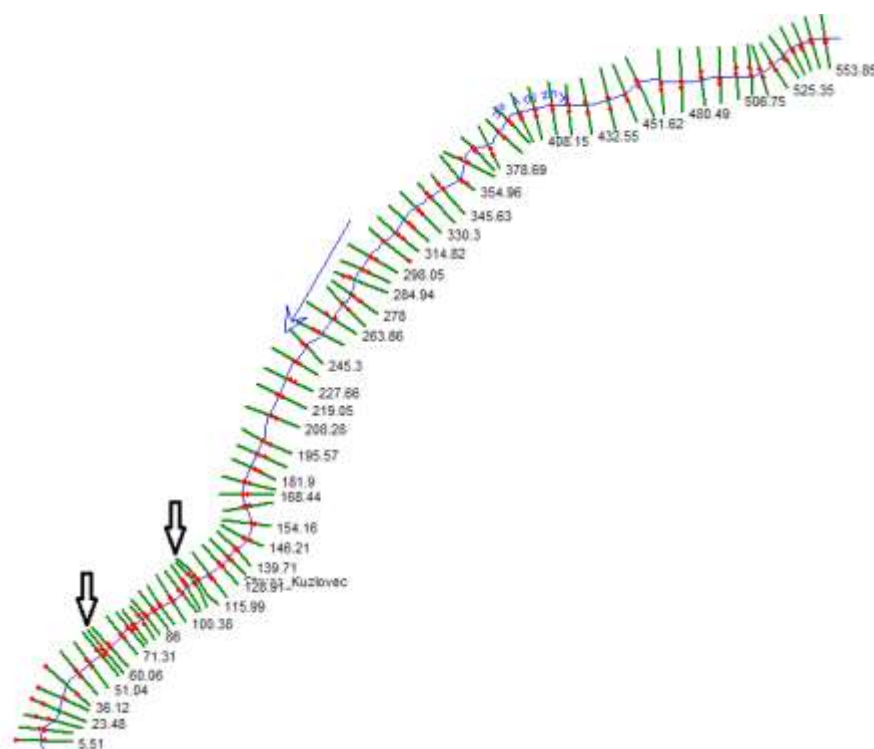
Strugo vodotoka oblikujejo predvsem skale, skalnate kaskade ipd. Celotno območje je prekrto z gozdom, kjer prevladuje bukev. V strugi je nekaj padlega drevja, ki dodatno ovira tok vode.

Skeniranje se je izvajalo leta 2013 z Rieglovim terestičnim laserskim skenerjem VZ-400, na katerega je bil nameščen fotoaparata Nikon D700. Vzduž struge je bilo razporejenih 29 stojšč. Vezne točke so signalizirali z Rieglovimi cilindričnimi tarčami iz visoko reflektivnega materiala (Grigillo et al.; 2014).

## 8.2. Hidravlična analiza

### 8.2.1 HEC-RAS model Kuzlovca

Na sliki spodaj je predstavljen HEC-RAS model hudournika Kuzlovec z označenimi profili. Minimalna nadmorska višina dna struge je 393,12 metrov, maksimalna nadmorska višina pa znaša 495,05 metrov. V diplomsko nalogo je vključena celotna dolžina struge Kuzlovca, ki je 553,85 metrov. Na odseku struge je bilo narejenih 80 profilov, ki so v povprečju med seboj oddaljeni 6,9 m. Iz modela struge v programu sem izračunala povprečni nagib struge. Strugo sem razdelila na 2 dela. Spodnji del ima padec 14%, zgornji pa 18%. Iz teh števil je razvidno da gre tukaj seveda za hudourniško strugo z zelo strmim padcem.

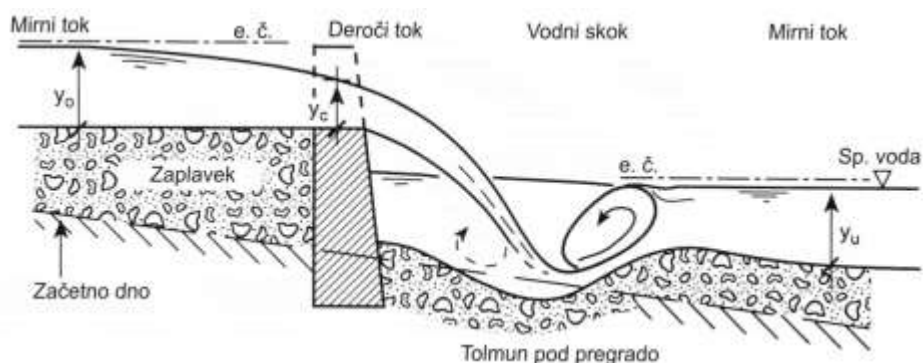


Slika 16: Situacija obravnavanega hudournika v programu HEC-RAS



Na območjih kjer so profili bolj gosto skupaj imamo pregrade, ki ustvarjajo vodni skok. Te pregrade so na sliki zgoraj označene s črno puščico (odseki profilov 50-60 in 100-115), njihov zaplavni prostor pa je zasut.

Pregrade pri hidravlični analizi niso bile vstavljene v model in detajlno hidravlično analizirane. Pri mirnem režimu toka vode na hudourniško pregrado se pretočne hitrosti močno povečajo, zato v območju prelivne krone preide mirni tok v deročega (Mikoš, 2008).

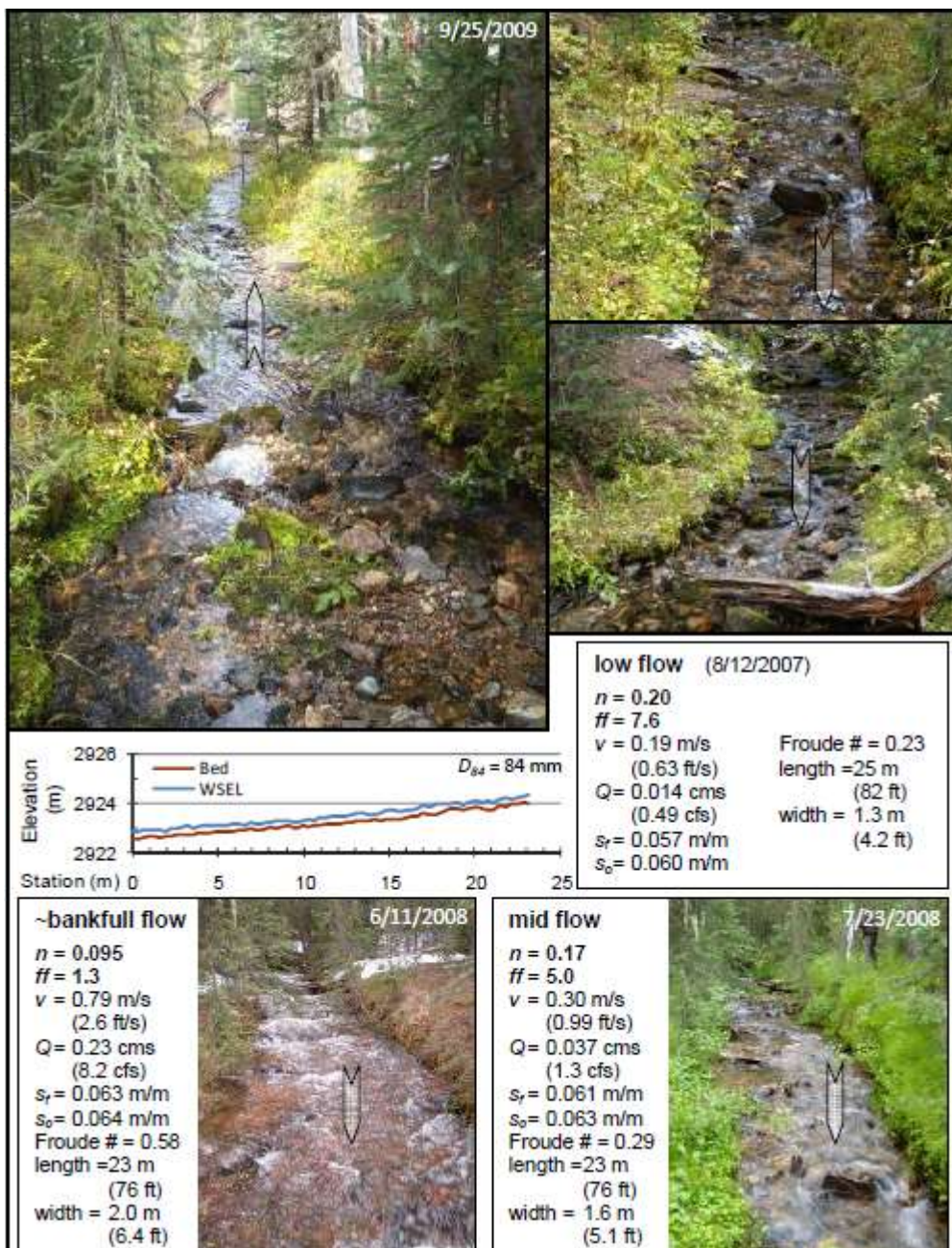


Slika 17: Prikaz vodnega skoka (Mikoš, 2008)

### 8.2.2 Opredelitev hidravlične analize

Pri hidravličnih analizah nam težave povzroča določitev Manningovega koeficienta hrapavosti, katerega sem določila s pomočjo raziskave (Yochum, 2010) Flow resistance estimation in high gradient streams, ki je bil podrobneje opisan že pod točko 4.2.

Izmed devetih testnih odsekov, sem si izbrala tisto, ki je kar najbolj podobna izbranemu hudourniku, Kuzlovcu. Ta je bila narejena v gorovju Canyon Mountains, natančneje Fool Creek.



Slika 18: Določitev Manningovega koef. hrapavosti v Canyon Mountains (Flow resistance estimation in high gradient streams)

Pri analizi v programu HEC-RAS sem uporabila vrednost koeficienta  $n_G = 0,09$ ,  $n_G = 0,15$ ,  $n_G = 0,2$  ter  $n_G = 0,3$ , kar je prikazano tudi spodaj, v preglednici 5.

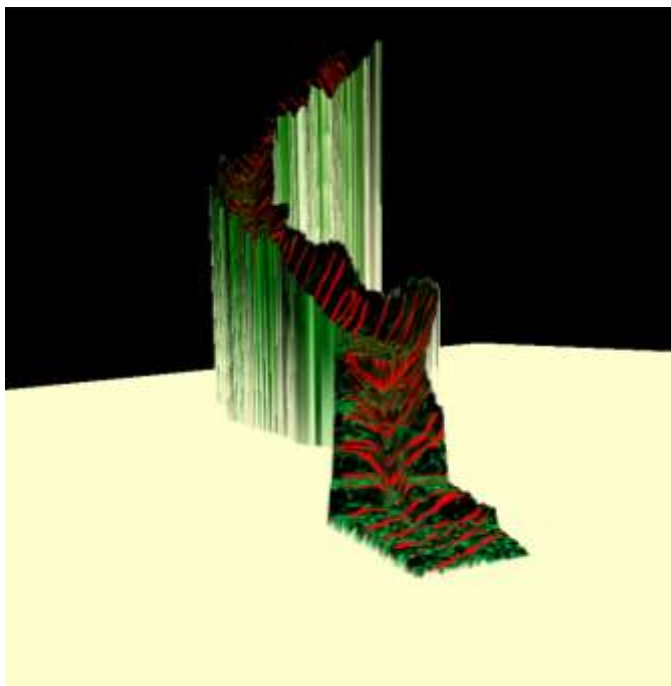
Analizo smo delali pri štirih različnih pretokih ter pri vsakem uporabili drugačen Manningov koeficient. Prvi je sušni pretok 20 l/s, potem pa še 500 l/s, 1000 l/s ( $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 1500 l/s ( $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ), ter 3000 l/s ( $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

V raziskavi je za nizek pretok uporabljen koeficient  $n_G = 0,2$ , vendar smo ga glede na terenske razmere v strugi Kuzlovca izkustveno povečali, ter sem tako računala z vrednostjo  $n_G = 0,3$ , ker je sušni pretok v Kuzlovcu zelo majhen.

V preglednici spodaj je prikazano kakšen Manningov koeficient je bil uporabljen pri določenem pretoku.

Pretok [L/s]	Manningov koeficient hrapavosti $n_G$
20	0,3
500	0,2
1000	0,15
1500	0,09
3000	0,09

Preglednica 5: Uporabljeni Manningov koeficient hrapavosti  $n_G$

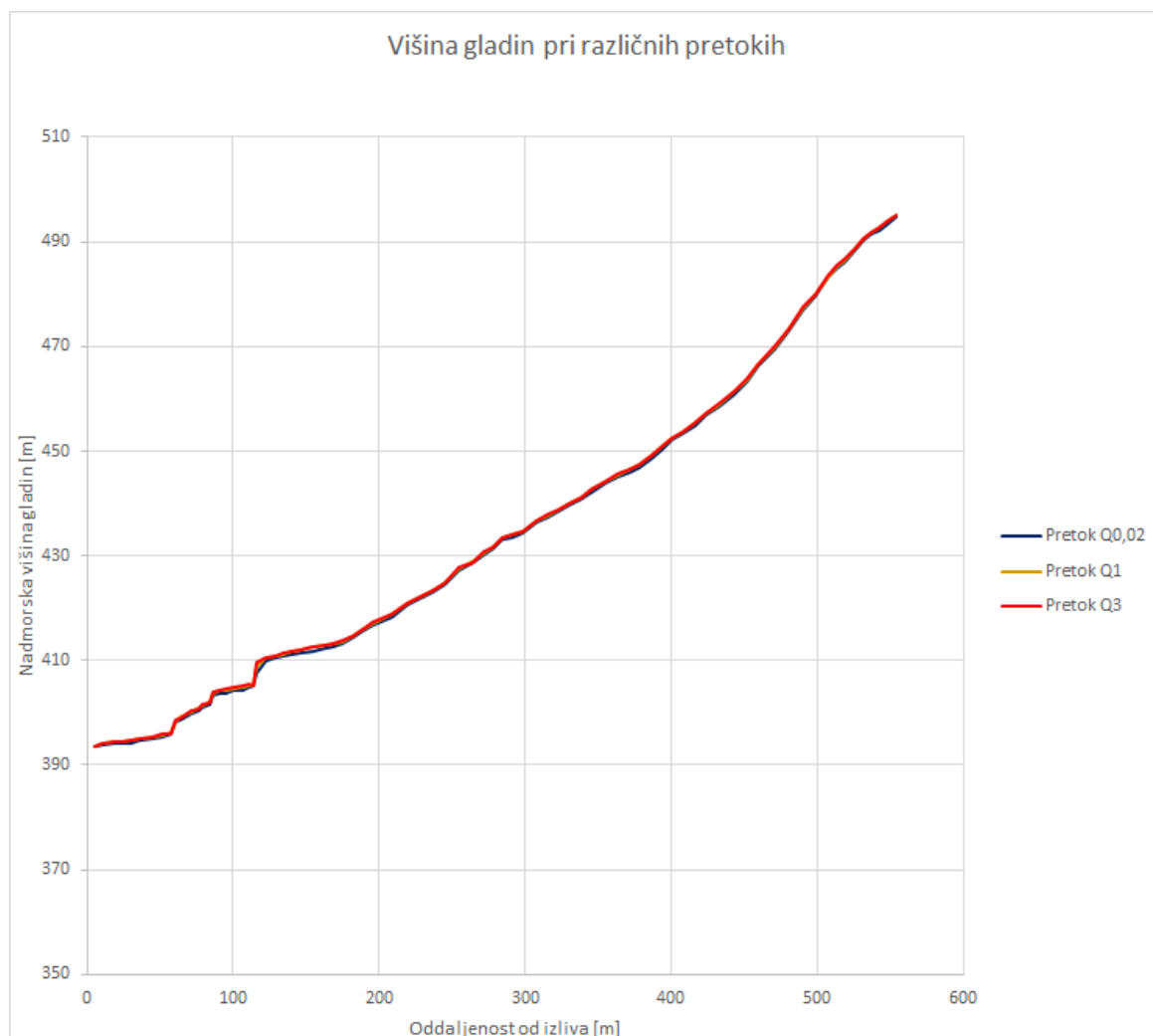


Slika 19: 3D prikaz poteka struge

### 8.2.3 Primerjava višine gladin

V grafikonu spodaj so predstavljene višine gladin vode pri različnih pretokih. Razvidno je, da višina gladin pada enakomerno skupaj s padcem skozi celotno strugo Kuzlovca. Manjši

preskoki so na oddaljenosti od 57 metrov do 115 metrov od izliva v Gradaščico. Te preskoki se pojavijo zaradi pragov in pregrad.



Grafikon 1: Višine gladin pri treh različnih pretokih z različnimi Manningovimi koeficienti

Na grafu so višine gladin pri treh različnih pretokih- najnižjim, srednjim in najvišjim pretokom. Zaradi majhnih globin v obravnavanem hudourniku je graf dokaj nerazločen.

Med povprečnimi globinami vodnega toka so razlike zelo majhne, le nekaj centimetrov.

Absolutna višina pri najmanjšem, sušnem, pretoku je 431,9 m, pri srednjem pretoku 432,3 m, pri največjem pretoku ( $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) pa 432,4 m.





Slika 20: Struga Kuzlovca s pregrado pred in po ekstremnem padavinskem dogodku leta 2014 (Projekt SedAlp)

#### 8.2.4 Primerjava pretočnih hitrosti v obravnavanem hudourniku

Izbrala sem sedem prečnih prerezov vzdolž naravne struge, ter potem na podlagi izračunov v HEC-RASu dobila podatke o hidravličnem radiju in ocenila lokalni padec na obravnavanem pododseku. Nato sem ocenila pretočne hitrosti, za iste stacionaže, še po Jarretovi in Rickenmannovi enačbi. Pri izračunu sem predpostavila, da  $d_{90}$  znaša 20 cm. V izračunu sem upoštevala oz. ocenila lokalni padec na kratkem odseku izbranega prečnega prereza. Te vrednosti so prikazane v preglednici spodaj.

<b>Stacionaža [m]</b>	<b>514,85</b>	<b>459,7</b>	<b>371,54</b>	<b>278</b>	<b>181,9</b>	<b>83,51</b>	<b>17,88</b>
<b>Lokalni padec [%]</b>	17,2	33,0	12,53	22,63	16,6	32,0	4,74

Preglednica 6: Lokalni padci na kratkih odsekih izbranega prečnega prereza

Stacionaža [m]	20 L/s	500 L/s	1000 L/s	1500 L/s	3000 L/s
514,85	0,31 m/s	0,82 m/s	0,99 m/s	2,22 m/s	4,06 m/s
459,7	0,2 m/s	0,81 m/s	0,96 m/s	2,2 m/s	6,34 m/s
371,54	0,26 m/s	0,61 m/s	0,74 m/s	1,68 m/s	6,3 m/s
278	0,16 m/s	0,56 m/s	0,73 m/s	2,5 m/s	3,48 m/s
181,9	0,2 m/s	0,96 m/s	1,24 m/s	1,86 m/s	4,16 m/s
83,51	0,11 m/s	0,44 m/s	0,57 m/s	0,29 m/s	4,19 m/s
17,88	0,09 m/s	0,25 m/s	0,29 m/s	3,61 m/s	16,84 m/s

Preglednica 7: Pretočne hitrosti na sedmih izbranih stacionažah izračunane s HEC-RASom

**JARRETOVA ENAČBA**

$$v = 3,11R^{0,83}I_0^{0,12}$$

Stacionaža [m]	20 L/s	500 L/s	1000 L/s	1500 L/s	3000 L/s
514,85	0,24 m/s	0,74 m/s	0,98 m/s	0,77 m/s	0,98 m/s
459,7	0,26 m/s	0,59 m/s	0,72 m/s	0,66 m/s	0,80 m/s
371,54	0,27 m/s	0,82 m/s	1,04 m/s	0,87 m/s	1,06 m/s
278	0,35 m/s	0,80 m/s	1,06 m/s	0,63 m/s	0,85 m/s
181,9	0,21 m/s	0,63 m/s	0,79 m/s	0,79 m/s	1,10 m/s
83,51	0,26 m/s	0,80 m/s	1,11 m/s	0,33 m/s	0,47 m/s
17,88	0,15 m/s	0,66 m/s	0,90 m/s	0,82 m/s	1,07 m/s

Preglednica 8: Pretočne hitrosti na sedmih izbranih stacionažah izračunane po Jarretovi enačbi

**RICKENMANNOVA ENAČBA**

$$v = 0,79Q^{0,34}I_0^{0,20}d_{90}^{-0,35}$$

Stacionaža [m]	20 L/s	500 L/s	1000 L/s	1500 L/s	3000 L/s
514,85	0,26 m/s	0,77 m/s	0,98 m/s	1,12 m/s	1,42 m/s
459,7	0,29 m/s	0,88 m/s	1,11 m/s	1,28 m/s	1,62 m/s
371,54	0,24 m/s	0,72 m/s	0,92 m/s	1,05 m/s	1,33 m/s
278	0,27 m/s	0,81 m/s	1,03 m/s	1,18 m/s	1,50 m/s

<b>181,9</b>	0,26 m/s	0,77 m/s	0,97 m/s	1,11 m/s	1,41 m/s
<b>83,51</b>	0,29 m/s	0,87 m/s	1,10 m/s	1,27 m/s	1,61 m/s
<b>17,88</b>	0,20 m/s	0,60 m/s	0,75 m/s	0,87 m/s	1,10 m/s

Preglednica 9: Pretočne hitrosti na sedmih izbranih stacionažah izračunane po Rickenmannovi enačbi

Pretočne hitrosti po Jarretovi in Rickenmannovi enačbi so dokaj podobne, veliko večje vrednosti pa dobimo pri izračunu v programu HEC-RAS.

### 8.2.5 Strižne napetosti v obravnavanem hudourniku

HEC-RAS nam poda tudi vrednosti strižnih napetosti v glavni strugi, kar nam omogoča izris grafikona v Excelu. V hudournikih nam veliko škode zaradi sile upora povzroča hiter tok vode, ki povzroča erozijske procese. Ti procesi povzročajo škodo v vodnem gospodarstvu, v kmetijstvu, itd.

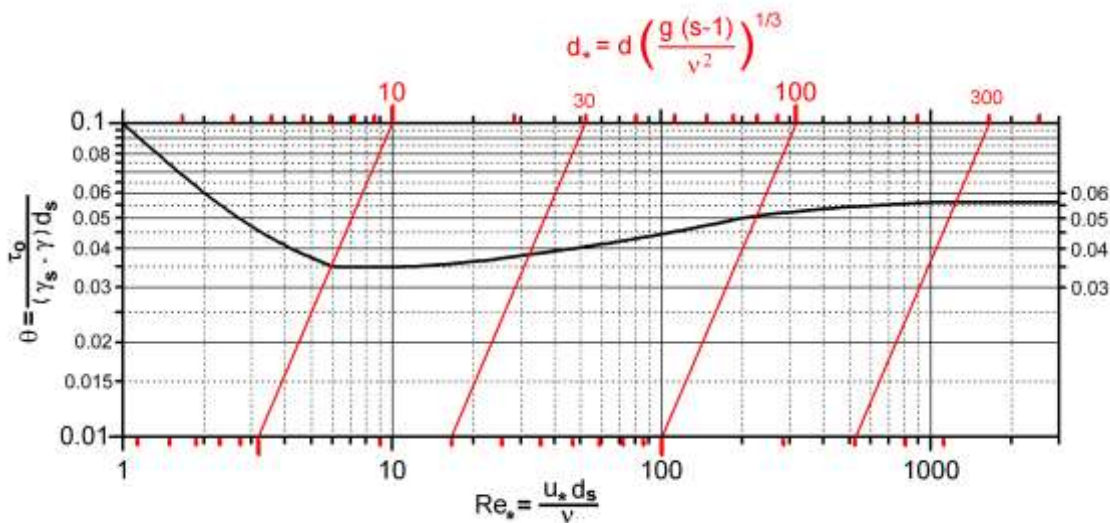
Geometrijska spremenljivost struge močno vpliva na strižne napetosti oz. na nihanja teh vrednosti.

Kritična strižna obremenitev v strugi vodotoka je odvisna od mejnega zrna krovnega sloja.

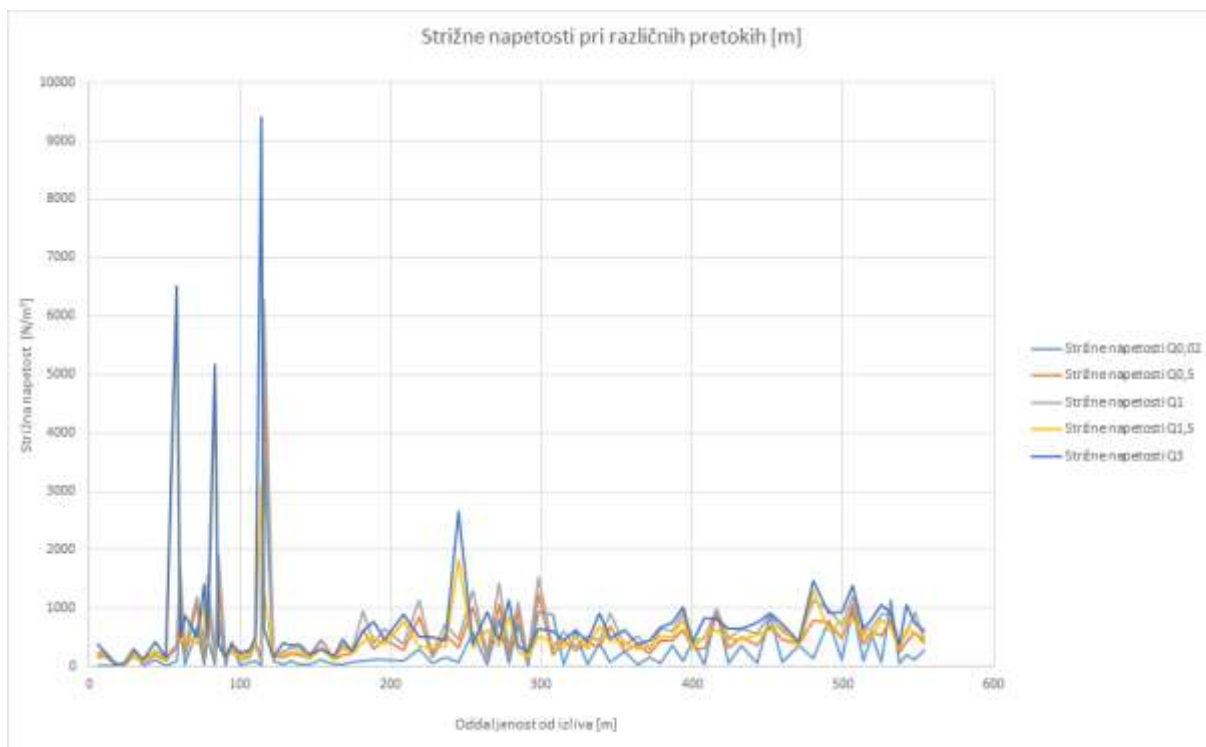
<b>Pretok</b> [L/s]	<b>Povprečna strižna napetost</b> [N/m <sup>2</sup> ]	<b>Kritična brezdimenzijska strižna napetost</b>	<b>Kritično zrno plavin</b> [m]
<b>20</b>	294,9	0,053	0,38
<b>500</b>	489,6	0,054	0,62
<b>1000</b>	645,8	0,055	0,83
<b>1500</b>	614,4	0,05	0,84
<b>3000</b>	843,4	0,056	1,0

Preglednica 10: Povprečna strižna napetost in pripadajoča kritična zrna plavin

Kritično zrno plavin, ki bi se še lahko upiralo vodnemu toku dobimo glede na povprečno strižno napetost. Pomagamo si s Shieldsov-im diagramom.



Slika 21: Shieldsov diagram



Grafikon 2: Strižne napetosti pri različnih pretokih

Prikazane so strižne napetosti za pretok 20 l/s, 500 l/s, 1000 l/s, 1500 l/s ter 3000 l/s. Razvidno je, da so odstopanja strižnih napetosti pri izbranih pretokih, približno enakomerna skozi cel grafikon. Največje oz. maksimalne vrednosti so pri hudourniških pregradah (odsekih profilov 50-60 in 100-115). Tu znašajo strižne napetosti med 5177 N/m<sup>2</sup> in 9389 N/m<sup>2</sup>.



Če gledamo samo odseke struge, ki niso pod vplivom pregradnih objektov, so najvišje vrednosti dosežene pri maksimalnem pretoku  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Na oddaljenostih 245,3 metrov od izliva v Gradaščico je rahlo odstopanje strižne napetosti, ki znaša  $2649 \text{ N/m}^2$ .

Spodaj je podana tabela z maksimalnimi in minimalnimi strižnimi napetostmi za odseke, ki niso pod vplivom pregradnih objektov.

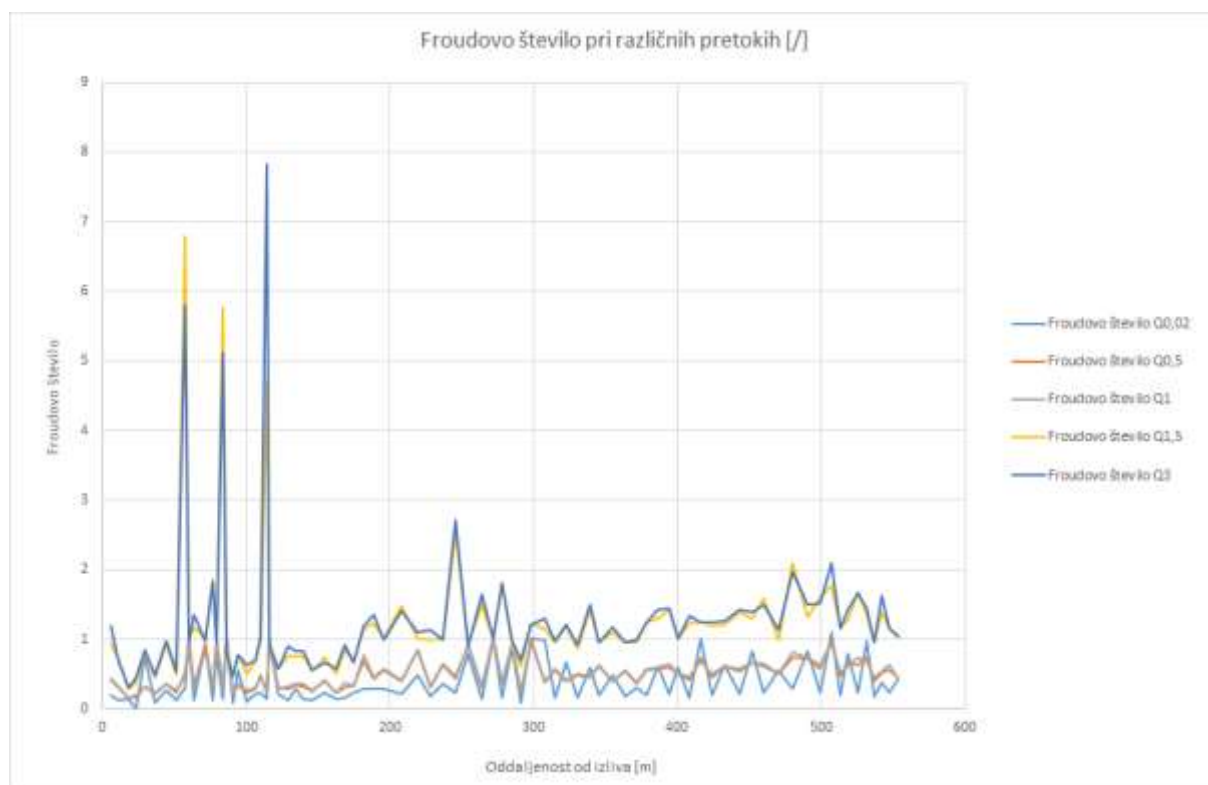
<b>Pretok [L/s]</b>	<b>Minimalna strižna napetost [<math>\text{N/m}^2</math>]</b>	<b>Maksimalna strižna napetost [<math>\text{N/m}^2</math>]</b>
<b>20</b>	9	1135
<b>500</b>	19	1414
<b>1000</b>	44	1919
<b>1500</b>	29	4875
<b>3000</b>	43	5177

Preglednica 11: Približne minimalne in maksimalne strižne napetosti odsekov, ki niso pod vplivom pregrad

### 8.2.6 Primerjava režima toka

S pomočjo programa HEC-RAS sem dobila podatke o vrednosti Froudovega števila, ki je prikazan v grafikonu spodaj. Ta vrednost nam pove ali je tok miren, deroči ali kritičen. Za mirni tok so značilne majhne hitrosti in velike globine, pri deročem toku, pa so hitrosti velike ter globina majhna.

Pri končnem izračunu smo v programu uporabljali mešani režim toka (ang. mixed Flow). Program pri izračunu uporablja formulo  $D=S/\text{širina gladine}$ , kjer s S označuje površino, z D pa hidravlično globino.



Grafikon 3: Froudovo število pri različnih pretokih [F]

Iz grafikona je razvidno, da so maksimalne vrednosti tam, kjer imamo hudourniške pregrade, ki so na odsekih profilov 50-60 ter 100-115. Kot sem že omenila, pri hidravličnih analizah te objekti niso bili vstavljeni v model in detajlno analizirani. Za detajlno analizo, bi morali te objekte ustrezno hidravlično obravnavati.

Maksimalne vrednosti so bile dosežene pri največjem pretoku 3000 l/s oz.  $3 \text{ m}^3$ , minimalne pa pri sušnem pretoku 20 l/s. Pri Kuzlovcu, pri katerem lahko govorimo o toku, ki je večfazni, se srečamo z deročim tokom, saj je struga hudournika zelo strma. Tu je vzdolžni padec velik, kar nam da tudi višje hitrosti. Te lastnosti nam povzročajo veliko erozijsko moč hudournika. Pri dnu je mešanje vode s trdimi delci, na vrhu struge pa mešanje vode z zrakom. Ko režim toka prehaja iz deročega v mirnega prihaja do vrtinčenja (Brilly in Šraj, 2005).

Za lažji pregled minimalnih in maksimalnih vrednosti Froudovega števila, je spodaj podana tabela.

<b>Pretok</b> [L/s]	<b>Fr – minimalna vrednost</b> [/]	<b>Fr– maksimalna vrednost</b> [/]
<b>20</b>	0	1,09
<b>500</b>	0,15	1,01
<b>1000</b>	0,16	1,01
<b>1500</b>	0,29	6,8
<b>3000</b>	0,31	7,82

Preglednica 12: Minimalne in maksimalne vrednosti Froudevega števila za različne pretoke

## 9 ZAKLJUČEK

Namen diplomske naloge je bil preučiti hidravlične razmere v hudourniku Kuzlovec. Najprej so opisane in razložene teoretične osnove, potem pa je v praktičnem delu narejena hidravlična analiza na konkretnem primeru- Kuzlovec.

V diplomski nalogi sem se seznanila s hidravličnimi osnovami, ki so značilne za strme struge. V strmih strugah se največkrat uporabljata Manningova in de Chezyjeva enačba, katere so bile razvite za ravninske odseke vodotokov, njihova pomanjkljivost je omejena uporaba v strmih strugah. Enačbi sta pogosto neprimerni, ker nam zaradi večfaznega toka (to je: mešanica vode, plavin in zračnih mehurčkov) podajata nerealne oz. pogosto napačne rezultate. Zato so bile za takšno okolje razvite empirične in pol empirične enačbe, ki so uporabne večinoma v dokaj ozkem intervalu vhodnih podatkov.

Program HEC-RAS nam omogoča izdelavo eno-dimenzionalnega modela stalnega in nestalnega toka. Izračun oz. postopek izračuna hidravličnega modela eno-dimenzionalnega toka temelji na iteracijskem reševanju energijske enačbe.

Zaradi nepravilne ocene Manningovega koeficienta lahko dobimo velike napake pri izračunih. V veliko pomoč pri določitvi te vrednosti nam je lahko ameriška raziskava (Yochum, 2010), ki je bila opravljena na Univerzi v Coloradu. Na devetih testnih odsekih, ki so zajeti v raziskavo, lahko najdemo primer vodotoka, ki je vsaj delno podoben tistemu, ki ga obravnavamo mi. Leta 2000 je bila narejena tudi raziskava na reki Floridi, ki je pokazala, da lahko, v povprečju, pri modeliranju bolj strmih strug pride kar do 20,8% napake. Za končni in seveda pravilni rezultat je pomemben položaj in število posnetkov profilov vzdolž obravnavane struge.

V praktičnem delu diplomske naloge sem naredila hidravlično analizo hudournika Kuzlovec, katerega dolžina znaša 553,85 metrov. Kuzlovec je majhen del porečja reke Gradaščice, ki izvira v Polhograjskem hribovju. Hudournik se izteka v Veliko Božno, ki se pri Polhovem Gradcu združi z Malo vodo. Na porečju Kuzlovca sta postavljeni dve hudourniški pregradi. V strugi je voda prisotna v vseh letnih časih.

Vzdolž celotne struge je bilo v hidravličnem modelu obravnavanih 80 profilov, padec struge pa znaša 14% oz. 18%.

Za izdelavo hidravličnega računskega modela je bil uporabljen računalniški program HEC-RAS (verzija 5.0.1), v katerega smo vnesli vse potrebne parametre.

Analizo sem delala pri štirih različnih pretokih. Prvi je sušni pretok 20 l/s, potem pa še 500 l/s, 1 m<sup>3</sup>/s, 1,5 m<sup>3</sup>/s, ter 3 m<sup>3</sup>/s. Posebej sem bila pozorna na določitev Manningovega koeficienta, katerega napačna določitev nam da velike napake v izračunih. V analizi je narejena primerjava višine gladin pri različnih pretokih, primerjava pretočnih hitrosti po Jarretovi in Rickenmannovi enačbi, strižne napetosti pri različnih pretokih ter Froudovo število pri različnih pretokih.

## VIRI

Agencija RS za okolje. 2016.

[http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas\\_Okolja\\_AXL@Arso](http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso) (Pridobljeno 22. 5. 2016.)

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

Bezák, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2013. Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih in hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov greben. Članek: str. 85-97.

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

Charlton, R. 2008. Fundamentals of fluvial geomorphology. London: Routledge. 280 str.

Grigillo, D., Rusjan, S., Vrečko, A., Džebo, E., Kozmus Trajkovski, K., Urbančič, T., Petrovič, D., Mikoš, M. 2014. Digitalni model reliefa struge hudournika Kuzlovec in matematično modeliranje toka vode. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. [http://giam.zrc-sazu.si/sites/default/files/grigillo\\_in\\_ostali.pdf](http://giam.zrc-sazu.si/sites/default/files/grigillo_in_ostali.pdf). (Pridobljeno 6. 4. 2016.)

HIDROTEHNIK- Vodnogospodarsko podjetje d.d. (<http://www.hidrotehnik.si/podjetje/o-nas>) (pridobljeno 21. 5. 2016.)

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

Hostnik, A. 2013. Analiza postopkov obdelave podatkov terestičnega laserskega skeniranja v programu RiSCAN PRO. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hostnik): 66 str.

Jokanović, S. 2010. Predlog ureditve reke Bolske v Brodeh na Vranskem. Diplomaska naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba S. Jokanović): 56 str.

Komac, B., Natek, K., Zorn, M. 2008. Geografski vidiki poplav v Sloveniji. Ljubljana, ZRC SAZU. 180 str.

Kovačič, P. 2009. Določevanje prispevnih območij površinskih voda v GIS za smotno upravljanje zemljišč. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Kovačič): 115 str.

Lukavečki, B. 2010. Analiza reke Save s programom HEC-RAS na odseku od HE Vrhovo do Sevnice. Diplomski naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba B. Lukavečki): 66 str.

Markič, T. 2008. Stabilizacijski objekti v vodotokih. Magistrski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Markič): 243 str.

Martinčič, M. 2013. Primerjava razvoja hudourničarstva v Sloveniji in Avstriji. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Martinčič): 51 str.

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](http://faculty.fortlewis.edu/may_d/dmay_homepage_support/hecras%20paper.doc)  
(Pridobljeno 6. 4. 2016.)

Mayer, T. 2013. Določevanje poplavnega območja na reki Vipavi v naselju Brje. Projektna naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba T. Mayer): 51 str.

Mikoš, M. 1995. Soodvisnost erozijskih pojavov v prostoru. Gozdarski vestnik 53, 9: 342–351.

Mikoš, M. 1996. Vrednotenje pretočnih hitrosti voda v strmih hudourniških strugah. Gradb. vestnik. 45,3-4:83-90.

Mikoš, M. 2008. Osnove hudourništva, skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 52. str.

Ministrstvo za okolje in prostor. Geodetska uprava Republike Slovenije. 2011 Projekt: Lasersko skeniranje in aerofotografiranje 2011. Ljubljana.  
[http://www.gu.gov.si/nc/si/medijsko\\_sredisce/novica/article/12050/5451/](http://www.gu.gov.si/nc/si/medijsko_sredisce/novica/article/12050/5451/) (Pridobljeno 30. 3. 2016.)

Mohorič, N. 2012. Pretočne hitrosti vode v hudournikih. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Mohorič): 32 str.

Pintar, J. 1969. Erozija tal- hudourniki- plazovi. Začasne smernice za sestavo vodnogospodarskih podlog. Ljubljana, Projektivni biro za urejanje hudournikov: 79 str.

Polajnar, J. 2005. Hudourniki so nepredvidljivi: Mladina 35 (31. avg. 2005): str. 52-53.  
<http://www.mladina.si/96846/hudourniki-so-nepredvidljivi/> (Pridobljeno 17. 3. 2016.)

Pravni red RS. 2002. Zakon o vodah (ZV-1). Uradni list RS, št. 67/02.  
<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1244> (Pridobljeno 17. 3. 2016.)

Projekt SedAlp. Oznaka projekta: 1-4-3-AT. Sediment management in Alpine basins. Upravljanje s sedimenti v porečju alpskih rek: 6 str. <http://www.ksh.fgg.uni-lj.si/sedalp/Data/Opis%20SedAlp%20SLO.pdf> (Pridobljeno 21. 4. 2016.)

PUH- Podjetje za urejanje hudournikov. Ljubljana. <http://www.pedsava.si/p49/zgodovina> (Pridobljeno 23. 3. 2016.)

PUH- Podjetje za urejanje hudournikov. Ljubljana.  
[http://www.zelenaslovenija.si/images/stories/primeri-praks/2011\\_vode/Upravljanje\\_voda\\_v\\_Sloveniji\\_-\\_primeri\\_praks\\_-\\_Podjetje\\_za\\_urejanje\\_hudournikov.pdf](http://www.zelenaslovenija.si/images/stories/primeri-praks/2011_vode/Upravljanje_voda_v_Sloveniji_-_primeri_praks_-_Podjetje_za_urejanje_hudournikov.pdf) (Pridobljeno 23. 3. 2016.)

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.

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 (samozaložba U. Repič): 39 str.

Republika Slovenija. Okrožno sodišče v Ljubljani. Ljubljana.  
[http://www.sdgd.si/uploads/stecaj\\_puh.pdf](http://www.sdgd.si/uploads/stecaj_puh.pdf) (Pridobljeno 18. 4. 2016.)

SAGA User Group Association, FAO Prof. Dr. J. Böhrer, Department of Geography.  
<http://www.saga-gis.org/en/index.html> (Pridobljeno 15. 3. 2016.)

Sodnik, J. 2009. Matematično modeliranje drobirskih tokov in priprava podrobnih kart nevarnosti. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Sodnik): 241 str.

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.

Šifrar, S. 2011. Hudourniki Poljanske in Selške Sore. Diplomaska naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta (samozaložba S. Šifrar): 126 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): 90 str.

Urbančič, T., Grigillo, D. 2015. Lidar in uporaba lidarskih podatkov laserskega skeniranja v geodeziji.  
[http://dev.tend.si/izs/uploads/tx\\_izsizobgeo/Lidar\\_in\\_uporaba\\_podatkov\\_laserskega\\_skeniranja\\_v\\_geodeziji\\_2015\\_.pdf](http://dev.tend.si/izs/uploads/tx_izsizobgeo/Lidar_in_uporaba_podatkov_laserskega_skeniranja_v_geodeziji_2015_.pdf) (Pridobljeno 30. 3. 2016.)

Zalokar, M. 2015. Prečni objekti na hudournikih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Zalokar): 68 str.



Yochum, S., Flow resistance estimation in high-gradient streams. USDA Natural Resources Conservation Service & Colorado State University, Fort Collins