

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:

Mohorič, N. 2012. Pretočne hitrosti vode v hudournikih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Mikoš, M., somentor Rusjan, S.): 32 str.

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:

Mohorič, N. 2012. Pretočne hitrosti vode v hudournikih. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Mikoš, M., co-supervisor Rusjan, S.): 32 pp.

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 ŠTUDIJ
PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVA

Kandidat:

NEJC MOHORIČ

PRETOČNE HITROSTI VODE V HUDOURNIKI

Diplomska naloga št.: 14/B-GR

WATER FLOW VELOCITIES IN TORRENTS

Graduation thesis No.: 14/B-GR

Mentor:

prof. dr. Matjaž Mikoš

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

asist. dr. Simon Rusjan

Član komisije:

izr. prof. dr. Maruška Šubic Kovač

doc. dr. Simon Schnabl

doc. dr. Andrej Kryžanowski

Ljubljana, 24. 09. 2012

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA:

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

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **NEJC MOHORIČ** izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom: »**PRETOČNE HITROSTI VODE V HUDOURNIKIH**«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 26. 08. 2012

Nejc Mohorič

.....

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN

| | |
|-------------------------|---|
| UDK: | 627.152.3(043.2) |
| Avtor: | Nejc Mohorič |
| Mentor: | prof. dr. Matjaž Mikoš |
| Somentor: | asist. dr. Simon Rusjan |
| Naslov: | Pretočne hitrosti vode v hudournikih |
| Tip dokumenta: | Diplomska naloga – univerzitetni bolonjski študij |
| Obseg in oprema: | 32 str., 2 pregl., 17 sl., 19 en. |
| Ključne besede: | hidravlika, strme struge, metoda razredčenja, meritve, hudourniški vodotoki, kaskade, vodotoki tipa stopnja-tolmun |

IZVLEČEK

V strmih strugah, ki so večinoma hudourniškega tipa, standardne enačbe za položne struge ne delujejo več pravilno. Gre za kompleksno obnašanje vodotoka, saj prihaja do večfaznosti toka, torej mešanja zračnih mehurčkov, vode in plavin. Med plavinami je pogosto prisotna tudi znatna količina zaplavnega lesa. Obstaja velika množica enačb za take tipe vodotokov, vendar so večinoma uporabne v zelo ozkem obsegu. V začetnem poglavju sem predstavil metode meritev, s katerimi pridemo do podatkov, na podlagi le-teh pa uporabimo razpoložljive enačbe in tudi vrednotimo njihove rezultate. V nadaljevanju so predstavljene izkušnje raziskovalcev s prej omenjenimi enačbami, torej njihovo območje uporabe, prednosti, pomanjkljivosti, ter če je možna njihova uporaba tudi izven območja originalnih raziskav.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 627.152.3(043.2)
Author: Nejc Mohorič
Supervisor: Prof. Matjaž Mikoš, PhD
Co-supervisor: Simon Rusjan, PhD
Title: Water flow velocities in torrents
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: 32 p., 2 tab., 17 fig., 19 eq.
Key words: hydraulics, steep streams, dilution method, stream measurements, torrential streams, cascades, step-pool streams

ABSTRACT

In steep streams, which are mostly torrential, usual equations for flat, low land rivers do not act well any more. We have complex behaviour of stream, because we have multistage stream flow. This means, that we have mixing of air bubbles, water and sediments. We can also often find significant amounts of instream wood. A large number of equations can be found for this kind of streams, but they are mostly applicable in a very narrow range. In my thesis, I firstly presented methods of measurements, used to get data, which we can apply to calculate equations and evaluate their results. Furthermore, I presented experiences with those equations from other researchers, the range of their applicability, what advantages and disadvantages are and if there is maybe an option of using the equation also outside the range of the original research.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Matjažu Mikošu in somentorju asist. dr. Simonu Rusjanu.

Zahvalil bi se tudi svojim staršema, ki sta mi skozi vsa leta študija nudila pomoč, me spodbujala in mi stala ob strani.

KAZALO VSEBINE

| | |
|--|-----------|
| BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN..... | III |
| BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION | IV |
| ZAHVALA..... | V |
| KAZALO VSEBINE..... | VI |
| KAZALO PREGLEDNIC..... | VIII |
| KAZALO SLIK..... | IX |
| SIMBOLI..... | X |
| SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK | XII |
| 1 UVOD | 1 |
| 1.1 Teorija hidravlike strmih strug | 4 |
| 2 METODE MERITEV | 6 |
| 2.1 Splošno | 6 |
| 2.2 Geometrija | 8 |
| 2.3 Merjenje hitrosti in pretoka | 10 |
| 2.3.1 Metoda razredčenja..... | 10 |
| 2.3.1.1 Metoda konstantnega injiciranja..... | 11 |
| 2.3.1.2 Metoda trenutnega vnosa sledila | 12 |
| 2.3.1.2.1 Merilna naprava..... | 13 |
| 2.3.2 Metode za merjenje pretokov in hitrosti na prerezih | 14 |
| 2.3.2.1 Objekti za meritev pretokov | 14 |
| 2.3.2.2 Elektro-magnetna metoda merjenja pretoka | 15 |
| 2.3.2.3 Akustična metoda merjenja pretoka | 15 |
| 2.3.2.4 Metoda naklon-površina | 15 |
| 2.3.2.5 Metoda hitrost-površina..... | 15 |
| 2.3.2.6 Naprave za merjenje po postopku hitrost-površina | 16 |
| 2.3.2.6.1 Flow Tracker handheld ADV merilec pretočnih hitrosti SonTek..... | 16 |
| 2.3.2.6.2 Hidrometrično krilo | 16 |
| 2.3.2.6.3 Dopplerjev merilec pretočnih hitrosti, temperature vode in vodnega tlaka Starflow unidata model 6526-51 | 17 |
| 2.4 Zaplavni les | 17 |
| 2.5 Maskimalna velikost plavin..... | 18 |
| 2.6 Ocene napak | 18 |
| 3 PREGLED NAD PREDLAGANIMI ENAČBAMI IN DOSEDANJE IZKUŠNJE RAZISKOVALCEV Z MERJENIMI PODATKI..... | 19 |
| 3.1 Relativna potopljenost dna | 19 |
| 3.2 Brezdimenzijska hitrost in pretok..... | 19 |
| 3.3 Ocena hrapavostnih koeficientov | 20 |
| 3.3.1 Uporabnost enačb za izračun hrapavostnih koeficientov | 20 |
| 3.3.2 Ocene kvalitete obravnavanih enačb za koeficiente hrapavosti | 20 |
| 3.4 Direktna ocena hitrosti..... | 22 |
| 3.5 Enačbe | 23 |
| 4 ZAKLJUČEK | 28 |

| | |
|--------------------------|----|
| VIRI IN LITERATURA | 29 |
|--------------------------|----|

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|--|----|
| Preglednica 1: Opis večjih poplav na območju Slovenije od leta 1900 naprej (povzeto po »Slovenka«, 2010; Poljanec, 2011; Kobold, 2008)..... | 1 |
| Preglednica 2: Seznam pogosto uporabljenih enačb, opis, področje uporabe in originalnih raziskav, interval uporabe (prirejeno po Mikoš, 1989)..... | 23 |

KAZALO SLIK

| | |
|--|----|
| Slika 1: Primer označenega poplavno ogroženega področja; temnejša, kot je modra barva, večja je verjetnost poplavljanja (Sinergise, 2011)..... | 2 |
| Slika 2: Kaskade na hudourniškem potoku Peričnik v dolini Vrata (lasten vir) | 3 |
| Slika 3: Leica HDS postajni sistem (SPAR Point Group staff, 2009)..... | 8 |
| Slika 4: Snemanje z LiDAR-jem s pomočjo letala (Grangeo, 2012) | 8 |
| Slika 5: Laserski teodolit (G. B. International, 2008) | 9 |
| Slika 6: Potovanje koncentracije sledila (Flow-tronic, 2003) | 10 |
| Slika 7: Prikaz merjenja hitrosti z sledilom rodamin (ASLO, 2008) | 11 |
| Slika 8: Fluorometer (Snell, 2012)..... | 12 |
| Slika 9: Prekucnik (Tipping bucket rain gauge, 2012)..... | 12 |
| Slika 10: Instrument Flo-tracer proizvajalca Flow-tronic z opremo (Flow-tronic, 2003)..... | 13 |
| Slika 11: Ostrorobi preliv (U.S. Geological Survey, 2012) | 14 |
| Slika 12: Skica ostrorobega preliva (Claydon, 2011b)..... | 14 |
| Slika 13: Skica širokega praga (Claydon, 2011a) | 15 |
| Slika 14: Prikaz meritve z napravo Flow Tracker handheld ADV merilec pretočnih hitrosti SonTek (AnHydre, 2012) | 16 |
| Slika 15: Hidrometrična krila(SL 0281 hidrometrično krilo, 2012)..... | 16 |
| Slika 16: Dopplerjev merilec pretočnih hitrosti, temperature vode in vodnega tlaka Starflow unidata model 6526-51 (Unidata, 2012) | 17 |
| Slika 17: Prisotnost zaplavnega lesa v vodotoku Belca nad krajem Belca pri Mojstrani (lasten vir) ... | 17 |

SIMBOLI

| | |
|----------------------------|--|
| h | povprečna globina toka na odseku, izračunana kot povprečje globin prerezov [m] |
| h_w | srednja pretočna globina vode [m] |
| h_m | mediana maksimalne globine toka iz enako postavljenih odsekov ali vzdolžnega profila globočnice [m] |
| h_{res} | ostala globina globočnice [m] |
| h_{th} | srednja globina globočnice [m] |
| h_n | številčna n-odstotna dolžina najkrajše osi skeletnih zrn [m] |
| w | širina struge [m] |
| B_D | širina dna struge vodotoka [m] |
| B_w | širina površine vodnega toka [m] |
| S | prerez pretoka, izračunan kot povprečje vseh prečnih prerezov [m ²] |
| f_w | površina prečnega prereza [m ²], ki ga zavzema vodni tok |
| O | odsekovni omočen obod, izračunan kot povprečje vseh prerezov odseka [m] |
| R | hidravlični radij $R=S/O$ [m] |
| σ_h | standardna deviacija globine globočnice [m] |
| σ_z | standardna deviacija ostankov vzdolžne regresije globočnice [m] |
| $R/\sigma_z, h_m/\sigma_z$ | relativna potopljenost dna [-] |
| d_{50}, d_{84}, d_{90} | velikost zrn plavin za katerega je 50 %, 84 % in 90 % materiala finejšega [m] |
| d_c | parameter hrapavosti za brezdimenzijsko hitrost in pretok = σ_z, d_{84} [m] |
| $d_{Ap^{**}}$ | težnostno skeletno zrno oblike dna [m] |
| $d_{Aq^{**}}$ | številčno skeletno zrno oblike dna [m] |
| d_{Vn} | prostorninsko n-odstotno zrno rinjenih plavin [m] (če je n enak 90, potem d_{V90}) |
| f | povprečni Darcy-Weisbachov hrapavostni koeficient na odseku [-] |
| n | povprečni Manningov koeficient hrapavosti na odseku [s/m ^{1/3}] |
| k_s | enakomerna peščena hrapavost – po Nikuradseju [m] |
| k_{st} | Stricklerjev koeficient trenja [m ^{1/3} /s] |
| C | de Chezyjev koeficient trenja [m ^{1/2} /s] |
| I_f | padec trenja [m/m] |
| I_0 | padec dna struge [m/m] |
| I_e | padec energijske črte, pogosto izenačen s padcem dna struge [-] |
| I_w | padec vodne gladine [-] |
| u^* | strižna hitrost $u^* = \sqrt{gI_f h}$ [m/s] |
| v | povprečna hitrost vode na odseku [m/s] |
| v_h | hitrost sledila izračunana kot harmonično povprečje [m/s] |
| v_p | hitrost sledila izračunana z uporabo potovalnih časov izračunano kot razlika med vrhnjimi vrednostmi [m/s] |
| v^* | brezdimenzijska hitrost $v^* = v/\sqrt{gd_c}$ |
| v^{**} | brezdimenzijska hitrost $v^{**} = v/\sqrt{gI_0 d_c}$ |
| Q | pretok vode [m ³ /s] |
| Q^* | brezdimenzijski pretok ($Q^* = Q/(d_c \sqrt{gd_c^3})$) |
| q | specifični pretok na enoto širine [m ² /s] $q = Q/TW$ |
| TW | širina kanala na vrhu struge, izračunana kot povprečje širin vseh odsekov [m] |
| q^* | brezdimenzijski enakomerni pretok $q^* = \frac{q}{\sqrt{gd_c^3}}$ |
| q^{**} | brezdimenzijski enakomerni pretok $q^{**} = \frac{q}{\sqrt{gI_0 d_c^3}}$ |
| g | gravitacijski pospešek (9,81 m/s ²) |
| a, b | nadomestne obrazložitvene spremenljivke |

| | |
|-----------|---|
| Δ | višina ovir v vodnem toku [m] |
| b_{50} | številčna 50-odstotna dolžina prečno na vodni tok merjene osi skeletnih zrn [m] |
| k_0 | nadomestna enakomerna hrapavost [m] |
| V_{H20} | volumen vode v odseku, izračunan z uporabo odsekovnih sekcij [m ³] |
| V_w | volumen zaplavnega lesa, ki ni v stopnjah [m ³] |
| W_d | srednja višina lesa [m] $W_d = \text{volumen lesa} / \text{omnoženi obod struge pri pretoku, ki zapolni celotno območje glavne struge}$ |
| Re | Reynoldsovo število [-] |
| Fr | Froudovo število [-] |
| Z_{90} | relativna hrapavost [-] |
| [X] | velikostni razred obravnavane količine »x« [-] |

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

Degradacija je razpadanje in obraba površine kamnin, klifov, geoloških plasti, dna strug ipd. zaradi vpliva atmosferskih, vodnih, bioloških in drugih dejavnikov (Mikoš et al., 2002).

Globočnica oziroma globinska črta je črta, ki povezuje najgloblje točke struge ali korita (Mikoš et al., 2002).

Kalibracija je eksperimentalno določanje povezave med količino, ki jo želimo meriti, in vrednostjo, ki jo kaže naprava, ki količino meri (Mikoš et al., 2002).

Kaskada je izraz za majhen slap ali niz majhnih slapov (Mikoš et al., 2002).

Koeficient hrapavosti predstavlja številčno vrednost, ki odraža vpliv hrapavosti struge na povprečno hitrost v prečnem prerezu vodotoka (Mikoš et al., 2002).

Kontinuitetna enačba izraža ohranjanje mase tekoče snovi npr. vode (Mikoš et al., 2002).

Newtonska tekočina ima pri različni sili različno viskoznost. Če nanjo delujemo z majhno silo (počasi), se odziva kot tekočina, če pa z veliko silo (hitri premiki), se obnaša kot trdna snov (Nared, 2009).

Newtonska tekočina ima viskoznost (razmerje med napetostjo in deformacijo) linearno ter poteka skozi koordinatno izhodišče (Newtonska tekočina, 2011).

Omočeni obod je dolžina omočenega stika med vodnim tokom in strugo, v kateri teče, merjena pravokotno na tok (Mikoš et al., 2002).

Ostrorobi preliv je preliv z ostrim vodoravnim robom, oblikovanim tako, da se voda pri prelivanju samo dotika gorvodnega roba krone (Mikoš et al., 2002).

Plavine so nesprijet erozijski material, ki je nastal pri razpadanju kamnin in se nakopičil na mestu nastanka ali kjer ga je odložil vodotok ali led (Mikoš et al., 2002).

Široki prag je tip preliva, ki ima v smeri toka dovolj dolg prag, tako da se na pragu pojavi kritični tok (Mikoš et al., 2002).

Wolmanovo štetje je postopek, ki ga uporabimo za izmero premera srednje osi 100 naključno izbranih kamnov vzdolž prereзов na koncu tolmunov (Wild fish Montana initiative, 2002).

1 UVOD

V Sloveniji prevladujejo vodotoki hudourniškega značaja, njihova skupna dolžina je kar prek 8000 kilometrov (Mikoš, 1996). Pri nas do sedaj še ni bilo narejenih veliko raziskav s tega področja, so pa nekatere raziskave drugih držav, zlasti z območja Alp, pogojno primerne tudi za naše območje, saj gre za podobne hidrološke in topografske razmere. Vodotoki hudourniškega značaja so prisotni največ v gorskem in hribovitem svetu. Do povečanega pretoka pride običajno zaradi kratkotrajnih in intenzivnih padavin. Hudourniški vodotoki imajo to značilnost, da lahko njihov pretok relativno hitro naraste, njihov visok nivo oziroma poplavljanje pa običajno traja le nekaj ur. Poplave lahko nastopijo zaradi več razmer (Brilly et al., 1999):

- intenzivnih padavin, ko je teren že od predhodnih padavin razmočen;
- ko ob prisotnosti snežne odeje pride do obilnih padavin, ki povzročijo taljenje snega;
- ko imamo izredno velike in dolgotrajne padavine.

Hudourniške poplave običajno prizadenejo manjše območje in so posledica lokalnih nalivov, zato jih je težko predhodno in točno napovedati; običajno so možne točnejše napovedi le nekaj ur pred dogodkom. Vodni tok ima v takih okoliščinah veliko moč, posledično je mogoča velika gmotna škoda z morebitnimi smrtnimi žrtvami. Če pogledamo v preglednico 1, vidimo, da imajo ravno hudourniške poplave največje posledice. So najbolj smrtonosne, škoda je velika, podirajo se celo objekti, poleg tega pa so naplavine običajno nerodovitne, saj gre predvsem za prod, pesek, zaplavni les in tako dalje.

Preglednica 1: Opis večjih poplav na območju Slovenije od leta 1900 naprej (povzeto po »Slovenka«, 2010; Poljanec, 2011; Kobold, 2008)

| Datum | Območje | Materialna škoda | Smrtne žrtve |
|----------------------|---|---|---------------------------|
| 14.–6. 11. 1901 | V večjem delu Slovenije, zlasti Gorenjska. | Ni podatkov. | / |
| 17. 9. 1903 | Štajerska, Koroška, Drava prestopila bregove, okolica Dravograda, Ptuj. | Odnašalo je celo hiše. | 17 |
| 7. 12. 1903 | Ljubljansko barje. | Voda do oken hiš. | / |
| 8. 8. 1924 | Polhograjski dolomiti; prišlo je do silovite nevihte. | Potoki so kot hudourniške vode odnašali vse pred seboj. | 19 |
| 11. 11.–12. 11. 1925 | Ob Muri; posledica silovitega neurja, zalilo je Mursko Soboto in okolico, ob Ščavnici. | Poškodovanih 150 hiš, 4 porušene, voda do dveh metrov visoko, poplavljenih 100000 ha njiv, umrlo več 100 glav živine. | 2 |
| 8. 8. 1926 | V večjem delu Slovenije, zlasti Celje z okolico, dolina Drave od Slovenj Gradca do Dravograda, poplavljala je tudi Pesnica. | Voda je odnašala hiše, živine in mostove, uničeni pridelki. | Več smrtnih žrtev. |
| 27. 9. 1926 | Območje Ljubljane, poplavljala je Gradaščica, na Viču in v Rožni dolini, voda 2 metra visoko. | Gradaščica je rušila hiše, mostove in brvi; Sora je uničila 50 zgradb. | Gradaščica: 3 Sora: 10 |
| 23.–24. 9. 1933 | V večjem delu Slovenije, v Sodražici voda segala do dveh metrov visoko, podobno v Celju in Brežicah. | Umrlo je ogromno živine. | / |
| 4.–5. 6. 1954 | Škofja vas, Štore in Arja vas. | Reke so odnašale mostove, hiše, voda segala do 3 metrov. | 22 |
| Oktober 1964 | V večjem delu Slovenije. | Sava v spodnjem toku je prestopila bregove in ogrožala 2000 ljudi na območju Brežic. | / |
| 13.–14. 7. 1972 | V Pomurju. | Poplavljenih 28000 ha zemlje, zemeljski plazovi, evakuiranih 1000 ljudi, škoda v kmetijstvu. | / |
| 1. 11. 1990 | V večjem delu Slovenije; največje poplave v tem stoletju na Savi, Sori, Kamniški Bistrici in Savinji z Lučnico. | 1200 plazov, uničenih 190 hiš in številne ceste ter mostovi. | / |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1

| | | | |
|-----------------|---|--|---|
| 17. 11. 2000 | Dolgotrajnejše močne padavine na zahodu Slovenije. | Manjše poplave; sprožil se je plaz v Logu pod Mangartom in zahteval smrtne žrtve. | 7 |
| 18. 9. 2007 | Območje zahodne, severozahodne in severne Slovenije, zlasti Selška Sora, Davča in Kroparica, poplavljali so hudourniki in reke na območju Karavank in Kamniško-Savinjskih Alp, na Kranjskem in Domžalskem polju, Tuhinjski dolini in na celjskem območju; pretoki so na območjih, kjer je bila škoda največja, preseglji stoletne povratne dobe velikih pretokov. | Velika gmotna škoda. | 6 |
| 16.–20. 9. 2010 | Močne in obsežne padavine so povzročile razlivanja vodotokov in poplave skoraj povsod po Sloveniji. Obsežnejše poplave so bile na Ljubljanskem barju, v Vipavski dolini, na povodju Krke, v spodnjem toku Save in na kraških poljih Notranjskega in Dolenjskega krasa. Dogodek se uvršča v vrh ekstremnih poplavnih dogodkov; na ozemlje Slovenije je v 48 urah padlo v povprečju od 170 do 180 mm padavin, kar je največja količina v takšnem časovnem obdobju v zadnjih 60 letih. | Velika gmotna škoda; na Ljubljanskem barju je bilo veliko hiš poplavljenih več dni, prav tako objekti in kmetijska zemljišča v spodnjem toku Save, ob Krki ... | 3 |

Poplavne površine so danes dokaj dobro označene. Najbolj pregledno pa so grafično prikazane na spletnem portalu geopedia.si; področje, ki je označeno s temno barvo, je poplavno bolj ogroženo, vendar pa so območja okrog manjših hudournikov še vedno dokaj nenatančno označena. Ti hudourniki pa so lahko ravno tako nevarni, v kolikor so okoliški objekti preblizu struge.



Slika 1: Primer označenega poplavno ogroženega področja; temnejša, kot je modra barva, večja je verjetnost poplavljanja (Sinergise, 2011)

Pri vodotokih s hudourniškim značajem je precej pogost pojav, da lahko vodotok tudi presahne in je zapolnjen samo ob večjih nalivih. V takem primeru je dimenzioniranje še posebej težavno, saj tudi ko je struga zapolnjena, težko izvedemo kakršnekoli raziskave, saj je tok deroč in nevaren, poleg tega pa pogosto na nedostopnem terenu. V kolikor imamo stalni pretok, je postopek nekoliko lažji. Značilni so prodniki, ki pri nizkem pretoku segajo skozi tok, in zaplavni les, ki ga prinese vodotok in se zagozdi med prodniki. V takih okoliščinah je koeficient trenja zelo visok. Že ob nizkih pretokih prihaja do

večfaznosti toka, torej mešanja vode, prodnikov, lesa, zraka in tako dalje, pri visokih pa je to le še bolj izrazito. Ob višjih pretokih prodniki, ki segajo skozi tok, izgubijo na vplivu, vendar pa takrat pride do še bolj izrazitega premeščanja plavin in mešanja z zrakom, zato je v toku prisotno veliko kamnitih delcev, lesenih plavin in zračnih mehurčkov. Stanju toka, v katerem so prisotne plavine, voda in zračni mehurčki, pravimo večfaznost toka. V taki mešanici se voda ne obnaša več kot običajna tekočina, ampak gre za mejno območje med newtonsko in nnewtonsko tekočino (Rusjan, 2012).

Značilna skupina strmih strug so tudi struge tipa stopnja-tolmun. Njih definira ponavljajoče se zaporedje grobljastih, lesenih ali skalnatih stopenj, preko katerih tok strmo pade v tolmane. Zaporedja take vrste toka se pojavijo v strugah z naklonom od 2 do 20 %. Zaradi tega v stopnjevanih profilih pride do koncentrirane izgube višine, medtem ko v tolmunih pride do minimalne izgube višine.

Podobna skupina so tudi kaskade. Značilen je nenaden padec v nivoju dna vodotoka. Gre za naravni proces umirjanja deročega vodnega toka. V kaskadi pride do intenzivnega premeščanja plavin (degradacija), medtem ko pride v tolmunih do odlaganja tega materiala. Količina degradiranega materiala je enaka količini odlaganja. Bolj kot je položen tolmun, finejši delci plavin se usedajo.



Slika 2: Kaskade na hudourniškem potoku Peričnik v dolini Vrata (lasten vir)

Za analizo kvalitete izračunanih vrednosti pretokov, hitrosti in koeficienta hrapavosti na terenu se je v preteklosti razvilo več različnih pristopov, ki so primerni v različnih okoliščinah. Za pretoke in hitrosti ločimo 2 glavni skupini pristopov, in sicer metode sledenja ter metode merjenja s pomočjo standardiziranih instrumentov ali objektov v preseku vodotoka. Pri dolgoročnejših meritvah ima zanesljivost prednost pred natančnostjo, saj ko so neki podatki enkrat izgubljeni, jih ne moremo pridobiti nazaj. Vedeti moramo, ali nam bo že dovolj enkratna meritev ali potrebujemo rezultate za daljše časovno obdobje. Ločimo več metod, in sicer metodo razredčenja, metodo hitrost-površina, elektro-magnetno metodo, akustično metodo, merjenje s pomočjo objektov in metodo naklon površina. Pri vseh metodah si pomagamo z določenimi instrumenti. Pri metodi razredčenja uporabljamo

prenosni merilec, ki beleži spremembo koncentracije sledila vnesenega v vodni tok. Metoda razredčenja je uporabna za nekoliko daljše odseke, kjer iščemo pretok in povprečno hitrost. Na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani se za te meritve uporablja Flo-tracer proizvajalca Flow-tronic. Poleg te metode je najpogostejša metoda hitrost-površina. S pomočjo instrumentov izmerimo pretoke na določenem prečnem preseku vodotokov, metoda pa je primerna zgolj za kratke odseke, kjer sta hitrost in oblika struge približno konstantni tekom odseka. Prednost te metode je, da je enostavna, hitra in natančna. Lahko jo večkrat ponovimo in na okolico nima negativnih vplivov. Pogosteje uporabljani instrumenti na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, ki temeljijo na tej metodi so:

- Flow Tracker handheld ADV merilec pretočnih hitrosti Sontek;
- hidrometrično krilo;
- Dopplerjev merilec pretočnih hitrosti, temperature vode in vodnega tlaka Starflow unidata model 6526-51.

S temi instrumenti izmerimo hitrost, potem pa iz oblike prečnega prereza in posebnih metod lahko izračunamo še pretok. Poleg teh instrumentov sicer obstajajo še drugi.

Primarni namen diplomske naloge je bil seznaniti se s hidravličnimi osnovami, nadalje pa z razmerami, ki nastopajo v strugah, ki so hudourniškega značaja. Nato sem preučil metode meritev, ki se uporabljajo za merjenje v takih vodotokih z deročim tokom, kateri instrumenti se uporabljajo ter na kaj moramo biti pri tem pozorni. Razvite so bile številne enačbe za območje deročega vodnega toka v odprtih strugah, ki so večinoma uporabne zgolj v ozkem območju robnih pogojev, zato je bil cilj naloge tudi preučiti predlagane enačbe, narediti njihov pregled in jih primerno ovrednotiti.

1.1 Teorija hidravlike strmih strug

Praktično vsi hudourniški vodotoki in tudi številni drugi sodijo v skupino, kjer Manningova enačba ne da zadovoljivih rezultatov in je njena uporabnost močno omejena. V hidravliki odprtih vodotokov imamo dobro raziskane in definirane možne klasične načine računa pretokov in hitrosti, kot sta na primer Manningova in Chezyjeva enačba (Steinman, 1999), ki nam podata precej točne rezultate, v kolikor smo tudi podatke vnesli natančno.

Manningova enačba:

$$v = \frac{R^{2/3} I_e^{1/2}}{n} \quad (1)$$

Chezyjeva enačba:

$$v = C(RI_0)^{0,5} \quad (2)$$

Kjer je hidravlični radij R razmerje med površino prečnega prereza in omočenim obodom struge:

$$R = S/O \quad (3)$$

Podobno velja tudi za koeficiente hrapavosti, kjer se največ uporablja kar Manning-Stricklerjev koeficient trenja n . Na njegovo vrednost vplivajo hrapavost ostenja, rastlinstvo, spreminjanje geometrije prečnih prerezov, razne ovire v vodotoku, potek trase vodotoka, transport plavin, izpodjedanje ter tudi vodostaj in pretok. Obstaja več pristopov k oceni vrednosti Manningovega koeficienta. Lahko se uporabijo meritve stanja na terenu na podlagi izmerjenih pretokov, poteka gladin in karakteristik vodotoka na stabilnem odseku, lahko ga določimo na podlagi merjenih hitrosti ali pa po empiričnih metodah. V hidravlični praksi se koeficiente hrapavosti večinoma določa izkustveno, torej je določitev prepuščena inženirski oceni po opravljenih terenskih ogledih. Določitev koeficienta hrapavosti tu variira odvisno od avtorja, za spremenljivko pa vsi vzamejo nek premer plavin ali delež le-teh, ki naj bi bil po njihovo najbolj primeren za določitev koeficienta hrapavosti. Vendar pa te enačbe postanejo nezanesljive in nenatančne v strmejših strugah, saj pride do znatnega vpliva transporta plavin, zajemanja zraka in podobno. Manningova enačba velja zgolj za gladek beton oziroma grobi prod, odvisna pa je tudi od hrapavosti struge oziroma razmerja med velikostjo zrn plavin in hidravličnim radijem struge ter od naklona. Zato moramo v strmih strugah uvesti nove enačbe za izračune. Poznamo empirične, semi-empirične (poleksperimentalne) in teoretične pristope k reševanju. Slednji so zelo komplicirani, dragi in zamudni zaradi izrazite tridimenzionalnosti problema

in večfaznosti toka. Izvesti moramo zahtevne hidravlične izračune, ki temeljijo na numeričnem reševanju diferencialnih enačb, pogosto pa se izvedejo tudi modelne raziskave. Zato se kljub silovitemu razvoju računalniške tehnologije še vedno poslužujemo empiričnih in semi-empiričnih enačb, ki nam kljub svoji preprostosti, ob upoštevanju robnih pogojev, dajo zadovoljive rezultate. Vendar pa niso vse enako uporabne. Treba se je zavedati, da so bile nekatere izmed raziskav, iz katerih so bile potem razvite enačbe, pridobljene na terenu, druge v laboratoriju, tretje pa so upoštevale podatke iz obeh okoliščin. Nekatere izmed njih nam lahko dajo precej napačne rezultate, tudi če se držimo znotraj določenih razmer, v katerih so bile razvite enačbe. Že kar nekaj raziskovalcev je ovrednotilo njihovo kvaliteto, zato sem jih zbral v enem izmed sledečih poglavij.

2 METODE MERITEV

2.1 Splošno

V tem poglavju so opisani postopki, kako priti do podatkov in informacij, ki so bistveni za kvalitetno analizo obstoječe strme struge. Podatki, pridobljeni po teh metodah, se uporabijo v nadaljevanju za izračun iskanih količin po primernih enačbah oziroma so v nekaterih primerih sami predmet izračuna. Ko pride do potrebe po analizi neke strme struge, se moramo seznaniti s karakteristikami celotnega povodja:

- kako obilne padavine pričakujemo na opazovanem področju;
- oblika in tlorisna površina povodja;
- kakšno je rastje;
- kakšen je potek struge;
- naklon dna struge;
- naklon gladine vodotoka;
- oblika dna struge;
- sestavljenost in količino plavin.

Za količino padavin je najbolje, da si pomagamo z rezultati na dežemerih bližnjih meteoroloških postaj. V kolikor so te preveč oddaljene, pa lahko na povodju postavimo začasno mrežo dežemerov, vendar gre običajno za preveč kratkotrajne podatke, da bi lahko z neko zanesljivostjo napovedali količino padavin z določeno povratno dobo. Oblika povodja lahko dodatno doprinese k hitrosti odtoka, strmejše je območje, hitrejši je odtok, površina pa nam pomaga pri računu odtoka. Tudi količina in vrsta rastja znatno vpliva na to, kolikšen bo odtok padavin. Več, kot je rastja, in gostejše, kot je, toliko več vode se akumulira na terenu in porabi za evapotranspiracijo. Potek struge lahko s trenjem vpliva na energijske izgube, zlasti če je ta zelo vijugasta. Naklona dna in gladine imata manjši vpliv. Vendar pa je naklon dna eden izmed glavnih dejavnikov, da pride do formiranja oblik stopnja-tolmun in tudi kaskad. Oblika dna struge vpliva na hrapavost, večja, kot so zrna, večja je hrapavost. Seveda pa je poleg prodnatih plavin v večini primerov hudourniških strmih strug prisoten tudi zaplavni les.

Ko izvajamo meritve, se moramo odločiti, ali gre za nizke, srednje ali visoke pretoke, ter opredeliti topografijo dna, brežin in poplavne ravnice. Potrebno je tudi opredeliti za kakšno vrsto padavin gre na tem območju (dež, sneg ...) ter kakšna je količina le-teh.

Ko se odločamo, katere odseke oziroma prečne prereze bomo uporabili za izvedbo meritev, izberemo take, znotraj katerih prevladuje čim bolj konstantna morfologija, spremenljivost globine in količina zaplavnega lesu.

Ena pomembnejših stvari, ki nas zanima, je pretok. Definiramo ga kot volumen vode, ki v določenem času preteče skozi nek prečni prerez vodotoka (Mikoš et al., 2002). Izračunamo ga po kontinuitetni enačbi (4).

$$Q = v \times S \quad (4)$$

Poznamo dva načina meritev pretokov, in sicer enkratno (trenutno) merjenje ter kontinuirno merjenje. Enkratna merjenja se opravljajo občasno, za kratek čas, pogosto za kalibracijo ene od kontinuiranih metod merjenja ali za neko raziskavo, študijo, kontinuirne pa za redno spremljanje dogajanja v vodotoku (monitoring) ter vodenje evidence in statistik (Mejak, 2010).

Opredeliti moramo, v kakšnem obsegu dnevnega povprečnega pretoka so pretoki v času naših meritev, torej, ali gre za nizke, srednje ali visoke pretoke. V kolikor izvajamo kontinuirne meritve, moramo odčitati povratno dobo opazovanih pretokov glede na predhodna merjenja pretokov. Yochum et al. (2012) priporočajo uporabo logaritemske Pearsonove III frekvenčne porazdelitve. Za natančnejšo analizo moramo imeti podatke merjenj za daljše časovno obdobje nekaj let, le redko si lahko pomagamo z izsledki krajših trenutnih merjenj.

Opazovati moramo tudi količino zaplavnega lesa, saj ta znatno vpliva na obnašanje vodotoka. Ob nižjih pretokih se pogosto zasidra med prodnike, pri višjih pa tok te nastale stopnje podre in jih oblikuje na novo dolvodno.

Dodatna lastnost vodotoka, ki vpliva na njegovo obnašanje in je zajeta v praktično vseh formulah za izračune, je maksimalna velikost plavin. Kljub temu da gre za pomembno količino, ni široko sprejete metode za vrednotenje; od tega so ene boljše, druge slabše ter vsaka od njih primerna za določen tip raziskav, torej, ali gre za raziskave v laboratoriju ali na odprtem vodotoku.

Na koncu je smiselno naše meritve ovrednotiti v smislu natančnosti, kakšne napake smo pri posameznem merjenju naredili. Tako potem po izračunu s formulami ovrednotimo, kakšno je pričakovano odstopanje od dobljenega rezultata.

Enačbe, ki so najbolj poznane ter v praksi tudi največkrat uporabljene v izračunih, so Manning-Stricklerjeva, Jarrettova in Rickenmannove enačbe. Te enačbe nam v večini kot neznanu količino navajajo hitrost vodotoka.

Manning-Stricklerjeva enačba (1) se še vedno pogosto uporabi tudi v strmih strugah vodotokov, saj inženirji pogosto spregledajo pogoje, pod katerimi je sploh uporabna. Eden glavnih razlogov za njeno neuporabnost sta, da Stricklerjev koeficient trenja k_{st} ni več konstanten v takih pogojih (Mikoš, 1996) in da je bila razvita za majhne relativne hrapavosti $R/d_{90} > 20$. Poleg tega moramo poznati srednje pretočne globine za izračun hidravličnega radija R , kar pa je v strmih strugah sila nepraktično, če spomnim samo na to, da ponekod lahko prodniki sploh niso v celoti potopljeni.

Jarrettova enačba (5) v primerjavi z Manning-Stricklerjevo kaže na bistveno zmanjšan vpliv padca dna struge I_0 na srednje pretočne hitrosti v (Mikoš, 1996). Gre sicer za eno najbolj pogosto uporabljenih enačb, vendar pa še vedno zahteva poznavanje srednjih pretočnih globin za hidravlični radij. V kolikor je določitev le-tega mogoča, v nadaljevanju nato uporabimo iterativni račun. Najbolj uporabna je v strmih naravnih vodotokih s stabilnim dnom in brežinami, z majhnim vplivom zajezeb ter malo lebdečimi plavinami. V enačbi je upošteval parametre:

- g [m/s^2];
- padec dna struge I_0 z zmanjšanim vplivom [-];
- hidravlični radij R [m].

Ta formula kaže svojo največjo primernost za pravilnejše oblike strug.

Jarret:

$$v = 3,11 R^{0,83} I_0^{0,12} \quad (5)$$

Rickenmannove enačbe (povzeto po Mikoš, 1996) so narejene za vsak tip vodotoka posebej, torej posebej za položne struge, strme struge in za zablatale tokove, saj je avtor ugotovil, da ni možno za vse tipe narediti samo ene, ki bi dobro opisala obnašanje v vseh tipih. Temelji na lastnih terenskih meritvah in se deloma naslanja tudi na drugo literaturo. Meritve so bile narejene na strugah brez izrazitih skokov ali stopenj in je enačba manj primerna za kaskadne struge in struge tipa stopnja-tolmun. Uporabil je dva brezdimenzijska parametra in večkratno regresijo, da je določil srednjo pretočno hitrost (potenčna enačba). V njegovi enačbi je upošteval parametre:

- g [m/s^2];
- pretok vode Q [m^3/s];
- padec dna struge I_0 [-];
- 90-odstotno zrno plavin d_{90} [m].

Kjer 90-odstotno zrno plavin pomeni, da je 90 odstotkov zrn manjših od te vrednosti. Enačba Rickenmann 1 je narejena za položne vodotoke, Rickenmann 2 za strme struge, Rickenmann 3 in 4 sta bila razvita za primerjavo z Manningovo enačbo ter Rickenmann 5, ki je primeren za zablatale vodotoke. Rickenmannova enačba ima prednost, da ne potrebujemo hidravličnega radija R kot

vplivnega parametra, ki je največja slaba lastnost Jarrettove enačbe. Za Rickenmannovo 1. in 2. enačbo so bile izdelane tudi tabele za območje $0,4 < h/d_{90} < 4$, ki nam olajšajo računanje.

Rickenmann 1:

$$v = 0,79Q^{0,34}I_0^{0,20}d_{90}^{-0,35} \quad \text{Območje uporabe: } 0,008 < I_0 < 0,63 \quad (6)$$

Rickenmann 2:

$$v = 2,18Q^{0,29}I_0^{0,35}d_{90}^{-0,23} \quad \text{Območje uporabe: } I_0 < 0,008 \quad (7)$$

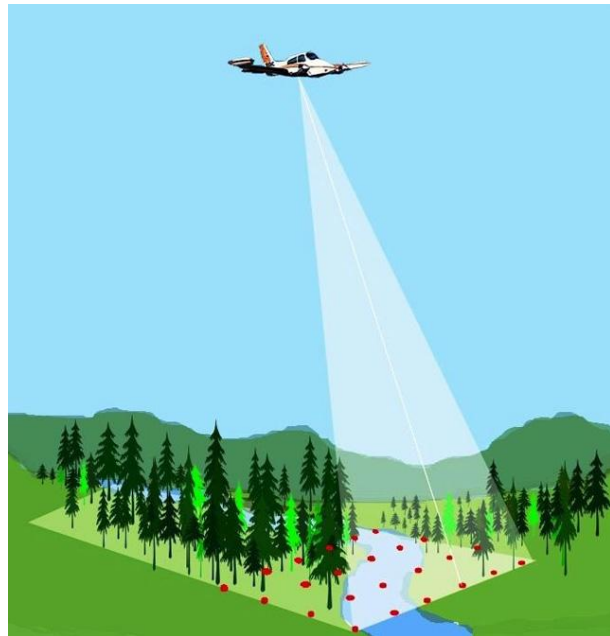
Razvitih je bilo še vrsto drugih enačb, nekaj med njimi tudi v zadnjih 20 letih. Te so podrobneje predstavljene v naslednjem poglavju.

2.2 Geometrija

Za zbiranje podatkov o karakteristikah celotnega povodja in struge je danes aktualen sistem LiDAR (Light detection and ranging). Za zbiranje podatkov s pomočjo LiDAR-ja lahko uporabimo Leica HDS postajni sistem. Isto območje moramo skenirati z več smeri, da minimaliziramo sence.



Slika 3: Leica HDS postajni sistem (SPAR Point Group staff, 2009)



Slika 4: Snemanje z LiDAR-jem s pomočjo letala (Grangeo, 2012)

Z LiDAR-jem lahko snemamo teren tudi z letala. Ključna prednost LiDAR-ja je to, da ta raziskovalna tehnika dovoljuje virtualne ponovne ogleda in raziskave karakteristik struge tudi kasneje. Iz LiDAR skenov in dodatnih skupnih podatkov postaj odseke razdelimo na manjše prečne prereze (Yochum et al., 2012). Slabost LiDAR-ja je v tem, da z njim ne moremo meriti podvodnih značilnosti. Za nadvodne značilnosti vodotoka lahko uporabimo tudi lasersko-teodolitske raziskave v razrezani, na polja razdeljeni mreži.



Slika 5: Laserski teodolit (G. B. International, 2008)

Laserski teodolit se uporablja tudi za merjenje vzdolžnih profilov dna in vodne gladine med vsakim merjenjem hrapavosti v globočnici struge vzdolž odseka ter levem in desnem robu vodotoka. Prečne prereze se pridobi iz oblaka točk, ki predstavljajo laserski posnetek terena na vnaprej določenih intervalih, ki niso preveliki, vzdolžno po odseku. Preiskovana dolžina globočnice sledi poti ocenjenega centra mase pretoka, kar nam poda najbolj hidravlično-reprezentativno dolžino odseka za specifičen pretok (Yochum in Bledsoe, 2010). Za pridobitev podatkov o geometriji struge vodotoka se še vedno najpogosteje uporabljajo metode klasičnega geodetskega posnetka terena v izbranih prečnih prerezih struge vodotoka.

Za laboratorijske raziskave imamo podobne naprave, ki pa so toliko bolj natančne. Zimmermann (2010) je za posnetek vodne gladine in površine podlage v svojih raziskavah uporabljal laserski profilomer, ki ima natančnost enega milimetra in ustvari digitalni površinski model. Ti so lahko uporabljeni za določitev srednjega naklona podlage, standardne deviacije podložne površine, površine vodne gladine, dolžine profila ter lokacije stopenj in tolmunov. Lee in Ferguson (2002) sta se teh meritev lotila nekoliko drugače. Izvedla sta več meritev širine vodotoka, s sledilno metodo sta izračunala pretok, nato pa iz kontinuitetne enačbe izračunala globino modela. Pri tem postopku se prvotno izvede šest do osmem ponovitev postopka meritev vsakega različnega modela. Kadar je pretok višji kot predhodne meritve, moramo ročno izmeriti širino vodne gladine (izključujoč prodnike, ki segajo skozi vodno gladino) na zadostnem številu točk, da dobimo dovolj natančno srednjo vrednost. Gre za precej zahteven proces. Lee in Ferguson (2002) sta ocenila, da je potrebno povprečno 30 do 60 merenj na odsek, da definiramo srednjo vrednost s standardno napako manjšo od 5 %. To pa je vseeno manj, kot če bi poskušali izmeriti povprečno globino s takšno natančnostjo. Pri kasnejših obravnavah odseka, če je pretok znotraj predhodno izmerjenih vrednosti, se širina oceni z interpolacijo razmerja med širino gladine v strugi in pretokom ($w-Q$) za mesto, ki ga zadeva. Srednja globina h je določena s kontinuitetno enačbo in hidravličnim radijem. Če izvajamo raziskave v laboratorijih, moramo definirati dolžino kanala, kakšni so nakloni in širine. V kanalih zanemarimo skrajni začetek in konec, saj obnašanje toka v tem delu ni enako tistemu v sredinskem delu in bi z njihovo meritvijo pokvarili rezultate raziskave. Določimo tudi dolžino opazovanega kanala. Dotočne in odtočne nastavitvene dolžine morajo biti kratke zaradi hrapavih, grobih pogojev podlage povezanih s strmo strugo, ki ustvarijo zelo moteče lokalne tokovne okoliščine.

Naklon vodne gladine (I_w) se upošteva, da je ekvivalenten padcu hrapavosti (I_f) in je izračunan z uporabo nadmorskih višin vodnih gladin na dnu in vrhu vsakega posameznega odseka in dolžine vzdolžnega profila odseka. Pomembno je, da ima struga znotraj enega odseka čim bolj enake karakteristike po celem vzdolžnem profilu.

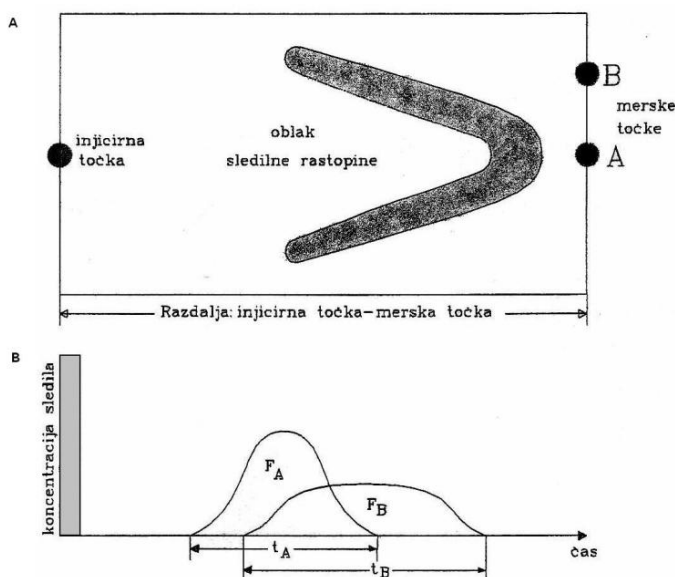
2.3 Merjenje hitrosti in pretoka

Za merjenje hitrosti in pretoka vodotoka ločimo sledilne metode, kjer merimo zgolj povprečno hitrost na določenem odseku. Poznamo več možnih načinov izvedbe metode, med drugim obstajata metoda razredčenja in metoda sledenja plovcu. Pri metodi razredčenja s sledilom (najobičajnejše je to kuhinjska sol) so zaželeni odseki s turbulentnim tokom, da se sol dobro premeša, izogibamo se odsekom z gladkimi površinami, stoječi vodi in odsekom, kjer prihaja do izgub in zastoja sledila. Razdalja med gorvodnim in dolvodnim robom območja naj bi bila 20- do 50-kratna srednja širina profila (Lee in Ferguson, 2002). Metoda sledenja s plovcem je najstarejši postopek merjenja hitrosti vode in izvira že iz antičnih časov. Slaba lastnost je, da merimo hitrost samo na površini vodotoka, kjer je večja kot globlje v vodotoku (Brilly in Šraj, 2005). Še najbolj je primerna za vodotoke, ki imajo zelo nizko hitrost, kar pa ni značilnost strmih strug, zato te metode ne bom podrobneje obravnaval.

Poznamo tudi metode, kjer hitrost in pretok merimo zgolj na določenem prerezu, ki pa mora imeti enake oziroma minimalno različne karakteristike s preostalimi prerezi na opazovanem odseku. Za kontinuirano merjenje se uporabljajo zlasti objekti za meritev pretokov, elektro-magnetna metoda merjenja pretoka ter akustična metoda merjenja pretoka, za enkratno pa sta uporabljeni metoda hitrost-površina in metoda naklon-površina (Mejak, 2010). Te metode so že zaradi nekonstantnih karakteristik strug v strmih vodotokih manj primerne.

2.3.1 Metoda razredčenja

Te metode so najbolj primerne za merjenje v manjših vodotokih v strmih strugah. Bistveni lastnosti, ki zaznamujeta take tipe vodotokov sta, da je tok izredno hiter oziroma spreminjajoč in neenakomeren. Princip je v tem, da je enaka količina sledila pri večjem pretoku bolj razredčena kot pri manjšem. Sledilo spremeni elektroprevodnost vode. Na spodnjem preseku merimo, kako se spreminja elektroprevodnost s časom. Poznamo dve metodi injiciranja: metoda konstantnega injiciranja in metoda trenutnega injiciranja. Včasih se je kot razredčilo uporabljal natrijev fluorescein oziroma uranin ter rodamin, ki pa sta v večjih količinah strupena, zato je danes bolj uporabljana kuhinjsko sol, lahko pa tudi kalcijev klorid. Prednost soli je tudi ta, da jo lahko enostavno stehamo. Zelo pomembno je, da je enako sledilo uporabljeno tako za kalibracijo kot tudi merjenje. Na dolvodni strani odseka se v fiksni točki merjenja določa koncentracija razredčenega sledila, kot je vidno na sliki 6. Zaželeno je, da so ti časovni intervali čim krajši.



Slika 6: Potovanje koncentracije sledila (Flow-tronic, 2003)

Pri metodah razredčenja moramo upoštevati naslednje pogoje (Mejak, 2012):

- med meritvijo mora biti pretok konstanten;
- skozi naš profil mora teči celotna količina raztopljenega sledila (nobenih izgub);
- sledilo mora biti popolnoma raztopljeno in premešano tako, da skozi vsako točko merskega profila preteče enaka količina raztopine.

Rezultat meritev je diagram časovnega spreminjanja koncentracije sledila v merjeni točki. Moramo se zavedati, da je hitrost vode po odseku različna, zato je tudi časovni potek koncentracij profila različen. V matici je potovanje sledila hitro, v točkah z nižjimi hitrostmi, pa oblak sledila potuje počasneje. Zavedati se moramo, da ima vsaka voda po naravi neko svojo elektroprevodnost, ki jo izmerimo na dolvodnem preseku odseka, preden dodamo sledilo. Sol sprana s cestišč v zimskem in pomladanskem času lahko to elektroprevodnost poveča tudi za desetkrat, tako da moramo biti pozorni na to. Sledilo mora imeti sledeče karakteristike (Mejak, 2010):

- ne sme biti strupeno pri izbranih koncentracijah;
- biti mora lahko topno v vodi pri normalnih temperaturah;
- ne sme obstajati kot naraven del vodotoka razen v minimalnih količinah;
- ne sme reagirati z vodo in naravnimi elementi;
- ga je lahko meriti in je zanesljivo.

2.3.1.1 Metoda konstantnega injiciranja

(povzeto po Yochum et al., 2012 in Zimmermann, 2010)

Hitrost se lahko meri s pomočjo rodamin sledila, kjer injiciranje poteka zvezno dalj časa. Lahko tudi uporabimo raztopino kuhinjske soli. Povprečne hitrosti na odsekih se izračunajo kot dolžina globočnice vodotoka (krivulja na dnu, ki sledi najnižjim točkam struge) deljeno s potovalnim časom sledila. Potovalni čas se meri z uporabo rodamin barv, z več ponovitvami, da zmanjšamo potencialne napake. Uporabimo dva sinhronizirana fluorometra, pritrjena na palice v centru toka na koncu obravnavanega odseka, ki merita, kdaj bo prišel oblak sledila. Barva se spušča kot lisa na sredi toka (Slika 7).



Slika 7: Prikaz merjenja hitrosti z sledilom rodamin (ASLO, 2008)



Slika 8: Fluorometer (Snell, 2012)

Za določanje srednje hitrosti s pomočjo sledila v laboratorijih uporabljamo prekucnik (ko je en prekat poln, se prevrne in izlije, pri tem pa se obrne tako, da se polne naslednji prekat, ko pa se ta napolni, se ponovno prekucne in se polni prvi prekat in tako dalje), ki injicira primerno količino sledila v zgornji konec odseka vsako minuto.



Slika 9: Prekucnik (Tipping bucket rain gauge, 2012)

Zabeležimo si čas injiciranja. Pulz soli naj bi bil nadzorovan z dvema prevodnostnima sondama s frekvenco 10 Hz. Obstaja precejšnje število načinov obdelave podatkov prevodnosti za določitev hitrosti vode (npr. zgornja ali srednja zabeležena vrednost). Harmonično srednjo vrednost lahko določimo z uporabo sonde na spodnjem delu kanala. Ta metoda je bila spoznana za najbolj natančno merjenje srednje vrednosti hitrosti skozi kanal. Iz kontinuitetne enačbe (7) se lahko nato izračuna globino vodotoka, če seveda merimo tudi pretok tako, kot sta to izvedla Lee in Ferguson (2002).

2.3.1.2 Metoda trenutnega vnosa sledila

Drugi možni postopek za določitev hitrosti toka je uporaba metode z razredčeno soljo za merjenje pretoka in hitrosti, torej metoda trenutnega injiciranja. Ta metoda se pogosteje uporablja v laboratoriju v kanalih, lahko pa tudi pri terenskih raziskavah. Najpogosteje je uporabljena zaradi dobrih lastnosti soli, kot so lahka dostopnost, ugodne cene, dobra topnost, in ker praktično nima posledic na floro in favno v vodotoku. Količina soli, ki jo uporabimo, je odvisna od turbulence toka vode, širine in dolžine opazovanega odseka, od osnovne električne prevodnosti vodotoka in pretoka v času izvedbe meritve.

Običajno potrebujemo okrog 2 do 12 gramov soli na 1 liter/sekundo pretoka (Flow-tronic, 2003). Pretok moramo zato predhodno oceniti.

Hitrost in pretok morata biti merjena pri vsakem obisku vsakega opazovanega odseka posebej pri hipnem dodatku poznane količine soli v določeni točki. Avtorja Lee in Ferguson (2002) opisujeta, da naj bi bila ta točka približno 20 do 50 širin kanala gorvodno od mesta, kjer določimo konec odseka. Solni val se odčita na koncu vsakega izmed opazovanih odsekov z uporabo sonde za električno prevodnost z laboratorijsko preverjenimi kalibracijskimi (umeritvenimi) konstantami in v povezavi z enim samim merjenjem podatkovnega zapisovalnika pri 1 Hz. Pretok v vsakem poskusu se izračuna z uporabo metode masne bilance, s temperaturnim popravkom 2 %/°C. Avtorja Lee in Ferguson (2002) v svojem delu pravita, da se ocena pretoka pri dveh meritvah enega odseka največkrat razlikuje za majhen, sistematičen obseg pri pogojih, ko imamo nizke pretoke, ki kaže, da je lahko nekaj soli skladiščene tudi znotraj odsekov še od prejšnje meritve, kljub temu da vodotok ne vsebuje velikih mrtvih rokavov. Povprečna hitrost v odseku je določena kot dolžina odseka, deljena s časovno razliko med centriodi prečnega prereza struge zalitega z vodo na vrhu odseka in solnih valov na dnu odseka.

2.3.1.2.1 Merilna naprava

Za merjenje hitrosti in pretokov z metodo sledenja potrebujemo tudi prenosni merilec pretoka Flo-tracer.



Slika 10: Instrument Flo-tracer proizvajalca Flow-tronic z opremo (Flow-tronic, 2003)

Osnovan je na metodi kemičnega sledila v vodotoku. Na določeni razdalji dolvodno od točke injiciranja, kjer je sledilo dovolj razpršeno, lahko izračunamo stopnjo razredčitve sledila v vodnem toku. Injiciramo določeno količino kemičnega sledila gorvodno v vodotoku. V določeni točki potovanja z vodo se opravijo merjenja dovolj daleč, da zagotovimo enoten rezultat v času celotnega trajanja prehoda sledila. Za izračun pretoka potrebujemo podatke, koliko sledila bomo dodali, kakšna je njegova koncentracija na mestu dodajanja in kakšna je koncentracija na koncu opazovanega odseka. Zanesljivost metode je osnovno odvisna od sledečih pogojev:

- tok vode naj bi ostal enakomeren tekom merjenja;
- vsa količina sledila naj bi prepotovala merilni sektor;
- injicirana raztopina naj bi bila razširjena enakomerno po širini vodotoka;
- osnovna prevodnost vodotoka naj ne bi variirala med meritvami.

Koncentracija sledila v vodi je lahko ovrednotena z merjenjem prevodnosti, ki je direktno proporcionalna s koncentracijo sledila. Gre za enostaven in poceni postopek. Edina slabost je dejstvo, da imajo vsi vodotoki določeno stopnjo prevodnosti, ki variira. Izogniti se moramo tudi kritičnim obdobjem, ko se na primer sneg topi in odnaša sol s cest, saj se lahko prevodnost zaradi tega zelo poveča. Ker so naprave zelo občutljive in so zato dodane relativno majhne količine sledila, to ne zmoti živalstva in rastlinstva na območju meritve. Flo-tracer meri elektroprevodnost vode, iz spremembe le-te v primernem časovnem intervalu pa se nato izračuna pretok.

Raztopino soli hipno vlijemo v vodotok in takoj za tem izplaknemo posodo, v kateri je bila raztopina. Po začetku meritve inštrument opravlja meritve v izbranih intervalih. Za vsako meritev se na zaslonu izpišeta vrednost temperature in slanosti. Z instrumentom moramo preveriti predhodno slanost do prihoda oblaka sledila; teh meritev naj bi bilo vsaj 100, da dobimo pravilen izračun pretoka (Flow-tronic, 2003). Takoj po pojavu sledila, instrument zabeleži začetno slanost. Instrument tako beleži koncentracijo do znižanja na začetno vrednost (dokler oblak sledila ne gre mimo našega merskega profila). Najbolj pogosto se meri koncentracija sledila v matici toka. Sonda mora biti popolnoma potopljena v vodo.

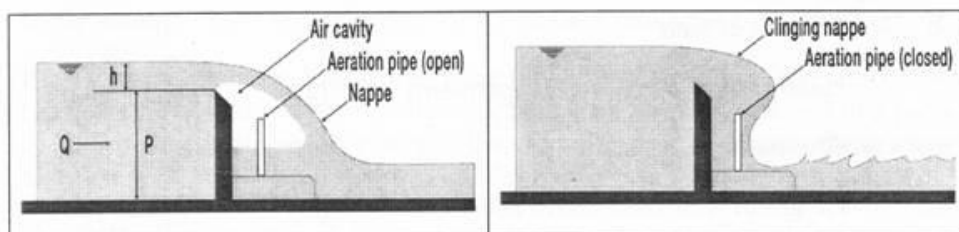
2.3.2 Metode za merjenje pretokov in hitrosti na prerezih

2.3.2.1 Objekti za meritev pretokov

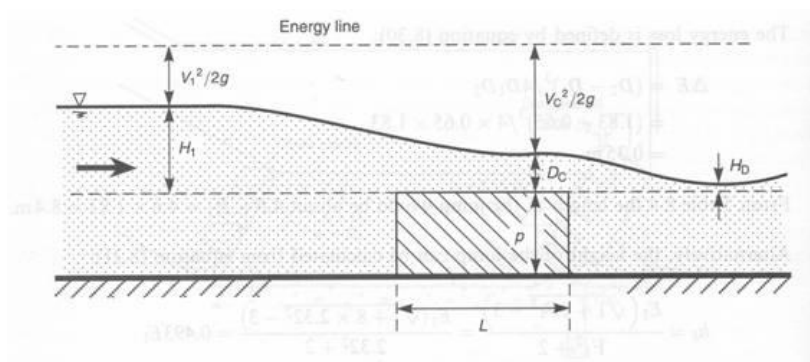
Izdelava objektov za merjenje pretokov, kot so široki pragovi, prelive in zožitve, je manj primerna za strme struge, saj je prisoten prod ter les v toku, ki lahko povzroči zaježbo na merilnem mestu in tako merjenje ni več natančno. Poleg tega so stroški izdelave takih objektov običajno nesorazmerni s stroški urejanja struge. Sicer pa gre za eno natančnejših metod merjenja. Obstajajo sicer tudi v montažni in prenosljivi izvedbi.



Slika 11: Ostrorobi preliv (U.S. Geological Survey, 2012)



Slika 12: Skica ostrorobega preлива (Claydon, 2011b)



Slika 13: Skica širokega praga (Claydon, 2011a)

2.3.2.2 Elektro-magnetna metoda merjenja pretoka

Gre za moderno metodo, ki je primerna za meritve pretokov v neobdelani in obdelani odpadni vodi, vodi v fazi pripravljanja za potrebe gospodinjstev, hladilne vode v industriji, v vodotokih z veliko poraščenostjo struge ter v vodotokih z nestalnim dnom in intenzivnim transportom sedimentov, kakršni so vodotoki v strmih strugah. Izogibati se moramo drugim elektro-magnetnim napravam, ki lahko motijo meritve. Deluje tako, da je pod rečnim dnom pokopana velika tuljava, skozi katero teče električni tok in voda tako, ko teče čez tuljavo, navpično seka magnetno polje. Pulzi se nato merijo z elektrodami postavljenimi na obeh straneh vodotoka. Ta napetost pa je sorazmerna s povprečno hitrostjo toka v opazovanem prerezu (povzeto po Mejak, 2010). Problem pri uporabi te metode v strmih strugah je, da se širina stalno spreminja.

2.3.2.3 Akustična metoda merjenja pretoka

Ta metoda deluje na osnovi oddajanja zvočnih pulzov skozi vodo na znani globini vode. Pulzi se oddajajo iz ene brežine vodotoka na drugo (Boiten, 2000). Izračunamo lahko tudi hitrost iz pretoka. Ta metoda zaradi nestalnosti pretoka v strmih strugah ni primerna, saj prihaja konstantno do spreminjanja širine vodotoka, odvisno od višine pretoka. Tako bi pulzi pri nizkih pretokih kmalu potovali po zraku, poleg tega pa se tudi struga redno spreminja ob vsakem večjem pretoku.

2.3.2.4 Metoda naklon-površina

Metoda naklon-površina se uporablja za določitev maksimalnega pretoka med poplavo (Boiten, 2000). Poplavni val za sabo pusti sledi, do kod je segal. Iz tega lahko določimo naklon, površino prečnega prereza in hidravlični radij. Pretok pa naj bi se določil s pomočjo Manningove ali Chezyjeve enačbe. Ravno zato ta metoda ni primerna za strme struge, saj se ti dve enačbi ne obnašata več dobro v takih okoliščinah. Ob enem pa menim, da je to metodo vseeno mogoče dobro uporabiti v strmih strugah, vendar moramo vzeti tudi temu primerne enačbe.

2.3.2.5 Metoda hitrost-površina

Metode za merjenje pretočnih hitrosti, ki so merjene samo na enem preseku v strmih strugah, običajno ne pridejo v poštev, saj se hitrosti v večini primerov nenehno spreminjajo. Če nas zanimajo razmere na kratkem odseku, kjer je hitrost in oblika struge približno konstantna, pa jih vseeno lahko uporabimo. Prav tako lahko s pomočjo določenih metod izračunamo pretok na določenem preseku in to dovolj natančno za uporabo ter z minimalnimi stroški. Seveda pa moramo postopek ponoviti večkrat pri različnih pretočnih pogojih.

2.3.2.6 Naprave za merjenje po postopku hitrost-površina

2.3.2.6.1 Flow Tracker handheld ADV merilec pretočnih hitrosti SonTek



Slika 14: Prikaz meritve z napravo Flow Tracker handheld ADV merilec pretočnih hitrosti SonTek (AnHydre, 2012)

Merilec lahko izmeri 2- ali 3-dimenzionalno hitrost vode in sicer od 0,01 cm/s do 5 m/s. Natančnost izmerjene hitrosti je 1 % (SonTek, 2002). Instrument iz povprečja 10 meritev poda vzorec hitrosti za vsako sekundo in jih shrani. Deluje na principu Dopplerjevega efekta in s pomočjo ultrazvoka. Zanj pa potrebujemo hitrost potovanja zvoka skozi vodo, ki pa je odvisna od slanosti in temperature. Zato ima naprava že vgrajen senzor za korekcije. Ima tudi možnost, da iz zbirke podatkov izračunamo pretok vodotoka (SonTek, 2002). Potem mora biti tehnika merjenja taka, da merimo hitrost prečno po izbranem profilu na različnih višinah. Te meritve kombiniramo s položajem in informacijami o globini vodotoka, da izračunamo celoten pretok. Pritrjen je lahko na standardizirani zgoraj nastavljivi palici, kar je priročno za operacije v plitvih vodotokih, saj zaradi svoje bočno obrnjene sonde ne potrebuje dodatnega zunanega vira energije ali zapisovalcev podatkov. Poleg tega je manjši in lažji od ostalih podobnih naprav.

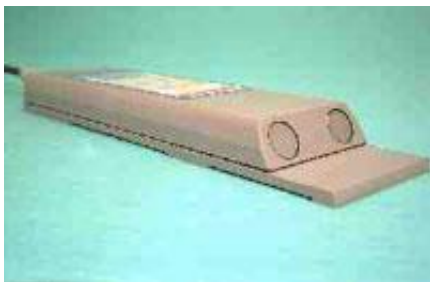
2.3.2.6.2 Hidrometrično krilo

Deluje po principu štetja obratov rotorja. Vsak obrat propelerja je v razmerju s hitrostjo vode in z nagibom krakov propelerja. Za majhne hitrosti vodotoka uporabljamo propeler z majhnim kotom krilc, drugače pa tiste z večjim kotom. Za merjenja je pomembna le srednja pretočna hitrost, pulzacije nas v tem primeru ne zanimajo.



Slika 15: Hidrometrična krila (SL 0281 hidrometrično krilo, 2012)

2.3.2.6.3 Dopplerjev merilec pretočnih hitrosti, temperature vode in vodnega tlaka Starflow unidata model 6526-51



Slika 16: Dopplerjev merilec pretočnih hitrosti, temperature vode in vodnega tlaka Starflow unidata model 6526-51 (Unidata, 2012)

Ravno tako deluje na principu Dopplerjevega pojava in s pomočjo ultrazvoka. Meri spremembo frekvence zvoka, ki se odbija od posameznega suspendiranega delca v vodi in tako določa hitrost. Temelji na predpostavki, da sta hitrost in smer suspendiranih delcev enaka hitrosti in smeri vode. Suspendirani delci so v naravi prisotni v še tako čisti vodi, tako da lahko merilec deluje tudi v takšnih pogojih. Posebnost je to, da lahko poleg hitrosti, z isto napravo merimo tudi globino, vodni tlak in temperaturo (Unidata, 2012). Uporaben je še posebej na območjih, kjer ne obstaja jasno razmerje med višino pretoka in hitrostjo, kjer so tokovi ovirani zaradi spremenljivih razmer, raznih blokad v vodah, drugih nestalnih razmer in povratnih tokov. Sposoben je meriti v vodah z različno kakovostjo. Pri meritvi instrument postavimo na dno vodotoka. Slabost tega instrumenta pa je, da meri hitrost le v prevladujoči smeri, torej le v eni dimenziji, kar pa pri strmih strugah ni najbolj primerno.

2.4 Zaplavni les



Slika 17: Prisotnost zaplavnega lesa v vodotoku Belca nad krajem Belca pri Mojstrani (lasten vir)

Prisotnost zaplavnega lesa ima znaten vpliv na obnašanje vodotoka, saj lahko zviša višino nastalih stopenj za precejšnje vrednosti. Raziskovalci so ugotovili tudi, da višina stopnje v vodotokih tipa stopnja-tolmun naraste zaradi večjega zaplavnega lesa in se poveča s povečanjem bližine zaplavnega lesa na dnu vodotoka (Wilcox, 2005).

Raziskovalci, ki so v svojih enačbah upoštevali zaplavni les, so se tega lotili na več načinov. Nekateri zagovarjajo količino lesa v kubičnih metrih na 100 tekočih metrov vodotoka, drugi uporabijo, kakšen delež plavin predstavlja, tretji pa samo, koliko kosov je povprečno prisotnih v 100 metrih vodotoka.

Pri raziskavah moramo določiti to količino zaplavnega lesa. Lesene plavine lahko močno vplivajo na disipacijo energije v majhnih in srednje velikih strmih gorskih strugah, s tem da povzročijo nastanek stopničastih profilov, kjer se velika količina tokovne energije potroši v slapovih, kaskadah, hidravličnih skokih in v koncentriranih turbulentnih mestih, ki so povezani z zaplavnim lesom. Wilcox (2005) je v svojem delu omenil, da so že predhodni avtorji v svojih raziskavah ugotovili, da plavine lahko vplivajo na 30–80 % izgube višine toka in da se relativni učinek zaplavnega lesa na disipacijo energije zmanjša z naklonom kanala. Tudi prodniki lahko zasidrajo zaplavni les in tako povečajo višino stopenj, raznolikost plavin in odpornost toka.

2.5 Maskimalna velikost plavin

Plavine lahko karakteriziramo na primer z uporabo »prodnatega štetja«. Vendar pa ni enotne široko sprejete metode za karakterizacijo hrapavosti v strugah tipa stopnja-tolmun z uporabo merljivih lastnosti dna. Obstaja nekaj alternativnih meritev za velikost zrn in mikrotopografije vzdolž vsakega odseka. Lee in Ferguson (2002) sta tako v svoji raziskavi predlagala, da se zrnavost plavin pridobi z merjenjem premera 100 prodnikov iz tolmunov (oziroma iz prodišč ob tolmunih) v vsakem odseku in dodatnih 100 v stopnjah, pri čemer je potrebno podati maksimalne premere zrn v stopnjah in tolmunih. Iz tega lahko določimo zrno d_{84} . Meritve se morajo narediti na čim širšem izboru pretokov. Tako dobimo nabor podatkov, da vidimo, kako variirata hitrost in odpornost toka s pretokom.

Mikoš (1996) svetuje, da naj določanje zrn ne bo samo optično; moralo naj bi sloneti vsaj na nekaj enostavnih meritvah zrnivosti plavin, na primer sejalni analizi, kar pa je precej zamuden postopek. Najprej izvedemo linijsko analizo krovnege sloja plavin v dnu hudourniške struge. Potem preračunamo v težnostno-prostorninsko analizo in jo sestavimo s Fullerjevo zrnavostno krivuljo v območju drobnejših zrn plavin. To je dokaj zanesljiva oblika analize. Ta nam omogoča zanesljivo oceno srednjega zrna plavin in tudi devetdeset odstotnega zrna.

Zimmermann (2010) je v študiju kanala v laboratoriju predvidel izvedbo eksperimentov z uporabo »finih« ali pa »grobih« usedlinskih mešanic, ki so modelirane po enem izmed dejanskih opazovanih vodotokov. Za obe mešanici je predlagal, da je vsaka polovica velikosti zrna skupine nad 11 mm pobarvana z različno barvo. Za določitev površinske porazdelitve velikosti zrn lahko med raziskavo zberemo digitalne slike kanala. Potem identificiramo barvo in posledično velikost vsakega kamna lociranega v 63 naključno izbranih točkah v vsaki sliki. Za oceno plavin celotne površine dna uporabimo 7 digitalnih fotografij za izdelavo vzorca Wolman-ovega štetja z več kot 300 kamni na vzorec, kar je dovolj, da karakteriziramo polno porazdelitev velikosti zrn. Večkrat obdelane slike dajo oceno standardne napake te tehnike. Obstajajo tudi drugi postopki za vrednotenje velikosti zrn plavin v laboratorijskih kanalih.

2.6 Ocene napak

Z merjenjem česarkoli metričnega je vedno prisotna neka netočnost. Napaka je, odvisno od merjenja, lahko ocenjena s pomočjo raznolikosti ponovljenih merjenj (na primer hitrosti), standardne napake (na primer naklon dna) ali inštrumentalne napake (na primer pretok). Za določitev napake povezane z vsemi metričnimi standardnimi napakami je najbolj priporočljiva uporaba relativne napake.

3 PREGLED NAD PREDLAGANIMI ENAČBAMI IN DOSEDANJE IZKUŠNJE RAZISKOVALCEV Z MERJENIMI PODATKI

3.1 Relativna potopljenost dna

Več raziskovalcev v zadnjem desetletju je ugotovilo, da je relativna potopljenost dna oziroma oblik na dnu vodotoka v smislu različno velikih zrn plavin z uporabo d_{84} slab pokazatelj za oceno celotne hrapavosti v strmih strugah, čeprav so jo v preteklosti že uporabljali kot dokaj uspešno. Glavni razlog za to je neupoštevanje dejstva, da dno vodotoka lahko oblikujejo tudi drugi materiali kot zrna, na primer zaplavni les. Kaufmann (1987) je testiral tudi pojem relativne potopljenosti, s katerim so ovrednotili nepravilnosti dna, zlasti standardno deviacijo globine globočnice (σ_z) in ostalo globino globočnice (h_{res}), kar pa nam poda precej dobre rezultate koeficienta hrapavosti in hitrosti. Tudi Kaufmannova (1987) enačba z uporabo h_{th}/σ_d se obnaša srednje dobro (Yochum et al., 2012). Najbolj zanesljiv pristop za oceno hitrosti je s pomočjo uporabe brezdimenzijskih spremenljivk, s karakterističnim hrapavostnim parametrom $d_c = \sigma_z$ z upoštevanjem povečanja stopnje za višino zaplavnega lesa. Kjer je pretok nepoznan, se tudi h/σ_z obnaša dobro za direktno oceno hitrosti. Poleg tega je bil preurejen empiričen odnos, da dobimo enačbo (8).

$$v/u^* = h/\sigma_z \quad (8)$$

Ta zagotavlja strog test predhodno pridobljenih rezultatov z uporabo podatkov, ki temeljijo na terenskih raziskavah v kompleksnih gorskih strugah. Ključna prednost uporabe σ_z je ta, da zajame vpliv največjih prodnikov v formiranih stopnjah, kombiniran vpliv prodnikov in zaplavnega lesa v formiranju stopenj ter raznolikost v skalnatih podlagah. Tako pridemo do ugotovitve, da je σ_z najbolj primeren parameter za oceno hrapavosti in hitrosti v strmih strugah (Yochum et al., 2012).

Odnosi, ki se zanašajo samo na relativno potopljenost plavin, kot pri Bathurstovi enačbi (1985) ter enačbi Leeja in Fergusona (2002), pa se slabše obnašajo. To je sicer pričakovano, glede na to, da je Bathurstova enačba razvita za oceno v bolj položnih strugah, toda tudi tam slabo opiše dogajanje. Lee in Ferguson (2002) sta v svoji enačbi uporabila velikost zrn v stopnjah. Razvita je bila za struge v podobnih razponih naklonov, z uporabo laboratorijskih in terenskih podatkov. Te stopnje so bile v celoti formirane iz prodnikov. To je tudi primer v podatkih pri formuli Comiti et al. (2007), čigar model konstantno podcenjuje odpornost, kljub uporabi brezdimenzijske hitrosti in pretočne metode, ki je bila dokazana kot učinkovita. Avtorji so v raziskavah v zadnjih letih ugotovili, da te metode tipično temeljijo na brezdimenzijski hitrosti in enakomernem pretoku izračunanem z uporabo d_{84} kot parametru hrapavosti d_c , ne da bi upoštevale možnost, da zaplavni les lahko poveča višino stopenj in hrapavost. Comiti et al. (2008) so ugotovili, da znatne količine zaplavnega lesa lahko povečajo hrapavost vse za red velikosti, kadar ima struga znatno prelivno hrapavost povzročeno z lesenimi stopnjami.

3.2 Brezdimenzijska hitrost in pretok

Raziskovalci so med drugim izvedli tudi brezdimenzionalen pristop z enakomernim pretokom (10) za oceno hitrosti (Rickenmann, 1994; Ferguson, 2007; Comiti et al., 2007; Comiti et al., 2009; Zimmermann, 2010). Zlasti za brezdimenzijsko hitrost v^* (9) so Yochum et al. (2012) ugotovili, da je dobro povezana z brezdimenzijskim enakomernim pretokom q^* .

$$v^* = \frac{v}{\sqrt{gd_c}} \quad (9)$$

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{(gd_c^3)}} \quad (10)$$

Kjer je d_c parameter hrapavosti. Brezdimenzijska hitrost in brezdimenzijski enakomerni pretok sta bila v zadnjih letih preoblikovana z dodatnim naklonom v imenovalcu, kot je prikazano v enačbah (11) in (12).

$$v^{**} = \frac{v}{\sqrt{gI_f d_c}} \quad (11)$$

$$q^{**} = \frac{q}{\sqrt{gI_f d_c^3}} \quad (12)$$

Uporabno vrednost pa ima tudi brezdimenzijski enakomerni pretok q^* (13).

$$q^* = \frac{Q}{d_c \sqrt{g d_c^3}} \quad (13)$$

Če predpostavimo, da je d_c ekvivalenten z d_{84} , je ocenjena hitrost na relativno visokem nivoju deleža opisanega raztrosa vrednosti v samostojno oblikovanih laboratorijskih kanalih, z odsotnostjo zaplavnega lesa. Odkar je bilo pokazano, da je d_{84} slab pokazatelj kompletne odpornosti v teh vrstah tokov, bi bila uporaba drugačnih hrapavostnih parametrov bolj primerna v strugah s precej velikimi zrni, še posebno v kanalih, ki imajo v strugi zaplavni les, ki poveča višino stopenj (Yochum et al., 2012).

3.3 Ocena hrapavostnih koeficientov

3.3.1 Uporabnost enačb za izračun hrapavostnih koeficientov

(povzeto po Mikoš, 1989)

Ocena hrapavostnih koeficientov je eden izmed težje določljivih količin pri hidravliki strmih strug, ki pa ima velik pomen. Glede na relativno hrapavost imajo različne enačbe različna območja uporabe.

Pri majhni relativni hrapavosti $R/k_0 > 15$ velja, da so uporabne tiste formule, ki v vertikali predpostavljajo logaritmično razporeditev hitrosti, to so enačbe Manning-Strickler, Keulegan, Bretting in Gončarov. Tu je k_0 nadomestna enakomerna hrapavost, R pa hidravlični radij vodotoka. Za srednjo in veliko relativno hrapavost ($4 < R/k_0 < 15$; $R/k_0 < 4$) velja, da vertikalna razporeditev hitrosti ne sledi več logaritmičnemu zakonu. Bolj so podobni obliki črke S. Tu je več principov reševanja:

1. Upoštevanje korekcije potenčnega (Manningovega) obrazca. Ta princip sta uporabila Ryabov in Jarrett. Vseeno se pogosto uporablja pri spreminjajočih se hidravličnih razmerah. Če je v okviru tabeliranih podatkov o geometriji struge, lahko zagotavlja uporabne rezultate. Pojavi pa se problem. Imamo samo en k_{st} za vse možne vodostaje. Pri majhnih relativnih hrapavostih sicer ni velike razlike, pri srednji in veliki hrapavosti pa je znatna.
2. Upoštevanje korekcije logaritmičnega obrazca na osnovi vse večjih izgub, ki jih povzročajo v vodni tok štrleča zrna plavin. Ta princip upoštevajo enačbe Thompson & Campbell, Hey, Jaeggi, Smart & Jaeggi, VGI-Pintar.
3. Temeljenje na režimski teoriji. Ta sloni na terenskih meritvah hidravličnih in geometrijskih značilnosti naravnih vodotokov, ki se jih nato s pomočjo večkratne regresije izrazi v medsebojni odvisnosti. To je primerno za strme vodotoke z obliko stopnja-tolmun. Značilno je stabilno dno s prečnimi ustalitvenimi pragovi. Zrna razvrščajo intenzivno, zato je določanje hrapavosti na istih osnovah kot pri majhni hrapavosti praktično nemogoče. Nemogoče je tudi definirati klasične prečne profile. Zato je primerjava dejanskih pretočnih razmer s stalnim enakomernim tokom nesmiselna. Ta princip je uporabljen v enačbah Kellerhals-Day in Ruf. Za pravilnejše oblike strug vodotokov je primeren Jarrett.
4. Lahko uporabimo tudi fizikalne zakonitosti turbulentnega toka v hidravlično hrapavem režimu.

3.3.2 Ocene kvalitete obravnavanih enačb za koeficiente hrapavosti

(povzeto po Lee in Ferguson, 2002)

Bilo je že bilo več poskusov, da bi določili kako se n in f nanašata na merljive lastnosti dna reke, zlasti percentile razporeditve velikosti zrn na dnu struge, kot je na primer mediana (d_{50}). Pristop z najbolj fizično osnovo je tisti od Keulegana (1938), ki je integriral logaritmični hitrostni profil za turbulentno mejno plast in uporabil rezultat kompletnega prereza, kot je prikazano v enačbi (14).

$$\left(\frac{1}{f}\right)^{0,5} = 2,03 \log(12,2R/k_s) \quad (14)$$

Kjer je k_s višina hrapavosti, ki količinsko opredeljuje površinsko hrapavost. Za usedline z ustrezno granulacijo je k_s lahko enačen tudi z d_{50} ali d_{65} , vendar pa je v slabo granuliranih podlagah strug rek

hrapavost na tok okrepljena z oblikovno hrapavostjo na večjih prodnikih, tako da mora biti k_s določen kot neki večkratnik m reprezentativnega grobega procentila porazdelitve velikosti, običajno d_{84} ali d_{90} . Za podatke iz rek s prodnatim dnom z nakloni do 2 % raziskovalci predlagajo (kot npr. Hey, 1979 in Bathurst, 1985), da je m v območju od 2 do 3,5. Ugotovljeno je bilo tudi, da je povprečna globinska hitrost iz njihovega fizično temelječega modela razmeroma dober približek z logaritemskim zakonom z $m \sim 3$ za R/d_{84} vse do ~ 4 . Ti podatki se ne podaljšajo za situacije zelo nizke relativne potopljenosti R/d_{84} .

Thompson in Campbell (1979) sta ugotovila, da je odpornost v pregradnem prelivu z umetnimi stopnjami opisana bolje z enačbo (15) in (16).

$$\left(\frac{1}{f}\right)^{0,5} = 2,03 \log\left(\frac{12,2R}{k_s}\right) \left(1 - \frac{0,1k_s}{R}\right) \quad (15)$$

$$k_s = 2,37d_{84} \quad (16)$$

Dodaten pogoj v tej enačbi vodi do precejšnjega povečanja v oceni hrapavosti za zelo plitve toke. Fizična osnova je poskus vrednotenja mere, do katere štrleči veliki elementi dna blokirajo tok, to je, zmanjšajo razpoložljivo območje prečnega prereza. Ta enačba je bila predlagana za paleohidravlične namene pregleda in primerjalnega testa. Smart in Jaeggi (1983) podobno spremenita enačbo z vključitvijo eksponentne razpadajoče odvisnosti na d/d_{90} (17).

$$\left(\frac{1}{f}\right)^{0,5} = 2,03 \log\left(\frac{12,2R}{k_s}\right) \quad (17)$$

Keuleganova enačba temelji na empiričnih ugotovitvah v zelo plitvih tokih in je njena fizična osnova v logaritemskem zakonu manj veljavna v takih primerih. Nekateri avtorji so dali prednost čisto empiričnim alternativam. Dobro poznana je Manning-Stricklerjeva hrapavostna enačba v odnosu (18).

$$\left(\frac{1}{f}\right)^{0,5} = a \left(\frac{R}{k_s}\right)^b \quad (18)$$

Je prilagodljivih lastnosti. Bathurst (1978) je to uporabil za popravek podatkov iz rek, ki ima balvansko dno, vendar jo je preoblikoval s faktorjem, vključujoč razmerje w/d v srednjih razmikih med ovirami. Jarrett (1987) je nato ugotovil, da so bile vrednosti n v strmih strugah veliko večje kot v položnih strugah s podobno relativno hrapavostjo R/d_{50} . Poleg tega je raziskoval alternative za ocene n iz velikosti zrna. Predlagal je enačbo (19).

$$n = 0,32R^{0,33}I^{-0,38} \quad (19)$$

Marcus et al. (1992) so testirali uporabnost te in drugih enačb, ki temeljijo na Manningovi enačbi, za majhne gorske tokove in ugotovili, da vsi razen Jarretta podcenjujejo izmerjeno odpornost toka, v nekaterih primerih celo do 90 %. Jarrett ga je v nasprotju z ostalimi precenil za 30 %. Ta pregled nam da jasno vedeti, da tukaj ni univerzalnega dogovora o tem, kako najbolje povezati hrapavost v plitvih strugah z lastnostmi tal. Dalje moramo vedeti, da sta samo dva študija, ki specifično vključujeta stopnjevanje kanale z nakloni večjimi od 9 % ali pretoki z R/d_{84} mnogo manj kot 2.

Yochum et al. (2012) so ocenili, da so se za oceno n modeli, ki sta jih izvedla Jarrett (1984) in Rickenmann (1994), obnašali najbolje. Jarrett (1984) ima manjšo relativno napako kot Rickenmann (1994). Jarrettova enačba je sicer res predvidela n z najmanjšo standardno napako, toda utežni faktor je razviden pri večjih vrednostih hrapavosti ($n > \sim 0,2$). To je lahko rezultat manjših naklonov, nepravilnosti oblike dna in zaplavnega lesa v primerjavi med dvema različnima bazama podatkov. Za oceno f da najbolj zanesljive napovedi Aberle in Smartov (2003) model. Iz predhodno razvitih metod, je enačba, ki sta jo razvila, prinesla najboljše ujemanje z izmerjenimi vrednostmi Darcy-Weisbachovega f . Uporabi se lahko tudi, če so stopnje okrepljene z lesom, čeprav so bili podatki izvedeni v laboratoriju samo na prodnikih. To kaže, da razmerje med globino in σ_z , kot relativno potopljenostjo dna, poda prenosljive velikostne odnose za oceno hrapavosti v strmih kanalih. Podobno močno uspešnost ima tudi model, ki ga je naredil Zimmermann (2010). Čeprav je bil ta odnos razvit v laboratoriju z uporabo izključno prodnikov, kaže, da je bolj splošno veljaven, če je $d_c = \sigma_z$. Ravno tako se dobro obnaša tudi model, ki so ga naredili Kaufmann et al. (2008). Uporabili so metodo ostale globine s pomočjo izračunavanja direktno iz volumna lesa. Comiti et al. (2007) konsistentno sledi trendu podatkov, čeprav je imel sistematične utežne faktorje v napovedih. Lee in Ferguson (2002) sta izvedla raziskavo v kanalu in jo desetkrat povečala v razmerjih, tako da sta ugotovila, da ta poveča trend izmerjenih vrednosti na terenu, da bi bilo mogoče opisati celoten obseg od skoraj zastalega do

stopnje-tvorečega pretoka z enim samim odpornostnim razmerjem. Izbrala sta hrapavost, in sicer raje f kot Manningov n , če vemo, da so vrednosti n implicirane s terenskimi meritvami zelo visoke in zelo variabilne.

Najmanj zanesljive ocene so bile narejene s strani Rice et al. (1998) za n , Bathursta (1985) ter Lee in Ferguson (2002). To so modeli za f , z bistvenim utežnim faktorjem na razmerju med izmerjenimi in ocenjenimi območji razponov hrapavosti. Tudi Thompson in Campbell (1979) sta v svojem modelu napravila slabo oceno za f , s podatki pripadajočimi čisto drugi populaciji, kot pa so jo imeli podatki, ki so bili uporabljeni za to ocenjevalno enačbo.

Yochum et al. (2012) so opozorili na dejstvo, da če imamo stopnjevane kanale, se moramo zavedati, da je hrapavost prevladujoča v stopnjah. Zato uporabljamo, če že, vrednost d_{84} v stopnji, kar je boljše kot povprečno odsekovno ali kot vrednosti v tolmunih.

3.4 Direktna ocena hitrosti

(povzeto po Yochum et al., 2012)

Predhodno objavljene metode za direktno napoved hitrosti v splošnem precenijo hitrost izmerjeno na terenu, analogno s koeficientom hrapavosti, ki je podcenjen. Zimmermann (2010) je razvil enačbo s podatki zbranimi v žlebu, kjer je uporabil $d_c = \sigma_z$, iz napovedi z najmanjšo standardno deviacijo, čeprav so prisotni manjši sistematični utežni faktorji. Še dodatno, metode predstavljene s strani Rickenmanna (1994) in Jarretta (1984) so dale relativno majhne standardne deviacije, čeprav oba kažeta precej bolj raztresene vrednosti kot Zimmermann (2010) in tudi konsistentno podcenjenost utežnih faktorjev. Metode razvite s strani raziskovalcev Ferguson (2007), Comiti et al. (2007) in Comiti et al. (2009) so vse ocenile hitrosti z veliko standardno deviacijo in kazale nekonsistentne utežne faktorje z večjimi podcenjenimi napakami za večje hitrosti.

V bistveni razširitvi pristopa so razvili iterativni računski model za srednji vertikalni profil hitrosti v tokovni izkustveni obliki hrapavosti iz določene porazdelitve frekvence višin ovir (Lee in Ferguson, 2002). Pridobila sta primerne povezave s hitrostnimi profili izmerjenimi v precej strmih strugah. Njun model lahko kritiziramo kot občutljiv na definicijo osnovne podlage nad katero segajo ovire, a je bil to velik korak k obravnavanju problema na teoretični osnovi. Pomemben zaključek iz njunega dela je bil ta, da kadar ocenjeni hitrostni profili občutno odstopajo od logaritemske oblike zakona, bi bila lahko srednja hitrost določena dokaj uspešno s standardnim izračunom, ki temelji na logaritemskem zakonu. Ključni vprašanji sta potem, kako določiti efektivno višino hrapavosti in če je ta v pomoč prilagoditvi globinskega izraza v enačbi hrapavosti za zaviralni učinek velikih elementov dna, kot sta predlagala Thompson in Campbell (1979). Povečanje hitrosti je vedno hitrejše kot povečanje globine, čeprav je nasprotno običajno res v vodotokih s peščenim ali prodnatim dnom.

3.5 Enačbe

Preglednica 2: Seznam pogosto uporabljenih enačb, opis, področje uporabe in originalnih raziskav, interval uporabe (prirejeno po Mikoš, 1989)

| Avtor | Enačba in opis | Področje uporabe in originalnih raziskav | Interval uporabe |
|--|---|--|---|
| <u>Manning-Strickler (1891, 1923)</u> | $v = k_{st} R^{2/3} I_e^{1/2} = n^{-1} R^{2/3} I_e^{1/2}$ $k_{st} = \frac{26}{d_{v90}^{1/6}} \text{ [m] ... Stricklerjev koeficient}$ trenja v prodnosnih vodotokih [-] n ... Manningov koeficient trenja [-] | Hrapavost: gladek beton/grobi prod (200 mm) $R = \frac{0,37}{7,14} \text{ m}$ $I_e = \frac{0,00004}{0,02500}$ | Po različnih avtorjih: (Kradolfer): $5 < \frac{R}{k_s} \leq 340$ in $I_w \geq 0,00001$ (Gončarov): $10 < \frac{R}{\Delta} < 1000$ (Kellerhals): $7 < \frac{R}{\Delta} < 130$ (Jaeggi): $20 < \frac{R}{d_{v90}} < 100$ |
| <u>Keulegan (1938)</u> | $\frac{v}{v_*} = 5,75 \log \left(12,27 \frac{R}{k_s} \right)$ $k_s = d_{v90}$... enakomerna peščena hrapavost – po Nikuradseju [m] – v prodnatih vodotokih | Meritve na trapeznem koritu – aplikacija von Karmanovega »univerzalnega zakona razporeditve hitrosti« | Majhna relativna hrapavost |
| <u>Bretting (1948)</u> | L – enačba: $L = \frac{19,3}{k_s^{1/3}}$ $v = LR^{5/6} I_e^{1/2}$ oziroma $\frac{v}{v_*} \approx 6,2 \left(\frac{R}{k_s} \right)^{1/3}$ M – enačba: $M = \frac{25,4}{k_s^{1/6}}$ $v = MR^{2/3} I_e^{1/2}$ oziroma $\frac{v}{v_*} \approx 8,1 \left(\frac{R}{k_s} \right)^{1/6}$ N – enačba: $N = \frac{41}{k_s^{1/12}}$ $v = NR^{7/12} I_e^{1/2}$ oziroma $\frac{v}{v_*} \approx 13,1 \left(\frac{R}{k_s} \right)^{1/12}$ | Aproksimacija Keuleganovega logaritmičnega obrazca s polinomsko črto | L – enačba: $0,7 < \frac{R}{k_s} \leq 5$ M – enačba: $5 < \frac{R}{k_s} \leq 340$ N – enačba: $340 < \frac{R}{k_s} < 5,6 \cdot 10^5$ |
| <u>Gončarov (1962)</u> | $v = 4(2gRI_e)^{1/2} \log \left(6,15 \frac{R}{\Delta} \right)$ $\frac{v}{v_*} = 4 * 2^{1/2} \log \left(6,15 \frac{R}{\Delta} \right)$ $\Delta = d_{v90}/2$... višina ovir v vodnem toku (m) – v prodnosnih vodotokih $\Delta = (22,2 n)^6$... primerjava z Manningovim koeficientom trenja »n« [-] $\frac{v}{v_*} \approx 7,1 \left(\frac{R}{\Delta} \right)^{1/6} \quad 10 < \frac{R}{\Delta} < 1000$ $\frac{v}{v_*} \approx 9 \left(\frac{R}{\Delta} \right)^{1/8} \quad 100 < \frac{R}{\Delta} < 4500$ | Ravninski turbulentni tok | Majhna relativna hrapavost |
| <u>Ryabov (1974)</u> | $v = n^{-1} R^\alpha I_e^{1/2}$ $n = 0,0235 + 0,073 d_{v50} \text{ [m]}$ $\alpha = 0,5 + 6,92 n^{1/2} - 0,865 - 0,75 R^{1/2} (n^2 - 0,1)$ $\frac{v}{v_*} \approx 3,6 \frac{R}{d_{v50}} \quad 0,2 \leq \frac{R}{d_{v50}} \leq 1,0$ $\frac{v}{v_*} \approx 3,6 \left(\frac{R}{d_{v50}} \right)^{0,7} \quad 1,0 \leq \frac{R}{d_{v50}} \leq 2,0$ $\frac{v}{v_*} \approx 4,3 \left(\frac{R}{d_{v50}} \right)^{0,45} \quad 2,0 \leq \frac{R}{d_{v50}} \leq 4,0$ | Odseki naravnih vodotokov s stabilnim dnom | $0,15 \text{ m} \leq R \leq 2,0 \text{ m}$ $0,0275 \leq n \leq 0,100$ |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 2

| Avtor | Enačba in opis | Področje uporabe in originalnih raziskav | Interval uporabe |
|---------------------------------|---|---|--|
| Jarret (1984) | $v = 3,11 R^{0,83} I_0^{0,12}$ $n = 0,32 R^{-0,16} I_0^{0,38}$ $I_0 \dots$ padec dna struge [-] $B_D \dots$ širina dna struge [m] | Odseki naravnih vodotokov (ravni, enakomerni, vodna gladina povezana, stabilno dno, minimalna vegetacija na brežinah): $d_{V16} = 0,02-0,12$ m $d_{V90} = 0,09-0,98$ m $B_D = 6,7-51,8$ m $R = 0,15-2,1$ m $I_0 = 0,002-0,039$ | Strmi naravni vodotoki, stabilno dno (prod, samice) in brežine (minimalna vegetacija) brez vpliva zajezb in z malo lebdečimi plavinami |
| Thompson-Campbell (1979) | $\frac{v}{v_*} = 8^{\frac{1}{2}} \left(1 - 0,1 \frac{k_s}{R}\right) 2 \log \left(12 \frac{R}{k_s}\right)$ $k_s = 4,5 d_{V50} \dots$ enakomerna peščena hrapavost – po Nikuradseju [m] – v širokih tokovih z veliko hrapavostjo | Meritve na strmem naravnem odprtem kanalu: padec dna 0,052, širok 41 m, dolg 308 m, dno iz nevezanih samic, pretoki voda do 140 m ³ /s | Široki tokovi z veliko relativno hrapavostjo – zavzema pomemben delež pretočne globine |
| Hev (1979) | $\frac{v}{v_*} = 5,75 \log \left(12,27 \frac{R}{k_s}\right)$ $k_s = 3,5 d_{V84} \dots$ enakomerna peščena hrapavost – po Nikuradseju [m] – v prodnatih vodotokih | Korekcija Keuleganovega logaritmičnega obrazca | Naravni prodnati vodotoki s srednjo relativno hrapavostjo: $\frac{R}{d_{V90}} < 20$ |
| Jaeggi (1983) | $\frac{v}{v_*} = 2,5 \left(1 - e^{\left(-0,05 \frac{Z_{90}}{I_0}\right)^{0,5}}\right) \ln(6,1 Z_{90})$ $Z_{90} = \frac{R}{d_{V90}} \dots$ relativna hrapavost [-] | Laboratorijske raziskave: $I_0 = 0,002-0,012$ in $3 < Z_{90} < 30$ | Naravni prodnati vodotoki srednje relativne hrapavosti: $3 < Z_{90} < 20$ |
| Smart-Jaeggi (1983) | $v = 2,5 (g h_{wm} I_0)^{\frac{1}{2}} \left(1 - e^{\left(-0,05 \frac{Z_{90}}{I_0}\right)^{0,5}}\right) \ln(8,2 Z_{90})$ $Z_{90} = \frac{R}{d_{V90}} \dots$ relativna hrapavost [-] $v_w \dots$ hitrost čiste vode (brez lebdečih plavin) [m/s] $h_{wm} \dots$ globina toka mešanice vode in proda [m] Račun pretočne hitrosti se izvrši v iterativnem postopku skupaj z računom premestitvene zmogljivosti – glej (Jaeggi), v približku h_{wm} nadomestimo z R in ne upoštevamo transporta plavin | Laboratorijske raziskave premestitvene zmogljivosti strmih prodonosnih vodotokov – meritve v žlebu s pomičnim dnom in neomejenim dotokom plavin (vpliv lebdečih plavin ni upoštevan): $I_0 = 0,03-0,25$ $\frac{d_{V90}}{d_{V30}} < 8,5$ | Strmi prodonosni vodotoki srednje relativne hrapavosti: $0,006 < I_0 < 0,20$ $3 < Z_{90} < 10$ |
| VGI (1984) | $\frac{v}{v_*} = 5,75 \log \left(6 \frac{R}{k_s} \left(1 - \left(\frac{0,4 I_w k_s}{R}\right)^{0,4}\right)\right)$ $k_s = d_{V90} \dots$ enakomerna peščena hrapavost - po Nikuradseju [m] – v prodonosnih vodotokih | Manningov koeficient trenja n izražen s pripadajočo relativno hrapavostjo in na osnovi dolgoletnih opazovanj definirani vplivi razpenjenosti | Strmi naravni prodnati vodotoki s srednjo relativno hrapavostjo: $I_0 < 0,20$ $5 < \frac{R}{k_s} < 50$ |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 2

| Avtor | Enačba in opis | Področje uporabe in originalnih raziskav | Interval uporabe |
|------------------------------|--|---|---|
| Kellerhals-Day (1973) | $a = 0,900 B_w^{0,472}$ $b = 0,252 B_w^{0,137} I_{doline}^{-0,0882}$ $v = f_w \left(\frac{1}{b} - 1\right) a \left(-\frac{1}{b}\right)$ f_w ... površina pretočnega prereza struge [m ²] B_w ... širina površine vodnega toka [m] I_{doline} ... padec dna doline, po kateri teče vodotok [-] | Terenske meritve strmih vodotokov oblike stopnja-tolmun, ki sami izoblikujejo v nanešenih naplavinah svojo strugo in v splošnem ne premikajo dna, razen v primeru izredno visokih voda | $I_0 < 0,15$ $[k_s] = [B_w]$ |
| Ruf (1988) | $v = 1,22 Q_w^{0,51} d_{v70}^{-0,51} I_0^{0,5} \approx 1,23(Q_w d_{v70}^{-1} I_0)^{1/2}$ $v \approx 1,51 f_w I_0 d_{v70}^{-1}$ I_0 ... padec dna struge [-] Q_w ... pretok vode [m ³ /s] skozi prerez f_w [m ²] | Terenske meritve pretočnih hitrosti v nereguliranih vodotokih stabilnega dna s pomočjo soli: dolžine odsekov 175–1255 m, $d_{v90} = 0,35$ –1,85 m Pretoki voda: $Q = 0,002$ –3,5 $\frac{m^3}{s}$ Nakloni: $I_0 = 0,09$ –0,48 | Velika relativna hrapavost |
| Bathurst (1978) a) | $\frac{v}{v_*} = \left(\frac{R}{0,365 d_{v84}}\right)^{2,34} \left(\frac{B_w}{h_w}\right)^{7(\lambda-0,08)}$ $\lambda = 0,139 \log\left(1,91 \frac{d_{v84}}{R}\right)$... zgoščenost hrapavosti v_T na dnu struge [-] B_w ... širina površine vodnega toka [m] h_w ... srednja pretočna globina vodnega toka [m] | Terenske meritve naravnih vodotokov: $I_0 = 0,004$ –0,100 $n = 0,04$ –0,20 $[B_D] \gg [d_{v84}] = [h_w]$ | Naravne struge s samicami $\frac{R}{d_{v84}} < 1,2$ |
| Bathurst (1979) b) | $\frac{v}{v_*} = (1,842 \left(\frac{B_w}{d_{v84}}\right) \log\left(\frac{R}{1,2 d_{v84}}\right) + 14,66) \left(\frac{B_w}{h_w}\right)^{7(\lambda-0,08)}$ $\lambda = 0,139 \log\left(1,91 \frac{d_{v84}}{R}\right)$... zgoščenost hrapavosti [-] | Dodatne terenske, laboratorijske meritve k že prej opravljenim meritvam | Naravne struge s samicami $1,2 < \frac{R}{d_{v84}} < 4$ |
| Bathurst (1982) c) | $\sigma = \log\left(\frac{h_{84}}{h_{50}}\right)$ $\beta = 0,684 \sigma^{-0,134}$ σ ... standardna deviacija zrnivosti plavin v dnu struge (-) h_n ... po številu iz vrednotena krajša os n-odstotnega zrna [m] $b = (1,175 \left(\frac{b_{50}}{B_w}\right)^{0,557} \left(\frac{h_w}{h_{50}}\right)^\beta)$... funkcija efektivne hrapavosti $\alpha = 1,025 \left(\frac{\beta_w}{b_{50}}\right)^{0,118}$... zgoščenost hrapavosti dna struge (-) b_{50} ... po številu iz vrednotena, prečno na vodni tok merjena os 50 % zrna [m] B_w ... širina površine vodnega toka [m] Fr ... Frouddovo število [-] $\frac{v}{v_*}$ $= (0,28 \frac{Fr}{b}) \log\left(\frac{0,755}{b}\right) (13,4 \left(\frac{B_w}{b_{50}}\right)^{0,492} b^\alpha) \left(\frac{B_w}{h_w}\right)^{-b}$ | Teoretična zasnova računa upora toka vode pri veliki relativni hrapavosti: elementi hrapavosti povzročajo upor oblike in upor zaradi deformacije vodne gladine (vodni skok) – oba vpliva sta izražena s pomočjo geometrije hrapavosti dna in geometrije struge same – opravljene meritve v laboratorijskem žlebu s stabilnim dnom | Hrapave struge z gosto zloženimi elementi hrapavosti približno pol-eliptične prečne oblike in neenakomerne zrnivosti: $0,599 < \frac{h_{50}}{d_{50}} < 0,728$ $0,047 < \sigma < 0,187$ $0,41 < \frac{h_w}{h_{50}} < 12,10$ $0,1 < b < 1,0$ $13 < \frac{B_w}{h_w} < 153$ $0,02 < I_t < 0,08$ $0,19 < Fr < 1,93$ $10^3 < Re < 4,4 \cdot 10^4$ $1,29 < \left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} < 7,47$ |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 2

| Avtor | Enačba in opis | Področje uporabe in originalnih raziskav | Interval uporabe |
|-------------------------------|---|---|--|
| Bathurst (1985) | $\frac{v}{u^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 5,62 \log\left(\frac{h}{d_{84}}\right) + 4$ $\frac{h}{d_{84}} \dots \text{relativna potopitev dna}$ | Raziskave v naravnih vodotokih | $0,004 \leq I_0 \leq 0,04$ $0,06 \leq f \leq 5,5$ $0,17 \leq v \leq 3,6 \text{ m/s}$ |
| Kaufmann (1987) | <p>A: $\frac{v}{u^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 0,62 \ln\left(\frac{h_{th}}{h_{res}}\right)$ $h_{th} \dots$ srednja globina globočnice [m] $h_{res} \dots$ ostala (rezidualna) globina globočnice [m]</p> <p>B: $\frac{v}{u^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = \ln\left(\frac{h_{th}}{\sigma_h}\right)^{0,92}$</p> | Raziskave v naravnih vodotokih tipa kaskade in stopnja-tolmun, upoštevana je prisotnost zaplavnega lesa $Q = 0,019\text{--}0,62 \text{ m}^3/\text{s}$ $V = 0,065\text{--}0,29 \text{ m/s}$ $f = 2\text{--}87$ Zaplavni les: 1–63 m ³ /100 metrov odseka Premer prevladujočih zrn: 0,10–0,35 m | $0,026 \leq I_0 \leq 0,083$ $0,12 \leq h_{th} \leq 0,27 \text{ m}$ $2,3 \leq w \leq 4,6 \text{ m}$ $17 \leq w/h_{th} \leq 29$ $1,5 \leq \frac{h_{th}}{\sigma_h} \leq 5,3$ |
| Rickenmann (1994) | Rickenmann 1: $v = 0,37 \frac{g^{0,33} Q^{0,34} I_0^{0,2}}{d_{90}^{0,35}}$ $\frac{1}{n} = 0,56 \frac{g^{0,44} Q^{0,11}}{I_0^{0,33} d_{90}^{0,45}}$ Rickenmann 2: $v = 0,96 g^{0,36} Q^{0,29} I_0^{0,35} d_{90}^{-0,23}$ | Za osnovo je vzel lastne meritve in meritve tudi drugih raziskovalcev, nekaj tudi na deloma reguliranih odsekih; iz teh podatkov je nato svojo enačbo, ki jo je razvil z laboratorijskimi poskusi v prejšnji raziskavi, priredil za vodotoke | Rickenmann 1: Interval uporabe: $0,008 < I_0 < 0,63$ $0,03 \leq Q \leq 140 \text{ m}^3/\text{s}$ $0,05 \leq d_{90} \leq 2,1 \text{ m}$ $0,4 \leq h/d_{90} \leq 4$ Rickenmann 2: Interval uporabe: $I_0 < 0,008$ $0,3 \leq Q \leq 2400 \text{ m}^3/\text{s}$ $0,03 \leq d_{90} \leq 0,81 \text{ m}$ $1,0 \leq h/d_{90} \leq 100$ |
| Rice et al. (1998) | $n = 0,029 (d_{50} I_0)^{0,147}$ d_{50} v [mm] V obliki z Darcy-Weisbachovim koeficientom hrapavosti: $\frac{v}{u^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 5,1 \log\left(\frac{h}{d_{84}}\right) + 6$ | Raziskave izvedene v laboratoriju: $0,025 < I_0 < 0,333$ $52 \leq d_{50} \leq 278 \text{ mm}$ Uporabili lomljenec, brez zaplavnega lesa | Za konstruirane kanale z lomljenecem $0,025 < I_0 < 0,333$ $0,16 \leq f \leq 0,82$ |
| Lee in Ferguson (2002) | $\sqrt{\frac{1}{f}} = 1,48 \left(\frac{R}{d_{84}}\right)^{1,80}$ $\frac{v}{u^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 4,19 \left(\frac{R}{d_{84}}\right)^{1,80}$ d_{84} je velikost zrn v stopnjah | Raziskave na terenu (z malo zaplavnega lesa) ter v laboratoriju, za dopolnitev terenskih Na terenu: $v = 0,7\text{--}2,1 \text{ m/s}$ V laboratoriju: $v = 0,02\text{--}0,67 \text{ m/s}$ V laboratoriju zrna velikosti od 4 do 64 mm $d_{50} = 16 \text{ mm}$ in $d_{84} = 32 \text{ mm}$ | Za prodnate vodotoke kaskadnega tipa in tipa stopnja-tolmun $0,027 < I_0 < 0,184$ $0,5 \leq f \leq \sim 5000$ $Q = 0,6\text{--}3,8 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Aberle in Smart (2003) | $\frac{v}{u^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 0,91 \frac{h}{\sigma_z}$ $v = 0,96 g^{0,2} I_0^{0,2} q^{0,6} \sigma_z^{-0,4}$ $q =$ specifični pretok na enoto širine | Razvita je bila v laboratoriju, širina struge pa je bila konstantna; ne upošteva prisotnosti zaplavnega lesa Plavine so bile velikosti $1 \text{ mm} < d < 64 \text{ mm}$ in $1 \text{ mm} < d < 32 \text{ mm}$ dobro granulirane $0,02 \leq I_0 \leq 0,10$ | Hrapave površine, ki vsebujejo tip struge stopnja- tolmun; kljub temu, da ne upošteva zaplavnega lesa, se pogojno lahko uporabi tudi takrat, ko je prisoten v stopnjah $0,75 \leq h/\sigma_z \leq 12$ $\sim 0,07 \leq f \leq \sim 6$ $\sim 0,1 \leq v \leq \sim 1,1 \text{ m/s}$ |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 2

| Avtor | Enačba in opis | Področje uporabe in originalnih raziskav | Interval uporabe |
|-------------------------------|--|---|--|
| Comiti et al. (2007) | $f = 87,1 q^{*-0,50} I_f^{1,83}$ $v^* = 0,92 q^{*0,66}$ $q^* = \frac{q}{\sqrt{gd_c^3}} \quad d_c = d_{84}$ q^* = brezdimenzijski enakomerni pretok $v^* = \frac{v}{\sqrt{gd_c}} \dots$ brezdimenzijska hitrost | Tolmuni so bili v raziskavah precej neizraziti; samo za prodnate vodotoke z zelo malo zaplavnega lesa | Struge tipa stopnja-tolmun $0,08 \leq I_0 \leq 0,21$ $Q = 0,08-1,86 \text{ m}^3/\text{s}$ $v = 0,2-1,4 \text{ m/s}$ $1,8 \leq f \leq 28$ |
| Ferguson (2007) | $v^* = a_1^{0,6} q^{*0,4} I_0^{0,3}$ za globoke vodotoke $v^* = a_2^{0,4} q^{*0,6} I_0^{0,2}$ za plitve vodotoke $v^* = \frac{v}{\sqrt{gd_c}}$ Ugotovil je, da sta najboljše vrednosti za a_1 in a_2 : $a_1 = 4,8 \quad a_2 = 2,5$ | Uporabljeni podatki terenskih meritev več predhodnih raziskovalcev; posebna pozornost posvečena obnašanju globokih tokov | Gramoznati in prodnati vodotoki, tudi tipa stopnja tolmun, vendar pa ni primerno za vodotoke z zaplavnim lesom $0,0007 \leq I_0 \leq 0,21$ $\sim 0,03 \leq v \leq \sim 3 \text{ m/s}$ |
| Kaufmann et al. (2008) | $\frac{f}{8} = 1,21 h_{res}^{1,08} (h_{res} + W_d)^{0,638} h_{th}^{-3,32}$ $\frac{v}{u^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 0,91 h_{res}^{-0,54} (h_{res} + W_d)^{-0,319} h_{th}^{1,66}$ $W_d \dots$ srednja višina lesa [m] $W_d =$ volumen lesa / omočeni obod struge pri pretoku, ki zapolni celotno območje glavne struge $h_{res} \dots$ ostala globina globočnice [m] $h_{th} \dots$ srednja globina globočnice [m] | Upošteva zaplavni les, raziskave pa so narejene v strugah | $Q = 0-2,12 \text{ m}^3/\text{s}$ $0,026 \leq I_0 \leq 0,08$ $0,27 \leq h_{th} \leq 2,6 \text{ m}$ $0,0085 \leq h_{res} \leq 0,74 \text{ m}$ $0,00 \leq h_{res}/h_{th} \leq 0,40$ $2 \leq f \leq 87$ Zaplavni les: 6–97 kosov/100 m |
| Comiti et al. (2009) | $v^* = 1,24 q^{*0,83}$ | Ne upošteva zaplavnega lesa, prisotnih je nekaj večjih kamnov do premera 203 mm, meritve pa so bile opravljene v laboratorijskem kanalu | $Q = 0,0056-0,091 \text{ m}^3/\text{s}$ $v = 0,1-1,2 \text{ m/s}$ $0,08 < I_0 < 0,14$ |
| Zimmermann (2010) | $v^* = 1,45 q^{*0,55} I_0^{0,32}$ $q^* = \frac{q}{\sqrt{gd_c^3}} \quad d_c = d_{84}$ q^* = brezdimenzijski enakomerni pretok $v^* = \frac{v}{\sqrt{gd_c}} \dots$ brezdimenzijska hitrost | Raziskave v laboratoriju, zrna večja od 2 mm Dve mešanici zrn: $d_{84} = 26.5 \text{ mm}$ in $d_{84} = 63 \text{ mm}$. Vzeti sta bili iz dejanskega vodotoka, ni upoštevanega zaplavnega lesa | Samostojno oblikovane kaskade in struge tipa stopnja-tolmun, majhne relativne globine $0,03 < I_0 < 0,21$ $0,17 \leq v \leq 1,07 \text{ m/s}$ |

4 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem se seznanil s hidravličnimi osnovami, ki so značilne za strme struge. V njih je uporabnost najbolj prepoznavnih Manningove in de Chezyjeve enačbe zelo omejena, ker imamo v strmih strugah pogost večfazen tok, torej mešanico vode, zračnih mehurčkov, zaplavnega lesa, premikajočega peska in tako dalje. Za take okoliščine pa sta ti dve enačbi neprimerni, saj ne podata realnih rezultatov. Za to okolje je bilo razvito večje število empiričnih in polempiričnih enačb, ki pa so uporabne večinoma v precej ozkem območju.

Same enačbe nam seveda nič ne pomenijo, če nimamo dobrih vhodnih podatkov. Zato potrebujemo kvalitetno analizo lastnosti strmega vodotoka. Sem sodi analiza topografije povodja in geometrijske lastnosti strug. V Sloveniji je v pripravi LiDAR posnetek celotne države, s čimer bo sama analiza povodij precej olajšana in cenejša, ko bo posnetek izdelan. Geometrijske karakteristike strug, sestava plavin, njihova velikost in količina zaplavnega lesa so ene bistvenih lastnosti, saj vplivajo na hrapavost, ki ja ena težje določljivih lastnosti, hkrati pa ena bolj pomembnih. Poleg vsega tega pa potrebujemo tudi analize pretokov in hitrosti vodotoka. Kot najprimernejšo metodo za izračun povprečne hitrosti in pretoka ocenjujem metodo sledenja s soljo, saj nas v strmih strugah zanimajo povprečne hitrosti, ki pa običajno ne morejo biti merjene zgolj na enem preseku, saj imamo večinoma vodotoke tipa stopnja-tolmun in kaskade, kjer hitrost stalno variira. Poleg tega gre za poceni, hitro izvedljivo metodo, pri kateri ni potrebno fizično iti v vodotok, kar je velika prednost pred ostalimi metodami merjenja, sploh v strmih strugah, kjer je to lahko zelo nevarno početje. Seveda pa imajo tudi druge metode v določenih okoliščinah prednost. Iz kvalitetno pridobljenih podatkov lahko nato tudi z večjo natančnostjo uporabljamo enačbe.

Pri teh enačbah ne moremo jasno reči, katera je najboljša in katera najslabša. Praktično vse enačbe se v okoliščinah, v katerih so njihovi avtorji delali raziskave, dokaj dobro obnašajo. Enačbe, ki se zanašajo samo na relativno potopljenost plavin, se slabo obnašajo, sicer pa je ta parameter lahko dober pokazatelj razmer, če ne celo eden izmed boljših, saj zajame tudi največje plavine. Uporaba brezdimenzijske hitrosti in pretoka se je izkazala za manj primerno zaradi predpostavke, da je d_c ekvivalenten z d_{84} , saj se v zadnjih raziskavah za ta parameter ocenjuje, da slabše opisuje razmere. Ocena koeficienta hrapavosti je ena težje določljivih količin v hidravliki strmih strug, vendar pa ima velik pomen. Ravno zaradi relativne hrapavosti imajo različne enačbe različna območja uporabe.

VIRI IN LITERATURA

Aberle, J., Smart, G.M. 2003. The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. *J. Hydraul. Res.* 41, 3: 259–269.

AnHydre. 2012. Courantomètre moulinet Doppler Sontek. France. AnHydre.
<http://www.hellopro.fr> (Pridobljeno 26. 7. 2012.)

ASLO. 2008. Rhodamine Tracer Addition to Sawtooth Mountain Stream. USA. ASLO.
<http://www.aslo.org/photopost/showphoto.php/photo/1586/title/rhodamine-tracer-addition-to-sawtooth-mountain-stream/cat/504> (Pridobljeno 1. 8. 2012.)

Bathurst, J.C. 1978. Flow resistance of large-scale roughness. *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.* 104, HY12: 1587–1603.

Bathurst, J.C. 1985. Flow resistance estimation in mountain rivers. *J. Hydraul. Eng.* 111, 4: 625–643.

Boiten, W. 2000. *Hydrometry*. Rotterdam, A.A. Balkema: 244 str.

Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999. *Vodne ujme*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.

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

Claydon, J.F. 2011a. Broad crested weir,. ZDA. Claydon, J.F.
http://www.jfccivilengineer.com/broad_crested_weir.htm (Pridobljeno 26. 7. 2012.)

Claydon, J.F. 2011b. Sharp crested weir,. ZDA. Claydon, J.F.
http://www.jfccivilengineer.com/sharp_crested_weir.htm (Pridobljeno 26. 7. 2012.)

Comiti, F., Mao, L., Wilcox, A., Wohl, E.E., Lenzi, M.A. 2007. Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *J. Hydrol.* 340, 1-2: 48–62.

Comiti, F., Andreoli, A., Mao, L., Lenzi, M.A. 2008. Wood storage in three mountain streams of the Southern Andes and its hydro-morphological effects. *Earth Surf. Process. Landforms.* 33, 2: 244–262.

Comiti, F., Cadol, D., Wohl, E. 2009. Flow regimes, bed morphology, and flow resistance in self-formed step-pool channels. *Water Resour. Res.* 45, W04424: 18 str. doi: 10.1029/2008WR007259

Ferguson, R. 2007. Flow resistance equations for gravel-and boulder-bed streams. *Water Resour. Res.* 43, W05427: 12. doi: 10.1029/2006WR005422

Flow-tronic. 2003. *Manual for flo-tracer*. Belgium. Flow-tronic: 25 str.
<http://www.flow-tronic.com> (Pridobljeno 26. 7. 2012.)

Hey, R.D. 1979. Flow resistance in gravel-bed rivers. *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.* 105, 4: 365–379.

G. B. International. 2008. *Laser Digital Theodolite*. USA. G. B. International
<http://www.gb-international.com/laser-digital-theodolite-1948.html> (Pridobljeno 27. 7. 2012.)

Grangeo. 2012. *LIDAR*. Slovenija. Grangeo.
<http://www.grangeo.si/LIDAR.htm> (Pridobljeno 29. 8. 2012.)

Jarrett, R.D. 1987. Errors in slope-area computations of peak discharges in mountain streams. *J. Hydrol.* 96, 1-4: 53–67.

Kaufmann, P.R. 1987. Channel Morphology and Hydraulic Characteristics of Torrent-Impacted Forest Streams in the Oregon Coast Range, USA. Doctoral Dissertation. Corvallis, Oregon State University (samozaložba P. R. Kaufmann): 235 f.

Kaufmann, P.R., Faustini, J.M., Larsen, D.P., Shirazi, M.A. 2008. A roughness corrected index of relative bed stability for regional stream surveys. *Geomorph.* 99, 1-4: 150–170.

Keulegan, G.H. 1938. Laws of turbulent flow in open channels. *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 21, 6: 707–741.

Kobold, M. 2008. Katastrofalne poplave in visoke vode 18. Septembra 2007. *Ujma* 22: 65–75.
<http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2008/065.pdf> (Pridobljeno 4. 5. 2012.)

Lee, A.J., Ferguson, R.I. 2002. Velocity and flow resistance in step-pool streams. *Geomorph.* 46, 1-2: 59–71. doi: 10.1016/S0169-555X(02)00054-5

Marcus, W.A., Roberts, K., Harvey, L., Tackman, G. 1992. An evaluation of methods for estimating Manning's n in small mountain streams. *Mt. Res. Dev.* 12, 3: 227–239.

Mejak, A. 2010. Primerjava meritev pretokov na manjšem vodotoku z Dopplerjevim merilnikom in metodo razredčenja. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Mejak): 103 f.
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/283/> (Pridobljeno 4. 5. 2012.)

Mikoš, M. 1989. Metode vrednotenja srednjih pretočnih hitrosti vode v naravnih vodotokih. *Gradb. vestn.* 38: 16–23.

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

Mikoš, M., Krajnc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2002. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. *Acta hydrotechnica* 20, 32: 3–325.
<http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/acta/> (Pridobljeno 14. 8. 2012.)

Nared, M. 2009. Ljubljana: Po tekočini se lahko tudi sprehaja. Slovenija. MMC RTV SLO
<http://www.rtv slo.si/znanost-in-tehnologija/ljubljana-po-tekocini-se-lahko-tudi-sprehaja/204102>
(Pridobljeno 14. 8. 2012.)

Newtonska tekočina. 2011.
http://sl.wikipedia.org/wiki/Newtonska_teko%C4%8Dina (Pridobljeno 14. 8. 2012.)

Poljanec, N. 2011. Analiza intenzivnosti padavin v Sloveniji. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta (samozaložba N. Poljanec): 64 f.
http://www.digitalna-knjiznica.bf.uni-lj.si/vs_poljanec_nejc.pdf (Pridobljeno 26. 7. 2012.)

Rice, C.E., Kadavy, K.C., Robinson, K.M. 1998. Roughness of loose rock riprap on steep slopes. *J. Hydraul. Eng.* 124, 2: 179–185.

Rickenmann, D. 1994. An alternative equation for the mean velocity in gravel-bed rivers and mountain torrents. V: Cotroneo, G.V., Rumer, R.R. (ur.). Hydraulic Engineering '94: Proceedings of the 1994 Conference, vol. 1. ASCE, New York.

Rusjan, S. 2012. Diplomsko delo (online). Sporočilo za: Mohorič, N. (20. 7. 2012). Osebna komunikacija.

Sinergise. 2011. Geopedia, opozorilna karta poplav. Slovenija. Sinergise.
<http://www.geopedia.si> (Pridobljeno 26. 7. 2012.)

SL 0281 hidrometrično krilo. 2012.
<http://hydrologie.org/glu/SL/GF0281SL.HTM> (Pridobljeno 27. 7. 2012.)

»Slovenka«. 2010. Najteže poplave u Sloveniji u proslosti. Serbia. www.serbianmeteo.com.
<http://www.serbianmeteo.com> (Pridobljeno 1. 8. 2012.)

Smart, G.M., Jaeggi, M.N.R. 1983. Sediment transport on steep slopes. Versuchsanstalt fur Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Mitteilungen 64, ETH Zurich: 191 f.

Snell, M. 2012. Biomonitoring Overview. EdenDTC, A National Demonstration Test Catchment, objavljeno 17. 2. 2012.
<http://www.edendtc.org.uk/2012/02/biomonitoring-overview/> (Pridobljeno 26. 7. 2012.)

SonTek. 2002. Flow Tracker Handheld ADV Operation Manual Firmware Version 2.3. San Diego, SonTek/YSI: 98 str.
<http://www.sontek.com> (Pridobljeno 4. 5. 2012.)

SPAR Point Group staff. 2009. Leica Geosystems HDS Launches ScanStation C10 All-in-One Scanner, Encourages Surveyors to Expand Portfolio Now. USA. SPAR Point Group.
http://www.sparpointgroup.com/News/2009_sept02_Leica-Geosystems-HDS-Launches-ScanStation-C10-All-in-One-Scanner,-Encourages-Surveyors-to-Expand-Portfolio-Now/ (Pridobljeno 27. 7. 2012.)

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

Thompson, S.M., Campbell, P.L. 1979. Hydraulics of a large channel paved with boulders. J. Hydraul. Res. 17, 4: 341–354.

Tipping bucket rain gauge. 2012.
http://en.wikipedia.org/wiki/Tipping_bucket_rain_gauge#Tipping_bucket_rain_gauge (Pridobljeno 1. 8. 2012.)

Unidata. 2012. Ultrasonic Doppler Instrument. Australia. Unidata.
<http://www.unidata.com.au> (Pridobljeno 4. 5. 2012.)

U.S. Geological Survey. 2012. Monitoring the Effectiveness of Urban Best Management Practices in Improving Water Quality of Englesby Brook, Burlington, Vermont. USA. U.S. Geological Survey.
<http://vt.water.usgs.gov> (Pridobljeno 26. 7. 2012.)

Wilcox, A.C. 2005. Interactions between flow hydraulics and channel morphology in step-pool streams. Doktorska disertacija. Fort Collins, Colorado State University, Department of Geosciences (samozaložba A. C. Wilcox): 218 f.

Wild fish Montana initiative. 2002. 1997-2001 Effectiveness Monitoring Report, Substrate composition and quality. USA. Wild fish Montana initiative.
http://wildfish.montana.edu/Cases/pdfs/redriver/RRMRP_97-01_Ch6_3.pdf (Pridobljeno 15. 8. 2012.)

Yochum, S., Bledsoe, B. 2010. Flow resistance estimation in high-gradient streams, pripravljeno za 4th Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, 27. junij–1. julij, 2010, Riviera Hotel, Las Vegas, Nevada, USA: 12 str.

Yochum, S.E., Bledsoe, B.P., David, G.C.L., Wohl, E. 2012. Velocity prediction in high-gradient channels. *J. Hydrol.* 424–425: 84–98. doi: [10.1016/j.jhydrol.2011.12.031](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.031)

Zimmermann, A. 2010. Flow resistance in steep streams: An experimental study. *Water Resour. Res.*, 46, W09536: 18 str. doi: [10.1029/2009WR007913](https://doi.org/10.1029/2009WR007913)