

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., 2015. Analiza vzdolžnih padcev hudourniških strug. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Mikoš, M., somentor Grigillo, D.): 117 str.

Datum arhiviranja: 01-04-2015

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Mohorič, N., 2015. Analiza vzdolžnih padcev hudourniških strug. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Mikoš, M., co-supervisor Grigillo, D.): 117 pp.

Archiving Date: 01-04-2015

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM DRUGE STOPNJE  
VODARSTVO IN OKOLJSKO  
INŽENIRSTVO**

Kandidat:

**NEJC MOHORIČ**

**ANALIZA VZDOLŽNIH PADCEV HUDOURNIŠKIH  
STRUG**

Magistrsko delo št.: 2/II.VOI

**ANALYSIS OF LONGITUDINAL PROFILES OF  
TORRENTIAL CHANNELS**

Graduation – Master Thesis No.: 2/II.VOI

**Mentor:**

prof. dr. Matjaž Mikoš

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Dušan Žagar

**Somentor:**

asist. dr. Dejan Grigillo

Ljubljana, 30. 03. 2015

---

**STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA:**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani Nejc Mohorič izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom »Analiza vzdolžnih padcev hudourniških strug«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 4. 3. 2015

Nejc Mohorič

---

## BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	UDK/UDC: 551.311.21:627.152.3(497.4)(043.3)
Avtor:	Nejc Mohorič, dipl. inž. grad. (UN)
Mentor:	prof. dr. Matjaž Mikoš
Somentor:	asist. dr. Dejan Grigillo
Naslov:	Analiza vzdolžnih padcev hudourniških strug
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	117 str., 11 pregl., 25 sl., 30 graf., 44 en.
Ključne besede:	stopnje-tolmuni, kaskade, moč vodnega toka, padci hudourniških strug, vzdolžni profili, Zgornjesavska dolina, erozijska aktivnost, hudourniki

### Izveleček

V magistrskem delu je prikazana vloga velikih padcev v hudourniških strugah. Zbrani so izsledki raziskav različnih avtorjev. Opisane so karakteristike značilnih geomorfoloških oblik strug, ki se pojavljajo v hudourniških območjih. Poleg tega so predstavljene funkcije lesa, procesov erozije, transporta in akumulacije plavin, hidroenergetskega potenciala ter moči vodnega toka kot parametra za oceno potrošnje energije v strugi.

Obravnavanih je 34 hudournikov na pobočju Karavank v Zgornjesavski dolini. Na bolj dostopnih predelih je bil izveden terenski ogled. Opisana je metoda analize vzdolžnih profilov in porečij s programskim orodjem ArcGIS. Primerjana je uporabnost DMV 12,5, DMV 5 ter DMV s prostorsko ločljivostjo 1 m in 0,5 m pridobljenih iz podatkov lidarskega snemanja. S pomočjo rezultatov pridobljenih iz lidarskih DMV je predstavljena možnost ocene geomorfoloških oblik struge ter periodičnost spreminjanja lokalnih padcev na krajših odsekih. Izdelani so celotni vzdolžni profili, iz njih pa je ocenjena erozijska aktivnost v prihodnosti. Izvedene so različne variante normiranja vrednosti višinskih razlik in dolžin hudournikov, tako pridobljenim rezultatom pa so podane mejne vrednosti z ovojnico. Analizirana je tudi moč vodnega toka na štirih hudournikih in njeno spreminjanje vzdolž struge.

---

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

UDC: UDK/UDC: 551.311.21:627.152.3(497.4)(043.3)  
Author: Nejc Mohorič, B. Sc.  
Supervisor: Matjaž Mikoš, Ph.D., Prof.  
Cosupervisor: Dejan Grigillo, Ph.D., Assist. Prof.  
Title: Analysis of Longitudinal Profiles of Torrential Channels  
Document type: Master Thesis  
Notes: 117 p., 11 tab., 25 fig., 30 graph., 44 eq.  
Key words: step-pools, stream power, drops in mountain streams, longitudinal profiles, Upper Sava Valley, erosional activity, torrents

**Abstract**

This master thesis presents the role of high gradients (slopes) in torrential streams. Results of previous researches by different authors are collected, followed by the descriptions of the characteristics of typical geomorphologic forms of channels in torrential areas. Functions of instream wood, erosion, transport and accumulation of sediment, hydropower potential, and stream power as parameter for energy dissipation in stream are also shown.

The thesis discusses thirty-four torrential streams on the slopes of Karavanke in the Upper Sava Valley, Eastern Alps. Field examination of individual, more accessible reaches has been made. The method for analysis of longitudinal profiles of streams and basins with ArcGIS software tools is described. The usability of DEM 12.5, DEM 5 and LiDAR DEM with spatial resolution 0.5 and 1 meter is compared. From the results obtained from LiDAR DEM, the possibility of identifying the geomorphologic forms in streams and the periodic changing of local slopes on shorter sections is discussed. Whole longitudinal profiles are produced and their future erosion activity estimated. A few variations of normalised values of vertical drops and torrent lengths are made. The threshold of the envelope is determined for the obtained results. Finally, stream power and its changes along the stream are also analysed by examining four torrents.

## **ZAHVALA**

Za pomoč pri nastajanju magistrskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Matjažu Mikošu in somentorju asist. dr. Dejanu Grigillu.

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

**KAZALO VSEBINE**

<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....</b>	<b>IV</b>
<b>ZAHVALA.....</b>	<b>V</b>
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Namen in cilji.....</b>	<b>3</b>
<b>2 STRME HUDOURNIŠKE STRUGE .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Klasifikacija različnih geomorfoloških oblik strug .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.1 Morfološke oblike strug v naplavinski podlagi .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1.1 Kaskade.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1.2 Stopnje-tolmuni .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1.3 Ravno dno .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1.4 Brazde-tolmuni .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1.5 Dine in brazde.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.2 Koluvialne struge in struge v matični skalnati podlagi .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.3 Nepravilno oblikovane morfologije .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.4 Vmesne stopnje .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2 Vzdolžni padci struge značilni za pojavljanje posamezne morfologije .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 Podrobneje o oblikah dna strug tipa stopnja-tolmun.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.1 Kdaj in kako se oblikujejo struge tipa stopnja-tolmun .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3.2 Višina stopenj .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3.3 Razdalja med stopnjami.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3.4 Pretočne hitrosti v strugah tipa stopnja-tolmun.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.5 Upor toku vode strugah tipa stopnja-tolmun .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.6 Premeščanje plavin v strugah tipa stopnja-tolmun .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.7 Struge stopnja-tolmun v matični kamnini .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.8 Metode meritev strug tipa stopnja-tolmun .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.8.1 Izbira dolžine preiskanega odseka .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.8.2 Oblika zrn plavin in meritve transporta plavin.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.8.3 Določitev dejanske zgornje širine struge .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Les in hudourniki .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.1 Obrežni gozdovi.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.2 Račun potenciala zapadlega lesa .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5 Erozija, transport in akumulacija.....</b>	<b>27</b>
<b>2.5.1 Pojavljanje drobirskih tokov v hudournikih .....</b>	<b>31</b>
<b>2.6 Energetski potencial v hudournikih .....</b>	<b>33</b>
<b>2.6.1 Moč vodnega toka v hudournikih .....</b>	<b>33</b>
<b>2.6.2 Hidroenergetski potencial v hudournikih za hidroenergetsko izrabo.....</b>	<b>35</b>
<b>3 MATERIAL IN METODE .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 Opis obravnavanih območij .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.1 Geomorfološke oblike kot naravne vrednote .....</b>	<b>38</b>



---

<b>3.1.2</b>	<b>Geološke in geomorfološke značilnosti .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Izbrana hudourniška območja.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1.3.1</b>	<b>Hudourniško območje Završnice .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.3.2</b>	<b>Ratibovec, Srednik in Sevnik .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.3.3</b>	<b>Hudourniško območje Bele .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1.3.4</b>	<b>Hudourniško območje Javornika .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1.3.5</b>	<b>Hudourniško območje Ukove.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.3.6</b>	<b>Hudourniško območje Jesenice.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.3.7</b>	<b>Dobršnik .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.3.8</b>	<b>Presušnik .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.3.9</b>	<b>Hudourniško območje Mlince.....</b>	<b>53</b>
<b>3.1.3.10</b>	<b>Sedučnik .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1.3.11</b>	<b>Hudourniško območje Belce .....</b>	<b>54</b>
<b>3.2</b>	<b>Metoda analize .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Razvoj in podatki o digitalnih modelih višin .....</b>	<b>56</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Uporabljeni računalniška orodja.....</b>	<b>58</b>
<b>3.3</b>	<b>Hidrološke razmere.....</b>	<b>63</b>
<b>4</b>	<b>REZULTATI IN RAZPRAVA.....</b>	<b>68</b>
<b>4.1</b>	<b>Digitaliziran potek struge in izbor digitalnega modela višin .....</b>	<b>68</b>
<b>4.2</b>	<b>Analiza vzdolžnih profilov hudourniških strug z uporabo različnih digitalnih modelov višin.....</b>	<b>70</b>
<b>4.3</b>	<b>Uporaba lidarskih digitalnih modelov višin za določevanje geomorfoloških oblik in lokalnih padcev hudourniških strug .....</b>	<b>73</b>
<b>4.4</b>	<b>Vzdolžni profili hudourniških strug in erozijska aktivnost .....</b>	<b>82</b>
<b>4.5</b>	<b>Primerjava vzdolžnih profilov različnih hudournikov .....</b>	<b>91</b>
<b>4.6</b>	<b>Analiza moči vodnega toka hudournikov .....</b>	<b>97</b>
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČKI.....</b>	<b>103</b>
<b>VIRI.....</b>		<b>107</b>

---

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Skice opisanih oblik dna v tlorisu in vzdolžnem prerezu (povzeto po Montgomery in Buffington, 1997, str. 600, 601).....	7
Preglednica 2: Značilnosti posameznih odsekov in zaporedij oblik dna (Repnik, 2006, str. 43, cit. po Montgomery in Buffington, 1997).....	9
Preglednica 3: Seznam geoloških materialov (povzeto po Geološki zavod Slovenije, 2006) .....	43
Preglednica 4: Podatki o izbranih koordinatnih sistemih (Vir: ESRI, 2013; avtor: Nejc Mohorič) .....	59
Preglednica 5: Povprečna količina padavin na območju Zgornjesavske doline (povzeto po Meteo.si, 2015).....	63
Preglednica 6: Površine obravnavanih hudourniških območij, pridobljene iz DMV 5 (Vir: ESRI, 2013; avtor: Nejc Mohorič).....	66
Preglednica 7: Vrednosti ocenjenih pretokov s stoletno povratno dobo pri upoštevanju enačbe (35) .....	67
Preglednica 8: Funkcije, ki najbolj ustrezajo dejanskemu vzdolžnemu profilu posamezne hudourniške struge, ter korelacijski koeficienti .....	86
Preglednica 9: Funkcije, ki najbolj ustrezajo dejanskemu vzdolžnemu profilu posamezne hudourniške struge, ter korelacijski koeficienti .....	88
Preglednica 10: Funkcije, ki najbolj ustrezajo dejanskemu vzdolžnemu profilu posamezne hudourniške struge, ter korelacijski koeficienti .....	89
Preglednica 11: Funkcije, ki najbolj ustrezajo dejanskemu vzdolžnemu profilu posamezne hudourniške struge, ter korelacijski koeficienti .....	91

---

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Razmerje med prispevnim območjem in padcem (hudourniško območje Finney creek, Washington, ZDA) (povzeto po Montgomery in Buffington, 1997, str. 604).....	5
Grafikon 2: Prisotnost posameznih geomorfoloških oblik strug pri določenih padcih (povzeto po Montgomery in Buffington, 1997, str. 604). .....	10
Grafikon 3: Primerjava vzdolžnih padcev hudourniške struge Bele pri različnih prostorskih ločljivostih (12,5 m; 5 m; 1 m; 0,5 m) .....	72
Grafikon 4: Primerjava vzdolžnih padcev hudourniške struge Mlake pri različnih prostorskih ločljivostih (12,5 m; 5 m; 1 m; 0,5 m) .....	72
Grafikon 5: Primerjava vzdolžnih padcev hudourniške struge Dobršnik pri različnih prostorskih ločljivostih (12,5 m; 5 m).....	73
Grafikon 6: Vzdolžni profil in spreminjanje lokalnih vzdolžnih padcev na odseku hudourniške struge Bele (s črnimi puščicami so nakazane kaskade).....	75
Grafikon 7: Primerjava lokalnih padcev na odseku hudourniške struge Bele in sinusne funkcije 1 .....	76
Grafikon 8: Primerjava lokalnih padcev na odseku hudourniške struge Bele in sinusne funkcije 2 .....	77
Grafikon 9: Stopnje-tolmuni zaznani v vzdolžnem profilu in spreminjanje vzdolžnih padcev na drugem obravnavanem odseku hudourniške struge Bele (odsek Bele nad Koroško Belo) .....	78
Grafikon 10: Grafikon 9 razdeljen na tri zaporedne odseke (odsek Bele nad Koroško Belo).....	79
Grafikon 11: Primerjava lokalnih padcev in sinusne funkcije 2 (drugi obravnavani odsek hudourniške struge Bele).....	80
Grafikon 12: Primerjava lokalnih padcev in sinusne funkcije 2 za prvih 100 m opazovanega odseka (drugi obravnavani odsek hudourniške struge Bele) .....	80
Grafikon 13: Primerjava lokalnih padcev in sinusne krivulje 3 (drugi obravnavani odsek hudourniške struge Bele).....	81
Grafikon 14: Vzdolžni profili hudournikov Završnica s pritoki, Ratibovec, Srednik, Sevnik ter Bela s pritoki; podane so tudi trendne črte vseh vzdolžnih padcev .....	85
Grafikon 15: Vzdolžni profili hudournikov Javornik s pritoki, Ukova s pritoki ter Jesenica s pritoki; podane so tudi trendne črte vseh vzdolžnih padcev.....	87
Grafikon 16: Vzdolžni profili hudournikov Dobršnik, Presušnik, Mlinca s pritokom in Sedučnik; podane so tudi trendne črte vseh vzdolžnih padcev .....	89

---

Grafikon 17: Vzdolžni profili hudournika Belca s pritoki; podane so tudi trendne črte vseh vzdolžnih padcev .....	90
Grafikon 18: Vzdolžni profili hudourniških strug do vršajev .....	92
Grafikon 19: Vzdolžni profili hudourniških strug; prikaz povprečnega padca, ki bi ga imel hudournik na svoji dolžini pri neki razpoložljivi višinski razliki .....	93
Grafikon 20: Vzdolžni profili hudourniških strug; prikaz povprečnega padca, ki bi ga imel hudournik na nekem deležu svoje dolžine pri neki razpoložljivi višinski razliki .....	94
Grafikon 21: Vzdolžni profili hudourniških strug; prikaz povprečnega padca, ki bi ga imel hudournik na nekem deležu svoje dolžine pri neki razpoložljivi višinski razliki brez ekstremnih primerov hudournikov in z ovojnicami .....	95
Grafikon 22: Brezdimenzijski vzdolžni profili .....	96
Grafikon 23: Spreminjanje moči vodnega toka in padca vzdolž hudournika Bela .....	97
Grafikon 24: Spreminjanje moči vodnega toka in pretokov s 100-letno povratno dobo vzdolž hudournika Bela .....	98
Grafikon 25: Spreminjanje moči vodnega toka in padca vzdolž hudournika Sevnik .....	99
Grafikon 26: Spreminjanje moči vodnega toka in pretokov s 100-letno povratno dobo vzdolž hudournika Sevnik.....	99
Grafikon 27: Spreminjanje moči vodnega toka in padca vzdolž hudournika Bitgovec.....	100
Grafikon 28: Spreminjanje moči vodnega toka in pretokov s 100-letno povratno dobo vzdolž hudournika Bitgovec.....	100
Grafikon 29: Spreminjanje moči vodnega toka in padca vzdolž hudournika Mlinca.....	101
Grafikon 30: Spreminjanje moči vodnega toka in pretokov s 100-letno povratno dobo vzdolž hudournika Mlinca.....	102

---

## KAZALO SLIK

Slika 1: Primera geomorfoloških oblik stopenj in tolmunov v strmih strugah.....	11
Slika 2: Stopnje iz balvanov v strugi kot posledica erozije brežin .....	15
Slika 3: Vloga lesa v hudournikih.....	23
Slika 4: Model izvirnih območij zapadlega in zaplavnega lesa ter plavja (povzeto po Mazzorana, 2007, cit. po Rudolf-Miklau in Hübl, 2010, str. 870) .....	26
Slika 5: Primera erozijskih žarišč .....	28
Slika 6: Zavarovana območja in točke na izbranih hudournikih (Vir: ARSO, 2014; avtor: Nejc Mohorič).....	42
Slika 7: Kategorizacija urejanja vodotokov – geomorfološka ohranjenost z višjim razredom pada (Vir: ARSO, 2014; avtor: Nejc Mohorič).....	45
Slika 8: Završnica pred iztokom v akumulacijo na odseku, kjer je struga »ravna«.....	46
Slika 9: Sevnik in Srednik .....	48
Slika 10: Hudournik Bela .....	49
Slika 11: Hudourniško območje Javornika.....	50
Slika 12: Stopnje in tolmeni na Jesenici .....	51
Slika 13: Dobršnik .....	52
Slika 14: Hudourniške pregrade na vršaju Presušnika .....	53
Slika 15: Mlinca in Sedučnik.....	54
Slika 16: Hudourniško območje Belce.....	55
Slika 17: Prikaz postopka obdelave podatkov DMV na hudourniškem območju Mlince (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič) .....	62
Slika 18: Skica principa delovanja funkcije »Con« v rastrskem računalu (ESRI, 2012).....	63
Slika 19: Obravnavana hudourniška območja (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič).....	65

- Slika 20: Primer dobrega ujemanja rezultatov z dejanskim stanjem (struga pridobljena iz DMV 12,5 je zelena linija, iz DMV 5 je rumena linija, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 1 m je vijoličen, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 0,5 m je rdeč, linija hudournika po DTK 5 pa je modra linija) (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič) .....69
- Slika 21: Primer slabega ujemanja rezultatov z dejanskim stanjem (struga pridobljena iz DMV 12,5 je zelena linija, iz DMV 5 je rumena linija, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 1 m je vijoličen, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 0,5 m je rdeč, linija hudournika po DTK 5 pa je modra linija) (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič) .....70
- Slika 22: Začetek linije na odseku Bele (struga pridobljena iz DMV 12,5 je zelena linija, iz DMV 5 je rumena linija, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 1 m je vijoličen, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 0,5 m je rdeč, linija hudournika po DTK 5 pa je modra linija) (Vir: ESRI, 2013; avtor: Nejc Mohorič).....71
- Slika 23: Naključno izbran odsek hudourniške struge Bele nad sotočjem s Čiklo (modra barva je struga pridobljena iz rastra 0,5 m, rdeča 1,0 m, svetlo modre pa so struge po DTK5) (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič).....74
- Slika 24: Drugi obravnavani odsek hudournika Bela (podatki iz rastra 0,5 m so označeni z rdečo, modra je pozicija struge po DTK 5) (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič)....77
- Slika 25: Različne oblike vzdolžnih profilov hudourniških strug (a – uravnoteženi vzdolžni profil, b – profil aktivnega odnašanja in nasipavanja dna, c – izprani vzdolžni profil v matični kamnini, d – vzdolžni padec po enem izmed postopkov projektiranja (Gavrilović, 1972, str. 147) .....84

---

## KRATICE

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
DMV	digitalni model višin
DMR	digitalni model reliefa
DTK	digitalna topografska karta
ETRS 1989	European Terrestrial Reference System 1989 – geodetsko kartezično referenčno orodje, ki predpostavlja, da je Evrazijska plošča kot celota statična
ESRI	Environmental System Research Institute – servisno orientirano podjetje, ki razvija programsko opremo s področja geografskih informacijskih sistemov in aplikacije za področje upravljanja geoDBMS
EU	Evropska unija
EVRS	European Vertical Reference System – evropski vertikalni referenčni sistem
GIS	geografski informacijski sistem
GK	Gauß-Krügerjeva kartografska projekcija
GNSS	global navigation satellite system – globalni navigacijski satelitski sistem
GURS	Geodetska uprava Republike Slovenije
HE	hidroelektrarna
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
INS	inertial navigation system – inercialni navigacijski sistem
mHE	mala hidroelektrarna
NUPB	neuradno prečiščeno besedilo
SCI	direktiva o habitatih
SCS	Soil Conservation Service
SPI	direktiva o pticah
TM	transverzalna Mercatorjeva kartografska projekcija
TTN	temeljni topografski načrt
ZON	Zakon o ohranjanju narave
ZV	Zakon o vodah

**SIMBOLI**

- $a, b$  konstanti v enačbi za razdaljo med stopnjami [-]
- $a, n$  neodvisna koeficienta za oceno magnitudi drobirskega toka [-]
- $A$  površina prispevnega območja [ $m^2$ ]
- $A, \beta$  empirična koeficienta v enačbi za določitev celotnega volumna transportiranih plavin [-]
- $C$  faktor zgradbe gozda [-]
- $d_{16}, d_{30}, d_{50}, d_{84}, d_{90}$  velikost zrn plavin (lahko v tolmunu, v kolikor so plavine v stopnjah in tolmunih ločene), za katerega je 16 %, 30 %, 50 %, 84 % in 90 % materiala finejšega [m]
- $D_{16}, D_{50}, D_{84}, D_{90}$  velikost zrn plavin v stopnji, za katerega je 16 %, 50 %, 84 % in 90 % materiala finejšega [m]
- $D_i$  velikost plavin, ki označuje začetek gibanja delcev v posteljici dna [m]
- $d_m$  srednja vrednost velikosti zrn [m]
- $E$  povprečna erozijska aktivnost [ $m^3/m$ ]
- $f$  Darcy-Weisbachov koeficient hrapavosti [-]
- $Fr$  Froudovo število [-]  $Fr = \frac{v}{(g \cdot h)^{0,5}}$
- $g$  gravitacijski pospešek  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- $G_E$  celotni volumen transportiranih plavin v enem poplavnem dogodku [ $m^3$ ]
- $h$  srednja pretočna globina vode [m]
- $h_m$  globina toka mešanice plavin [m]
- $H$  višinski padec na izbranem odseku [m]
- $H_A$  višinska razlika prispevnega območja [km]
- $H_{bruto}$  bruto padec v izbrani dolžini  $L$  [m]
- $H_{max}$  višina najvišje točke hudourniškega območja [km]
- $H_{min}$  najvišja točka vršaja [km]
- $H_s$  višina stopnje [m]
- $\Delta H$  energijske izgube v dovodnem kanalu in tlačnem cevovodu objekta [-]
- $I$  povprečni padec dna struge na nekem odseku  $1 \frac{m}{m} = 1 = 100 \% = 45^\circ$  [m/m, -, %, °]
- $I_e$  padec energijske črte, pogosto izenačen s padcem gladine ali dna struge [m/m, -, %, °]
- $I_w$  padec vodne gladine, pogosto izenačen s padcem dna struge [m/m, -, %, °]
- $k$  faktor lastne erodibilnosti matične kamnine in velikostnih ter frekvenčnih karakteristik toka [-]
- $k$  konstanta v enačbi za značilno konkavno obliko vzdolžnih profilov vodotokov [-]
- $k_{hp}$  faktor inštalacije moči, ki je razmerje med  $Q_{instalirani}$  in  $sQ_s$  [-]
- $L$  dolžina struge vodotoka ali pa razdalja med dvema točkama na vodotoku [m]
- $L_{max}$  maksimalna razdalja med stopnjami [m]
- $L_s$  razdalja med stopnjami, oziroma dolžina ene sekvence stopnje in tolmunu [m]
- $L_w$  dolžina struge vodotoka [km]
- $n$  Manningov koeficient hrapavosti [ $s/m^{1/3}$ ]
- $n$  indeks konkavnosti profila [-]
- $O$  omočen obod [m]
- $P$  vodna moč, moč vodnega toka [ $W, \text{kg m}^2/\text{s}^3$ ]
- $q$  specifični pretok na enoto širine [ $m^3/s \text{ m}$ ]  $q = Q/W$



---

$q_b$	na širinski meter dna in na sekundo premeščena prostornina plavin – sekundna specifična premestitvena zmogljivost [ $m^3/m\ s$ ]
$q_c$	kritični pretok pri začetku premeščanja [ $m^3/s\ m$ ]
$Q$	pretok vode [ $m^3/s$ ]
$Q_{100}$	pretok s stoletno povratno dobo [ $m^3/s$ ]
$Q_{es}$	minimalni ekološko sprejemljivi pretok [ $m^3/s$ ]
$Q_{HE}$	pretok uporaben za hidroenergetsko rabo [ $m^3/s$ ]
$Q_{instalirani}$	instalirani pretok hidroelektrarne [ $m^3/s$ ]
$Q_{max}$	največji možen odvzem v določenem prerezu, ki že vključuje minimalni ekološko sprejemljivi pretok $Q_{es}$ [ $m^3/s$ ]
${}_sQ_s$	srednji letni pretok [ $m^3/s$ ]
${}_sQ_{np}$	srednji nizki letni pretok [ $m^3/s$ ]
$R$	hidravlični radij $R = S/O$ [m]
$s$	razmerje med gostoto plavin in gostoto vode [-]
$s$	lokacija prečnega prereza [m]
$S$	površina prečnega prereza pretoka [ $m^2$ ]
$T_c$	kritični čas stekanja [h]
$T_p$	čas zamika med težiščem padavin in konico odtoka [h]
$v$	povprečna hitrost vode na nekem odseku [ $m/s$ ]
$V_h'$	potencial zaplavnega lesa [ $m^3$ ]
$V_{re}$	efektivni odtočni volumen [ $m^3$ ]
$V_r$	prostornina odtoka [ $m^3$ ]
$W$	širina struge [m]
$\eta_t$	izkoristek turbine [-]
$\theta$	brezdimenzijska strižna napetost [-]
$\theta_{CR}$	kritična brezdimenzijska strižna napetost [-]
$\rho$	gostota vode [ $kg/m^3$ ] $\rho \approx 1000\ kg/m^3$
$\sigma$	standardna deviacija porazdelitve velikosti plavin [-] $\sigma = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}}$
$\tau_b$	strižna napetost pri strugotvornem pretoku [ $N/m^2$ ]
$\Phi, \sigma$	konstanti v enačbi za povprečno erozijsko aktivnost $\sigma = 0,44$ in $\phi = 0,68$ [-]
$\Phi_b$	Einsteinov parameter premeščanja ali razmerje med maso premeščenih plavin in maso posameznega zrna [-]
$\omega$	specifična moč vodnega toka ali srednja moč vodnega toka ali enakomerna moč vodnega toka, izražena na enoto površine struge [ $W/m^2$ ]
$\omega_c^*$	kritična brezdimenzijska moč vodnega toka [-]
$\Omega$	razpoložljiva moč vodnega toka ali moč vodnega toka nekega prereza izražena na enoto dolžine [ $W/m$ ]

---

## SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

**Balvan** – **angl. boulder** je velika (osamljena) skala, ki jo je na mesto prinesel ledenik od drugod (SAZU, 2000). V tem delu je izraz uporabljen tudi za skale, ki so prišle v strugo kot posledica skalnih podorov na pobočjih dolin kot posledica preperevanja, ne pa ledenikov.

**Brazde-tolmuni (sin. brzice-tolmuni)** – **angl. pool-riffle** imajo valovito posteljico dna, ki definira sekvence ovir, tolmunov (jezerc) in brazd. Prečno nihanje oblik dna jih razlikuje od ostalih oblik (Montgomery in Buffington, 1997).

**Dejanska zgornja širina struge** – **angl. bankfull width** je razdalja med obema vrhoma brežin pri strugotvornem pretoku (Mikoš, 2014).

**Digitalni model reliefa (DMR)** – **angl. Digital Terrain Model (DTM)** je digitalni zapis dejanskega reliefa, ki prikazuje površje brez stavb, vegetacije ipd. Gre za kompleksno predstavitev površja, ki vsebuje višinske točke ter tudi njegov opis z nakloni, ekspozicijo, plastnicami, padnicami, točkami vrhov ter drugimi značilnimi črtami in točkami (Podobnikar, 2001).

**Digitalni model višin (DMV)** – **angl. Digital Elevation Model (DEM)** je računalniška predstavitev višin zemeljskega površja na določenem območju. Je preprostejši približek DMR z ožjim pomenom. DMV vsebuje samo višinske točke, ki so najpogosteje zapisane v obliki pravih kvadratnih celic in pogojno tvorijo ploskev zemeljskega površja. (Podobnikar, 2001).

**Dine in brazde** – **angl. dune-ripple** je izraz, ki označuje zaporedje din, ki se pojavljajo v peskonosnih vodotokih z majhnimi padci (Montgomery in Buffington, 1997).

**Globočnica (sin. globinska črta, črta dna)** – **angl. thalweg** je črta, ki povezuje najgloblje točke struge ali korita oziroma doline (Mikoš et al., 2002).

**Kaskada** – **angl. cascade** je manjši stopničasti slap (SAZU, 2000), ki definira eno enoto vertikalne spremembe oblik dna tako pri kaskadah kot stopnjah-tolmunih.

**Kaskade** – **angl. cascade channels** je izraz za morfološko obliko za struge, v katerih prevladuje disipacija energije s ponavljajočim prevračanjem in curki okrog in čez posamezne večje balvane v posteljici dna. Tolmuni so manjši. Pojavijo se pri strmih naklonih, ko so vodotoki utesnjeni med pobočja doline, posamezna kaskada ni prisotna po celi širini struge (Montgomery in Buffington, 1997).

**Padec (sin. strmec, vzdolžni naklon)** – **angl. drop (sin. longitudinal fall, slope)** je razmerje med višinsko razliko in vodoravno oddaljenostjo dveh točk (SAZU, 2000).

**Plavje** – **angl. floating woody debris** so organski in drugi plavajoči predmeti (debla, vejevje, listje, odpadki in podobno) (NUPB ZV-1, 2002).

---

**Ravna struga (sin. struga z ravnim dnom) – angl. plane-bed channel** se pojavi pri srednjih do velikih naklonih v relativno ravnih strugah, ki so pogosto omejene s pobočji dolin. Značilna je dolga ravna posteljica dna z razmeroma malo oblikami dna in je pogosto tlakovana (Montgomery in Buffington, 1997).

**Samica** je posamezna večja plavina, ki pa je lahko transportirana zgolj pri redkih ekstremnih dogodkih (Mikoš, 2014).

**Stopnje-tolmuni (sin. prag-tolmun) – angl. step-pool** so sestavljene iz stopenj in tolmunov. Stopnje tvorijo večji prodniki, ki potekajo preko celotne širine struge, tolmane pa finejši material. Ta morfologija je v glavnem povezana s strmimi padci, majhnimi razmerji med globino in širino ter omejenim prostorom ob strugi zaradi strmih pobočij doline (Montgomery in Buffington, 1997).

**Strugotvorni pretok (sin. pretočna sposobnost struge, prevodnost struge) – angl. bankfull discharge (sin. inbank capacity)** je maksimalen pretok vode v vodotoku brez prelivanja čez brežine (Mikoš et al., 2002).

**Tolmun – angl. pool** je poglobljeni del rečne struge ali jezerskega dna, kjer dela voda vrtinec (SAZU, 2000).

**Zapadli les (sin. veliko leseno plavje) – angl. large woody debris** je veliko leseno plavje, ki je lahko ob ali v strugi. Ni nujno, da je lahko premeščeno tudi ob večjih poplavnih dogodkih, a vseeno lahko vpliva na pretočne razmere v strugi (Mikoš, 2014).

**Zaplavni les – angl. instream wood** je izraz za odloženo plavje, ki na primer tvori stopnje v strugah tipa stopnja-tolmun (Mikoš, 2014).

**»Ta stran je namenoma prazna.«**

## 1 UVOD

Slovenija leži na robu Alp. Tako ima z Julijskimi Alpami, Karavankami, Kamniško-Savinjskimi Alpami in predalpskimi hribovji ter začetkom Dinarskega gorstva dobre pogoje za razvoj hudournikov, ki so prisotni v zgornjem toku vodotokov. V Sloveniji imamo okrog 400 hudourniških območij z okoli 8000 kilometri hudourniških strug (Mikoš, 2009). Za njih je značilno, da imajo velike padce, poleg tega pa je pogosto prisotna večja prodonosnost kot posledica erozije brežin in poglobljanja struge. Struge so lahko vrezane v lastne naplavine, kar je pri hudournikih nekoliko redkeje, ali pa se nahajajo v starih vodnih, ledeniških ali koluvialnih odkladninah. Pojavljajo se tudi odseki, kjer struga poteka po matični kamnini oziroma skalnati podlagi.

Hudourniška območja so izpostavljena močnemu erozijskemu delovanju kot posledica različnih procesov. Na takih področjih so prisotna razna erozijska žarišča, ki poskrbijo za vnos materiala v hudournik. Plavine v hudournikih so grobe, lahko tudi do velikosti premera skal 1 m. Zrna se že zelo kmalu po vstopu v strugo zaoblijo. Za to je odgovorna abrazija, ki kmalu po izvoru tvori elipsoidna zrna. Ker so pri velikih pretokih prisotne velike hitrosti in ker je običajno v ozkih dolinah meandriranje omejeno, so struge razpotegnjene.

Beseda hudoŕnik je izpeljana iz besedne zveze huda ura – »nevihta«, kar pomeni gorski potok, ki teče oziroma je znaten le ob nevihtah (Snoj, 1997). Za hudournike je značilen nestalni in neenakomerni tok. To pomeni, da se pretok v času zvezno spreminja, dimenzije struge in hitrost toka pa prostorsko in časovno prav tako. V hudournikih je prisotno mešanje zraka, vode in plavja. Torej imamo večdimenzionalni tok, kar povzroči, da je njihova fizikalna obravnava zelo zahtevna, poleg tega pa se zato obnašajo podobno kot nenevtonske tekočine. Obstaja tudi možnost nastanka drobirskih tokov, ki so ena izmed oblik masnega gibanja. Pojavijo se le izjemoma, vendar običajno zaradi svojih karakteristik, zlasti velike hitrosti in moči, povzročijo še več škode kot običajni poplavni dogodki. V hudourniških strugah je prisotno nepredvidljivo obnašanje, kritični so zlasti kratkotrajni intenzivni nalivi, za katere običajno nimamo potrebnih podatkov iz meritev, da bi jih predvideli – zato se uporabljajo približne empirične metode za izračun pretokov vode in pretokov plavin. Pretoki so v sušnih obdobjih lahko zelo nizki (le nekaj litrov na sekundo) oziroma hudourniki presahnejo, ko pa prihaja do velikih pretokov, se ti lahko povečajo za več razredov. Zaradi velikih hitrosti imajo izredno moč. Pogosto vsebujejo velike količine plavin in plavja ter tako predstavljajo veliko nevarnost za človeško lastnino ob strugah in tudi za človeška življenja. Poleg tega lahko nanesejo prod na obdelovalne površine in pogosto poškodujejo tudi nepravilno dimenzionirane cestne prepuste oziroma prometno infrastrukturo. Strokovnjaki si zato prizadevajo, da bi lahko napovedali medsebojno delovanje hidravličnih in geomorfoloških karakteristik, da bi lahko zmanjšali ali izničili škodljive učinke na infrastrukturo (npr. mostove in prepuste) in ekologijo ob hudourniku. Ena teh karakteristik je tudi vzdolžni padec hudourniških strug. Da se ti negativni učinki vsaj na poseljenih območjih nekoliko omejijo, se izvede ureditvene ukrepe, ki vplivajo na vodni režim in rečno morfologijo. Pogosto se nad poseljenimi območji zgradi zaplavna pregrada, ki ustavi plavje in plavine, in tako prepreči zasutje struge in prelitje hudournika v naseljeno območje. Taka pregrada je bila med drugim izvedena na hudourniku Bela nad Koroško Belo. Poznamo pa tudi hudourniške pregrade oziroma sisteme hudourniških pregrad, ki poskrbijo za odlaganje presežnih plavin zaradi zmanjšanja vzdolžnega

---

padca hudourniške struge in povečanja širine prečnega prereza. Eden takih sistemov je izvedenih na primer na hudourniku Presušnik.

Hudourniški sistemi so odprti. Material in energija se izmenjujeta z okolico. Glavna vhodna količina v sistem sta voda in plavine, poleg tega pa lahko tudi biološki material ter snovi, ki se vnesejo preko atmosferskih in erozijskih vplivov. Večino energije, ki je potrebna, je vnese iz atmosferskih procesov (npr. padavine), ki dvigajo gladino vode, ostalo pa je posledica delovanja gravitacije. Voda lahko vzdolž vodotoka izhlapeva, plavine pa se premikajo skozi rečni sistem ali se odlagajo. Če se energija prenese do iztoka, potem tam pride do odlaganja plavin. Energija se lahko tudi akumulira. To se dogaja predvsem z odlaganjem plavin vzdolž vodotoka, voda pa se lahko shrani v podtalnici, akumulacijah in tako dalje.

Za hudourniške struge je značilen velik vzdolžni naklon. Ko pride do potrebe po analizi neke strme struge, se moramo seznaniti s karakteristikami celotnega hudourniškega območja. Zanima nas, kolikšno količino padavin pričakovati na opazovanem področju, kakšna je oblika in tlorsna površina hudourniškega območja, kakšno je rastje, kakšen je potek struge, naklon dna struge, naklon gladine hudournika, oblika dna struge ter sestavljenost in količina plavin. Padci hudourniških strug so tako eden izmed glavnih geometrijskih parametrov, ki jih potrebujemo pri urejanju hudourniških območij. Skupaj s podatki o pretokih in o velikosti plavin lahko med drugim izračunamo pretočno globino, geometrijo in hrapavost struge, prodonosnost in kalnost (Mikoš, 2007). Ko imamo na voljo celotno krivuljo vzdolžnega profila nekega hudournika, lahko tudi ocenimo, na katerem odseku bo prihajalo do nadaljnjega erodiranja doline in druge nasipavanja, da se bo ustvarilo ravnotežno stanje. Kot posledica velikega padca in prostorskih omejitev (utesnjene rečne struge) se vodna energija disipira drugače kot v nižinskih vodotokih. Pogoste so zlasti geomorfološke oblike stopnja-tolmun, kaskade, manjši slapovi, ki se tvorijo glede na robne pogoje na nekem odseku. Energija se v takih primerih troši zlasti v stopnjah, ko voda prosto pade v tolmun. Tvorba neke določene strukture je odvisna od padca, vodnega toka ter prisotnosti plavin in plavja.

Te oblike so značilne za hudourniška območja, vendar so danes zaradi človeških posegov v okolje, bodisi zaradi izkoriščanja vodne energije ali zaradi varovanja poplavne varnosti, postale nekoliko redkejše. Danes so tako ohranjene prvotne hudourniške struge pogosto zaščitene kot geomorfološka in hidrološka vrednota lokalnega ali pa celo državnega pomena.

Ker je padec struge velik, se pojavi ideja o izkoriščanju vodne energije. To sega že zelo daleč v človeško zgodovino. Tako na hudourniških območjih še danes kljub težki dostopnosti najdemo ostanke več deset mlinov in žag iz polpretekle zgodovine. Tudi izkoriščanje vodne energije za pridobivanje elektrike ima že več kot 100-letno zgodovino. Ravno letos (2015) mineva 100 let od začetka obratovanja male hidroelektrarne (mHE) Završnica, ki se nahaja na obravnavanem hudourniku Završnica. Na obravnavanem območju se nahaja večje število že obstoječih malih oziroma mikro hidroelektrarn. Vseeno pa ima izkoriščanje hudournikov za izgradnjo malih hidroelektrarn nekaj slabosti, kot sta nihanje pretokov zaradi majhnih prispevnih površin (hudourniki namreč lahko tudi presahnejo) in povečana prodonosnost zlasti v času večjih pretokov. Plavine namreč lahko zamašijo vstopne objekte ali pa poškodujejo turbine. Poleg tega se v zadnjih letih daje velik poudarek ohranjanju narave, zlasti območij, kjer je bilo do sedaj zelo

malo ali nič človeških posegov. Tako so možnosti za izgradnjo kakšnega novega objekta majhne, bolj realna je obnova obstoječih ter povečanje njihovih izkoristkov z novo strojno opremo.

Hudourniška območja tako predstavljajo kompleksen sistem, saj je potrebno najti kompromis med gozdarstvom in kmetijstvom, prostorskim načrtovanjem, okoljevarstvom, infrastrukturo (promet), turizmom in (vodno) rekreacijo, električno proizvodnjo, vodnim ravnotežjem (hidrologija), varstvu pred poplavami, upravljanjem s hudourniki in plazovi ter ribištvom.

### **1.1 Namen in cilji**

Namen tega magistrskega dela je prikazati pomen vzdolžnih padcev v hudourniških strugah na splošno, v nadaljevanju pa omenjeno predstaviti tudi na izbranem območju Zgornjesavske doline na pobočju Karavank.

Najprej so predstavljene morfološke oblike struge in njihovi običajni padci. Oblike stopnjatolmun so še dodatno opisane kot pogostejša oblika v strmih strugah. Prepoznana je tudi vloga lesa v hudournikih in na brežinah, erozijski procesi ter z njimi povezana transport in akumulacija sedimentov. Upoštevan je bil tudi hidroenergetski potencial hudournikov. Sledi obravnava izbranega območja v Zgornjesavski dolini, njegovih hidroloških značilnosti, urejenosti hudourniških strug, geoloških in geomorfoloških značilnosti ter vrednotenje njihove vrednosti v okolju. Vsak obravnavan hudournik oziroma hudourniško območje je tudi dodatno predstavljeno, vključno z njegovimi posebnostmi. Opravljen je bil tudi terenski ogled večine hudourniških območij. Sledi predstavitev postopka zajema vzdolžnih profilov s programskim orodjem ArcGIS iz digitalnih modelov višin DMV 12,5, DMV 5 in lidarskih DMV z gostoto točk 1 m in 0,5 m. Za nadaljnjo obdelavo rezultatov, ki so tudi cilj tega dela, se je uporabilo programsko orodje Microsoft Excel.

Cilji magistrskega dela so:

- medsebojna primerjava rezultatov iz različnih DMV in ocena najbolj ustreznega,
- predstavitev tlorisne uporabnosti rezultatov avtomatiziranega izračuna poteka struge,
- prepoznavanje geomorfoloških značilnosti posteljice dna iz podatkov pridobljenih iz lidarskih DMV,
- spreminjanje lokalnih padcev zaradi geomorfoloških oblik,
- izris vzdolžnih profilov obravnavanih 34 hudournikov v Zgornjesavski dolini in ocena nadaljnje erozijske aktivnosti,
- primerjava vzdolžnih profilov hudournikov in
- analiza spreminjanja moči vodnega toka.

## 2 STRME HUDOURNIŠKE STRUGE

Prisotne so zlasti v povirjih v tako imenovanih utesnjenih strugah – v ozkih dolinah rečnega nastanka z običajno strmimi pobočji. Ena glavnih značilnosti hudourniških strug so veliki padci, ki so posledica tega, da hudournik v ozkih strugah nima dovolj prostora za meandriranje in je primoran v drugačne oblike disipiranja energije. Poleg tega so v strugi lahko prisotni balvani, leseno plavje oziroma je struga izprana do matične kamnine, kar vpliva na geometrijo struge, hitrost toka in hrapavost. Pogosta je majhna pretočna globina, posledično pa toliko večja hrapavost. (Rickenmann et al., 2006). V strugah se tako formirajo geomorfološke oblike, kjer se potroši presežna energija s turbulenco. Te oblike dna strmih hudourniških strug so najbolj heterogene zlasti v zgornjih delih porečij, kjer je prisotna velika transportna zmogljivost. Ta lahko igra pomembno vlogo pri premeščanju plavin, plavja in tudi pri asimilaciji polutantov oziroma kalnih snovi (Jimenez in Wohl, 2013). Poleg tega se padec v povirjih hitro spreminja, medtem ko je pri nižinskih vodotokih njegovo spreminjanje zelo počasno. Oblike se lahko tvorijo v treh osnovnih tipih podlage (Montgomery in Buffington, 1997), in sicer:

- aluviju (lastnih naplavinah),
- v skalni osnovi (matični kamnini) ali
- koluviju (nasutem materialu kot posledica delovanja skalnatih podorov, ledenikov ali npr. drobirskih tokov).

Tu velja omeniti, da avtorji ne navajajo vedno istih izrazov za iste oblike. Čeprav je bila klasifikacija s strani Montgomeryja in Buffingtona narejena že leta 1997, se še naprej pojavljajo drugačne klasifikacije oziroma nejasnosti, na primer zaradi izraza kaskada, ki se hkrati uporablja tudi za obliko stopnje v strugah tipa stopnja-tolmun. Zimmermann in Church (2001) sta tako na primer v svojih raziskavah omenila, da se stopnje in tolmeni lahko pojavljajo v 2 oblikah – kot brazde in tolmeni ter kot kaskade; tako posebne oblike stopnja-tolmun sploh nista uporabila. Popolnoma drugače sta opredelila oblike Maxwell in Papanicolau (2001). Določila sta, da imajo struge s stopnjevano posteljico dna dolžino med stopnjami 1- do 2-kratno širino struge, stopnje in tolmeni pa od 0,1- do 1-kratno širino struge. Prvi so namreč stopnje in tolmeni, drugi pa kaskade. Tako so v njunih raziskavah kaskade imenovane stopnje in tolmeni, stopnje in tolmeni pa so struge s stopnjevano posteljico dna. Podobno je na primer tudi Grant et al. (1990) navajal ravno obratni definiciji za stopnje in tolmane ter kaskade. To je zgolj nekaj primerov dvoumnih oziroma različnih navajanj. Prisotna je tudi zmeda v terminologiji v obstoječi literaturi glede razdalje med tolmeni, razdalje med stopnjami, o globini in dolžini tolmena ter višini stopnje. Pogosto se za isto stvar uporabljajo različni izrazi oziroma oznake.

### 2.1 Klasifikacija različnih geomorfoloških oblik strug (povzeto po Montgomery in Buffington, 1997)

V naplavinski (aluvialni) osnovi je pestrost morfoloških oblik z različnimi sistemi oblikovnega upora toku vode precej večja. Med seboj se spreminjajo glede na naklon, pozicijo znotraj hudourniškega območja ter glede na to, ali imajo nič ali malo poplavnih ravnin ali pa dobro utrjeno veliko območje. Montgomery in Buffington (1997) sta naredila zelo pregledno razvrstitev naplavinskih oblik dna. Raziskava zajema namreč vse osnovne tipe, medtem ko se večina ostalih

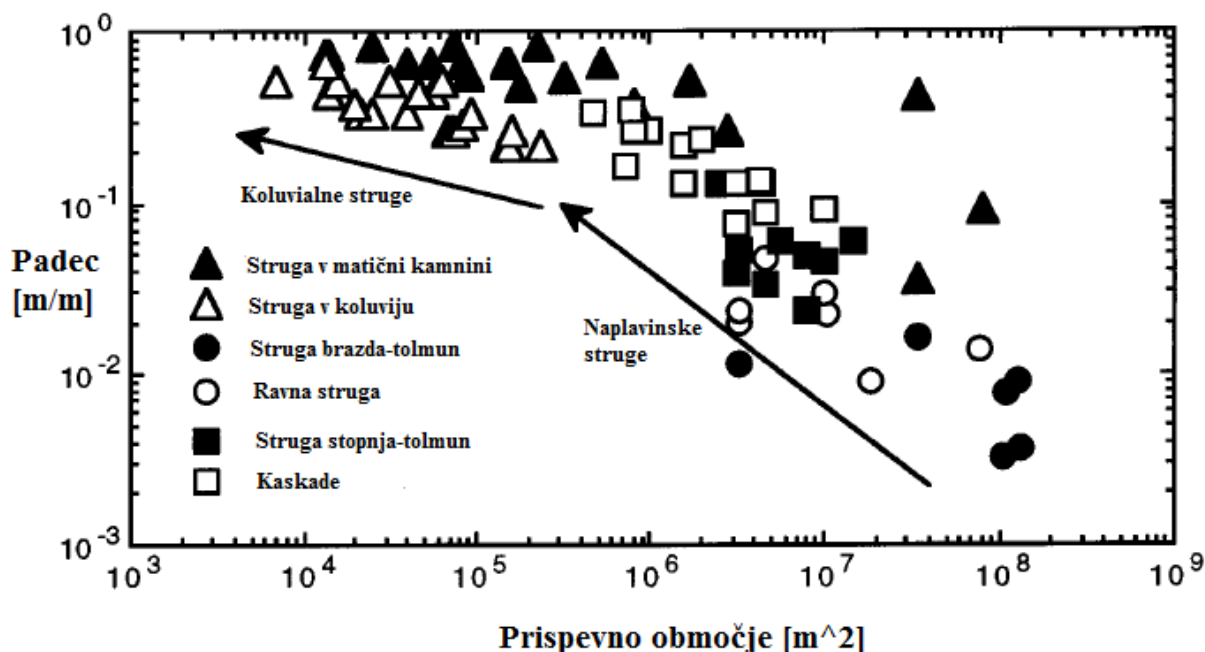


osredotoča zgolj na eno obliko. Oblike dna sta razdelila v smeri od povirij proti nižinskim območjem na:

- kaskade,
- stopnje in tolmane,
- odseke z ravnim dnom,
- brazde in tolmane (brzice in tolmane) ter
- s sipinami (dine in brazde).

Vodotoki, ki potekajo po matični kamnini, imajo manj okoliških plavin, ki so razpoložljive za premeščanje, kot imajo transportne zmogljivosti, ki je relativno visoka. Pogosto gre za struge, ki so omejene z zelo strmimi pobočji dolin. Te oblike bodo v nadaljevanju še podrobneje opisane. Struge v koluviju se pogosto pojavijo tudi s tanko naplavinsko podlago in so prisotne zlasti v manjših oblikah kot hudourniki ali gorski potoki v povirjih pri majhnih prispevnih površinah.

Že iz površine prispevnega območja in padcev se lahko predvidi tip struge (Grafikon 1). Odseki z enakim prispevnim območjem v matični kamnini imajo večji padec kot tisti v koluviju, posledično pa imajo višje strižne napetosti in moč vodnega toka (Montgomery et al., 1996). Tako odseki v matični kamnini kot koluvijski so značilni zlasti pri majhnih prispevnih območjih, odseki v matični kamnini pa se izjemoma pojavijo tudi pri večjih hudourniških območjih, običajno na krajših odsekih. Deli hudournikov v naplavinah se pojavljajo do maksimalno 0,2 m/m oziroma izjemoma do 0,3 m/m padca, kjer se v odvisnosti od slednjega formirajo tudi različne oblike posteljice dna.



Grafikon 1: Razmerje med prispevnim območjem in padcem (hudourniško območje Finney creek, Washington, ZDA) (povzeto po Montgomery in Buffington, 1997, str. 604)

### 2.1.1 Morfološke oblike strug v naplavinski podlagi

Kot je bilo že omenjeno, avtorji pogosto zamenjujejo posamezne oblike oziroma jih drugače navajajo in opisujejo, čeprav obstaja zelo dobra klasifikacija s strani Montgomeryja in Buffingtona (1997), ki je povezala rečno hidravliko, oblike dna vseh tipov strug, material posteljice dna in padec. V nadaljevanju bo ta klasifikacija tudi osnova za opisovanje.

#### 2.1.1.1 Kaskade

Kaskade (Preglednica 1 a) zaznamuje prevračajoč tok, čeprav njegova specifična morfološka definicija variira in je pogosto uporabljena tako za enoto struge kot za oblike na odseku. Naša razvrstitev kaskadnih strug se osredotoča na struge, v katerih je disipacija energije prevladujoča s ponavljajočim prevračanjem in curki okrog ter čez posamezne večje balvane in samice v posteljici dna. Pojavijo se pri velikih naklonih, hudourniki so utesnjeni med pobočja doline in jih prepoznamo z vzdolžno in prečno neorganiziranim materialom posteljice dna. Tipično so sestavljene iz grušča, balvanov in samic. Prevladujejo majhni tolmunji, ki običajno ne segajo čez celotno širino struge in so med sabo razmaknjeni za manj kot širino struge. V vodnem skoku je prisoten deroči tok preko posameznih stopenj iz balvanov in samic. Ta vključno z vrtinčastim tokom, povezanim s tokom okrog balvanov, porabi večino mehanske energije toka. Velika zrna (samice) so malo mobilna, le pri povratnih dobah nekje od 50 do 100 let (Grant et al., 1990).

#### 2.1.1.2 Stopnje-tolmunji

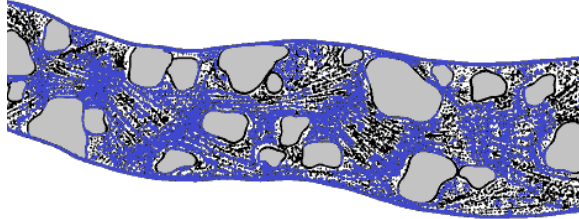
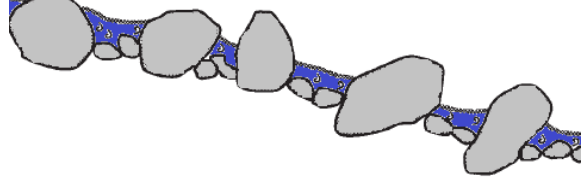
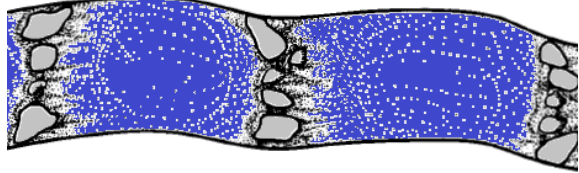
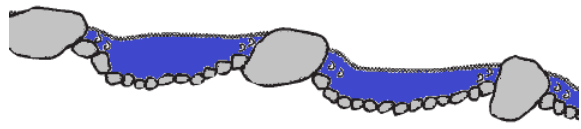
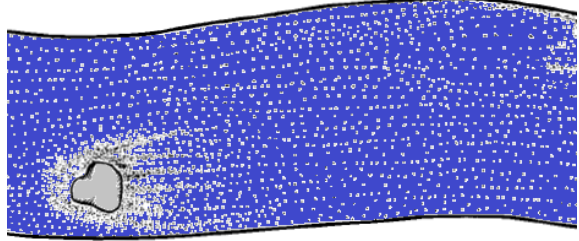

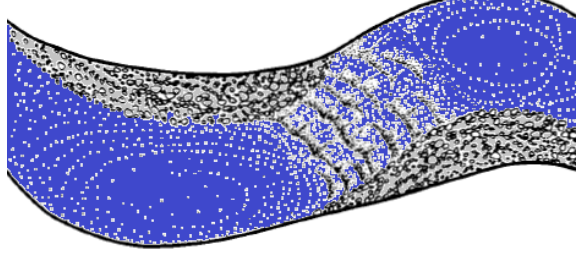
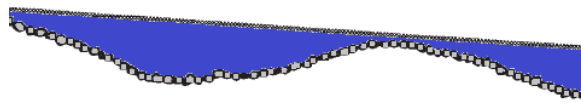
Tu so stopnje formirane iz večjih zrn, potekajo preko celotne širine struge in ločujejo tolmuje s finejšim materialom (Preglednica 1 b). Primarne spremembe toka in posteljice dna v takih strugah so še vedno vertikalne, medtem ko so v strugah z brazdami in tolmuji prečne. Zaradi stopnjevanja posteljice dna je prisotno menjavanje kritičnega in deročega toka preko stopenj ter mirnega toka v tolmunih (Chin, 1989). Razdalja med posameznimi tolmuji je od 1 do 4 zgornje širine struge (Grant et al., 1990), kar je razlika v strugah z brazdami in tolmuji, kjer je ta razdalja od 5 do 7 zgornjih širin struge (Keller in Melhorn, 1978). Večina energije se potroši v prelivih čez stopnje. Ta morfologija je v glavnem povezana s strmimi padci, majhnimi razmerji med globino in širino ter omejenim prostorom ob strugi zaradi strmih pobočij doline. Pojavijo se (Grant et al., 1990), kadar je transportna zmogljivost večja od razpoložljivih plavin in kadar so redko prisotni pretoki takih velikosti, da so sposobni premikati največje plavine. Potrebna je tudi (Grant in Mizuyama, 1991) mešanica posteljice dna, ki je zelo heterogena, ter tok blizu kritičnim razmeram. Razdalja med stopnjami ustreza maksimalnemu uporju toka vode, ki še zagotavlja stabilnost za posteljico dna, ki bi sicer bila mobilna (Abrahams et al., 1995).

Večinoma se celotna zgradba podere pri ekstremnih poplavih, kjer pa velja, da se pri upadanju pretoka tvorijo nove stopnje. Pogosteje se mobilizirajo manjši delci v tolmunih, ki ob pogostejših poplavnih dogodkih že potujejo dolvodno (Grant et al., 1990).

Razlika s kaskadami je, čeprav gre pri obeh oblikah za pomanjkanje plavin, v gostoti in organizaciji velikih zrn. Pri stopnjah in tolmunih so tolmuji preko celotne širine struge, pri kaskadah pa so ožji kot širina struge. Ena sekvenca stopnja-tolmun je dolga od 1 do 4 zgornje širine struge. Kaskade imajo vrtinčast in turbulenten tok preko serije individualnih balvanov in samic z majhnimi, nepravilno postavljenimi tolmuji, ki so med seboj manj kot za širino struge

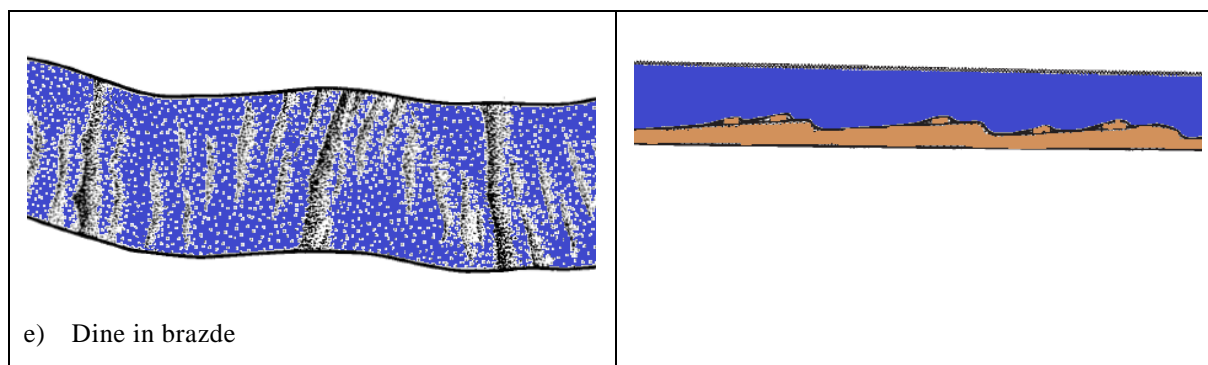
narazen. Pri stopnjah gre običajno za rečno (fluvialno) oblikovanje, pri kaskadah pa so pogosto zrna prisotna tudi iz kamnitih podorov, ostankov ledenikov ali drobirskih tokov.

**Preglednica 1: Skice opisanih oblik dna v tlorisu in vzdolžnem prerezu (povzeto po Montgomery in Buffington, 1997, str. 600, 601)**

Oblika dna v tlorisu	Oblika dna v vzdolžnem prerezu
 <p>a) Kaskade</p>	
 <p>b) Stopnje-tolmuni</p>	
 <p>c) Struga z ravnim dnom</p>	
 <p>d) Brazde-tolmuni</p>	

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1.



### 2.1.1.3 Ravno dno

Struge z ravnim dnom (Preglednica 1 c) se pojavijo pri srednjih do velikih naklonih v relativno ravnih strugah, ki so lahko omejene s pobočji dolin, ni pa nujno. Prisotne so posamezne brzice, brazde in hitrejši deli toka. Primanjkuje jim ločenih ovir, to je povezano z majhnimi razmerji med širinami in globinami (Ikeda, 1975, cit. po Montgomery in Buffington, 1997) in velikimi vrednostmi relativne hrapavosti. Tipično so sestavljene iz velikosti plavin peska do majhne groblje, a je posteljica večinoma iz prodnikov in grušča. V primerjavi s strugami tipa brazda-tolmun in stopnja-tolmun jim primanjkuje ritmičnih oblik dna. Značilne so dolge ravne posteljice z razmeroma malo oblikami dna. Prevrtačajočega toka v primerjavi s kaskadami in strugami tipa stopnja-tolmun ni, relativna hrapavost pa je manjša. Za strugo tipa brazda-tolmun ima premalo prečnega toka zaradi manjšega razmerja med globino in širino ter večjo relativno hrapavostjo. Zaradi ovir se lahko tvorijo lokalni tolmini. S tlakovano posteljico dna imajo transportno zmogljivost večjo kot zalogo plavin, površine brez tlakovane posteljice dna pa kažejo ravnotežne razmere (Dietrich et al., 1989). Premeščanje plavin se pojavi okrog strugotvornega pretoka (Buffington, 1995, cit. po Montgomery in Buffington, 1997). Ta oblika se lahko navezuje tudi na peskonosne nižinske vodotoke.

### 2.1.1.4 Brazde-tolmuni

Take struge (Preglednica 1 d) imajo valovito posteljico dna, ki definira sekvence ovir, tolmunov (jezerc) in brazd (Leopold et al., 1964). Prečno nihanje oblik dna jih razlikuje od ostalih oblik. Tolmuni so topografske depresije, ločujejo pa jih prodišča, ki so pripadajoče visoke točke. Tolmuni so ritmično razporejeni na vsakih pet do sedem širin struge (Leopold et al., 1964). Če je prisotnega veliko zaplavnega lesa, so te razlike lahko manjše (Montgomery et al., 1995). Običajno so neovirani (ni raznih pobočij) in imajo jasne poplavne ravnice. Plavine so lahko od peska do grušča, prevladuje pa običajno prod. Prisotna so tudi prodišča. Brazde in tolmini se pojavijo pri srednjih do nizkih naklonih, tako da se v hudourniških strugah pojavljajo redko. Hitrost v brazdah je relativno velika, v tolmunih ravno tako teče hitro, razlika je komaj opazna (Zimmermann in Church, 2001).

### 2.1.1.5 Dine in brazde

Gre za zaporedje din (Preglednica 1 e), ki se pojavljajo v peskonosnih vodotokih z majhnimi padci. Ta oblika dna za hudournike ni značilna in v nadaljevanju tudi ne bo obravnavana.

## 2.1.2 Koluvialne struge in struge v matični skalnati podlagi

V koluvialnih strugah so običajno hudourniški ali gorski potoki v povirjih, ki tečejo po koluvialnih dolinah z majhno transportno zmogljivostjo. Do sedaj je bilo narejeno le manjše število raziskav. Zaradi majhne transportne zmogljivosti ne predstavljajo večje nevarnosti sami po sebi, lahko pa z namakanjem plazljivih območij povzročijo nevarnost zemeljskih plazov.

Pri strugah v matični podlagi je prisotno pomanjkanje naplavinne posteljice. Čeprav se lahko v bolj zatišnih legah začasno shranijo plavine, je tega zelo malo, premalo za zapolnitev doline. Pogosto so omejene s pobočji doline. Pri istih prispevnih površinah imajo pogosto večje naklone kot tisti v naplavinah (Montgomery et al., 1996).

## 2.1.3 Nepravilno oblikovane morfologije

Oblikujejo jih ovire, zlasti zaplavni les in korenine, ki povzročijo lokalne razjede ali pospešijo tok ali »ujamejo« prod, kar lahko formira tolmane, ovire in stopnje. Te ovire oblikujejo prisiljene oblike tipov strug. Zlasti pogoste so prisiljene oblike strug tipa stopnja-tolmun. Ta oblika je pogosta v močno gozdnatih regijah. Lahko se razvijejo preko robnih pogojev, ki so običajni za neovirano oblikovane morfologije. Vloga plavja, zaplavnega in zapadlega lesa bo predstavljena v nadaljevanju.

## 2.1.4 Vmesne stopnje

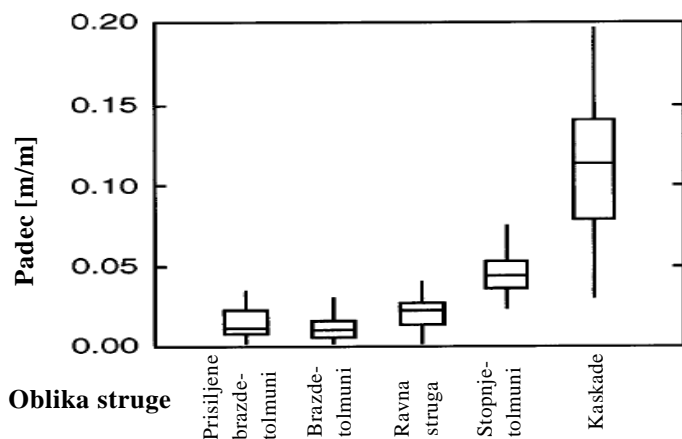
Vmesne stopnje med oblikami dna so v naravi dejansko najbolj pogoste. Tako se največkrat težko odločimo, za katero morfološko obliko gre. Velikokrat je tudi tako, da se neka značilna oblika pojavi zgolj na krajšem odseku, lahko kot posledica lokalnih večjih padcev. V Preglednici 2 so prikazane lastnosti posameznih morfologij ob idealnih pogojih. V njej je tudi uporabljen izraz samica tako za prvotni pomen kot tudi za balvane.

**Preglednica 2: Značilnosti posameznih odsekov in zaporedij oblik dna (Repnik, 2006, str. 43, cit. po Montgomery in Buffington, 1997)**

Značilnost	Dina - rebro	Tolmun - brzica	Ravno dno	Stopnja - tolmun	Kaskada	Matična kamnina	Koluvij
Substrat	Pesek	Prod, gramoz	Prod, gramoz, prodniki	Prodniki, samice	Samice	Skala	Spremenljiv
Vzorec oblik dna	Večplasten	Prečen	Ni pojava	Vertikalen	Naključen	Nepravilen	Spremenljiv
Prevladujoči elementi, ki povzročajo hrupavost	Vijugavost, oblike dna (dine, rebra, prodišča), substrat, brežina	Oblike dna (prodišča, tolmeni), substrat, vijugavost, brežine	Substrat, brežine	Oblike dna (stopnje, tolmeni), substrat, brežine	Substrat, brežine	Struga (dno in brežine)	Substrat
Prevladujoč izvor substrata	Brežine	Brežine	Brežine, drobirski tok	Pobočje, drobirski tok	Pobočje, drobirski tok	Pobočje, drobirski tok	Pobočje, drobirski tok
Naplavine	Poplavna ravnica, oblike dna	Poplavna ravnica, oblike dna	Poplavna ravnica	Oblike dna	Tvorbe za ovirami	Naplavine v kotanjah, votlinah	Dno
Prečni prerez	Neomejen	Neomejen	Spremenljiv	Omejen	Omejen	Omejen	Omejen
Značilen razmak med tolmeni (glede na širino struge)	5 - 7	5 - 7	Ni pojava	1 - 4	< 1	Spremenljiv	Ni pojava

## 2.2 Vzdolžni padci struge značilni za pojavljanje posamezne morfologije

Ne obstajajo točne meje, pri katerih padcih se pojavijo brazde in tolmeni, ravne struge, stopnje in tolmeni ali kaskade, saj je to odvisno tudi od razmerja globine vodotoka glede na širino struge, a so v več raziskavah prišli do podobnih zaključkov. Grant et al. (1990) so določili, da prevladujejo kaskade pri naklonih od 3 % do 7 %, med 4 % in 20 % pa skoki in tolmeni. Tu je potrebno poudariti, da je definicija med Grant et al. (1990) ter Montgomeryjem in Buffingtonom (1997) ravno obratna. Pod 2 % naklona se pojavljajo brazde in tolmeni (Florsheim, 1985, cit po Montgomery in Buffington, 1997). Abrahams et al. (1995) je tudi potrdil, da se pojavljajo kaskade do naklonov 20 %. Podobno so ugotovili tudi drugi avtorji (Chin, 1999; Wilcox in Wohl, 2006; Church in Zimmerman, 2007; Grodek et al., 1994), in sicer da se sistemi tipa stopnja-tolmun pojavijo v širokem naboru naklonov nad 2 %, kjer se lahko pojavijo tudi kaskade. Te se bolj pogosto pojavljajo nad 5 % padca. Church (2002) je tudi opazil, da se pojavi formiranje poplavnih ravnin tipično pod 2 % padca, zato so tudi v hudourniških strugah prisotne le izjemoma oziroma v okrnjenem obsegu. V Grafikonu 2 so prikazani padci, pri katerih se najpogosteje pojavljajo posamezne oblike dna s kvartili (pravokotniki) in centili (črte) verjetnosti pojavljanja.

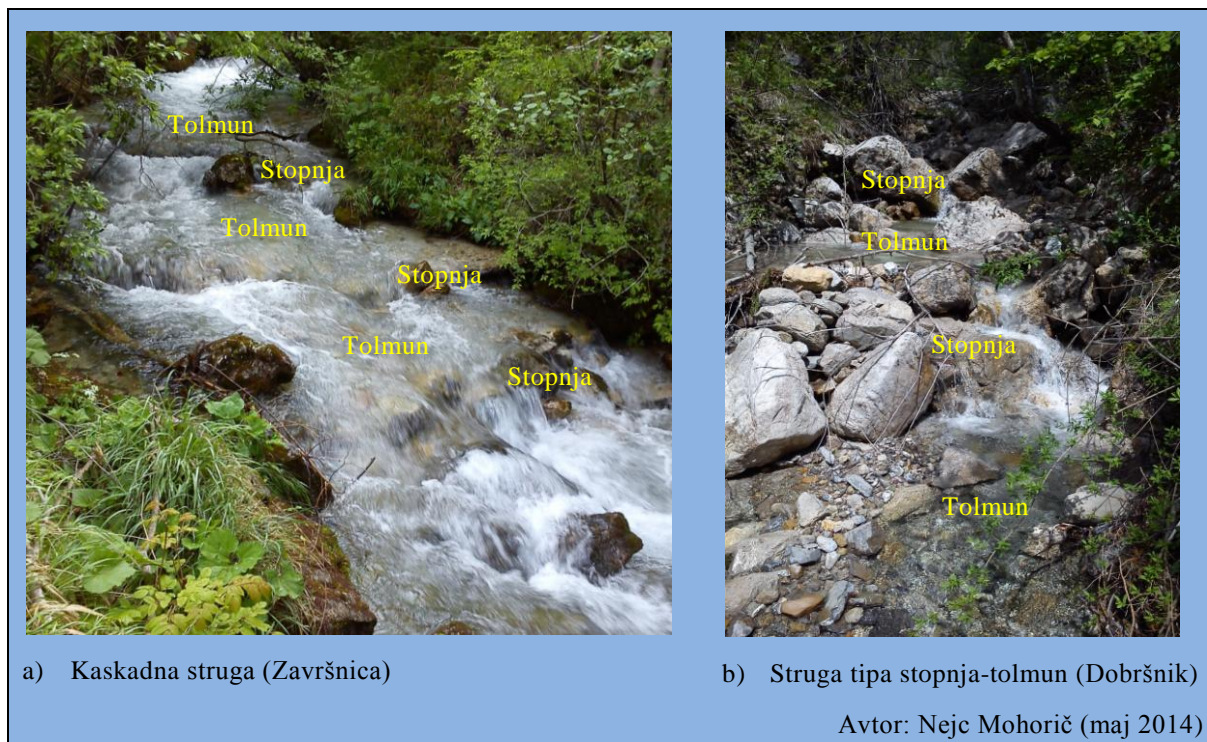


**Grafikon 2: Prisotnost posameznih geomorfoloških oblik strug pri določenih padcih (povzeto po Montgomery in Buffington, 1997, str. 604).**

## 2.3 Podrobneje o oblikah dna strug tipa stopnja-tolmun

Stopnje in tolmeni v utesnjenih gorskih strugah nadomeščajo meandriranje, kar je značilno za nižinske vodotoke, ki imajo dovolj razpoložljivega prostora. Bistveni pogoj za tvorjenje je relativno velik vzdolžni padec struge. Oblike dna tipa stopnja-tolmun so prevladujoča karakteristična oblika v hudourniških strugah (Chin in Wohl, 2005), pogoste so tudi kaskade. Razlike med tema oblikama so v praksi pogosto težko določljive. Na neki strugi tipa stopnja-tolmun se recimo pojavijo posamezne značilnosti kaskad. To dobro prikazuje Slika 1 a, kjer bi glede na padec in stopnje čez celo strugo lahko rekli, da gre za tipičen primer struge tipa stopnja-tolmun, vendar je razdalja med stopnjami manjša, kot je širina hudournika, kar naj bi bila karakteristika kaskad. Obratno je pri Sliki 1 b, ki glede na večji padec ter večjo prisotnost samic in balvanov spominja na kaskade, vendar so tolmeni daljši, kot je širina struge in ima v tolmunih obraten padec, kar sta karakteristiki stopenj-tolmunov. Te so sestavljene iz izmeničnih oblik dna stopenj in tolmunov ter tvorijo stopničast vzdolžni profil.

Pojavijo se v širokem razponu hidro-klimatskih razmer; od mokrih regij (Hayward, 1980) do puščavskih območij z občasnim rečnim sistemom (Wohl in Grodek, 1994) kot tudi polsušnih območjih (Chin, 2002, 2003). Stopnje in tolmini so bili na Japonskem opisani tudi v vodotokih prekritih z ledom (Yamazaki et al., 1998, cit. po Chin in Wohl, 2005). Disipacija energije je prevladujoča pod stopnjami, energija pa se porabi za optimizacijo tolmunov in stopenj ter teži k temu, da se doseže ravnotežno stanje. Stopnje pretežno poskrbijo za spremembe padca struge, tolmini pa za disipacijo energije. Hayward (1980) je ocenil, da se kar 95 % energije disipira v padcu preko stopenj v tolmun. Hkrati stopnje služijo za to, da se poveča koeficient hrapavosti (Wohl et al., 1997) in tako zmanjša pretočna hitrost.



**Slika 1: Primera geomorfoloških oblik stopenj in tolmunov v strmih strugah**

Stopnje se pogosto oblikujejo nekoliko diagonalno, so med seboj redko vzporedne (Zimmermann in Church, 2001) in večinoma potekajo preko celotne širine struge. Posledično je dolžina ene sekvence ali pa posameznega tolmana malenkostno odvisna od lokacije merjenja. Takoj na začetku tolmana pod stopnjami se nahajajo prodniki, ki podpirajo prodnike, ki tvorijo stopnjo. Vertikalno lahko merijo stopnje tudi 2 m (Zimmermann in Church, 2001), v takšnih primerih bi lahko govorili že o manjših slapovih, ker presegajo 1 m višine (Repnik, 2006). Glede na način sestave poznamo:

- stopnje iz plavin – večjih prodnikov v hudourniku,
- stopnje iz ključnih balvanov iz erozijskih žarišč v bližini hudournika, ki so temelj za tvorjenje stopnje,
- stopnje iz plavja,
- stopnje iz zapadlega ali zaplavnega lesa,
- stopnje v matični podlagi, kadar gre za stopnje in tolmine v kamninski podlagi,
- kombinacije.

V naravi pretežno prevladujejo kombinacije – na primer ob zapadli les se zaklinijo tako prodniki kot tudi plavje, skupaj tvorijo stopnjo. Ob to tvorbo se nato zaklinijo še manjše plavine, ki bi bile sicer izprane dolvodno (Wohl et al., 1997).

Za območja tolmunov je pri strugah tipa stopenj in tolmunov značilen negativen naklon dna (Abrahams et al., 1995). Pogosto se pojavijo tudi manjši tolmini, ki se oblikujejo ob robu, v zaledju velikih prodnikov. Poznamo tri tipe (Mikoš, 2007):

- morfološko pogojene,
- pri navpičnih curkih v kaskadnih strugah in strugah tipa stopnja-tolmun ter
- tolmine pri vodoravnem strujanju.

Obliko stopenj in tolmunov posnemajo tudi sistemi hudourniških pregrad, kot je na primer pri hudourniku Presušnik med Mojstrano in Hrušico. Danes se oblika stopenj in tolmunov v tujini poskusno že uporablja tudi kot sonaraven način ureditve struge, kjer se betonske stopnje obloži z veliko grobljo (1 m – 1,5 m na primer), ali pa se uporabi samo balvane oziroma se vgradi zaplavni les (Lenzi, 2002). Podobno so Chin et al. (2009) naredili eksperiment na poseljenih območjih na strmih pobočjih. Tako se nato ustvari naravno ravnovesje, prednost takih oblik dna pa je med drugim tudi v tem, da se lahko prilagodijo in preoblikujejo, hkrati pa so stabilne čez relativno velik razpon pretokov. Težavo predstavlja kompleksna analiza problema, saj je potrebno izvesti geomorfološke, hidrološke, hidravlične analize ter analize transporta plavin, kjer pa so za strme struge v uporabi pretežno empirične enačbe, ki so uporabne zgolj v ozkem naboru robnih pogojev.

### **2.3.1 Kdaj in kako se oblikujejo struge tipa stopnja-tolmun**

Pogoj za tvorjenje stopenj in tolmunov je padec med 3 % in 7 %, medtem ko je pri kaskadah med 4 % in 20 % (Grant et al., 1990). Občasno so ti padci lahko tudi večji. Te oblike dna se formirajo ob visokih pretokih, in sicer tako, da se tvorijo stopnje, preko katerih voda strmo pade v območje tolmana, kjer pride do potrošnje energije z vrtinčenjem (Slika 1 b). Gre za relativno stabilno obliko posteljice dna. V času nizkih in srednjih pretokov so stabilne, premeščajo se zgolj manjše plavine v tolmunih.

Kombinacija visokih naklonov strug in visokih pretokov povzroči v času poplavnih dogodkov močno erozijo posteljice dna ter brežin. Lahko premika velike prodnike, lahko pa pride tudi do obsežnih sprememb v morfološki zgradbi struge. Glede na sestavo stopenj in lokalne značilnosti lahko pride do porušitve oblik posteljice dna že pri strugotvornih pretokih s povratno dobo 2 do 3 let, lahko pa so za porušitev potrebni pretoki s 50- ali celo 100-letno povratno dobo. Kdaj bo prišlo do porušitve stopenj, je močno odvisno od velikosti plavin oziroma plavja in zaplavnega lesa, prisotnosti balvanov ter matične kamnine, ki sestavlja stopnje.

Zlasti pri stopnjah iz prodnikov pride lahko do porušitve že pri strugotvornih pretokih, odvisno od velikosti plavin. Pri strugotvornih pretokih je premestitvena zmogljivost že dovolj visoka, da se mobilizirajo ključni večji prodniki v stopnjah. V primeru stopenj iz zapadlega lesa, ko je ta prevelik za transport, lahko pride do porušitve stopnje, ko les zgine. Lahko so v strugi prisotni balvani iz erozijskih žarišč, ki so preveliki za transport. Ker so ti prerezi zoženi, se lahko tvorijo stopnje iz velikega lesenega plavja in večjih prodnikov, za njimi pa se večje plavine strehasto naložijo in se tako formira stopnja. Taka zgradba ima zelo visoke vrednosti strižnih napetosti



(Zimmermann in Church, 2001), posledično pa so take stopnje precej bolj obstojne in jih strugotvorni pretoki niso zmožni porušiti. Pojavi se lahko tudi posebna oblika stopenj in tolmunov, ki se tvorijo v matični kamninski podlagi. Tu so pogosto pretoki, pri katerih pride do porušitve zelo veliki, seveda če gre za intaktno kamnino, porušitev običajno ni normalna.

Nove stopnje se nato tvorijo proti koncu poplavnega dogodka, gorvodno in dolvodno pa se ustvarijo tolmini. Ob visokih pretokih, ko pride do porušitve, se stopnje običajno premaknejo zgolj za nekaj metrov dolvodno. Hayward (1980) je tudi za stopnje iz prodnikov ugotovil, da ko se je stopnja podrla, so se ključne velike plavine premaknile zgolj za kakšen meter, okrog njih pa se je spet ustvarila stopnja. Zanimiv je tudi podatek iz raziskav Zimmermana in Churcha (2001), kjer je kar 86 % prodnikov v stopnjah ležalo z daljšo osjo prečno na hudournik, 88 % pa je imelo najkrajšo os vertikalno (ali skoraj vertikalno).

Veliko število avtorjev je tudi želelo razložiti zgradbo stopenj in tolmunov ali s formacijo antidin (kot odziv na stoječi val, ki se obnaša kot antidina) (Whittaker and Jaeggi, 1982, cit. po Zimmermann in Church, 2001; Grant and Mizuyama, 1991; Grant, 1997; Chartrand and Whiting, 2000) ali s sklicevanjem na hipotezo maksimalne hrapavosti v toku (Abrahams et al., 1995). Nobena hipoteza sicer ni potrjena. Čeprav se je na primer v Whittakerjevi in Jaeggijevi (1982, cit. po Zimmermann in Church, 2001) raziskavi pokazalo, da so njihovi rezultati skladni z modelom antidin za naklone do 7,5 %, Zimmermann in Church (2001) vseeno menita, da je za skromne poraste pretokov malo verjetno, da bi povzročili, da bi Froudeovo število doseglo vrednosti, ki bi lahko formirale antidine. Raziskave, ki sta jih opravila Wohl in Thompson (2000), so pokazale, da se lahko razvita turbulenca, ki jo ustvari strižna napetost povprečnega profila dolvodno od stopenj, lahko razložijo s hipotezo antidin, čeprav razvita turbulenca ni ključen faktor za formacijo antidin.

Grant (1997) je prvi postavil hipotezo, da se v strugah z nestabilno posteljico dna (raziskave je delal na strmih peskonosnih strugah) s hidravliko struge in konfiguracijo dna preprečuje Froudeovemu številu ( $Fr$ ), da bi dosegel kritično vrednost 1 za več kot le kratko razdaljo ali časovni interval. Hipotezo sta Zimmermann in Church (2001) razširila na prodonosne vodotoke. Če gledamo celoten odsek, je Froudeovo število pod 1 – torej je povprečno mirni tok. Froudeovo število je največje na odsekih, ki imajo brzice, ker so tolmini majhni, povprečna hitrost pa je visoka. V stopnjah se pojavi kritični tok ( $Fr > 1$ ), medtem ko je v tolmunih prisoten mirni tok ( $Fr < 1$ ).

### 2.3.2 Višina stopenj

Za več lastnosti velja, da vplivajo oziroma so odvisne od višine stopenj. Višina stopenj se teoretično poveča z večjim padcem (Whittaker, 1987, cit. po Chin, 1998 ; Chin, 1989; Wohl in Grodek, 1994). V naravi je višina stopenj opisana kot posledica velikosti največjih ključnih kamnov (Grant et al., 1990; Chin, 1999; Chartrand in Whiting, 2000). Tako velja tudi odvisnost, da večja kot je višina stopnje, večji so prodniki ali zaplavni les, ki so prisotni v stopnjah (Wohl et al., 1997). Maxwell in Papanicolau (2001) medtem uporabita za spremenljivke, ki naj bi vplivale na višino stopnje, velikosti prodnikov v posteljici dna  $d_{50}$ , standardno deviacijo porazdelitve velikosti plavin  $\sigma$ , globino toka  $h$  in Froudeovo število  $Fr$  (1). V njunem delu ne upoštevata posebnih velikosti zrn za stopnje in tolmine, naklona pa so bili med 3 in 7 % in tako ustrezajo stopnjam in tolmunom.

$$\frac{H_s}{h} * \sigma^{0,5} = 2,0 * \left( \frac{Q}{\sqrt{g * h^5}} * \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{1,50} \right)^{0,31} \quad (1)$$

Razlika v višini med prodnatimi stopnjami in stopnjami iz zaplavnega lesa je zanemarljiva (Wohl et al., 1997).

### 2.3.3 Razdalja med stopnjami

Srednja razdalja med stopnjami je obratno sorazmerna s padcem kanala in sorazmerna z zgornjo širino struge in prispevnim območjem (Wohl et al., 1997). Razdalja med stopnjami je sorazmerna tudi s premerom prodnikov, ne pa s premerom zaplavnega lesa v stopnjah. Wohl et al. (1997) so tudi ugotovili, da ni nobene znatne razlike med prodnimi in lesenimi stopnjami v zvezi z razdaljo med stopnjami. Razdalja med stopnjami se zmanjša s povečanjem naklona (Whittaker, 1987, cit. po Chin, 1998; Chin, 1989, cit. po Chin, 1998; Wohl in Grodek, 1994). Abrahams et al. (1995) so ugotovili, da je idealna razporeditev med stopnjami taka, ki disipira vso energijo toka v prelivih čez stopnje. To področje pa ostaja še odprto. Nekateri raziskovalci (npr. Whittaker, 1987, cit. po Maxwell in Papanicolau, 2001, Grant et al., 1990) so sicer pokazali, da je odvisna od naklona dna, medtem ko je nekaj raziskovalcev (Billi et al., 1998, cit. po Maxwell in Papanicolau, 2001) ugotovilo, da je razdalja med stopnjami funkcija naklona in višine stopnje.

Abrahams et al. (1995) so ugotovili močno povezavo med  $L_s$  (dolžino med stopnjami),  $H_s$  (višino stopnje) in naklonom odseka struge  $I$ , tako da razmerja  $H_s/L_s/I$  ostanejo skoraj konstantna preko širokega razpona naklonov (2).

$$L_s = \frac{H_s}{a * I^b} \quad (2)$$

Črki  $a$  in  $b$  predstavljata konstanti. Razvitih je bilo več podobnih odvisnosti, ki pa razdaljo med stopnjami določajo zgolj glede na naklon. Whittaker (1987, cit. po Okazaki et al., 2006) na primer podaja naslednjo zvezo (3).

$$L_s = 0,311 * I^{-1,188} \quad (3)$$

Akiyama in Maita (1997, cit. po Okazaki et al., 2006) sta določala maksimalno možno razdaljo med stopnjami (4).

$$L_{max} = 0,096 * I^{-2} \quad (4)$$

Maxwell in Papanicolau (2001) sta predstavila logaritemsko zvezo višine stopnje in padca, ki je temeljila tako na laboratorijskih kot predhodnih terenskih meritvah (5).

$$L_s = 7,39 * \ln\left(\frac{H_s}{I}\right) - 5,52 \quad (5)$$

V vseh primerih gre za empirične enačbe, ki se obnesejo le v lokalnih razmerah. Okazaki et al. (2006) so recimo za prve tri enačbe, ki izvirajo iz Amerike, Nove Zelandije in Japonske, ugotovili, da nobena povsem ne ustreza za njihovo raziskovalno hudourniško območje.

Precej avtorjev (Bisson et al. 1987; Robison in Beschta, 1990; Richmond, 1995) je prišlo do zaključka, da so pretoki v manjših strugah prešibki, da bi lahko transportirali vso veliko leseno plavje, zato se tvorijo stopnje ali prodnate zagate na naključnih lokacijah. Tudi Zimmermann in Church (2001) sta prišla do podobnih ugotovitev pri prodnatih stopnjah, in sicer da sta tudi dolžina med stopnjami in višina stopenj odvisna od naključnih lokacij ključnih velikih balvanov (samice), ki so v hudourniku kot posledica erozije brežin in so preveliki za transport (Slika 2). Stopnje in tolmeni naj bi bili tako naključno razporejeni.



**Slika 2: Stopnje iz balvanov v strugi kot posledica erozije brežin**

Stopnje in tolmeni naj bi bili tako naključno razporejeni, za kar lahko rečemo, da v naravnih strugah zagotovo drži, saj se vzdolž hudournika spreminjajo praktično vsi parametri (mogoče malo manj le velikost plavin, a tudi ta je odvisna od erozijskih središč v bližini), ki vplivajo na tvorjenje stopenj in tolmunov glede na lokalne pogoje. V tem primeru struga ni čisto naplavinska, ker balvani, ki določajo morfologijo kanala in toka, niso prisotni na nekem mestu zaradi sile vode med visokimi vodami. Vseeno pa obstoj balvanov ni garancija za obstoj stopnje na tem mestu (Zimmermann in Church, 2001), saj morajo prvo biti izpolnjeni ravnovesni pogoji. Občasno se tudi pripeti, da se balvani zaradi pomanjkanja potrebe po dodatni stopnji znajdejo v tolmunu, saj tam ni dovolj velikih sil za premikanje plavin takih velikosti. Kljub temu se lahko pod določenimi pogoji za to grobljo plavine strehasto naložijo in tako ustvarijo novo stopnjo ter izredno kratek tolmun gorvodno (Zimmermann in Church, 2001).

Stopnja se lahko tvori tudi tako, da plavje naredi prepreko, večji prodniki pa se nato ob njem ujamejo in tvorijo stopnjo (Wohl et al., 1997). Pojavijo se tudi v nemobilni obliki kot posledica koreninskih sistemov dreves, ki se zaradi erozije hudournika deloma nahajajo v pretočnem

prerezu ali zapadlega lesa, ki je prevelik za transport, in tako tvori osnovo za njen nastanek. Prerez se nato zaprodi in tvori stopnjo. Taka oblika je zlasti pogosta v povirnih delih vodotokov, saj je njihova pogostost v sorazmerju z naklonom (večji je naklon, več jih je) in obratno sorazmerna z zgornjo širino struge ter prispevnega območja (manjša je zgornja širina struga oziroma prispevno območje, več jih je). Da se ustvarijo ravnotežni pogoji, se med nemobilnimi stopnjami prav tako oblikujejo mobilne stopnje (Wohl et al., 1997). Dolvodno, kjer se hudournik razširi in naklon pade, prispevno območje pa je večje, je zaplavni les mobilni (Wohl et al., 1997). V pretočnem prerezu ima znaten delež plavja (ob večjih pretokih) in lahko tvori stopnje z zagozdenjem v brežine ali zapičenjem v posteljico dna.

### 2.3.4 Pretočne hitrosti v strugah tipa stopnja-tolmun (povzeto po Mohorič, 2012)

Pretočna hitrost je preko stopenj relativno velika, medtem ko je v tolmunih občutno nižja, skladno s padcem. V splošnem so z inženirskega vidika bolj zanimive povprečne hitrosti, ki pomagajo pri analizi hudourniških območij. Padci hudourniških strug so pri tem poleg velikosti plavin in pretokov eden izmed glavnih geometrijskih parametrov, ki so potrebni pri izračunu. Povezavo med pretoki  $Q$  in hitrostjo  $v$  predstavlja kontinuitetna enačba (6), potrebni pa so tudi podatki o površini prečnega prereza toka vode  $S$ .

$$Q = v * S \quad (6)$$

V strmih hudourniških strugah standardne enačbe za položne struge, kot je Manning-Stricklerjeva, ne dajejo več pravilnih ocen. Prisotno je kompleksno obnašanje hudournika, saj prihaja do večfaznosti toka, torej mešanja zračnih mehurčkov, vode in plavin. Ker je dogajanje v takih strugah kompleksno, obstaja velika množica empiričnih in polempiričnih enačb za hudournike, vendar so večinoma uporabne v zelo ozkem obsegu. Ta obseg se nanaša zlasti na oceno hrapavosti (v hudournikih se običajno uporablja Darcy-Weisbachov koeficient trenja  $f$ ), saj je ta parameter ključen za pridobitev realnih ocen hitrosti. Ob upoštevanju robnih pogojev te enačbe dajejo zadovoljive rezultate.

Najbolj uporabljani enačbi za strme struge sta Jarrettova (7) in Rickenmannova enačba (8). Pri večjih padcih ima spreminjanje padca nekoliko manjši vpliv, geomorfološke značilnosti onemogočajo razvoj večjih hitrosti, zlasti pri nižjih pretokih. Slabost Jarrettove enačbe je ta, da še vedno potrebujemo hidravlični radij  $R$  (razmerje med površino prečnega prereza in omočenim obodom), ki je v strmi naravni strugi, kjer prodniki občasno tudi segajo skozi tok, zahteven za izračun. Najbolj uporabna je v strmih naravnih hudournikih s stabilnim dnom in brežinami ter pravilnejšim koritom. Oblike dna zmanjšajo uporabnost Jarrettove enačbe.

$$v = 3,11 * R^{0,83} * I^{0,12} \quad (7)$$

Tudi Rickenmannova enačba (8) (Rickenmann 1 – razvita za strme struge) ni primerna za struge tipa stopnja-tolmun, kljub temu da naj bi bila uporabna do padcev 0,63 m/m. Prednost pred Jarrettovo je v tem, da ni uporabil hidravličnega radija, ampak devetdesetodstotno zrno plavin  $d_{90}$ , ki pa je vseeno težje določljivo.

$$v = 0,79 * Q^{0,34} * I^{0,20} * d_{90}^{-0,35} \quad (8)$$

Razvitih je bilo tudi vrsto drugih enačb, ki so primerne tudi za stopnje in tolmune. Te so podrobneje predstavljene v Mohorič (2012).

### 2.3.5 Upor toku vode strugah tipa stopnja-tolmun

Upor toku vode se v splošnem deli na hrapavostni upor, ki je posledica velikosti in oblik plavin v posteljici dna ter oblikovni upor, ki je posledica oblik dna. Stopnje so razlog, da je oblikovni upor v strugah stopnja-tolmun prevladujoč. Maxwell in Papanicolau (2001) sicer pravita, da je znaten tudi hrapavostni upor. Omenjata tudi upor zapadlega lesa oziroma prelivni upor stopenj, ki pa sta sestavni del oblikovnega upora. Hrapavost se močno spreminja s pretokom. Pri večjih pretokih se lahko zmanjša tudi za štirikrat oziroma celo do desetkrat pri večjih pretokih (Lee in Ferguson, 2002).

Za določanje hrapavosti v stopnjah in tolmunih velja podobno kot za hitrost. Najbolj so v uporabi polempirične in empirične enačbe, namesto Manning-Stricklerjevega koeficienta  $n$  pa je primernejši Darcy-Weisbachov koeficient trenja  $f$ . Enačbe v splošnem vsebujejo tudi direktno padec dna struge, nekatere pa posredno. Recimo Maxwell in Papanicolau (2001) sta predlagala zvezo (9), ki uporablja razdaljo med stopnjami  $L_s$ , višino stopnje  $H_s$ . Razvita je bila za padce od 3 % do 7 % (kar ustreza stopnjam-tolmunom), ampak v laboratoriju, zato so realne razmere v naravi lahko drugačne.

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = -3,73 * \log\left(\frac{H_s * D_{84}}{L_s * h}\right) - 0,80 \quad (9)$$

Simbol  $h$  predstavlja srednjo pretočno globino.  $D_{84}$  tu ni striktno razdeljen na vrednosti v stopnjah ali tolmunih. Gre za 84. percentil celotne sestave plavin, za dobro oceno pa bi bilo potrebno vzeti vrednosti, ki veljajo za stopnje. 50. percentil v stopnjah  $D_{50}$  je namreč običajno celo večji od  $D_{84}$ , ki je izračunan tako za stopnje kot tolmune (Wohl et al., 1997). Lee in Ferguson (2002) sta razvila enačbo (10) za določanje upora stopenj-tolmunov iz plavin za padce od 3 % do 18 %, ki pa je temeljila tako na terenskih kot tudi laboratorijskih meritvah. Poleg tega sta uporabila  $D_{84}$  iz stopenj, da so dobljene vrednosti boljše. Ponovno se pojavi hidravlični radij  $R$ , ki je zahtevnejši za izračune v strmih strugah.

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 4,19 * \left(\frac{R}{D_{84}}\right)^{1,80} \quad (10)$$

Slabost zgoraj omenjenih enačb, ki uporabljata 84. percentil sestave plavin, je, da ne upoštevata drugih dejavnikov za tvorjenje stopenj in tolmunov, kot so zaplavni in zapadli les ali pa veliki balvani (Mohorič, 2012). Razvito je tudi veliko ostalih enačb, a tiste, ki dajejo najboljše rezultate, potrebujejo veliko količino težko določljivih vhodnih podatkov, zato je njihova uporaba posledično okrnjena.

### 2.3.6 Premeščanje plavin v strugah tipa stopnja-tolmun

Izračuni po teoretičnih enačbah premeščanja plavin kažejo na to, da so lahko pri večini strug prodniki v stopnjah premeščeni že pri strugotvornem pretoku (Wohl et al., 1997). Premeščanje plavin v tolmunih pa je še precej bolj pogosto in intenzivno, poleg tega plavine naredijo daljšo pot pri nekem poplavnem dogodku. Tolmuni so najbolj aktivni deli strug tipa stopnja-tolmun (De Jong in Ergenzinger, 1994, cit. po Wohl et al., 1997; Schmidt in Gintz, 1995, cit. po Wohl et al., 1997). Ashida et al. (1981, cit. po Zimmermann in Church, 2001) so ugotovili, da se med dvema poplavnima dogodkoma, ki nista sposobna podreti stopenj, zamenja večina plavin, ki so odložene v tolmunih. Voda se preliva preko stopenj, ki ustvarjajo hidravlični skok, ter ustvari podvodni curek, ki izpira plavine v podlagi in ustvarja tolmun. Plavine se odlagajo v dolvodnem delu tolmana. Preliv čez stopnjo ustvari turbulenco, ki lahko premika plavine. Količina energije, ki se disipira v tolmunih, je odvisna od višine in zgradbe gorvodne stopnje. Kakor se naklon poveča, se poveča tudi disipacija energije toka v tolmunih. Intenzivnost vpliva na posteljico dna je odvisna od količine vode v tolmunu. V majhnem tolmunu bo imel precej bolj intenzivno cirkulacijo, kot je v velikih tolmunih (Zimmermann in Church, 2001). Bolj intenzivna turbulenca ustvari večje gradiente tlaka in večji dinamični vzgon, ki je sposoben premikati plavine. Ko je energija turbulence disipirana, se plavine odložijo na robu tolmana. Plavine lahko tudi odplakne čez stopnjo, če je strižna napetost dovolj visoka. Razlike v velikosti zrn v stopnjah in v podlagi so lahko zelo velike. Če je na primer  $D_{50}$  v podlagi med 72 in 95 mm, je lahko  $D_{50}$  v sami stopnji tudi med 450 in 600 mm (Zimmermann in Church, 2001).

Ko so mejne strižne napetosti v posteljici dna presežene, pride do začetka premeščanja plavin. V strugah tipa stopnja tolmun se to dogaja zlasti ob visokih pretokih, manjša zrna pa so lahko premeščena že prej. Klasične teoretične enačbe za izračun premestitvene zmogljivosti, kot je MPM (Mayer-Peter-Millerjeva) enačba, v splošnem niso primerne za uporabo v strmih hudourniških strugah zaradi prevelike kompleksnosti hudournikov. Problematika je dodatno predstavljena v poglavju 2.5. Zaporedja stopenj in tolmunov lahko močno vplivajo na potovalne dolžine plavin. Prodonosnost lahko močno niha glede na razpoložljivost plavin, ki je lahko včasih omejena, v primerjavi z nižinskimi vodotoki. Velja tudi, da naj bi bil za račun transportne zmogljivosti primernejši izračun s padcem v tolmunih (Ashida et al., 1981, cit. po Zimmermann in Church, 2001), to pa zato, ker je tam najmanjši padec in posledična najmanjša zmogljivost premeščanja plavin. Treba je upoštevati tudi, da je tok znotraj tolmana različno močen. Zimmermann in Church (2001) sta sicer potrdila, da je naklon v tolmunu pri predpostavki stalnega enakomernega toka primeren za račun transporta sedimenta v strmih strugah tipa stopenj in tolmunov, kljub temu da nekoliko preceni vrednosti. Uporabila sta enačbo za mejne strižne napetosti (11).

$$\tau_b = \rho * g * h * I \quad (11)$$

Iz te zveze se lahko nato oceni maksimalne velikosti plavin, ki so še lahko premeščene, seveda če se upošteva padec v tolmunih (npr. povprečje padca v 10 zaporednih tolmunih). Njuna raziskava je odkrila, da bi po klasičnem računu lahko hudournik pri pretokih z enoletno povratno dobo premaknil zrna do celo premera 0,5 m, vendar pa jih pri opazovanem dogodku take povratne dobe ni premaknilo. Če sta račun opravila za zrna v tolmunu, je bil rezultat enak 100 mm, kar pa je enako dejanskemu dogajanju. Zrna v stopnjah so zaklinjena in tako zdržijo večje strižne napetosti

(Zimmermann in Church, 2001). Strižne napetosti ob poplavnih dogodkih pri izračunih presežejo 100 Pa, kar pomeni, da bi lahko plavine bile tudi polmetrske skale in bi morale premikati tudi največje skale v strugi. V resnici je struga stabilna, ker se plavine v stopnjah zaklinijo, v tolmunih pa se zaradi manjših naklonov te vrednosti zmanjšajo za približno štirikratno vrednost. Potrebno je povedati, da Shieldsova enačba temelji na povprečnem naklonu. Kritični Shieldsov parameter je 0,045 za heterogene mešanice (Miller et al., 1977) ali 0,06 za homogene, enozrnate plavine (Shields, 1936). Samo v primerih, ko so tudi večje plavine v celoti preplavljene (plavine so torej tako majhne, da jih hudournik preplavi), jih lahko premika že pretok pri enoletni povratni dobi (Zimmermann in Church, 2001).

### 2.3.7 Struge stopnja-tolmun v matični kamnini

Posebna oblika stopenj in tolmunov se lahko pojavi tudi ob prisotnosti zgolj skalnate matične kamnine. V tem primeru se pojavijo skalne ponvice, ki so globoke, okrogle oblike, izdobljene v skalno podlago struge z abrazijo in v njih poteka potrošnja odvečne energije. Howard (1980) je določil zvezo za izračun povprečnega razreda erozije v hudournikih v matični kamnini (12).

$$E = k * A^{\Phi} * I^{\sigma} \quad (12)$$

$E$  predstavlja povprečno erozijsko aktivnost, ki se poveča v odvisnosti od velikosti prispevne površine  $A$ , padca  $I$ , konstant  $\sigma$  in  $\Phi$  ter faktorja  $k$ , ki vključuje lastno erodibilnost matične kamnine in velikostne ter frekvenčne karakteristike toka. Na empiričnem primeru je ocenil vrednosti konstant  $\sigma = 0,44$  in  $\Phi = 0,68$ . Ker stopnja erozije lahko močno variira vzdolž hudournika, ker je geometrija hudournikov zapletena (neenakomerni tok) in ker je padec delno neodvisna spremenljivka, je ta izraz primeren le za krajše odseke.

Geometrija stopenj v matični kamnini lahko odraža iste interakcije, čeprav mejna hrapavost ni odvisna samo od hrapavosti plavin, temveč tudi od odpornosti matične kamnine na abrazijo in krušenje, kar je odvisno od trdnosti intaktne kamnine (skalnate podlage), oblikovanja posteljice dna in razpok v kamnini (Wohl, 2000b). Wohl in Grodek (1994) nista našla neke stalne korelacije med trdnostjo skale (tukaj je funkcija gostote razpok in orientacije, kot tudi litologija konstantna) in geometrijo stopenj ter nobenih opaznih razlik med geometrijo stopenj naplavinjskih stopenj in takih v skalnati osnovi. Duckson in Duckson (1995) sta našla sistematične razlike v dolžini, globini in površini tolmunov v relaciji s tipom skale, vendar pa nobenih razlik v energijskih izgubah na hidravličnih skokih, povezanih s tolmini v različnih okoljih nastanka.

Odseki v skalnati podlagi imajo značilno lahko večje naklone dna, višje stopnje, ki so med sabo bolj oddaljene, večje volumne tolmunov in manjšo povprečno širino, glede na odseke v naplavinski osnovi.

Normaliziranje geometrije stopenj in geometrije tolmunov z naklonom odseka ( $H_s/L_s/g$ ) nakazuje, da je razmerje naplavinske višine stopenj in dolžine med stopnjami ( $H_s/L_s$ ) dejansko večji ter da so naplavinski tolmini dejansko enaki v volumnu tem v skalnati podlagi (povzeto po Wohl, 2000b). Pri dolžini ene stopnje in tolmana  $L_s$  lahko rečemo tudi, da gre za en interval. Normalizirana razmerja  $H_s/L_s$  stopenj in volumnov tolmunov splošno niso statistično bistveno različni med odseki v matični kamnini in aluvialnih odkladninah. Manjše dimenzije tolmunov in razmerje  $H_s/L_s/g$  za odseke v matični kamnini nakazujejo na to, da je razmerje vlečnih sil proti

uporu toku vode manjše v takih odsekih kot v naplavinških odsekih. Naplavinski tolmeni so izprani do maksimalne količine relativno hitro, ko se stopnje in tolmeni formirajo. Ko je enkrat tolmun oblikovan, večje dimenzije naplavinskih tolmunov kažejo na to, da je lahko več energije disipirane v turbulenci v bližini površine. Nasprotno se tolmeni v matični podlagi počasi erodirajo in njihove sedanje dimenzije kažejo na to, da je več energije efektivno razpoložljive, da se erodirajo brežine v strugah s skalnato podlago. Sprememba v razmerju stopenj  $H_S/L_S/g$  je podobna v vseh strugah, padajoč iz razmerja nad 2 v naplavinskih odsekih na razmerje okrog 1 v odsekih s skalnato podlago. Vsi odseki struge s skalnato osnovo so ožji v razmerju s padcem, kot podobni naplavinski odseki. To kaže na to, da je energija toka lahko bolj efektivno usmerjena na spodjedanje dna in dolbljenje v odsekih v matični kamnini, kot je logično glede na pričakovane večje naklone odseka. V odsekih v matični kamnini je struga ožja pri stopnjah in širša v tolmunih. To kaže na to, da ima voda, ki pade preko stopenj, dovolj energije, da širi strugo takoj dolvodno. Prav tako nakazuje na večjo disipacijo energije v hidravličnih skokih, strižnem toku in stranskih vrtincih, ki se tvorijo v tolmunih. V strugah v matični kamnini pogosto tok nima dovolj energije, da bi širil strugo v tolmu dolvodno od stopnje, medtem ko je energija toka v naplavinskih odsekih zadostna, da razširi celotno strugo.

### 2.3.8 Metode meritev strug tipa stopnja-tolmun

Naklon dna na mikrolokacijah se preiskuje na terenu najbolj pogosto z nivelmanom in nivelmansko lato ali pa laserskim teodolitom. Potek gladin lahko meri na isti način. Ker je merjenje poteka gladine pri visokih pretokih nevarno, se običajno to izvede v času nizkih pretokov. V takih primerih si lahko tudi pomagamo z nemimi pričami takoj po poplavnem dogodku. Iz teh kazalcev se nato lahko oceni gladino hudournika ob maksimalnem pretoku. Kadar imamo struge z oblikami dna, na primer oblike stopenj in tolmunov, moramo analizirati tudi primerno dolg odsek, da zajamemo vsaj nekaj teh oblik (Mikoš, 2007). Če imamo hudournik, ki presahne, lahko morfologijo struge posnamemo tudi z lidarjem. Tak postopek je zlasti primeren ob zajemu podatkov z večjega območja, na primer nekega hudourniškega območja.

Poleg tega je potrebno izvedeti, kako dolg odsek se preiskuje, kako določiti velikost plavin oziroma kako meriti njihov transport in zgornjo širino struge hudournika. Metode so lahko uporabljene tudi pri preostalih geomorfoloških oblikah.

#### 2.3.8.1 Izbira dolžine preiskanega odseka

Ta odločitev je odvisna od namena raziskave. Zlasti je pomembna pri raziskavah oblik dna in njihovih značilnosti. Do sedaj še ni bilo razvite enotne metodologije za določitev dolžine posameznega odseka, kjer se izvajajo raziskave za pridobitev najboljših rezultatov, saj je to odvisno od lokalnih razmer in cilja preučevanja. Večina raziskav je bila opravljena na odsekih, kjer je bila morfologija in sestava stopenj približno enaka tekom celega odseka. Tako so dobili rezultate, ki so bili značilni posebej za struge tipa stopenj in tolmunov, kaskade ali brazd in tolmunov. Večino so raziskave ponovili večkrat na različnih odsekih in različnih hudourniških območjih, ki pa so se nahajala na istem geografskem območju. Velikost prispevnih območij je bila večinoma pod  $10 \text{ km}^2$ . Eden prvih, ki je izvajal podobne raziskave, je bil Kaufmann (1987), ki je obravnaval v vsakem od izbranih hudournikov po vsaj tri 100-metrške odseke. Wohl et al. (1997) so obravnavali kar 53 odsekov na 32 hudournikih, kjer je bilo preiskanih vsaj 20 zaporednih sekvenc stopenj in tolmunov, kar je zneslo od 30 m do 60 m. Izbrana dolžina je bila tako odvisna



od velikosti hudourniškega območja, homogenosti dna doline, in sprememb v naklonu struge. Chin (1998), ki je preučevala stabilnost strug tipa stopnja-tolmun, je analizirala po sedem ali osem odsekov na hudourniku dolžine med 125 m in 273 m. Zimmerman in Church (2001), ki sta preučevala nekoliko večje hudournike (do 60 km<sup>2</sup> prispevne površine), sta uporabila 4 60-metrške odseke.

Wohl (2000a) je nato v raziskavi, kjer je merila povprečno hitrost hudournika tipa stopnja-tolmun, uporabila odseke dolžine 55 m do 790 m, kar presega predhodne primere meritev. Curran in Wohl (2003) sta nato predlagala, da naj bi bil analizirani odsek dolg vsaj 10 širin struge, kar znaša za taka prispevna območja običajno 50 m do 60 m. Na ta način se naj bi zajelo lokalno spreminjanje enot tipa stopnja-tolmun. Na temu odseku bi nato potrebovali preiskave merjenja s teodolitom in merjenja razdalje, da bi določili 10 do 11 prečnih prerezov. Pomembno je, da so v času meritev hidrološki pogoji čim bolj konstantni oziroma da se meritve izvajajo takrat, ko so pogoji čim bolj podobni. Preiskave vzdolžnega profila, ki so potrebne za določitev dolžine odseka, povprečnega naklona in višine stopnje, se izvajajo vzdolž globočnice.

Lee in Ferguson (2002) sta uporabila za preiskave hitrosti in hrapavosti zgolj 6 odsekov in dolžine 15 m do 20 m, znotraj katerih sta zajela tri do šest ciklov stopenj in tolmunov, ki so bili večinoma formirani iz groblje in prodnikov. V tem primeru so se analizirale različne strukture, saj je bilo prisotnih na opazovanih odsekih tudi nekaj stopenj v skalnati podlagi in dve stopnji, ki sta bili vmesni stopnji med strugami tipa stopnja-tolmun in kaskadami. Wohl in Wilcox (2005) sta za analizo odnosov med rečno hidravliko in morfologijo struge uporabila več 30-metrskih odsekov s po približno šestimi sekvencami. Raziskava, ki so jo izvedli Comiti et al. (2005) in je geografsko najbolj sorodna raziskava, je zajemala 10 odsekov dolžin od 16 m do 76 m.

V nasprotju z večino predhodnih raziskav pa so Kaufmann et al. (2008) uporabili 40-kratnik omočenega oboda nizkih pretokov, kjer je bila minimalna razdalja 150 m. Ta je bila nato razdeljena na 11 enako oddaljenih prečnih prerezov, kjer se je zajelo še 10 m brežine na vsaki strani struge. Vzdolžni profil se je meril v globočnici, in sicer v 100 enako razmaknjenih točkah oziroma 150 v hudournikih ožjih od 2,5 m.

Eno zadnjih podobnih raziskav sta opravila Yochum in Bledsoe (2010). Uporabila sta 15 odsekov, ki so bili merjeni z lidarjem za značilnosti izven hudournika, z laserskim teodolitom pa so bile izmerjene značilnosti v strugi. S slednjim so izvedli tudi merjenje vzdolžnih profilov po globočnici in obeh brežinah. Iz oblaka točk iz teodolita so bili nato razviti prečni prerezi z intervalom 0,75 m do 1,5 m in na samo 6 m do 35 m dolgih odsekih.

Nekateri raziskovalci so se odločili tudi, da so podatke pridobljene s strani drugih raziskovalcev ponovno uporabili oziroma so v raziskavi združili podatke več različnih merjenj. Taka obravnava je lahko vprašljiva, saj je pogosto zajem podatkov različen. Različni avtorji uporabljajo drugačne definicije dolžin sekvenc stopenj-tolmunov, višine stopnje in tako dalje.

### **2.3.8.2 Oblika zrn plavin in meritve transporta plavin**

Za analizo plavin se najpogosteje uporablja Wolmanovo štetje 100 naključnih prodnikov iz tolmunov in 100 iz stopenj. Na ta način je upoštevana velika razlika med velikostjo plavin v eni in drugi tvorbi. Upoštevati je potrebno tudi razliko v velikosti plavin v posteljici dna in tistih v

materialu pod njo, saj so slednje manjše. Te lastnosti Wolmanovo štetje ne upošteva. Če je bila stopnja formirana iz zaplavnega lesa, se izmeri njegov premer. Pogosto se teh 100 kamnov v stopnjah izmeri še v 3 oseh, če se raziskave navezujejo na način postavljanja v stopnjah.

Raziskovalci so do sedaj uporabili tudi že precej različnih postopkov terenske ocene transporta plavin, noben pa ni bil širše uporabljan. Eden izmed novejših in najboljših možnih načinov je z uporabo lidarskih DMV pred in po poplavnem dogodku. Gre za drago metodo, saj je potrebno redno osveževanje DMV. Za potrebe raziskav se uporabljajo tudi drugi postopki, kot so obarvanje prodnikov in spremljanje njihovega potovanja (primernejše za laboratorij), namagnetenje zrn vnesenih v hudournik ali pa vstavitev oddajnikov v prodnike. Ergenzinger in Schmidt (1990) sta za določitev potovalne razdalje glede na težo in obliko uporabila umetne betonske prodnike z vstavljenim magnetom, oddajnikom in šifro. Uporabila sta lagrangeovo metodo sledenju delcem, ki je primernejša v primeru opazovanja dolžine premeščanja nekih določenih delcev. Merilne tehnike, ki so uporabljene na več strugah tipa stopnja-tolmun, so običajno ločene na zrna v stopnjah in zrna v tolmunih.

### 2.3.8.3 Določitev dejanske zgornje širine struge

Dimenzije dejanske zgornje širine struge se lahko ocenijo na terenu na osnovi sprememb v nagibu brežin, velikosti zrn (če so sploh še prisotna) in obrežne vegetacije (Wohl et al., 1997). Uporabi se lahko preprosti merilni trak.

## 2.4 Les in hudourniki

Hudourniška območja so pogosto prekrita z gozdovi. V življenjskem ciklu dreves prihaja do odmiranja in lomljenja, zaradi zunanjih dejavnikov pa so lahko ti procesi pospešeni. Odpadni les je, v kolikor ni s strani človeka odstranjen, nato prepuščen naravnim procesom gnitja, lahko pa po spletu okoliščin konča tudi v hudourniški strugi ali na poplavnih ravninah. To zlasti velja za drevesa na brežinah hudournikov. Poznamo zapadli les oziroma veliko leseno plavje. Zapadli les je v povirjih večino časa nemobilan, saj je prevelik za transport (Slika 3 a). To so kosi lesa, ki v strugi končajo najpogosteje po podrtju dreves na brežini, lahko zaradi spodjedanja brežin. Določeni izračuni značilnosti strug veliko leseno plavje tudi upoštevajo. Preiskovanje plavja v naravi je izredno kompleksen proces, zato je večino raziskav izvedenih v laboratorijih (posledično pa niso popolnoma primerne za prakso). Mednje se štejejo lesena debla, veje in panji premera nad 0,1 m in nad 1 m dolžine (Fetherson et al., 1995). V raznih izračunih se uporabljajo običajno kot število kosov na 100 m odseka ali pa kot volumen zapadlega lesa na 100-metrskem odseku za pridobitev neke povprečne vrednosti. Zaradi zapadlega lesa se lahko tvorijo stopnje in manjše zajezbe, ki spremenijo morfologijo struge. Če je zapadli les premeščen, se lahko odloži v aktivnem kanalu, kjer lahko tvori stopnjo – to obliko imenujemo zaplavni les (Slika 3 b, c). Ob izrednih dogodkih pa se odloži tudi na poplavnih ravninah, kjer nudi ustrezne pogoje za rast vegetacije. S svojim položajem, stranskimi tolmunmi in določanjem gibanja toka določa mesta za kopičenje organskih snovi in plavin (Fetherson et al., 1995). Plavje je les, ki ga hudournik nosi na gladini (Slika 3 d) in je običajno manjših dimenzij, kljub temu pa lahko zaradi svoje količine ni zanemarljiv njegov vpliv. Lahko je v kombinaciji s posameznim premeščenim zaplavnim lesom tudi razlog za dvig gladine hudournika, lahko povzroča zajezbe, poleg tega lahko vpliva na spremenjen čas potovanja poplavnega vala (Gippel, 1995). Zaplavni les je pomemben tudi z ekološkega vidika. Nudi vir hranil za rastline, hkrati pa nudi zavetje za organizme. Prihaja do

konflikta, da je zaplavni les iz struge z vidika hidravlične prevodnosti in urejanja hudournikov zaželeno odstraniti, da se zmanjša koeficient hrapavosti in poveča prevodnost, medtem ko je iz ekološkega vidika zaželen, saj tvori območja nizkih hitrosti in strižnih napetosti, tako pa omogoči ugodne razmere za ribje organizme oziroma omogoča nastanek novih ekosistemov z odlaganjem plavin.



Avtor: Nejc Mohorič (januar 2015, maj 2014)

### Slika 3: Vloga lesa v hudournikih

Porazdelitev, količina in funkcije zapadlega lesa se spreminjajo z velikostjo struge (Bilby in Ward, 1991). V splošnem manjši kanali vsebujejo veliko zapadlega lesa. V večjih kanalih je veliko leseno plavje lažje premeščeno, zato ga je relativno gledano manj, a so zaježitve, ki jih povzročijo, večje. Pogostost pojavljanja je manjša zaradi spiranja manjših delov plavja in grmičevja zaradi večje moči hudournika (Swanson et al., 1982, cit. po Fetherston et al., 1995). Zaplavni les

seveda lahko deloma tudi poveča širino kanala ali spremeni potek struge, v kolikor geomorfološke karakteristike doline to dopuščajo. Na velikost in porazdelitev zaplavnega lesa vpliva tudi sestava obrežnega rastja, saj večje vrste rastja ustvarijo bolj obstojne tvorbe v strugi (Fetherston et al., 1995).

Premeščanje plavja oziroma zapadlega lesa in tvorjenje stopenj iz njega je prisotno v še tako majhnih hudourniških in gorskih potokih, običajno pa pride v strugo iz poplavnih ravnin ali obrežij. Pogosto je tudi zaplavni les odločilen za nastanek stopenj. Naredi namreč prepreko, potem pa se večji prodniki ob njem ustavijo in tvorijo stopnjo (Wohl et al., 1997). Ta princip poskrbi s formacijo stopnje za to, da se zmanjšajo strižne napetosti v hudourniku (Marston, 1982; Grant et al., 1990). V strugah ožjih od 7 m naj bi kar 15 % padca ustvarile stopnje nastale iz zaplavnega lesa (Marston, 1982; Bilby in Ward, 1989). Redkejša so v širših strugah 7 m do 10 m, tam naj bi jih bilo le pet odstotkov, v še širših strugah pa so stopnje iz zapadlega lesa prisotne le izjemoma (Wohl et al., 1997).

Zapadli les na brežinah predstavlja ovire in tvori habitate ali celo prodišča (Abbe in Montgomery, 1996). Tudi za velikimi prodniki in zaplavnim lesom v bolj zatišnih legah se nabirajo finejše plavine. Tako zapadli les kot kasneje zaplavni les ustvarjata cone nizkih strižnih napetosti, kar vpliva na transport plavin, poleg tega pa se v teh zatišnih legah, odlagajo organske snovi in hranila kar ustvari dobre pogoje za razvoj habitata (Bisson et al., 1987). S sukcesijo lahko v takih okoliščinah pride do tega, da se pojavi vegetacija. V malih in srednje velikih strugah so prodišča kot posledica količine zapadlega lesa, ožje struge, večjega naklona ter posledično več oblik stopenj in tolmunov pogosta, a majhna. Dolvodno v širših, položnejših vodotokih z ravnim dnom ali brazdami so redkejša, a zato toliko bolj obširna (Montgomery in Buffington, 1993). Z naraščanjem širine struge pada pogostost prodišč in tudi delež prodišč nastalih iz zaplavnega lesa (Bilby in Ward, 1991).

Zapadli les iglavcev je običajno večji od listavcev, s čimer je manj verjetno, da ga odplakne dolvodno, vendar pa je čas trajanja razkroja višji, kar poveča njegovo obstojnost v sistemu (Harmon et al., 1986, cit. po Fetherston et. al., 1995). Ti faktorji tako vplivajo na večje količine zapadlega lesa v strugah, ki tečejo skozi iglaste gozdove. Veliko leseno plavje lahko pride v strugo na več načinov. Ločimo:

- trajne in
- občasne procese.

Trajni procesi vključujejo običajen vnos lesa kot posledica naravne umrljivosti dreves ali postopnega spodjedanja brežin. Za te procese je pričakovano, da prispevajo manjše količine zapadlega lesa v stalnih intervalih. Občasni vnosi, kot so vetrolomi, žledolomi, snegolomi, gozdni požari in obsežne poplave, se pojavijo zelo redko, vendar v kratkem času prispevajo zelo velike količine lesa v omrežje (Bisson et al., 1987). Območje, ki prispeva v kanal zapadli les, se spreminja v odvisnosti od vrste obrežne vegetacije, topografije obrežij, karakteristik kanala in prevladujoče smeri vetra (Steinblums, et al., 1984; Murphy in Koski, 1989). Če brežine niso zavarovane, spodjedanje brežin prispeva večino velikega lesenega plavja (Murphy in Koski, 1989). Nekaj velikega lesenega plavja lahko prinese tudi iz gorvodnih odsekov med poplavnimi dogodki ali obsežnimi redkimi dogodki (Swanson et al., 1982, cit. po Fetherston et. al., 1995).

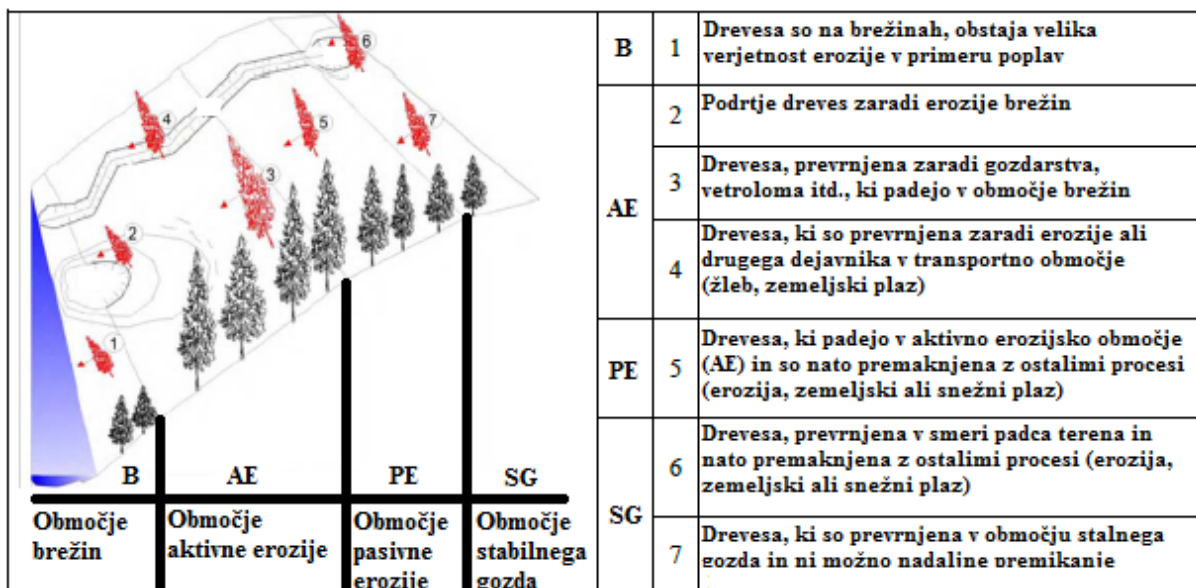
V preteklosti je bilo za večje hudournike že ugotovljeno, da je osnovna cona vnosa zapadlega lesa enaka višini najvišjih dreves na obrežjih (Murphy in Koski, 1989; Robison in Beschta, 1990). Fetherston et al. (1995) so ugotovili, da obrežni gozdovi na oddaljenosti do 30 m od struge prispevajo od 70 % do 90 % vsega zapadlega lesa v hudournikih. Zapadli les se aktivira iz brežin, teras, gozdov na poplavnih ravninah, na primer zaradi vetra in prevladujočih motenj pobočnih in rečnih procesov. Vloga obrežnih gozdov je predstavljena v podpoglavju.

Pomembno je tudi omeniti, da ob poplavnih dogodkih ravno veliko leseno plavje vpliva na dodatno škodo s tem, da zmanjša ali zamaši prepuste in odprtine v mostovih. V te se nato zatakne manjše plavje in lahko popolnoma zamaši prerez, nastane zaježitev. Pride do prelivanja in obtekanja objekta ali pa celo do hipne porušitve premostitve. Zato je možna tudi dodatna erozija na določenih območjih in odlaganje plavja in plavin na drugih. Škoda lahko nastane na stavbah, prometni in ostali javni infrastrukturi, kmetijskih površinah itd. Take dogodke lahko preprečimo ali vsaj omejimo (Rudolf-Miklau et al., 2011) s/z:

- gozdarskimi ukrepi (npr. vzdrževanje obrežnih gozdov, manjši kosi namreč tudi pri odplavitvi predstavljajo manjše tveganje),
- inženirsko-biotehnični ukrepi (npr. fašine),
- tehničnimi ukrepi (prebiralne pregrade – grablje, mreže, ostali tehnični ukrepi),
- ukrepi prostorskega načrtovanja (da se čim bolj omeji gradnja tiste infrastrukture, kjer je ob poplavljanju največja škoda ali so celo ogrožena življenja),
- vzdrževanjem in sanacijo struge (npr. odstranjevanje pretirane zarasti in zapadlega lesa od prejšnjih poplavnih dogodkov) ter
- interventnimi ukrepi v času poplav.

#### **2.4.1 Obrežni gozdovi**

Kot je bilo že omenjeno igrajo obrežni gozdovi pomembno vlogo. Predstavljajo proti-erozijsko zaščito brežin in poplavnih ravnin, poleg tega pa sestava vegetacije vpliva na količino velikega lesenega plavja. Raba tal na prispevnih površinah hudournika, še zlasti obrežni gozdovi v hudourniških območjih, imajo torej velik vpliv na sestavo in količino zapadlega lesa, zaplavnega lesa in plavja. Obrežni gozd predstavlja povezavo med vodnim in kopenskim ekosistemom v gozdnih pokrajinah (Fetherston et al., 1995). Močno vpliva na vsebnost organskih snovi v hudourniških strugah, ustvari sence ter stabilizira brežine. Zaplavni les, ki ga prispevajo obrežni gozdovi, lahko občutno vpliva tudi na potek struge, saj lahko preusmeri tok ali pa povzroči zaježbo oziroma stopnjo. Fetherston et al. (1995) so obrežne gozdove označili za bistven dejavnik formacije morfologije struge. Zlasti pomembni so zato, ker stabilizirajo aktivne poplavne ravne, poleg tega pa so glavni vir lesenega plavja. Obrežni gozd na ta način sooblikuje vzdolžno porazdelitev pobočnih in rečnih procesov vzdolž struge. Na strukturo, sestavo in porazdelitev obrežnih gozdov vzdolž hudournika pa vplivajo tudi snežni plazovi, drobirski tokovi ter poplavni dogodki. Tudi aktiven kanal, ki je zapolnjen s strugotvornim pretokom, je omejen s spodnjim nivojem kontinuirane obrežne vegetacije (Church, 1992). Te procese je dobro opisal Mazzorana (2007, cit. po Rudolf-Miklau in Hübl, 2010), ki je brežine oziroma pobočja dolin razdelil na območje brežin, območje aktivne erozije, območje pasivne erozije in območje stabilnega gozda (Slika 4). Lastnosti posameznih procesov na brežinah so predstavljene na Sliki 4.



Slika 4: Model izvornih območij zapadlega in zaplavnega lesa ter plavja (povzeto po Mazzorana, 2007, cit. po Rudolf-Miklau in Hübl, 2010, str. 870)

Potrebno se je zavedati, da se obrežni gozdovi v času in prostoru močno spreminjajo po njihovi količini, vrsti in karakteristikah ekosistema ter, da gre tako za geomorfološki proces (Fetherston et al., 1995). Pogozdene poplavne ravnice se najprej pojavijo na hudourniških območjih in so povezane z zapadlim lesom, ki je postavljeno paralelno ali poševno na strugo. Zaplavni les dobro uklešči rečne in koluvialne sedimente. Ukleščen med prodom začne gniti in prevzame vlogo hranila, ki poskrbi za ponovno zarast z olesenelimi rastlinami (Franklin, 1982; Harmon et al., 1986, cit. po Fetherston et. al., 1995). Vegetacija, ki je v aktivni strugi in na poplavnih območjih, mora biti dovolj močna, da zdrži poplave (Walker et al., 1986).

Ko pride pri strugotvornih pretokih do premeščanja posteljice, lahko to ustvari znatno motnjo za rastline, ki so znotraj strugotvornega območja (Sigafos, 1964; Harris, 1987). Vodne sile med poletnimi sušami in jesenskimi deževji ustvarijo veliko smrtnost med rastlinstvom, ki se je v času suše naselila v strugi (Walker et al., 1986).

Obrežni gozdovi so večinski vir velikega lesenega plavja, ta pa v ekstremnih dogodkih v ožjih delih struge lahko tvori naravne jezove, ki v primeru porušitve povzročijo katastrofalne posledice dolvodno (Rudolf-Miklau et al., 2011). Z ukrepi, kot so čiščenje obrežij ali tehničnimi ukrepi (ločevalne pregrade), se vnos velikega lesenega plavja bistveno zmanjša in tako bistveno zmanjšamo tveganje. Že s skrbnim in strokovnim upravljanjem gozda lahko znižamo tveganja. Verjetnost takih dogodkov in na splošno prisotnosti velikega lesenega plavja v hudourniku je odvisna od (Rudolf-Miklau et al., 2011):

- pestrosti drevesnih vrst,
- vrste dreves (nekatero vrste so bolj občutljive na določene vremenske pogoje),
- starosti gozda, starejša drevesa so namreč bolj nagnjeni k na primer vetrolomom,
- lastnosti tal in njihove stabilnosti,

- vetra in količine snega (vetrolom, snegolom, snežni plazovi, ki se ustavijo v strugi, žledolom ...),
- postavitve v prostoru (brežine proti jugu in zahodu so bolj izpostavljene preperevanju, saj je več sprememb mokro-suho ter zamrzovanje-tanje),
- upravljanja gozdnih površin (nepremišljeni gozdarski posegi, kot so goloseki, gozdne vlake in posledično vnos tujerodnih vrst, lahko povečajo nevarnost npr. plazov),
- geologije (plazovi so lahko razlog za povečane količine velikega lesenega plavja v hudourniku),
- globinske in bočne erozije hudournika (zlasti pri bočni pri npr. odplavitvi drevesa lahko nastane novo erozijsko žarišče oziroma spodjeda) ter
- padca na brežinah (večji naklon vpliva na večjo erozijsko moč).

#### 2.4.2 Račun potenciala zapadlega lesa (povzeto po Rudolf-Miklau et al., 2011)

Potencial zapadlega lesa je ocenjena količina zapadlega lesa, ki ga lahko pričakujemo glede na velikost hudourniškega območja oziroma dolžino hudournika. Izračun potenciala zaplavnega lesa je v razmerju z velikostjo območja. V uporabi sta Rickenmannovi enačbi (13) in (14) ter enačba po Uchiogi-ju (15).

$$V'_h \approx 90 * A \quad (13)$$

$V'_h$  je potencial zaplavnega lesa,  $A$  pa površina hudourniškega območja oziroma prispevnega območja v km<sup>2</sup>, uporabna pa naj bi bila za hudourniška območja do 100 km<sup>2</sup>. Druga Rickenmannova enačba (14) uporablja namesto velikosti hudourniškega območja dolžino struge hudournika  $L_w$  [km].

$$V'_h \approx 40 * (L_w)^2 \quad (14)$$

Ta enačba naj bi bila primerna za hudournike dolžine do 20 km, vendar pa poda slabše rezultate. Izračun potenciala zaplavnega lesa glede na velikost hudourniškega območja po Uchiogiju (15) je mogoče bolj primeren, saj je v izrazu upoštevana tudi zgradba gozda.

$$V'_h \approx C * A \quad (15)$$

Zgornja meja za iglaste gozdove je  $C = 1000$ ,  $C = 100$  je zgornja meja za listnati gozd ter  $C = 10$  spodnja meja pri mešanih gozdovih. Enačba je uporabna pri velikosti porečij do 100 km<sup>2</sup>. V kvadratnih kilometrih se podaja tudi velikost hudourniškega območja v tej enačbi. S to enačbo se dobi približno dobre rezultate. Ocena potenciala zapadlega lesa se danes poskusno ugotavlja s pomočjo zračnih posnetkov površine, kjer se nato oceni kritična mesta in količino razpoložljivega lesa. Slabost je v tem, da ni mogoče izključiti subjektivnosti izdelovalca, metoda je zahtevnejša in relativno draga. Izdelujejo se tudi novi postopki ocene potenciala zapadlega lesa, ki bi lahko dali uporabne rezultate.

#### 2.5 Erozijski transport in akumulacija

Procesi, ki oblikujejo površje so ledeniški, vulkanski, zemeljski plazovi, vodni in vetrni vplivi ter drugo, kjer je kar 85 do 90 % transporta v morja povzročena z vodotoki (Hribar, 2009). Erozijski

močno preoblikuje površje, gre pa običajno za počasen proces, v kolikor ni vključen človek, ki lahko s svojimi dejanji tvori hitre in velike spremembe. V primeru hudournikov je to lahko gozdarstvo, gradnja objektov na hudournikih ter tudi urejanje hudourniških strug. Erozijska je pogojena tudi z rabo tal. Pokritost površja Slovenije z gozdom je kar 60 odstotna, in če upoštevamo dejstvo, da so ravno strmejša pobočja pretežno pokrita z gozdom, je potrebno omeniti tudi, da se s poraščenostjo pobočij zmanjša erozijska. Tip in količina vegetacije lahko povečajo odpornost proti eroziji tako na pobočjih kot tudi na poplavnih ravninah. Količina materiala, ki prispe v strugo, je odvisna zlasti od naklona terena, tipa zemljine, matične podlage in podnebja (Hribar, 2010).

Plavine lahko izvirajo iz matične kamnine, mehanskega preperevanja zaradi atmosferskih razmer ter vodne ali ledeniške erozije (morenski material). Že kapljice ob dežju povzročajo erozijo (pljuskovna erozija), potem pa se združijo v žlebiče (žlebična, medžlebična in brazdna erozija) ter nadalje v jarke (jarkovna erozija) in potoke. Hudourniška območja v hribovitem in goratem svetu so kljub temu, da so včasih plavine omejene, glavni vir rečnih sedimentov, ker je prisotna močna interakcija med pobočnimi procesi in hudourniško strugo (Slika 5). Dodatno k temu pripomorejo veliki nakloni pobočij ter seveda tudi strug, ki imajo zato večjo premestitveno zmogljivost (ta je neposredno povezana s padcem).



**Slika 5: Primera erozijskih žarišč**

Transport sedimentov je v povirjih lahko omejen zaradi nizkih pretokov, močno pa se lahko poveča s poplavnimi dogodki (Galia in Hredecký, 2012). Omejuje ga lahko tudi pomanjkanje razpoložljivega erozijskega materiala (potencialnih plavin) v okolici. Transport sedimenta naj bi bil celo pogosteje omejen z razpoložljivo količino sedimentov kot pa s premestitveno zmogljivostjo pri danem pretoku in pogojih v strugi (Rickenmann et al., 2006). Plavine vstopajo v hudournik stohastično v intervalih, nekontinuirano, na različnih krajih v različnih časovnih intervalih. Proces lahko pospešijo ekstremni dogodki, kot so nevihte, ki lahko sprožijo na primer plazove, potresi, ki sprožijo skalne podore, in ravno tako plazovi ter požari, ki uničijo rastlinski pokrov in je tako možnost plazanja tal spet večja.



Hudourniku, ki premešča preveč plavin, se dviguje dno struge. Hudournik, ki premešča premalo plavin, pa se pogloblja in erodira svoje brežine. Če je zaradi razpoložljivega prostora le mogoče, struge stalno spreminjajo svojo lego in se spreminjajo zaradi odnašanja plavin iz posteljice dna in brežin ter akumuliranja le-teh dolvodno. Posteljica dna ostane večinoma stabilna tekom manjših pretokov in manjših poplav, ker transportira samo pesek in fine prodnike preko bolj grobega površinskega sloja (Marion in Weirich, 1999). Do premikanja struge in porušitve stabilnosti prihaja zlasti ob večjih poplavnih dogodkih, ko je premestitvena zmogljivost bistveno večja in pride tako do porušitve ravnovesnega stanja. Na premeščanje plavin pomembno vpliva to, ali gre za aluvialno, koluvialno strugo ali strugo v matični podlagi (Montgomery in Buffington, 1997). Nekonsolidirani nanosi seveda nudijo precej manj odpora kot skalnata matična kamnina.

Modeliranje transporta plavin je zelo zahtevno. Obstaja več programskih orodij, ki so večinoma primerna zgolj v ozkih geografskih okoljih, vseeno pa jih večina v tem okviru oceni vsaj velikostni razred. Dodaten problem takih programov predstavljajo nezanesljivi vhodni podatki (Rickenmann et al., 2006). Tudi pri številu faz premeščanja plavin si raziskovalci niso popolnoma enotni. Beschta (1987, cit. po Rickenmann et al., 2006) in Bathurst (1987, cit. po Rickenmann et al., 2006) sta premeščanje plavin v strmih strugah razdelila na 2 fazi. V prvi gre za premeščanje finejših delcev, posteljica dna pa ostane stabilna. V drugi pride do porušitve posteljice dna oziroma tlakovanega sloja in enakomerne mobilnosti zrn vseh velikosti. Velikostna sestava plavin je zato podobna tisti v podpovršinskemu sloju. Warburton (1992) je predlagal še podrobnejšo razdelitev na 3 faze transporta plavin. Ta se sicer nanaša zgolj na stopnje in tolmane, vendar ker so te prevladujoče v strmih strugah, je govora praktično o istih procesih kot pri Beschti (1987, cit. po Rickenmann et al., 2006) in Bathurstu (1987, cit. po Rickenmann et al., 2006). Transport je razdelil na:

- nizkopretočno izpiranje finih plavin,
- pogosto visokovodno mobilizacijo prodnikov v tolmunih in
- redke visokopretočne mobilizacije zrn, ki tvorijo stopnje.

Energija, pri kateri pride do večjih geomorfoloških sprememb, je odvisna od velikosti pretokov in padca struge. Večina energije se že prej porabi za sam tok vode, ki izgublja energijo ob brežinah struge, ter pri stopnjah in padcu v tolmane, deloma pa tudi pri zavojih, ki jih je v hudourniških manj. Ocenjeno je, da se 95 % energije porabi samo za premagovanje upora toku. Izgube energije se kot posledica trenja delijo na hrapavostni upor ter oblikovni upor. V hudourniških strugah, kjer so prisotne oblike dna (stopnje-tolmuni, kaskade ...), ima oblikovni upor prevladujoč vpliv (Rickenmann et al., 2006).

Določanje premeščanja plavin je zahtevno. Klasična Meyer-Peter-Müllerjev (MPM) enačba ni primerna. Do premeščanja pride, ko je presežena kritična strižna napetost. Problematika je dobro preučena v nižinskih vodotokih, v hudourniških strugah pa nekoliko slabše. Rickenmann (1991) je eksperimentalno razvil brezdimenzijsko enačbo (16) za opis transporta v strmih strugah.

$$\Phi_b = 3,1 * \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} * \theta^{0,5} * (\theta - \theta_{cr}) * Fr^{1,0} * (s - 1)^{-0,5} \quad (16)$$

Ta enačba se ob predpostavkah, da je  $s = 2,68$  in  $d_{90} / d_{30} = 1,05$ , glasi, kot je predstavljeno v (17).

$$\Phi_b = 2,5 * \theta^{0,5} * (\theta - \theta_{cr}) * Fr^{1,0} \quad (17)$$

$\theta$  je brezdimenzijska strižna napetost (19),  $\theta_{cr}$  je kritična brezdimenzijska strižna napetost, pri kateri pride do premikanja plavin,  $\Phi_b$  (18) je Einsteinov parameter premeščanja ali razmerje med maso premeščenih plavin in maso posameznega zrna,  $Fr$  (20) pa Froudeovo število. Razvita enačba ima tako podobno zgradbo kot MPM enačba.

$$\Phi_b = \frac{q_b}{[(s-1)*g*d_m^3]^{0,5}} \quad (18)$$

$$\theta = \frac{h_m * I}{[(s-1)*d_m]} \quad (19)$$

$$Fr = \frac{v}{(g*h)^{0,5}} \quad (20)$$

Enačba (16) je lahko modificirana v obliko (21).

$$q_b = 12,6 * \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} * (q - q_c) * I^{1,5} * (s - 1)^{-1,5} \quad (21)$$

Oznaka  $q_b$  je specifična premestitvena zmogljivost,  $q_c$  pa kritični pretok pri začetku premeščanja. Ob upoštevanju izrazov za  $\Phi_b$  (18) in  $\theta$  (19) ter kontinuitetne enačbe je potem (za padce 3 % do 20 %) z upoštevanimi poenostavitvami specifična premestitvena zmogljivost  $q_b$  enaka enačbi (22).

$$q_b = 1,5 * (q - q_c) * I^{1,5} \quad (22)$$

Ta enačba je po obliki izjemno podobna Schoklitschevi (23) (1962, cit. po Rickenmann et al., 2006), razlika je le v začetni konstanti, kjer ni upoštevana predpostavka za vrednost razmerja med gostoto plavin in vode.

$$q_b = \left(\frac{2,5}{s}\right) * (q - q_c) * I^{1,5} \quad (23)$$

Kljub temu da je bila enačba (21) razvita kasneje (Rickenmann, 1991), je za naklone med 0,03 m/m do 0,2 m/m vseeno za malenkost bolj zanesljiva enačba (24) Rickenmanna (1990).

$$q_b = 3,1 * \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} * (q - q_c) * I^2 * (s - 1)^{-1,6} \quad (24)$$

Rickenmann (2001) je med drugim tudi predlagal enačbo (25) za določitev celotnega volumna transportiranih plavin v enem poplavnem dogodku  $G_E$ .

$$G_E = A * I^\beta * V_{re} \quad (25)$$

$A$  je empiričen koeficient,  $\beta$  pa variira med 1,5 in 2,0. Za strme struge je primerna vrednost 2,  $V_{re}$  pa je efektivni odtočni volumen.

Razvitih je bilo še več podobnih enačb z različno zanesljivimi rezultati. Enačbe, ki uporabljajo Einsteinov parameter premeščanja  $\Phi_b$ , temeljijo na efektivni strižni napetosti in ne upoštevajo

oblik dna. Zato je uporaba specifične premestitvene zmogljivosti  $q_b$  primernejša, ker temelji na efektivnem pretoku in oblike dna niso ovira (Rickenmann, 2001). Močno lahko na razvito enačbo vpliva izbor podatkov – ali gre za laboratorijske meritve (v nekem idealiziranem okolju) ali za terenske. Take enačbe imajo poleg tega svojo veljavnost pogosto zgolj za določene robne pogoje. Vse zgornje Rickenmannove enačbe so bile tako razvite na podlagi terenskih meritev, kljub temu pa sta Rickenmann in Koschni (2010) ugotovila, da so vse podcenile dejanske vrednosti.

Količina in dolžina premeščanja plavin ni odvisna samo od količine, ampak tudi od velikosti in oblike zrn. Hudourniki imajo zelo širok razpon velikosti plavin, te pa se spreminjajo v času in prostoru. Poleg tega v strugah tipa stopnja-tolmun zaporedje močno vpliva na odlaganje plavin – samo majhna količina se jih odloži v stopnjah, večina (manjših) pa v tolmunih (Ergenzinger in Schmidt, 1990). Medtem ko je glina, melj in drobnejši pesek lahko premeščen kot lebdeča plavina že pri nizkih pretokih, so večji prodniki premeščeni kot rinjene plavine po dnu hudournika. Razdalja, za koliko se premestijo, je manjša, taki dogodki pa imajo lahko tudi povratno dobo 50 let ali več. Tu je potrebno omeniti, da v zelo strmih strugah meja med lebdečimi in rinjenimi plavinami ni več jasna, razmere so zelo blizu tistim v drobirskih tokovih (Rickenmann, 1990). Potovanje plavin ni enakomerno, saj lahko pride na določenih mestih do zaklinjanja za določen čas. Pomembno vlogo igra tudi oblika plavin. Ugotovljeno je bilo (Ergenzinger in Schmidt, 1990), da diskasto oblikovane plavine ob premeščanju prepotujejo 3- ali 4-krat krajšo razdaljo kot okrogle in elipsoidne. Med elipsoidi in okroglimi prodniki ni opazne razlike. Do odlaganja plavin pride, ko je prodonosnost večja od premestitvene zmogljivosti. Veliko materiala se odloži že vzdolž struge, zato do izliva pride le manjši del.

Pri hudournikih je območje akumulacije zlasti vršaj. Pri izstopu hudournika iz doline pogosto pride do hitrega zmanjšanja padca in pogosto tudi razširitve struge, ker ni tako omejena s strmimi pobočji. Zato se močno poveča odlaganje plavin, struga pa je lahko tudi razvejana oziroma pramenasta. Gre za makrooblike v rečnem sistemu. V splošnem se premika naravni hudournik tekom časa preko celotne pahljače vršaja. Do tega prihaja s preboji in prestavljanjem pri visokih pritokih, kar pa je danes, ko so vršaji večinoma poseljeni ali pa obdelani, onemogočeno zaradi reguliranja hudournikov v preteklosti. Pogosto je v takih primerih nad naseljenim delom zaplavna pregrada, kjer se akumulirajo plavine, ki morajo biti fizično odstranjene s človeškim posredovanjem, nato pa je struga v betonskem koritu. Na ta način je naravno tvorjenje vršaja onemogočeno.

### **2.5.1 Pojavljanje drobirskih tokov v hudournikih**

Drobirski tokovi so pogosto sestavni del hudourniških območij, poskrbijo za porušitve morfoloških oblik v strugi, pogoj za nastanek pa so tudi primerni padci. V 90. letih in prej se tej posebni obliki masnega gibanja sedimentov po pobočjih ali hudourniških strugah (Sodnik in Mikoš, 2005), kjer gre za večfazni tok, ni posvečalo pretirane pozornosti. Preobrat na tem področju se je zgodil po katastrofalnih dogodkih v Logu pod Mangartom leta 2000 ter tudi po ponavljajočih drobirskih tokovih v Koseču (vodotok Brusnik) leta 2001 in 2002. Na omenjenih območjih je bilo narejeno veliko raziskav, ki so dobra osnova za poznavanje procesov in oceno možnosti podobnih dogodkov tudi na drugih območjih. Delijo se na (Sodnik et al., 2012):

- hudourniške, ki nastanejo ob ekstremnih poplavnih dogodkih, kjer se aktivira aluvialni material dna struge,
- pobočne drobirske tokove, ki se sprožijo izven hudourniške struge, ter
- pobočno-hudourniške tokove, kjer pobočni drobirski tokovi končajo v strugi hudournika in po njej nadaljujejo svojo pot.

Drobirski tokovi se lahko pojavijo le na hudourniških območjih manjših od 20 km<sup>2</sup> do 30 km<sup>2</sup> (Sodnik in Mikoš, 2005). Izvor materiala za tvorjenje drobirskega toka je vezan zlasti na mesta, kjer so prisotne manj odporne kamnine ali pa preperel material (tektonsko porušene kamnine) (Jež et al., 2008), lahko pa je prisoten tudi zapadli les, ki se pomeša z ostalim materialom. Obsežnost se meri z magnitudo, pomembno vlogo ima tudi padec vršaja. Magnituda drobirskih tokov je odvisna od:

- topografije,
- geologije,
- podnebja,
- vegetacije in
- drugih faktorjev.

Najpomembnejši parametri velikosti magnitude so tako površina prispevnega območja, vrednost Meltonovega števila, naklon vršaja in padec hudourniške struge (Sodnik in Mikoš, 2006). Uporablja se več metod za ocenjevanje magnitude drobirskih tokov, ki so razdeljene na empirične, morfološke, kombinirane in računalniške metode. Ker so vse metode vezane na neke ozke robne pogoje, je zanašanje na rezultate ene same preveč tvegano, zato je smiselno uporabljanje kombinacije različnih (Sodnik in Mikoš, 2005). Za slovenske razmere sta Sodnik in Mikoš (2006) ocenila kot najprimernejši metodi izračuna magnitud drobirskih tokov Marchi in D'Agostino (2004) (morfološka metoda) in Ceriani et al. (2000) (kombinirana metoda).

Glede na padec vršaja ter z uporabo Meltonovega števila (26) lahko razlikujemo med hudourniški in drobirski tokovi, obstajajo tudi vmesni tipi ter izjeme, ki bi jih uvrstili v en tip vršaja, dejansko pa gre za drugega.

$$Mel = H_A * A^{-0,5} \quad (26)$$

$H_A$  je višinska razlika prispevnega območja v km, površina prispevnega območja hudournika  $A$  pa je podana v km<sup>2</sup>. Za geomorfološke procese na hudourniških vršajih, s katerimi bi se ocenjevala magnituda drobirskih tokov, je bila v enih prvih študij s strani Meltona predlagana zveza (27).

$$I = a * [(H_{max} - H_{min}) * A^{-0,5}]^n \quad (27)$$

V tej enačbi sta  $a$  in  $n$  neodvisna koeficienta,  $H_{max}$  in  $H_{min}$  pa višina najvišje točke hudourniškega območja in najvišja točka vršaja [km]. Sodnik in Mikoš (2006) sta predlagala mejne vrednosti naklona vršaja 7 % ter vrednost Meltonovega števila 0,3. Hudourniška območja, ki izpolnjujejo samo enega od teh pogojev, so prehodnega tipa, drobirski tokovi pa se lahko pojavijo le izjemoma. Če je konkavna oblika vzdolžnega padca hudournika (vbočena navzdol), torej imamo

hudournik, ki je blizu ravnovesnemu stanju, naj bi bila nevarnost drobirskih tokov znatno manjša (Sodnik, 2009).

Na nekaterih izmed obravnavanih porečij so bile tudi narejene raziskave, ki so potrdile možnost, da pride do takih izjemnih dogodkov. Sodnik in Mikoš (2006) sta ugotovila, da so ogroženi vršaji Mlince, Presušnika, Dobršnika, Ukove, Sevnika, prehodna primera sta Javornik in Bela, medtem ko vršaja Belce in Jesenice nista ogrožena. Tu se še enkrat pokaže, da možnost drobirskih tokov v urbanizaciji niso bili predvideni, saj so zlasti vršaji Dobršnika (Hrušica), Ukove (Jesenice) ter tudi Javornika in Bele gosto poseljeni. V neposredni bližini hudournikov so celo stanovanjski bloki.

Obstajajo celo pisni podatki, da je na Beli že prišlo do drobirskega toka. Drobirski tok naj bi po povodnji 13. 11. 1789 (Lavtižar, 1897) na Koroški Beli poškodoval 40 hiš, porušil več mlinov in veliko obdelovalnih površin, dokaz pa so še danes več metrov zasuti ostanki zgradb. Sicer je v tem viru navedeno, da naj bi se porušil del hriba Čikla, vendar naj bi bil ta podatek netočen (Jež et al., 2008). Ker je geološka zgradba območja heterogena, obstaja možnost tudi več izvornih območij. Na območju povirja Bele so Jež et al. (2008) našli 4 aktivne plazove ter tudi 2 fosilna. Zlasti nad Potoško planino je obsežnejši, ta naj bi imel po njihovih ocenah od 700.000 m<sup>3</sup> do 1.400.000 m<sup>3</sup> materiala, celotno območje pa ima več izvirov in tako podobne karakteristike kot plazovi Stože (Log pod Mangartom), Slano blato (Lokavec) in Strug (Koseč).

Narejeni so bili tudi kontrolni izkopi na nekaterih izmed obravnavanih hudournikov. Značilnost v zrnih, ki jih prinesejo drobirski tokovi je v tem, da so občutno manj zaobljena kot prodniki. Izkopi so zlasti v zgornjem delu vršaja Bele pokazali, da je že bilo prisotnih več manjših drobirskih tokov (Sodnik, 2009). Tudi izkopi na Javorniku so pokazali, da je bil vršaj prizadet s hitrim in velikim drobirskim tokom in naj bi bil zelo podoben tistemu v Logu pod Mangartom. Podobno so na vršaju Presušnika prisotne odkladnine hitrega velikega drobirskega toka v preteklosti.

## **2.6 Energetski potencial v hudournikih**

Hydroenergetski oziroma energetski potencial je izraz, ki se uporablja tako za opis določanja sposobnosti vodotoka, da erodira plavine v strugi, kot tudi za opis razpoložljive energije za hidroenergetsko izrabo. Kot parameter, primeren za opis transporta plavin, ga je na primer uporabil Sodnik (2009), in sicer tudi za določevanje verjetnosti nastanka drobirskih tokov. V tem primeru pomeni večja vrednost potenciala, večjo verjetnost nastanka drobirskega toka. V primeru hidroenergetske izrabe višja vrednost predstavlja večjo ustreznost nekega odseka. V prvem podpoglavju je predstavljena v vlogi faktorja za določanje erozije, v drugem pa kot faktor hidroenergetske izrabe.

### **2.6.1 Moč vodnega toka v hudournikih (povzeto po Cooley, 2014)**

Moč vodnega toka je sposobnost vodotoka, da troši energijo v posteljici dna in ob brežinah ali pa da premešča plavine. Vzdolžna porazdelitev padca struge in posledično moči vodnega toka v hudourniških območjih bistveno vplivajo na proizvodnjo, premikanje in akumuliranje plavin. Uporablja se za določanje stopnje porabe energije na neki točki v rečnem sistemu (Reinfelds et al., 2004). Ta energetski potencial tekoče vode je neposredno povezan s/z (Reinfelds et al., 2004):

- geomorfološkimi spremembami v strugi,

- transportom plavin,
- stabilnostjo struge, torej poglobitvami, dvigovanjem ali razširitvami struge,
- občutljivostjo struge na ekstremne poplavne dogodke,
- formacijo poplavnih ravnin in
- formacijo posteljice dna vodotoka.

Razen v velikih žlebovih, kjer je to mogoče, moč vodnega toka ne more biti merjena direktno v vodotoku. Zato so potrebni podatki, ki so pogosto nepopolni, narejeni pa so tudi določeni približki. Avtorji si tudi niso enotni pri obliki enačbe in tudi sami definiciji pojma. Pogosto se uporabljajo v izračunih relativne vrednosti moči vodnega toka. Avtorji tudi uporabljajo različne faktorje in zakone, ki naj bi bili ključni pri izračunu, kot so zakon o ohranitvi mase, gravitacija, hidrologija hudourniškega območja, pretok, padec, širina struge, strižne napetosti, podnebje, konkavnost, pogostost večjih poplav, v primeru matične kamnine pa tudi razmik razpok v njej ter njeno erodibilnost in tudi druge. Visoke vrednosti moči vodnega toka se pojavljajo zlasti v strmih, ravnih in erodiranih strugah ter soteskah v matičnih kamninah, nizke pa v nižinskih vodotokih v širokih strugah in pri velikih poplavnih ravninah ter mrtvih rokavih.

Ključna za večje vrednosti moči vodnega toka sta padec in pretok. Pri teh večjih vrednostih pride do premeščanja plavin, lahko tudi do poglobljanja dna, v kolikor ni zadostnega pritoka novih plavin. Teoretično je bilo ocenjeno (Knighton, 1999), da so največje vrednosti moči vodnega toka v odsekih na sredini porečja. Vendar pa je potrebno upoštevati, da se padci lahko lokalno močno spreminjajo, poleg tega pa pritoki k opazovanemu vodotoku lahko popolnoma spremenijo teoretične značilnosti. Velik vpliv lokalnega padca na moč vodnega toka pomeni, da lahko slednji močno lokalno niha glede na opazovan odsek (Fonstad, 2003).

Kot je bilo že omenjeno, se uporablja več različnih enot in tipov enačb za izračun, avtorji pa niso enotni pri izbiri oznak v enačbah. Prva je specifična moč vodnega toka ali srednja moč vodnega toka ali enakomerna moč vodnega toka  $\omega$  (28), izražena na enoto površine posteljice dna struge [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

$$\omega = \rho * g * R * I_e * v \quad (28)$$

Kjer je  $v$  povprečna hitrost v nekem prerezu,  $I_e$  je padec energijske črte,  $R$  pa hidravlični radij. Potem se uporablja razpoložljiva moč vodnega toka ali celotna moč vodnega toka na nekem prerezu (29) Bagnold, 1966), ki je moč na enoto dolžine vodotoka [ $\text{W}/\text{m}$ ].

$$\Omega = \rho * g * Q * I_e \quad (29)$$

Zgornji enačbi sta lahko povezani z enačbo (30). Uporabnost specifične moči je v tem magistrskem delu zmanjšana zaradi nepoznavanja širine struge. Razvitih je bilo tudi nekaj enačb, kjer je iz strugotvornega pretoka možno oceniti širino struge, vendar pa brez slednjega ne moremo narediti analize.

$$\omega = \Omega / W \quad (30)$$

Bruto moč vodnega toka je lahko določena za pretoke s povratnimi dobami 5, 10, 50 ali 100 let v kombinaciji s padcem (Reinfelds et al., 2004).

Skupna moč vodnega toka za celoten odsek ( $P$ ), se redkeje uporablja v ta namen. Zato pa je zadnja leta bilo narejenih precej raziskav za kritično moč vodnega toka  $\omega_c^*$  (31). Ta je brezdimenzijska in povezana z velikostjo plavin  $D_i$ , ki označuje začetno gibanje delcev v posteljski dna (Eaton in Church, 2011; Parker et al., 2011; Camenen, 2012).

$$\omega_c^* = \frac{\omega_c}{\rho * (g * R * D_i)^{3/2}} \quad (31)$$

Cooley (2014) je tudi omenil, da so podatki iz DMV lahko primerni za izračun moči vodnega toka, vendar naj ne bi zagotovili vseh potrebnih podatkov, ki so potrebni. Tak primer je širina struge oziroma omočeni obod struge, ki je iz DMV lahko določena zgolj zelo površno.

V izračunih bo tako upoštevana enačba (29), kjer podatki o širini vodotoka niso potrebni. Če bi imeli na voljo še ocene strugotvornih pretokov, bi bilo glede na njihovo vrednost možno določiti tudi širino. Reinfelds et al. (2004) so ugotovili, da se lahko moč vodnega toka vzdolž vodotoka močno spreminja glede na lokalne razmere. Ta lastnost bo predstavljena v nadaljevanju. Ocenili so tudi, da so stolpičasti grafi primernejši za oceno moči vodnega toka, saj je tako bolj pregledno spreminjanje vrednosti vzdolž vodotoka. Ocenjevali so tudi specifično moč vodnega toka v strugi s povprečnim padcem 1 m/m in prišli do tega, da se pri strugotvornem pretoku z dveletno povratno dobo, vrednosti gibljejo okrog 300 W/m<sup>2</sup>. Omeniti velja, da je bilo obravnavano območje v subtropskem podnebj, bilo je od 1500 mm do 2200 mm padavin letno. Ta struga je bila deloma v matični kamnini, nižje pa v naplavinski podlagi z velikimi poplavnimi ravnici. Na koncu pa je bil obravnavan tudi izliv v morje, zato so te vrednosti za primerjavo z obravnavanim območjem lahko vprašljive.

## 2.6.2 Hidroenergetski potencial v hudournikih za hidroenergetsko izrabo

Hudourniška območja predstavljajo tudi potencial za gradnjo malih hidroelektrarn. Na razpolago so običajno manjša prispevna območja in posledično manjši pretoki, je pa zato padec na kratki razdalji lahko velik. Izkoriščanje energetskega potenciala v hudourniških območjih ima že dolgo zgodovino, uporabljali so ga že za mline in žage. V takih razmerah prevladujejo mikro in male hidroelektrarne, ki predstavljajo manjši poseg v prostor, tako je vpliv na spremembo pokrajine, gladine podzemne vode, življenjskega prostora v hudourniku in ob njem minimalen, nekoliko več pa vplivajo na spremembe v hidrologiji hudournika. Upoštevati moramo tudi gradnjo dovozne poti ter navezavo na obstoječe elektroenergetsko omrežje, ki lahko močnejše posežeta v okolje.

Umestitev malih hidroelektrarn na območja, kjer so prisotne značilne geomorfološke oblike, kot so stopnje-tolmuni in kaskade, na slednje nima vpliva. Hidroelektrarne namreč nikoli niso projektirane za izkoriščanje energije pri na primer pretokih s 100-letno povratno dobo. Tako je rušitev in ponovna formacija oblik vseeno omogočena.

Primernost nekega porečja ali rečnega odseka za pridobivanje električne energije se določi z razpoložljivim energetskega potencialom. Za to so potrebni podatki o topografiji in hidrologiji. Določiti je potrebno tudi različne parametre, na primer učinkovitost hidroenergetske izrabe vodnega potenciala (Šantl et al., 2012). Najlažje se izračuna bruto potencial (ali vodna moč), ki ga pridobimo s pomočjo izdatnosti (pretoka) in višinskega padca vodotoka (32).

$$P = \rho * g * H * Q \quad (32)$$

Bolj uporaben je tehnični potencial, ki upošteva tehnične omejitve, kot so izgube in izkoristiki objektov in naprav, zadrževanje (če je) in tako dalje. Iščejo se tehnične rešitve, ki omogočajo optimalno izrabo bruto potenciala. Upoštevati je potrebno tudi druge omejitve, na primer okoljske, v smislu ohranitve ekološko sprejemljivega pretoka  $Q_{es}$  in izključitev odsekov, kjer je taka raba prepovedana (odseki z referenčnimi razmerami). To je razpoložljivi tehnični potencial. V končni fazi se uporablja še ekonomsko upravičen potencial, to je tisti, ki da pozitivne finančne rezultate in je že osnova za izdelavo prostorskih načrtov (npr. da se za neko območje določi v občinskem prostorskem načrtu, da je možna gradnja mHE).

Ključni za določitev potenciala so podatki o razpoložljivih količinah vode. V splošnem se uporablja srednji letni pretok  ${}_sQ_s$ , ki naj bi bil pridobljen vsaj v eni točki znotraj analiziranega odseka – torej s hidrološko postajo. Za naše obravnavano območje v Zgornjesavski dolini nobeno izmed porečij nima hidroloških postaj, tako da nimamo na razpolago nobenih podatkov. Obstajala je le merilna postaja na Javorniku, ki pa je obratovala le 11 let (od 1954 do 1964), od tega se je pretok meril le prva 3 leta. Za kvalitetno analizo bi potrebovali podatke za 20 let. Bunčič (2014) je v svoji določitvi geografskega potenciala upošteval meritve pretokov na precej večjih hudourniških rekah – Savi Dolinki in Tržiški Bistrici (121 km<sup>2</sup> prispevnega območja), kjer so pretoki prvega podcenjeni zaradi podzemnega toka, pretoki drugega pa precenjeni zaradi velikosti prispevnega območja. Predpostavil je, podobno kot Sodnik in Mikoš (2006), da za opazovane hudournike velja enak specifični pretok, ki ga je dobil kot povprečje tistih na merilnih postajah. Ta je odvisen od pretoka in prispevnega območja, iz tega pa se lahko oceni vrednosti srednjega letnega pretoka ( ${}_sQ_s$ ), celo do 5 % natančno (Trobec, 2007). Slabost metode je, da je manj primerna za majhne hudournike, kot so obravnavani.

Pomemben podatek nam lahko predstavlja tudi dovoljena količina odvzete vode, ki je določena z vodno pravico (koncesijo), ter količina in lokacija vrnitve odvzete vode v vodotok. Šantl et al. (2012) predlagajo, da se razpoložljiv pretok za odvzem v nekem prerezu  $x$  z najmanjšo vrednostjo razpoložljive vode v celotni izbrani dolžini  $L$  lahko določi z naslednjo enačbo (33).

$$Q_{HE}(x, L) = \min[s = 0, L](Q_{max}(s)) \quad (33)$$

$Q_{HE}$  je pretok uporaben za hidroenergetsko rabo,  $Q_{max}(s)$  pa največji možen odvzem v določenem prerezu  $s$ , ki že vključuje minimalni ekološko sprejemljivi pretok  $Q_{es}$ . Ta se v skladu s predpisi določa glede na več različnih parametrov. Za njegovo določitev potrebujemo podatke o srednjem letnem pretoku  ${}_sQ_s$  in srednjem nizkem letnem pretoku  ${}_sQ_{np}$ . Ko ga določimo, je nato smiselno slednjega odšteti od  ${}_sQ_s$ , tako dobimo srednji letni pretok, ki je dejansko na voljo.

Včasih se je hidroenergetski potencial računal ročno, danes pa se da postopek popolnoma avtomatizirati. Za to je primerna večkriterijska analiza z določenimi utežnimi faktorji. Šantl et al. (2012) so uporabili orodje, ki v prvi fazi določi razpoložljivi tehnični potencial po vodotokih ali njihovih odsekih, nadalje pa preveri in določi tudi ekonomsko upravičen potencial.

Hidroenergetski potencial nam da osnovne podatke o nekem porečju oziroma o njegovi primernosti za izgradnjo hidroenergetskega objekta. Eden bistvenih podatkov, ki nas na koncu zanimajo, pa je moč hidroelektrarne ( $P$ ). Računa se po naslednji formuli (34).

$$P(x, L) = \eta_t * g * (H_{bruto} - \Delta H) * Q_{HE}(x, L) * k_{hp} \quad (34)$$



$\eta_t$  je izkoristek turbine,  $H_{bruto}$  bruto padec v izbrani dolžini  $L$ ,  $\Delta H$  energijske izgube v dovodnem kanalu in tlačnem cevovodu objekta ter  $k_{hp}$  faktor inštalacije moči, ki je razmerje med  $Q_{instalirani}$  in  ${}_sQ_s$  (odvisen od krivulje trajanj pretoka izbranega odseka).

Pri umeščanju hidroelektrarn v prostor je potrebno upoštevati okoljske, družbeno-ekonomske in okoljsko ekonomske vidike. Zaželene so zaradi doseganja večjega deleža obnovljivih virov energije, ob enem pa nezaželene zaradi pritiska na okolje in tako nedoseganja okoljskih ciljev. Prihaja do konfliktov interesov, saj evropski direktivi (Direktiva 2000/60/ES in Direktiva 2009/28/ES) o povečanju pridobljene energije iz obnovljivih virov in ohranjanju oziroma izboljšanju dobre kakovosti voda stremita ravno k nasprotnim ciljem – po eni strani h gradnji hidroelektrarn, na drugi pa k čim manjšim posegom v vodotok (Skroza, 2011). Šantl et al. (2010) so v svojem delu ravno ta dva kriterija vzeli za izhodiščna – okoljski kriterij in kriterij proizvodnje električne energije. V omenjenem delu sicer utežni faktorji še niso v celoti dopolnjeni, celoten sistem pa naj bi omogočal kakovostne analize. Cilj uporabe večkriterijske analize je predvsem vključiti deležnike, kot so javne uprave, organi odločanja, proizvajalci električne energije, kmetje, ribiči, živinorejci, turistični delavci, lokalne skupnosti ter lastniki vodnih pravic in zemljišč. Večkriterijska analiza naj bi tako v končni fazi s pomočjo utežnih faktorjev določila, kateri kriterij ima najvišjo vrednost.

Bunčić (2014) je potrdil, da se kar 9 današnjih mHE nahaja na istih območjih, kjer so v zgodovini stali mlini. Našel je 21 lokacij primernih za dolge cevovode (750 m) in 19 za kratke cevovode (100 m). Pri tem je potrebno upoštevati, da aktualni načrt upravljanja voda do 2015 zahteva za izdajo koncesije za mHE prispevno območje veliko vsaj 10 km<sup>2</sup> ali  ${}_sQ_{ns}$  večje ali enako 0,08 m<sup>3</sup>/s v profilu odvzema. Ob upoštevanju tega kriterija so se kot primerne ali primerne za obe obliki odvzema izkazale le 3 lokacije na Jesenici in ena na Belci. Ustreza tudi Javornik, a je že izkoriščen, kjer je to možno, in Završnica, ki sicer ni bila obravnavana v njegovem delu. V kolikor se Načrt upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja letos in v nadaljevanju ne bo spremenil, obstoječe mHE v večini ne bodo morale podaljšati koncesij in bodo morale prenehati obratovati.

### 3 MATERIAL IN METODE

V tem poglavju je predstavljeno obravnavano območje z geomorfološko ohranjenostjo hudournikov, geologijo, pokritostjo ter naravnimi vrednotami. Nato je predstavljena uporaba digitalnih modelov višin (DMV) ter računalniškega orodja ArcGIS. Na koncu poglavja so predstavljene še hidrološke značilnosti območja.

#### 3.1 Opis obravnavanih območij

Zgornjesavska dolina je usmerjena v smeri Savskega preloma severozahod-jugovzhod. Prične se v Ratečah, konča pa pred Mostami. Na severni strani Doline se nahaja greben Karavank, na južni pa Julijske Alpe. Obravnavani so bili hudourniki v vzhodnem delu Zgornjesavske doline, katerih območja se nahajajo na pobočjih Karavank. Za analizo so bili izbrani tisti, ki so poimenovani v ARSO (2014), in tisti neimenovani, ki presegajo 1,5 km<sup>2</sup> površine hudourniškega območja med hudournikoma Belca na zahodu in Završnica na vzhodu. To so Završnica s pritoki, Ratibovec, Srednik, Sevnik, Bela s pritoki, Javornik s pritoki, Ukova s pritoki, Jesenica s pritoki, Dobršnik, Presušnik, Mlinca s pritoki, Sedučnik ter Belca s pritoki.

##### 3.1.1 Geomorfološke oblike kot naravne vrednote

Geomorfološke oblike so bile v preteklosti prepoznane tudi kot naravne vrednote. Naravna vrednota je v Sloveniji po definiciji Zakona o ohranjanju narave (NUPB ZON, 1999): »redek, dragocen ali znamenit naravni pojav ter tudi drug vreden pojav, sestavina oziroma del žive ali nežive narave, naravno območje ali del le-tega, ekosistem, krajina ali oblikovana narava«. Pomembno ni samo ohranjanje biodiverzitete, ampak tudi geodiverzitete, ki običajno ni direktno zavarovana. Res pa je, da je geološka dediščina pogosto zavarovana vsaj posredno kot habitat. Naravna vrednota obsega vso naravno dediščino na območju RS. Po Uredbi o zvrsteh naravnih vrednot (UZNV, 2002) in Uredbi o spremembah in dopolnitvah uredbe o zvrsteh naravnih vrednot (2003) jih delimo na:

- površinske geomorfološke,
- podzemeljske geomorfološke,
- geološke,
- hidrološke,
- botanične,
- zoološke,
- ekosistemske,
- drevesne,
- oblikovane,
- krajinske vrednote,
- minerale in
- fosile.

Vrednotenje je sicer izjemno zahtevno, saj je potrebno upoštevati lastno vrednost, kulturno in estetsko vrednost, ekonomsko vrednost, funkcionalno vrednost ter raziskovalno in izobraževalno vrednost (povzeto po Hribar, 2009). Lastna vrednost predstavlja zavedanje, da imajo nekatere stvari (v tem primeru geodiverziteta) neko vrednost zgolj zato, ker so. Ker gre za odnos med

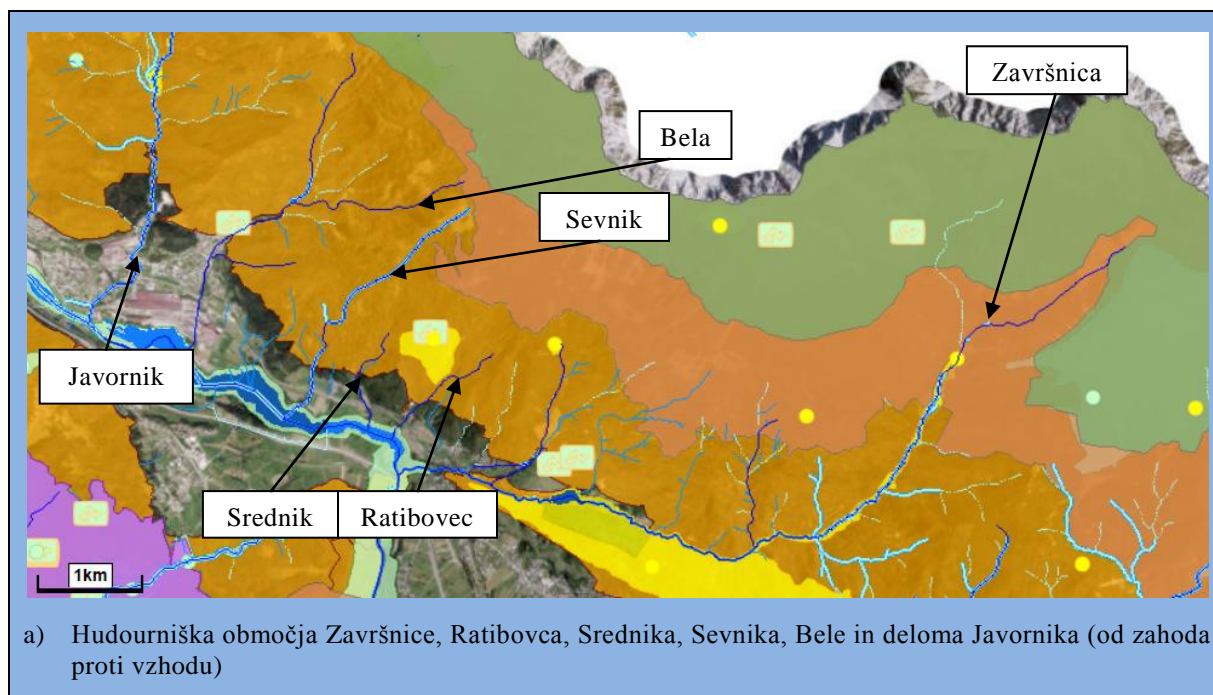
človekom in naravo na filozofskem nivoju je ta vrednota najbolj zahtevno definirana. Kulturno in estetsko vrednost se deli na več posameznih področij. Arheološko in zgodovinsko vrednost lahko dajejo podobnim območjem, kot je obravnavano, na primer stari mlini in njihovi ostanki. Vrednost za geoturizem in počitniško aktivnost predstavljajo na primer slapovi. Folklorno in duhovno vrednost bi lahko dajale razne legende, vendar za območja na pobočju Karavank v Zgornjesavski dolini ni nobene bolj prepoznavne. Predstavljajo pa lahko posamezna območja primere lokalne krajine in imajo zato vrednost. Take vrednosti so lahko tudi primerne za umetniški navdih. Ekonomska vrednost je kljub trudu ekonomistov težko določljiva. Poleg tega je voda izvzeta, saj gre za poseben primer dobrine. Se pa v tujini pojavljajo vrednotenja od nične vrednosti do neprecenljivosti. Vode, relief in geološka sestava imajo povsem logično tudi funkcionalno vrednost. Kot utilitaristično vrednost se lahko izpostavi izkoriščanje vodnega padca za potrebe hidroenergije, kot ekosistemsko in geosistemsko vrednost pa veliko leseno plavje, ki tvori območja z majhnimi pretočnimi hitrostmi, in je tako primerno okolje za nekatere organizme. Razumevanje dinamičnih procesov, njihovih odvisnosti in posledic, ki jih lahko človekovo delovanje povzroči, predstavlja raziskovalno in izobraževalno vrednost. Tako je lahko v primeru vodotokov na primer potrebno razumevanje povezave med gorvodnimi in dolvodnimi sistemi na nivoju maksimalnega odtoka, proizvodnje, transporta in odlaganja plavin, dinamike poplav, erozijskih procesov, mehanike transporta plavin, akumulacije plavin, mehanizma in stopenj kratkotrajnih sprememb kanalov ter dolgoročnih sprememb. Vrednotenje v Sloveniji je po Zakonu o ohranjanju narave sicer nekoliko drugače definirano. Merila za vrednotenje nekih vrednosti so izjemnost, tipičnost (značilnost), kompleksna povezanost, ohranjenost, redkost ter ekosistemska, znanstveno raziskovalna ali pričevalna pomembnost (NUPB ZON, 1999).

Mednarodno obravnavanje vode v zaščitelih območjih je zgolj indirektno in jo obravnavajo kot ledenike, kot območja izrednih naravnih lepote (npr. slapovi, kaskade) ter kot povzročitelja in sestavni del procesov, ki so oblikovali naravne oblike vredne ohranjanja (povzeto po Hribar, 2009). Povsod je potrebna tudi zaščita vseh sosednjih površin, ki tvorijo celoten sistem, tako na kemijskem kot fizikalnem nivoju. Evropske zakonodaje za zdaj še ni skupne, posredno pa so zajete geološke in geomorfološke oblike v Naturi 2000 kot habitati. V Sloveniji je voda lahko posredno zavarovana kot geodiverzitetna kot Ekološko pomembno območje, kot Posebna varstvena območja (v okviru Nature 2000) ali kot dejavnik, ki oblikuje na primer slapove, kaskade, jezera in tako dalje. Voda namreč s svojo erozijo in na splošno z delovanjem lahko oblikuje primerna območja za tvorjenje habitatov ter njihovo spreminjanje v času in prostoru.

Kljub temu, da so mnogi od teh hudournikov vsaj na krajših odsekih spremenjeni do te stopnje, da niso primerni za oceno hidromorfoloških razmer, so vseeno večinoma vsaj na odsekih zavarovani kot hidrološka in geomorfološka naravna vrednota (ARSO, 2014). Sama hudourniška območja se v veliki večini nahajajo v zaščitelih conah. Hudourniške struge so ovrednotene kot hidrološka oziroma geomorfološka naravna vrednota. Celotna Sava Dolinka do sotočja s Savo Bohinjko je s pritoki zaščiteni kot hidrološka in geomorfološka vrednota državnega pomena, zato vsi hudourniki spadajo v to kategorijo. Poleg tega so pretežno zavarovani še na lokalnem nivoju. Tako je z Završnico od sotočja s potokom pod Srednjim vrhom do konca akumulacijskega jezera mHE Završnica (Slika 6 a). Prav tako je zavarovana celotna struga Javornika (Slika 6 a, b), kljub temu da gre za hudournik, ki je izmed obravnavanih najbolj geomorfološko spremenjen, v spodnjem delu celo zelo močno. Še dodatno so na Javorniku zavarovani Javorniški slapovi v srednjem delu hudourniške struge. Dobršnik (Slika 6 b) ima zavarovan manjši del na območju

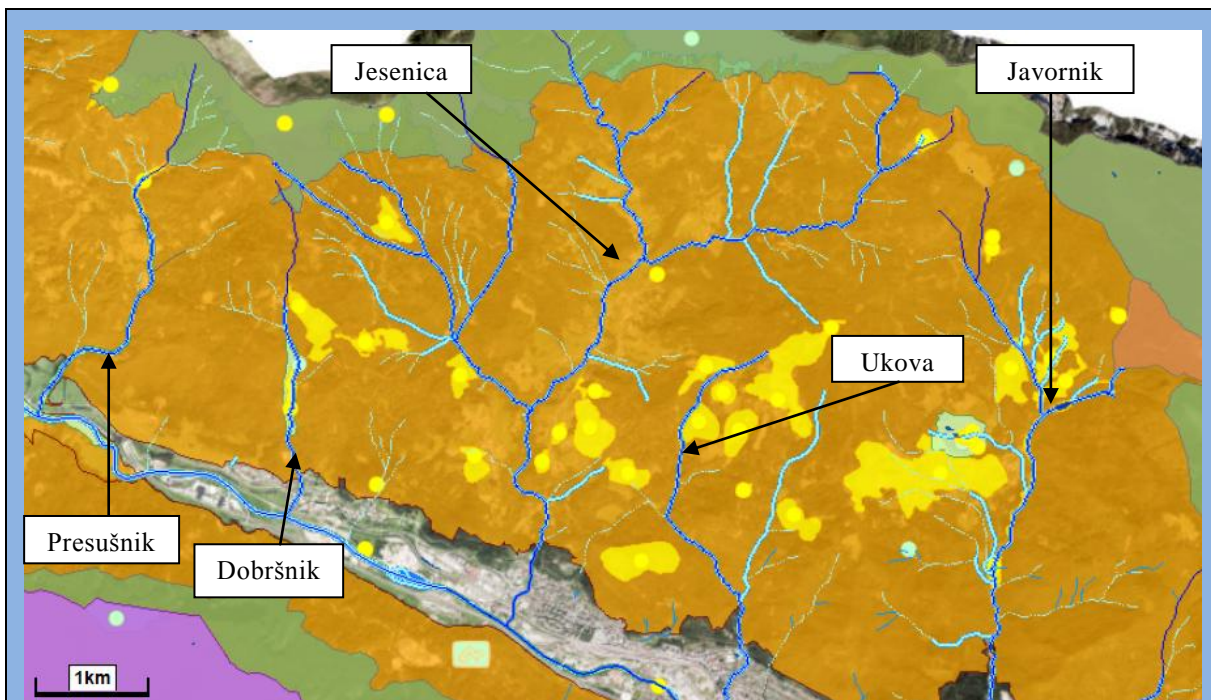
soteske in slapov, in sicer 2. slap kot naravno vrednoto lokalnega pomena, celotno sotesko pa kot naravno vrednoto državnega pomena. Pri Presušniku (Slika 6 b) je poleg naravne vrednote državnega pomena zgornji del struge vrednoten tudi kot lokalna vrednota. Soteska Mlince (celoten hudournik) je vrednotena spet kot lokalna naravna vrednota, medtem ko je Belca (Slika 6 c) s pritoki vrednotena kot državna naravna vrednota. Ratibovec, Srednik, Sevnik, Bela s pritoki, Ukova s pritokom, Jesenica s pritoki ter Sedučnik (Slika 6 a, b) nimajo striktnega zavarovanja struge, vseeno pa so kot pritok Save hidrološka in geomorfološka vrednota državnega pomena. V samih hudourniškega območjih so poleg tega zavarovane vrednote oziroma območja (Slika 6) kot:

- Natura 2000 (greben in deloma pobočja Karavank, kar vključuje hudournike od Završnice do Presušnika) tako po SCI (direktiva o habitatih) kot tudi SPI (direktiva o pticah) direktivi,
- ekološko pomembna območja (vključujoč območja Nature 2000 ter še dodatna nižja pobočja Karavank) in
- območja ostalih naravnih vrednot državnega ali lokalnega pomena (rastišča zoisove vijolice, narcise, gozdni rezervati, botanični vrtovi, jame ...), ki se večinoma prekrivajo z zgoraj naštetimi.

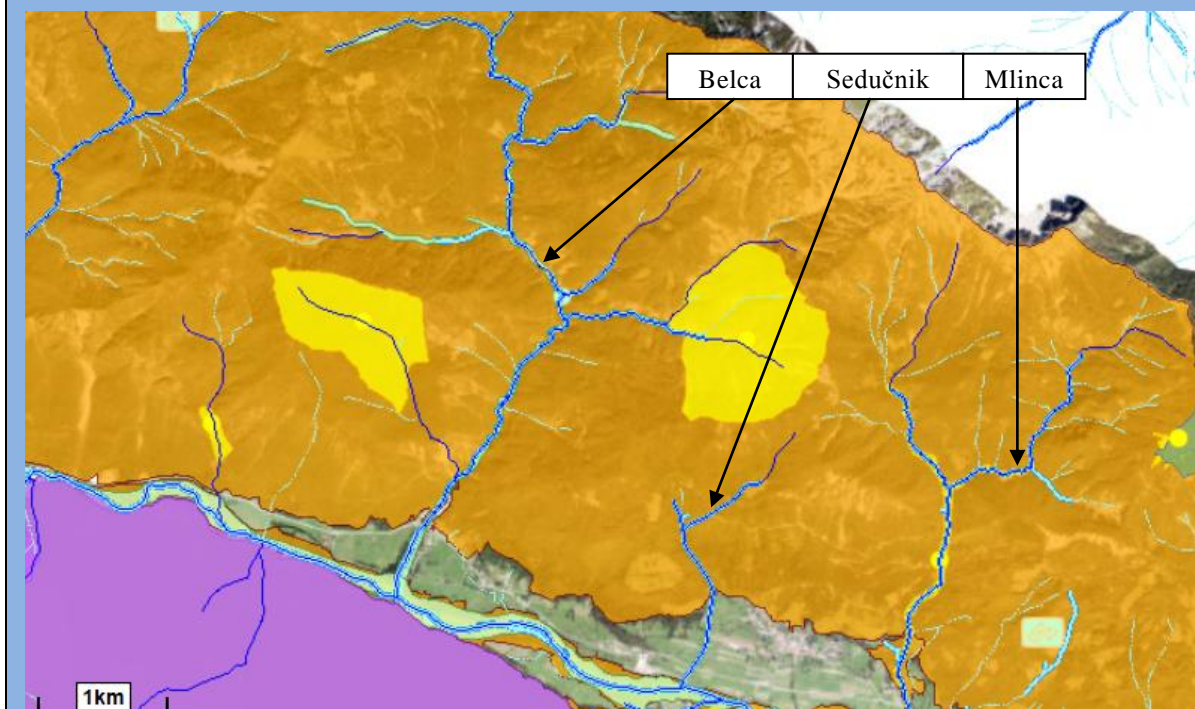


Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Slike 6.



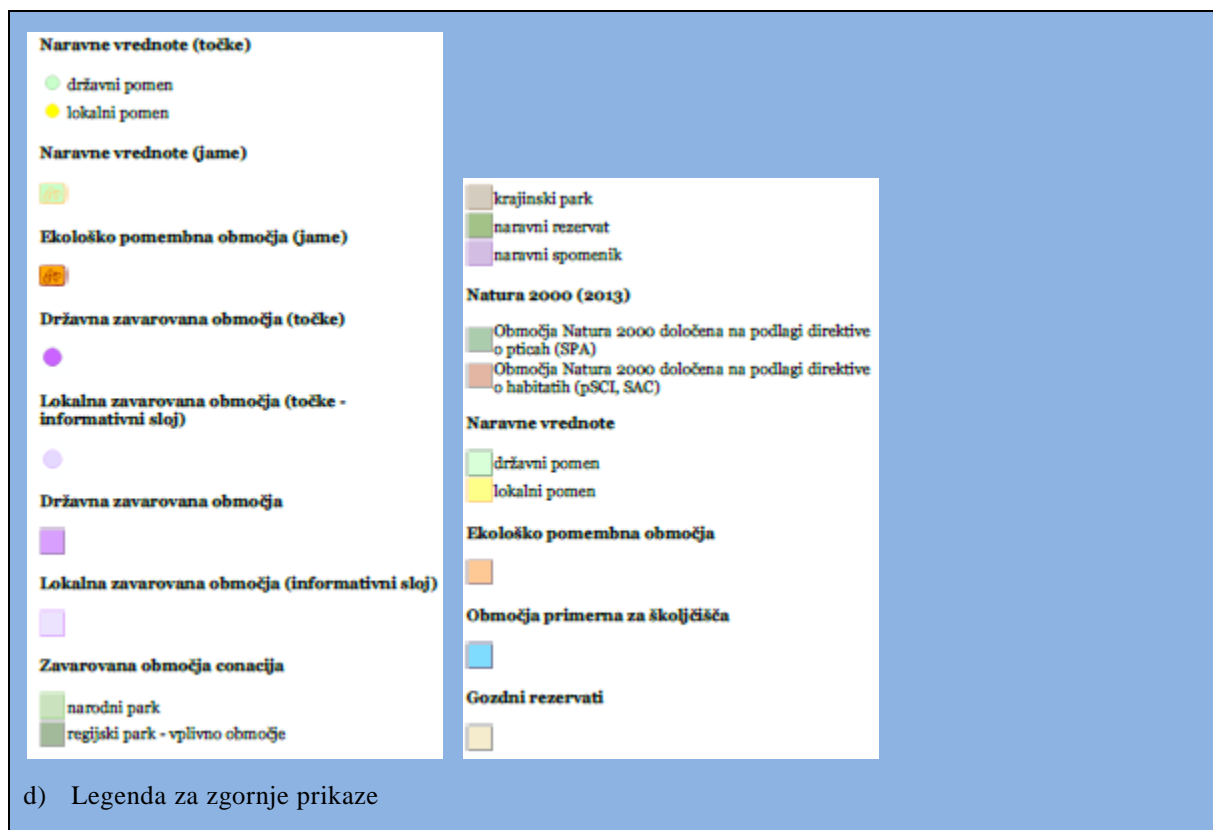
b) Hudourniška območja Javornika, Ukove, Jesenice, Dobršnika in Presušnika (od zahoda proti vzhodu)



c) Hudourniška območja Mlince, Sedučnika in Belce (od vzhoda proti zahodu)

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Slike 6.



Slika 6: Zavarovana območja in točke na izbranih hudournikih (Vir: ARSO, 2014; avtor: Neje Mohorič)

### 3.1.2 Geološke in geomorfološke značilnosti

Na pobočjih Karavank se prepletajo karbonatne in silikatne kamnine. Posledica tega so veliki padci – povprečni znaša za Karavanke 29° oziroma 0,55 m/m (Ogrin in Plut, cit. po Bunčič, 2014). Prisotna je večja količina površinskih voda, rečna mreža je dobro razvejana. V primerjavi s pobočji Julijskih Alp jih je na isti dolžini bistveno več. Izviri imajo pogosto značaj kontaktnega krasa in se pojavijo na stiku med prepustnimi (npr. karbonatne kamnine) in neprepustnimi kamninami (npr. peščenjak) (Bunčič, 2014).

Prevladujejo apnenci in dolomiti različnih starosti (povzeto po Geološki zavod Slovenije, 2006). Prisoten je deloma tudi pobočni grušč (ponekod sprijet v brečo) višje pod vrhovi, nižje pa morenski material, deluvij ter tudi skrilavci. Nižje na vršaju je seveda material značilen za vršaj in aluvij. V manjših količinah so prisotni tudi lapor, meljevec, tuf, tufit, peščenjak ter konglomerat. Izpostaviti se mora tudi nekaj bolj homogenih oziroma posebnih območij. Struga Jesenice se praktično v celoti nahaja v morenskem in deluvijskem materialu. Del Sedučnika teče po brečastem konglomeratu, v drugih hudourniških območjih ga večinoma ni. Velja, da zahodneje od hudourniškega območja Presušnika ni več menjavanja skrilavca, peščenjaka in konglomerata. Hudourniško območje Belce v večni obsega masiven in skladnat dolomit in apnenec iz karnija. Ostala območja porečij so precej bolj heterogena. Pri hudournikih v skrilavcih igra pomembno

vlogo usmerjenost lomov le-tega, saj so na primer protitočni lomi lahko precej hitreje erodirani, kot so sotočni. V Preglednici 3 so podani vsi geološki gradniki porečij vključno s starostjo.

**Preglednica 3: Seznam geoloških materialov (povzeto po Geološki zavod Slovenije, 2006)**

Opis	Starost
Debeloskladovit apnenec in dolomit (norijsko-retijska stopnja)	T3/2, 3
Pobočni grušč, ponekod sprijet v brečo	S
Masiven apnenec in zrnat dolomit (karnijska st.-cordevol)	1T3/1
Skladovit in ploščast apnenec z roženci (ladinijska stopnja)	T2/2
Skladovit dolomit, ponekod s plastmi apnenca-anizijska stopnja	T2/1
Morena	G1
Masiven grebenski apnenec (retijska stopnja)	T3/3
Rdečkast in sivkast apnenec v menjavi s pisano apnenčevo brečo	J1
Ploščast in skladovit apnenec z roženci	J1
Skladovit dolomit-zazarska stopnja	P3
Menjavanje skrilavca, peščenjaka in konglomerata (rotnovetijska in trogkofelijska stopnja)	P1, 2
Menjavanje skrilavca, peščenjaka in konglomerata z vložki apnenca (rotnovetijska in trogkofelijska stopnja)	P1, 2
Lapor, meljevec, apnenec, dolomit, tuf, tufit in apnenčeva breča (ladinijska stopnja)	T2/2
Deluvij	D
Pisana apnenčeva konglomeratna trbiška breča (sosijska stopnja)	1/ P2/2
Peščenjak, kremenov konglomerat, meljevec in glinovec (sosijska stopnja)	2/ P2/2
Ingnimbritni tuf	theta-hi-alfa
Aluvij	A1
Vršaj	Pr
Lapor, lapornat apnenec, ooliten in zrnat apnenec, sljudnat dolomit in meljevec (skitijska stopnja)	T1
Svetlosiv, bel in rožnat apnenec (rotnovetijska in trogkofelijska stopnja)	P1, 2
Menjavanje skrilavca, peščenjaka in konglomerata (gzelijska stopnja)	C3
Kremenov peščenjak, lapor, breča in konglomerat	O1
Ploščast in skladovit apnenec z roženci (karnijska stopnja-jul in tuval)	3/ T3/1
Dolomit z roženci (karnijska st.-jul in tuval)	2/ T3/1
Lapor in lapornat apnenec (karnijska st.-jul in tuval)	1/ T3/1
Menjavanje skrilavca, peščenjaka in konglomerata z vložki apnenčeve breče in črnega apnenca (rotnovetijska in trogkofelijska stopnja)	P1, 2
Masiven in skladnat dolomit in apnenec (karnij)	T3/1
Apnenec, apnenec z rožencem, dolomit, kalkarenit, lapor in meljevec (zg. del karnija)	2+3T3/1
Skladnat dachsteinski apnenec s plastmi dolomita (norij in retij)	T3/2+3
Brečast konglomerat (ladinij)	T2/2
Pobočni grušč	s
Dolomit, lapor, apnenec, oolit, skrilavec, meljevec, peščenjak (sp. trias)	T1
Skrilavec, peščenjak in kremenov konglomerat, apnenec in breča (trogkofelska in rotnoveska formacija)	P1,2
Groedenski konglomerat, peščenjak, meljevec in glinovec (sr. perm)	P2
Plastnat dolomit (zg. perm)	P3
Brečast konglomerat (ladinij)	T2/2
Masiven trogkofelski apnenec (sp. - sr. perm)	P1, 2
Nesprijeta morena	gl2

Omeniti je potrebno tudi geomorfološke značilnosti kot posledica delovanj v preteklosti, ki so vplivale na formacijo hudourniških strug. Zlasti ledeniško delovanje Zgornjesavskega ledenika je pustilo za seboj velike spremembe. Starejši in mlajši pleistocenski ledenik so oskrbovale gmote iz Ziljske doline čez ožino pod Trbižem in čez preval Koren, zajezil je ledenike iz Julijskih Alp,

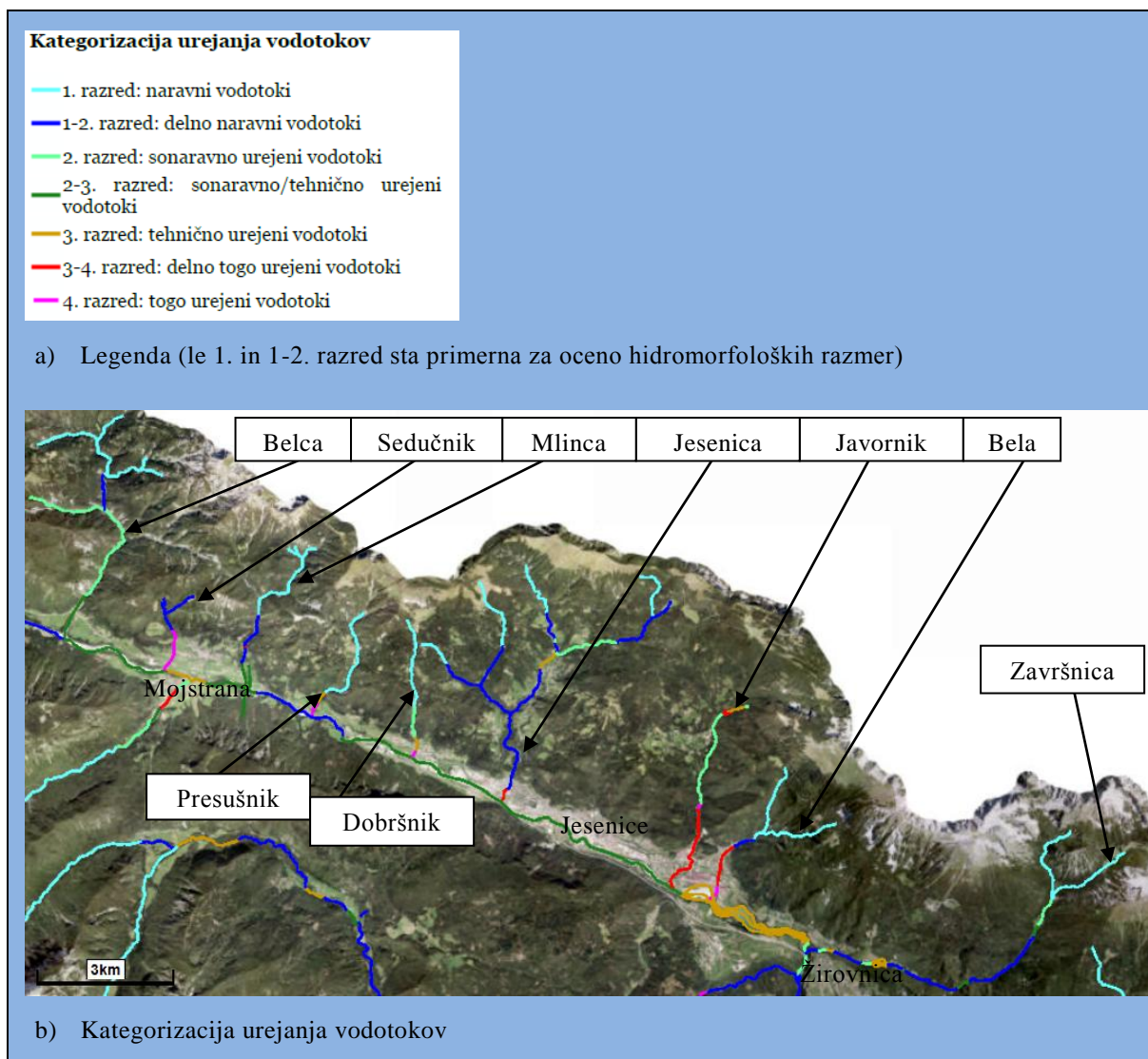
raztezal se je do Žirovnice (Gams, 1992). Gams (1992) je glede na morenske odkladnine ocenjeval tudi območja, kjer je bil prisoten ledenik. V hudourniškem območju Belce so tako morenski nasipi prisotni na sotočju s Suhim grabnom (1240 m n. m.), ki pa jo je potok že deloma odnesel. V hudourniškem območju Jesenice je na planini Rožca zaznana na 1190 m ter tudi na 1250 m kot bočna morena. Melik (1955, cit. po Gams, 1992) je našel morenski material tudi nižje na nadmorski višini 900 do 1000 m in pri naselju Plavški rovt med 870 in 890 m. Gams (1992) ocenjuje, da so te odkladnine posledica tistega ledenika, ki je odložil material na Mali Mežaklji na nasprotni strani Zgornjesavske doline na enaki nadmorski višini. Omenjene najvišje najdbe moren naj bi izvirale iz dobe največje ohladitve v wuermu, ko je bila na tem območju povprečna temperatura za 8 do 10°C nižja in je trajala med 18000 in 20000 let. Višine ledeniških moren so torej na različnih višinah kot posledica različnih poledenitev. Zato tudi ne obstajajo točne ocene nadmorske višine površine ledenikov, saj se je ta stalno spreminjalo, poleg tega pa so v posameznih obdobjih imeli večjo erozijsko sposobnost kot v drugih.

### 3.1.3 Izbrana hudourniška območja

V tem podpoglavju so predstavljena analizirana hudourniška območja, kjer je bil opravljen terenski ogled, ter karakteristike, ki so bile pri tem pridobljene. Opisana je pokritost tal, urejenost vodotoka oziroma geomorfološka ohranjenost hudournikov ter prisotnost mHE in večjih vodnih zajetij. Deloma je opis analiziranih območij predstavljen še v poglavju 3.3, kjer je predstavljena hidrologija in hudourniška območja, ki so že rezultat uporabe računalniškega orodja ArcGIS.

Pokritost tal je pomembna, saj slednja vpliva na odtočne razmere porečij, erozijo in tako dalje. Zgornjesavska dolina je v 70 odstotkih prekrita z gozdovi. Gozdna meja se v Karavankah nahaja med 1800 in 1900 m, višje pa je prisoten poseben rastlinski pokrov, ki je izpostavljen intenzivnim erozijskim procesom. Bunčić (2014) je ocenil, da so povprečne višine izvirov na nadmorski višini 1238 m n. m. Obravnaval je nekoliko druge hudournike, poleg tega pa so v tem magistrskem delu deloma obravnavane tudi struge z manjšimi hudourniški območji in posledično manjšo izdatnostjo. Na Sliki 7 je prikazana geomorfološka ohranjenost vodotokov. Večina hudournikov je na vršajih, ki so večinoma poseljeni – od malo do zelo močno spremenjenih, višje pa pa so večinoma v 1. in 2. razredu. Predstavljena je tudi obstoječa hidroenergetska izraba ter večja vodna zajetja na posameznih območjih.





**Slika 7: Kategorizacija urejanja vodotokov – geomorfološka ohranjenost z višjim razredom pada (Vir: ARSO, 2014; avtor: Nejc Mohorič)**

### 3.1.3.1 Hudourniško območje Završnice

Završnica se nahaja na vzhodnem robu Zgornjesavske doline. Završnica je eden izmed večjih hudournikov med analiziranimi. Terenski ogled je bil izveden na odseku od akumulacijskega jezera do planine Pri žagi, kjer je vodno zajetje, ter na hudourniku Rečica v delu, ki teče po vršaju. Odsek od mHE Završnica do vodnega zajetja je določen kot odsek z referenčnimi razmerami brez bioloških obremenitev. Obravnavana je bila Završnica kot celota ter pritoki Rečica, Bitgovec, Globoki potok, ter neimenovan hudournik pod Srednjim vrhom. Na hudourniku Završnica se poleg mHE Završnica nahajata še mHE Raztežilnik ter še ena mHE. Struga je spremenjena deloma s tremi premostitvami, zaplavno pregrado (ki pa jo je vodni tok obtekel) ter zajemi za mHE. Poleg tega je gorvodno od mHE tudi večje vodno zajetje sicer pa sta še 2 manjši. V sami strugi so prisotne tako stopnje-tolmuni (Slika 1 a) in kaskade, kot tudi brazde-tolmuni in ravni deli struge (Slika 8) – čeprav malenkost meandrirajo, so vseeno po karakteristikah podobne ravnim odsekom. Krajši odseki so tudi po kamniti osnovi. Prevladuje mešani gozd, nekaj je tudi

iglastega. Nad gozdno mejo so travniki, resave, redko porasle površine in nekaj tudi neporaslih (Sinergise, 2011; ARSO, 2014). Iz Slike 7 vidimo, da gre pri Završnici od sotočja hudournikov pod Srednjim vrhom in Završnice za naraven hudournik, ostalo pa je večinoma deloma urejen oziroma sonaravno urejen. Hudourniška struga pod Srednjim vrhom je popolnoma naravna.

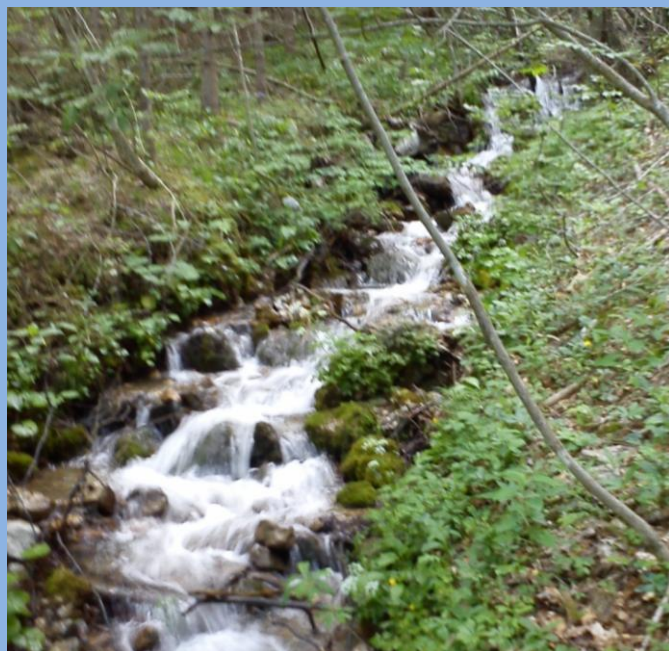


**Slika 8: Završnica pred iztokom v akumulacijo na odseku, kjer je struga »ravna«**

### 3.1.3.2 Ratibovec, Srednik in Sevnik

To so tri manjši hudourniki na pobočju Karavank med Završnico in Belo. Od njih ima zlasti Sevnik hudourniški značaj. Izvira na Potoški planini in gre deloma za kaskaden tip, deloma tip stopenj in tolmunov (Slika 9 c, d). Ima povečano prodonosnost. Sevnik je naraven, razen pri

premostitvah s cesto in železnico je struga urejena (kamen v betonu). Gozd je pri Ratibovcu mešan, Sredniku deloma mešan, deloma iglast, pri Sevniku pa deloma mešan, deloma iglast, na vršajih pa so tudi pašniki (Sinergise, 2011; ARSO, 2014). Ratibovec in Srednik sta gorvodno od vršaja popolnoma naravna, nato pa sta skozi naselja utesnjena v betonske struge. Srednik je manjši potok, ki ima hudourniško območje na pobočjih Ajdne. Prevladuje struga tipa stopenj in tolmunov, tudi nakloni so veliki (Slika 9 a). Ratibovec (Slika 9 b) ima manjši zajem pitne vode (podeljeno vodno dovoljenje), sicer pa je v celoti naraven, prevladujejo oblike stopnja-tolmun.



a) Srednik



b) Ratibovec

Se nadaljuje...

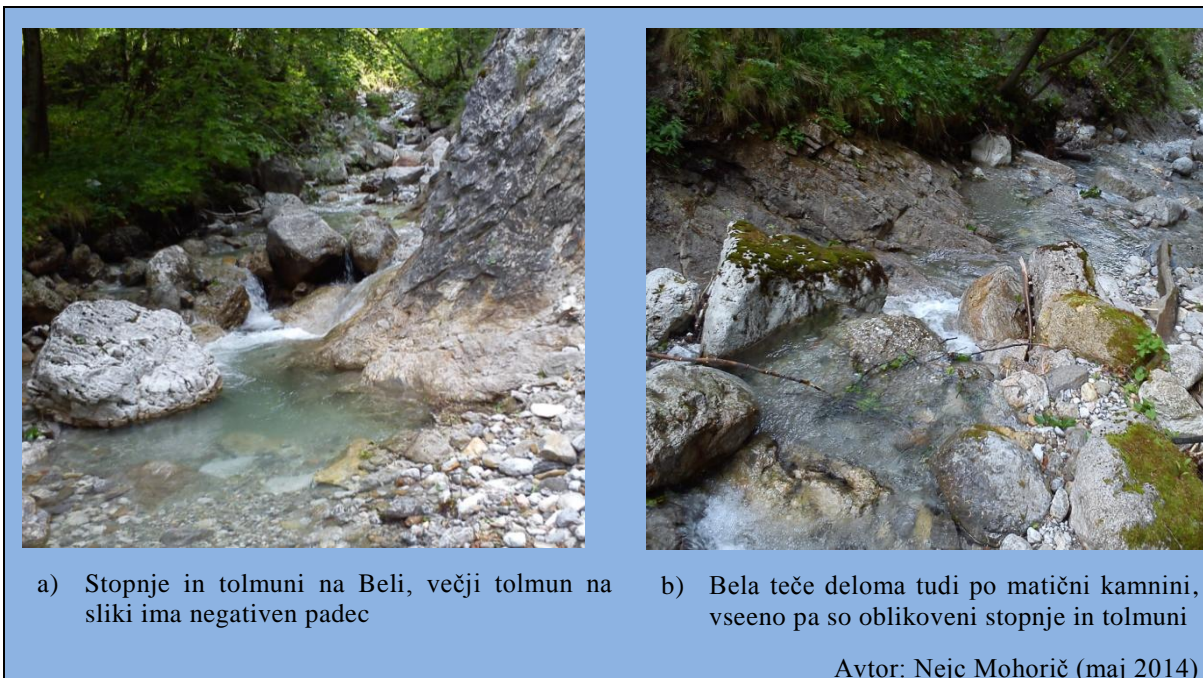
... nadaljevanje Slike 9.



**Slika 9: Sevnik in Srednik**

### 3.1.3.3 Hudourniško območje Bele

V hudourniškem območju Bele sta bila obravnavana tudi hudournika Mlaka in Čikla. Terenski ogled je bil izveden nad vršajem od zaplavne pregrade mimo vodnega zajetja. Tudi Bela izvira v bližini Potoške planine kot izvir Urbas, pod Koroško Belo pa se izliva v Savo Dolinko. Prevladujejo stopnje in tolmuni, na določenih odsekih pa je prisoten tok po skalnati podlagi (Slika 10 a, b). Nad naseljem je vodno zajetje, nižje pa zaplavna pregrada, skozenj pa je struga regulirana s tlakovanim dnom (kamen v betonu) in brežinami. Prevladuje listnat gozd ter mešan gozd. Hudourniško območje Mlake je popolnoma gozdnato (iglavci), območje Čikle prekriva deloma listnat, mešan in iglast gozd, višje so tudi travniki in redko porasle površine (Sinergise, 2011; ARSO, 2014). Podobno seveda velja za Belo, kjer pa je vršaj gosto poseljen. Struga hudournika Bele je večinoma naravna oziroma deloma urejena do vršaja, dalje pa gre za močno spremenjeno obliko prvotne struge na urbaniziranih območjih (Slika 7). Na Beli sta izvedeni 2 zajetji pitne vode, eno je dejansko na Čikli pred sotočjem z Belo. Čikla je višje v celoti naraven hudournik.



**Slika 10: Hudournik Bela**

#### **3.1.3.4 Hudourniško območje Javornika**

V območju Javornika je bil obravnavan še hudournik Jezernica, ki je desni pritok Javornika. Terenski ogled je bil izveden od vrha vršaja do konca vzporedne ceste. Hudournik Javornik je poleg Sedučnika eden bolj preoblikovanih (med obravnavanimi). Na vršaju gre za močno spremenjeno strugo, preostali del je večinoma sonaravno urejen. Na hudourniškem območju se nahajajo kar 4 mHE (mHE Rovt sicer ne obratuje več). Izvedena sta tudi 2 zajema pitne vode, v samem hudourniškem območju pa jih je več, ter zajem tehnološke vode. Hudournik sicer v nekem območju dobro sledi obliki stopenj in tolmunov, vendar je gorvodno še reguliran. Nad vršajem je prisotna tudi oblika brazda-tolmun (Slika 11 a). V tem hudourniškem območju sicer prevladuje mešani gozd, vendar pa znatno površino zasedajo pašniki, znatna je tudi poselitev (Sinergise, 2011; ARSO, 2014). Gozd na območju je večinoma mešan, višje pa iglasti. Vršaj Javornika je gosto poseljen. Pritok Jezernica (Slika 11 b) je pretežno naraven. Pri Jezernici je nekaj pašnikov, mešanega gozda in iglavcev, višje pa so tudi resave in redko porasle površine (Sinergise, 2011; ARSO, 2014).



**Slika 11: Hudourniško območje Javornika**

### 3.1.3.5 Hudourniško območje Ukove

Ukova ima eno mHE, sicer pa gre do vršaja za naraven hudournik, prav tako je popolnoma naraven pritok, po poseljenem vršaju pa je reguliran in v umetni pokriti strugi. Hudournik na Sliki 7 ni prikazan, terenski ogled pa ni bil izveden. Območje Ukove je pretežno gozdnato (prevladuje mešan gozd) in ima znaten delež travnatih površin. Hudourniško območje pritoka pa je praktično poraslo samo z mešanim gozdom (Sinergise, 2011; ARSO, 2014). Vršaj je gosto poseljen.

### 3.1.3.6 Hudourniško območje Jesenice

Na hudourniškem območju Jesenice (Slika 12) so bili analizirani tudi pritoki Beli potok, Črni potok, Črni graben, Raten in Jelenji potok. Terenski ogled je bil izveden na Jesenici na območju nad vršajem (Slika 12 a), kjer hudournik prečka cesta za Plavški rovt, na Črnem potoku na območju Planine pod Golico ter na manjših pritokih (Slika 12 d). Hudournik Jesenica je zlasti na vršaju, kjer je gosto poseljen močno spremenjen (kamen v betonu), drugje pa je večinoma naraven ali deloma urejen (Slika 7). Odsek je nad vršajem razglašen tudi kot referenčen, brez bioloških obremenitev. Prav tako so deloma urejeni oziroma naravni Raten in Jelenji potok, Beli potok, Črni graben, Črni potok pa je večinoma sonaravno urejen. Jesenica je takoj po sotočju Črnega in Belega potoka, kjer sta mHE, nekoliko bolj hidromorfološko spremenjen hudournik, saj ima hudourniške pregrade (Slika 12 b). Sicer so na območju Jesenice bile podeljene 3 koncesije za mHE (kjer Črni potok ne obratuje, Žerjavec pa še ni zgrajena) ter vodna dovoljenja za zasneževanje in ribogojnico. V samem hudourniškem območju je izdanih tudi več vodnih dovoljenj za zajetje. Ob Črnem potoku na levem bregu je nad vasjo Planina pod Golico prisoten tudi plaz (Slika 12 c). Na območju reke Jesenice je veliko travnatih površin, nižje prevladuje mešani gozd, višje pa iglasti. Precej je tudi pozidanih parcel (Sinergise, 2011; ARSO, 2014). Zato

pa so hudourniška območja pritokov pretežno pokrita z gozdom, največ iglastim, deloma pa so prisotni naravni travniki. Beli potok ima znatno količino erozijskih žarišč.



**Slika 12: Stopnje in tolmeni na Jesenici**

### 3.1.3.7 Dobršnik

Naselje Hrušica se nahaja na vršaju Dobršnika, kjer je ta ponovno v betonskem koritu (kamen v betonu). Terenski ogled je bil izveden od vrha vršaja do 2. slapa. Hudournik ima zaplavno pregrado nad naseljem. Višje gre za naravno hudourniško strugo (Slika 7). Včasih je bilo izvedeno vodno zajetje, ki danes ni več v uporabi, dolvodno pa je vseeno izdano vodno dovoljenje. Na Dobršniku (Slika 13) je več manjših slapov. Območje je praktično v celoti prekrto z iglastim gozdom, precej izrazita pa so erozijska žarišča (Sinergise, 2011; ARSO, 2014). Gozd je pretežno listnat. Hudournik ima tako znatno količino koluvialnih odkladnin in na delih je prisotna struga v koluviju, balvani pa tvorijo stopnje (Slika 13 a).



a) Stopnje-tolmuni iz balvanov na Dobršniku



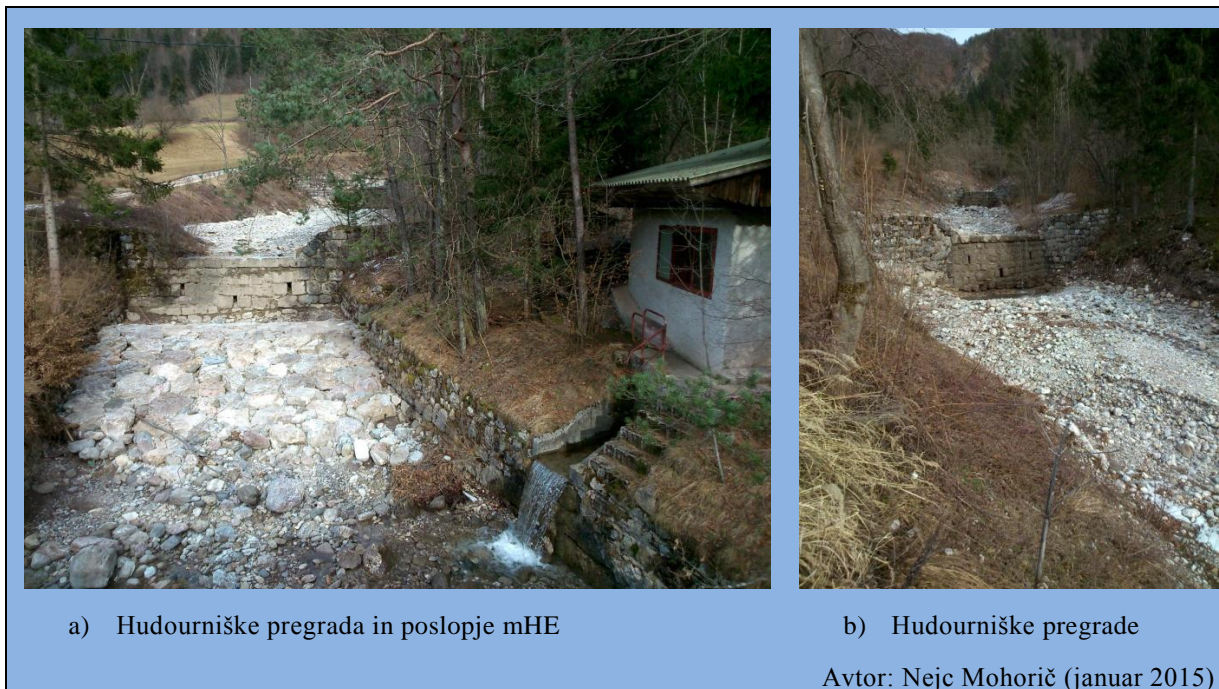
b) Stopnje-tolmuni iz prodnikov na Dobršniku

Avtor: Nejc Mohorič (maj 2014)

**Slika 13: Dobršnik****3.1.3.8 Presušnik**

Hudournik Presušnik ima eno mHE na vršaju (Slika 14 a). Vršaj za razliko od predhodnih ni poseljen, so pa na njem izvedene hudourniške pregrade (Slika 14 b). Gorvodno gre za naraven hudournik. Terenski ogled je bil izveden zgolj na območju vršaja. Ponovno prevladuje gozd v vseh treh oblikah, znaten delež je tudi travnatih površin in erozijskih območij (Sinergise, 2011; ARSO, 2014).





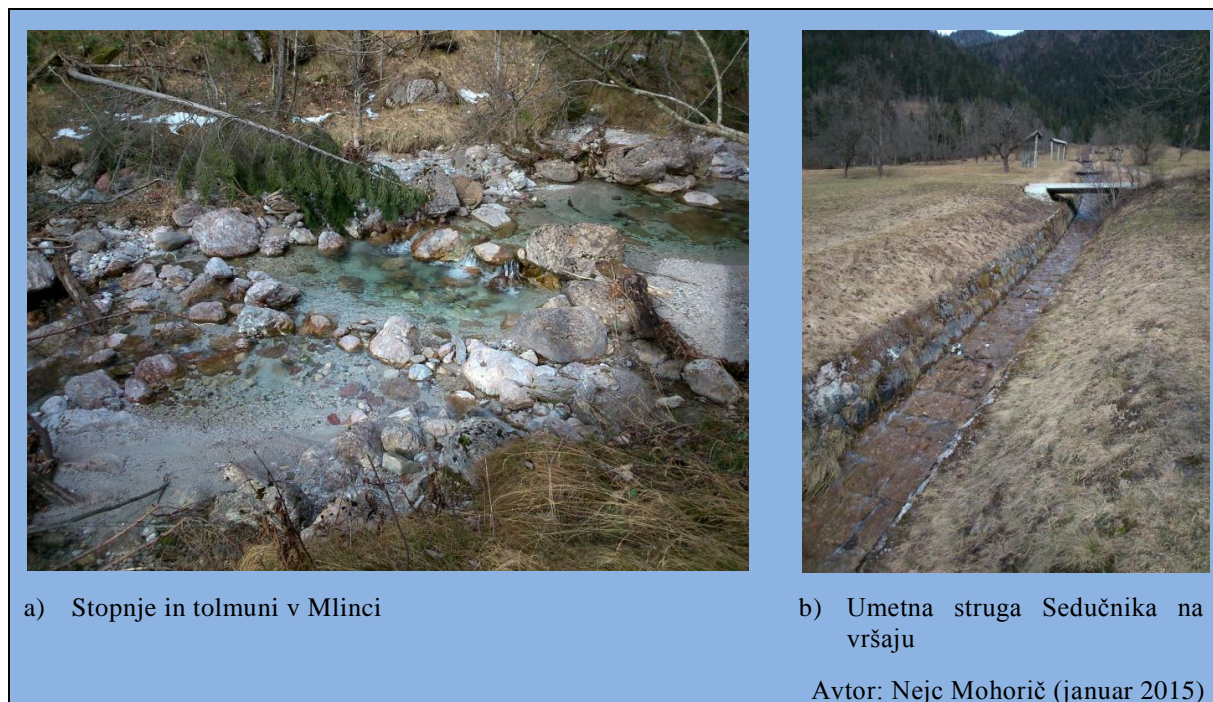
**Slika 14: Hudourniške pregrade na vršaju Presušnika**

### **3.1.3.9 Hudourniško območje Mlince**

Na hudourniku je bil obravnavan tudi pritok Žakelj. Terenski ogled je bil izveden nad vršajem nad zgornjo mHE v dolžini enega kilometra. Hudournik Mlinca (Slika 15 a) ima dve mHE. Kljub temu je pretežno neurejen hudournik oziroma je nižje le deloma urejen. Na vršaju gre za sonaravno oziroma tehnično urejen hudournik (Slika 7). Skoraj v celoti območje Mlince prekriva mešani gozd, nekaj je tudi erozijskih žarišč ob hudourniških strugah, višje pa so resave, grmičasti gozdovi in redko porasle površine (Sinergise, 2011; ARSO, 2014). Vršaj je le deloma poseljen.

### **3.1.3.10 Sedučnik**

Sedučnik je zlasti na vršaju togo urejen hudournik (Slika 7, Slika 15 b). Terenski ogled je bil izveden zgolj na tem območju. V spodnjem delu je tudi mHE in manjši zajem pitne vode. Višje gre vseeno za le deloma urejen hudournik. Praktično celo hudourniško območje razen vršaja prerašča mešani gozd (Sinergise, 2011; ARSO, 2014).



**Slika 15: Mlinca in Sedučnik**

### 3.1.3.11 Hudourniško območje Belce

V območju Belce so bili analizirani tudi pritoki Vršni graben, skupaj Jerca in Goša, Sušca, Bovharski potok, Kurji graben, Beli potok ter Suhi graben. Terenski ogled je bil izveden od vrha vršaja 0,5 km gorvodno. Belca na tem območju vsebuje tudi veliko balvanov, okrog katerih so tvorjene stopnje in tolmeni. Na hudourniškem območju je prisotno veliko erozijskih žarišč, v veliki večini pa prevladuje iglasti gozdni pokrov (Sinergise, 2011; ARSO, 2014). Na najvišjih delih območja je prisoten grmičast gozd, resave in redko poseljene površine. Vršaj je ponovno poseljen. Hudournik je v spodnjem toku tehnično urejen, višje pa sonaravno, saj so zgrajene hudourniške pregrade (Slika 7, Slika 16 a). V spodnjem delu Belce je tik pred vršajem tudi mHE (Slika 16 a). Višje gre za naravno hudourniško strugo, enako velja za pritoke. Za vse hudournike znotraj hudourniškega območja je značilna velika erozijska dejavnost. Malenkost izstopata Suhi graben in Bovharski potok, saj je nekoliko manj erozijskih žarišč, ter Vršni graben, ki ima slednje prisotne šele po strmeh padcu v dolino Belce, kjer v pobočnem grušču ponikne, razen ob visokih pretokih (Slika 16 b).



**Slika 16: Hudourniško območje Belce**

### 3.2 Metoda analize

V tem poglavju je prikazan postopek zajema podatkov, v nadaljevanju pa je predstavljena njihova obdelava. V strmih hudourniških strugah se pri obravnavi krajših odsekov (npr. 100 m) nakloni struge lahko močno razlikujejo zaradi oblik dna, zato je njihova analiza za inženirsko prakso običajno neuporabna. Vseeno nas lahko v primeru preučevanja hidravličnih lastnosti posameznih geomorfoloških oblik tak padec zanima. Ker v tem primeru ne gre za zajem točk večjega območja, so metode za masovni zajem višinskih točk manj uporabne. Kljub temu bi si pri podrobnejših analizah že veliko lahko pomagali z lidarskimi DMV, ta možnost je tudi predstavljena v tem delu. Če pa gledamo hudournik kot celoto, bi neke približke vzdolžnih profilov s padci lahko določili s pomočjo manj podrobnih DMV. Ti so izdelani iz niza prostorskih točk, ki so podane s prostorskimi koordinatami v izbranem koordinatnem sistemu (Rihtaršič in Fras, 1991). Točke so lahko razporejene enakomerno ali pa ne. Slaba stran modelov z enakomerno razporeditvijo točk je v tem, da se gostota točk na območjih, kjer je relief bolj razgiban, ne poveča (Podmenik, 2008), so pa zaradi tega najbolj enostavni za izdelavo. Glavni vir zajemanja točk DMR so bili od 90. let letalski posnetki. V letu 2011 se je pričel projekt aerolaserskega skeniranja Slovenije, ki se je po začasni prekinitvi ponovno pričel izvajati leta 2014 in naj bi bil zaključen do sredine leta 2015. Eden od izdelkov aerolaserskega skeniranja bo DMR s prostorsko ločljivostjo 1 m (Grigillo, 2014).

Vsi obravnavani višinski modeli v tem delu imajo enakomerno razporeditev točk, saj so bili podatki z interpolacijo preračunani v pravilno celično mrežo. Za obdelavo sta bila izbrana DMV 12,5 in DMV 5, kot najbolj točna in natančna obstoječa DMV. Vrednost 12,5 pomeni, da je velikost celice 12,5 m, vrednost 5 pa, da je velikost celice 5 m. V splošnem velja, da bolj kot je gosta množica celic, podrobnejši je model. Vendar pa to ni nujno, saj je pomemben tudi način zajema podatkov, višinska točnost podatkov in njihova obdelava. Za nekatera območja, kjer so bili na razpolago podatki laserskega skeniranja, so bili uporabljeni DMV z velikostjo celice 0,5 m in 1 m.

### 3.2.1 Razvoj in podatki o digitalnih modelih višin

Prve ideje o izdelavi DMR oziroma višin so se začeli takoj, ko se je na trgu pojavila računalniška tehnologija. Prvi poskusi so se začeli že v 60. letih (Podobnikar, 2008). Tako so začeli 1972 izdelovati DMR 100 na podlagi temeljnega topografskega načrta 5 in 10 (TTN 5 se je vzporedno izdeloval), in sicer z ročnim odčitavanjem vrednosti (Podmenik, 2008). Ta je imel v evropskem in svetovnem smislu sicer veljavo, vendar je bil za praktično uporabo še preveč posplošen. Kljub majhni prostorski ločljivosti je bila natančnost 10 m v horizontali in 10 m v vertikali, točnost pa je bila občutno nižja. Istočasno se je izdeloval DMR 500, ki je bil prvi izdelan za vso Slovenijo (Podobnikar, 2008). Ker se je izdelava precej vlekla, se je sočasno izdelalo nekaj lokalnih DMV 20 oziroma DMV 10 za potrebe raznih ustanov in podjetij. Leta 1995 so začeli izdelovati DMR 40, ki so ga kmalu transformirali v DMR 25. Izdelovalo ga je več izvajalcev, zato so se pojavljala odstopanja na stikih listov. Točnost je bila sicer predpisana 1 m za neporaščen teren in 3 m za gozdna območja, a je bila dejansko precej slabša. Hkrati so tudi izvajali izdelave DMV za potrebe obrambnega ministrstva, tako je nastal SPOT DMV 20 (Podmenik, 2008). Dalje je ZRC SAZU leta 1999 in 2000 izdelal InSAR DMV 25 in InSAR DMV 100 (interpoliran iz InSAR DMV 25) s pomočjo podatkov zajetih iz satelitov. Točnost je bila horizontalno 5 m in vertikalno 6,5 m (Podmenik, 2008).

1998. leta se je pojavila ideja o izdelavi DMR za celo Slovenijo. Začela se je 2001 in trajala do 2005. Vzeta je bila predpostavka, da se da iz obstoječih virov brez dodatnega narediti kakovosten DMV (Podobnikar, 2008). Upoštevanih je bilo kar 30 virov, vendar niso vsi zajemali celotnega površja Slovenije, med njimi:

- DMR 100,
- lokalni DMV 20 in DMV 10,
- DMR 25,
- SPOT DMV 20,
- InSAR DMV 25 in InSAR DMV 100,
- digitalizirane plastnice državne topografske karte (DTK) 25,
- digitalizirano hidrografijo DTK 25,
- plastnice temeljne topografske karte (TTN) 5 in TTN 10,
- točke temeljnih geodetskih mrež,
- točke zemljiškega katastra,
- Centralna baza podatkov o stavbah in
- druge.

Uporabljena je bila metoda utežnega seštevanja virov. Kmalu se je pokazalo, da podatki niso v tako dobrem stanju, kot so predvidevali, niso se namreč zajemali po enotnih standardih, niso bili vzdrževani, imeli so veliko grobih in sistematičnih napak, metapodatki pa so se med seboj težko primerjali (Podobnikar, 2008). Ker je prostorska ločljivost 12,5 m, je dobil ime DMV 12,5, izdelana pa sta bila še DMV 25 in DMV 100. Natančnost DMV 12,5 je horizontalno 2 m (Podmenik, 2008), višinska pa (Podobnikar, 2008):

- 1,1 m na ravnini,
- 2,3 m v gričevnatem svetu,

- 3,8 m v hribovitem svetu ter
- 7 m v goratem svetu.

V primeru podatkov v tem magistrskem delu gre pretežno za hribovit in deloma tudi gorat svet, zato so potem natančnosti nekih vmesnih vrednosti. Že iz tega, da je natančnost nekaj metrov, je uporabnost takih podatkov za analizo vzdolžnega poteka struge vprašljiva; za taka območja ga tudi Podobnikar opredeli kot manj primerne (2008). Kljub temu je v primerih, kjer obravnavamo celotno strugo in ima hudournik na tem delu nekaj 100 m padca, DMV 12,5 že lahko primeren za ugotavljanje daljšega vzdolžnega profila, zato pa je popolnoma neprimeren za podrobnejše analize kratkih odsekov struge, kjer bi na primer želeli ugotoviti morfološke značilnosti, kot so stopnje-tolmuni, kaskade in tudi slapovi.

Leta 2006 se je po naročilu Geodetske uprave Republike Slovenije (GURS) pričel zajem DMV 5, torej ločljivosti 5 m. Zahtevana natančnost je bila 1 m na neporaščnem ter 3 m na poraščnem terenu. Podobnikar (2008) pravi, da je bila že z DMV 12,5 dosežena natančnost 1 m na ravninskih območjih, zato bi v 5-metrski ločljivosti lahko pričakovali natančnost 10 cm do 30 cm na podobnih območjih. Izdelan je bil s prevzorčenjem iz DMV 12,5 na novo ločljivost 5 m. Izvedla se je (stereo) fotogrametrična obdelava prevzorčenega modela, ker pa so bili operaterji različno usposobljeni, je kvaliteta različna glede na območje (Podobnikar, 2008). Za delo se je uporabljal program Socet Set s svojimi orodji, posledica uporabe le-teh pa so vidne tudi na končnem izdelku (Podmenik, 2008) – popravljala so se zgolj območja, kjer je natančnost padla pod predpisano vrednost 1 m. Problem predstavlja tudi to, da se model ne posodablja. Podobnikar (2008) DMV 5 ocenjuje v primerjavi z DMV 12,5 za boljšega, če upoštevamo višinsko kakovost (ki ji je bilo posvečeno največ pozornosti), a ima več drobnih geomorfoloških napak in je primernejši za uporabo večjih območij, kjer so te manj izrazite. Prednost pred ostalimi je v bistveno večji prostorski ločljivosti in natančnosti na neporaščnih terenih, zlasti na pobočjih gričev, hribovij in gora, vseeno pa odstopanja na gozdnatih območjih presegajo predpisane 3 m (Podmenik, 2008). Tudi ta model ne bi bil primeren za podrobnejšo analizo krajših odsekov struge, v primeru obravnave celotne struge hudournika pa je natančnost zadovoljiva.

Kot se je izkazalo pri Sodnik et al. (2009) sta DMV 12,5 ter DMV 5 za potrebe matematičnega modeliranja neuporabna. Ravno to je spodbudilo vse širšo uporabo lidarskih DMV. Dodatna prednost je zajem tudi talnih točk pod vegetacijo. Same oblike struge pa je v splošnem ravno tako dokaj težko zajeti, saj so brežine pogosto gosto poraščene ali pa so v bližini objekti.

Lidarski modeli višin so narejeni s pomočjo tehnologije zračnega laserskega skeniranja (LiDAR je namreč angleška krajšava za Light Detection and Ranging). Gre za metodo razvito v zadnjih dveh desetletjih, ki omogoča izdelavo bistveno natančnejših DMV (5 cm do 15 cm). Zahtevana natančnost s strani GURS-a (2011) je po višini 15 cm, medtem ko je horizontalna 30 cm.

Naprava je običajno nameščena na letalu ali helikopterju. Letalo leti prehitro ter višje, posledično zajame manj točk, vendar pa leti bolj enakomerno (manj vijuga) v primerjavi s helikopterjem. Gre za najbolj točno metodo za masovni zajem višinskih točk, ki je trenutno na razpolago. V prihodnosti mu bodo lahko konkurenco predstavljali novi radarski sistemi (Grigillo, 2014). Danes je vedno bolj popularno in razvito snemanje z daljinsko vodenimi brezpilotnimi letalniki. V primeru struge je mikavna ideja o snemanju pod krošnjami dreves, tako bi se lahko zmanjšali

količino točk, ki bi morale biti filtrirane. Problem pa bi v tem primeru predstavljale ravno ozke doline in krošnje, saj je tako zanesljivost globalnega navigacijskega satelitskega sistema (GNSS) precej manjša oziroma celo nezadostna.

Naprava za skeniranje na plovilu proti tlom pošilja žarke, ki se odbijajo od površine (tudi objektov). Senzor zaznava te odbite žarke. Koordinate točk na terenu so določene s polarno metodo – s koordinatami dane točke (pozicija plovila, določena z GNSS in INS) in izmerjeno razdaljo ter kotom do iskane točke se izračunajo koordinate iskane točke. Inercialni navigacijski sistem (INS) meri vse tri kote zasuka plovila. Razdaljo lahko določi razdaljemer s časom, ki ga žarek potrebuje, da se vrne do naprave, lahko pa se določi tudi iz faze odbitega valovanja. Prvi so impulzni, drugi pa fazni razdaljemer. Danes se beleži tudi svetlobna intenziteta sprejetega žarka, znan je tudi red odboja. Rezultat snemanja je oblak točk, v katerem so zajeti tako odboji od objektov kot tudi odboji od dreves in tako dalje. V tem magistrskem delu je potreben model terena, zato je potrebno te neterenske točke odstraniti. Uporabljajo se posebni filtri, ki poskrbijo za to. Pridobljen je bil že filtriran DMV, interpoliran v pravilno celično mrežo.

S pomočjo lidarskega snemanja se lahko pridobi zelo visoka stopnja natančnosti. Vsi sistemi, ki sestavljajo laserski skener, vplivajo na (Bitenc, 2007):

- natančnost merjene razdalje,
- natančnost določitve položaja z GNSS,
- natančnost določitve smeri laserskega žarka,
- kakovost transformacije koordinatnih sistemov.

Poleg sistemskih merskih napak se lahko pojavijo tudi variabilne, ki so odvisne od:

- geometrije objektov na terenu,
- pokritosti tal,
- odbojnosti terena,
- kota skeniranja,
- višine plovila in
- drugo.

Slabost lidarskih DMV je absorpcija laserskega žarka v vodnih telesih. Odvisna je od vpadnega kota laserskega žarka, pri pravokotnem vpadu pa je največja. Lidar tako ni primeren za zajem gladin vodotokov. Lidarski DMV, ki je uporabljen v tem delu, je bil posnet poleti, ko so hudourniki na hudourniškem območju Bele presahnili. Tako je bila izničena pomanjkljivost lidarskega snemanja. Iste DMV so uporabljali že Sodnik et al. (2012). Dodatna pomanjkljivost je visoka cena lidarskih DMV (Sodnik et al., 2012), zato je uporabnost za večja območja nekoliko manjša, poleg tega pa je čas obdelave podatkov s programskimi orodji bistveno daljši. Ta model je bistveno boljši od DMV 12,5 ter DMV 5, iz njega bi morali slutiti tudi posamezne oblike dna.

### 3.2.2 Uporabljena računalniška orodja

Za določitev vzdolžnih padcev je bila uporabljena programska oprema ArcGIS podjetja Environmental System research Institute (ESRI), ki je namenjena analizi podatkov v geografskih informacijskih sistemih (GIS). Zagnani so bili vmesniki ArcMap, ArcCatalog ter ArcToolbox z

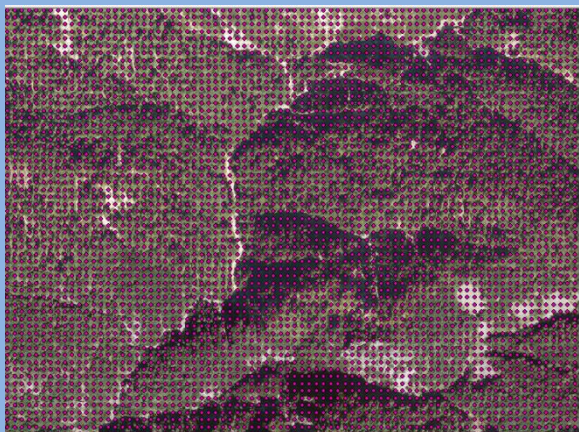
datki Spatial analyst tools in 3D Analyst. V vseh primerih pri DMV 12,5, DMV 5 ter lidarskih DMV je bila potrebna podobna obdelava podatkov.

Najprej je bila ustvarjena geografska podatkovna baza in značilnosti nabora podatkov, kjer je bil določen horizontalni in vertikalni koordinatni sistem. Za horizontalnega je bil izbran D48 Slovenia TM, za vertikalnega ETRS 1989 (Preglednica 4). D48 Slovenia TM je ravninski koordinatni sistem, kjer so koordinate D48 odvisne od »datuma«, in sicer elipsoida »Bessel 1841«. Oznaka TM predstavlja transverzalno Mercatorjevo kartografsko projekcijo, ki je sicer enaka Gauß-Krügerjevi projekciji (Berk, 2008). Ta projekcija je bila izbrana zato, da so se sloji digitalnih orto-foto posnetkov iz GIS Serverja Geopedije (Sinergise, 2011) ujemali z izračuni in da je bila s tem vizualna analiza lažja. Do leta 2008 je bil sicer pretežno v uporabi D48/GK, po tem letu pa se je uvedel koordinatni sistem D96/TM (Podobnikar, 2008). ETRS 1989 (European Terrestrial Reference System 1989) je geodetsko kartezično referenčno orodje, ki predpostavlja, da je Evrazijska plošča kot celota statična. 1989 se ne nanaša na leto realizacije, ampak na leto začetne definicije. Ta koordinatni sistem je predlagan za Evropo s strani EU za geodetske podatke in se uporablja v Evropi tako za kartiranje kot tudi za namene raziskav. Predvideno je, da ga v prihodnosti zamenja EVRS (Podobnikar, 2008).

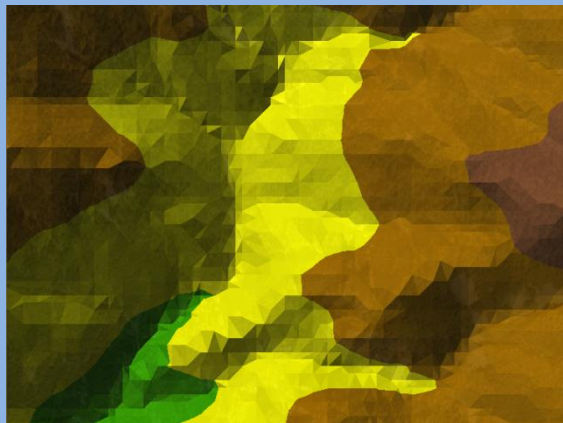
**Preglednica 4: Podatki o izbranih koordinatnih sistemih (Vir: ESRI, 2013; avtor: Nejc Mohorič)**

WKID: 102060 Authority: ESRI Projection: Transverse_Mercator False_Easting: 500000.0 False_Northing: -5000000.0 Central_Meridian: 15.0 Scale_Factor: 0.9999 Latitude_Of_Origin: 0.0 Linear Unit: Meter (1.0)  Geographic Coordinate System: GCS_D48 Angular Unit: Degree (0.0174532925199433) Prime Meridian: Greenwich (0.0) Datum: D_D48 Spheroid: Bessel_1841 Semimajor Axis: 6377397.155 Semiminor Axis: 6356078.962818189 Inverse Flattening: 299.1528128	ETRS_1989 WKID: 115701 Authority: ESRI  Linear Units: Meter Direction: positive up Vertical Shift: 0.0 Datum: D_ETRS_1989 Spheroid: GRS_1980 Semimajor Axis: 6378137.0 Semiminor Axis: 6356752.314140356 Inverse Flattening: 298.257222101
--	--

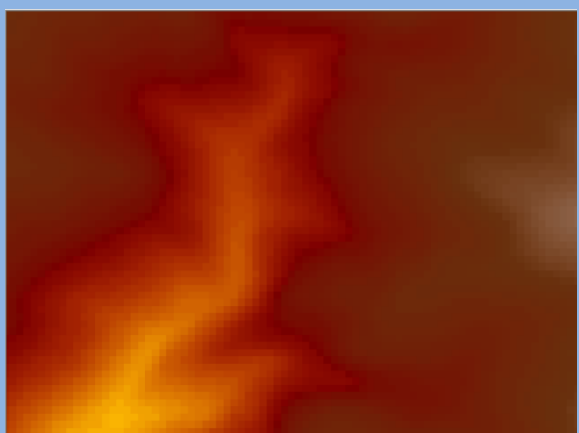
Te značilnosti podatkov so se uporabljale za uvoz podatkov iz koordinat x, y in z v tekstovni obliki v nov lastnostni razred – točke v programu v grafični obliki (Slika 17 a). Nato je bil iz teh točk ustvarjen piramidni teren (Slika 17 b), kjer je bila razdalja med točkami prilagojena DMV, ki je bil obravnavan. Iz tega terena je bila izdelana rastrska slika površja (Slika 17 c). Kot interpolacijska metoda je bila uporabljena metoda naravnih sosedov (natural neighbours), ki ustvari bolj gladek približek temeljni »resnični« funkciji. Kot velikost celice rastra je bila določena 0,5 m oziroma 1 m (pri lidarskih DMV) ter 5 m oziroma 12,5 m pri DMV 5 ter DMV 12,5.



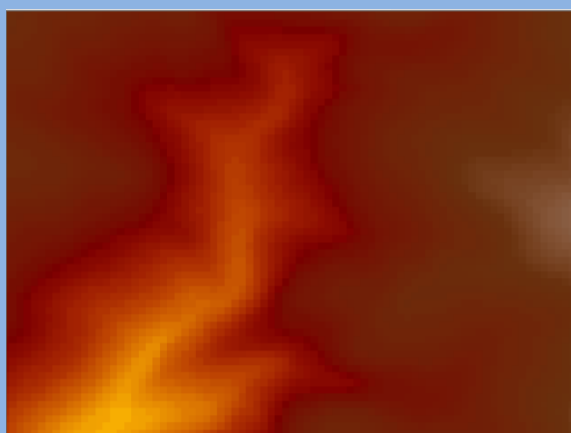
a) Prikaz DMV



b) Zgrajen teren iz DMV



c) Raster zgrajen iz terena

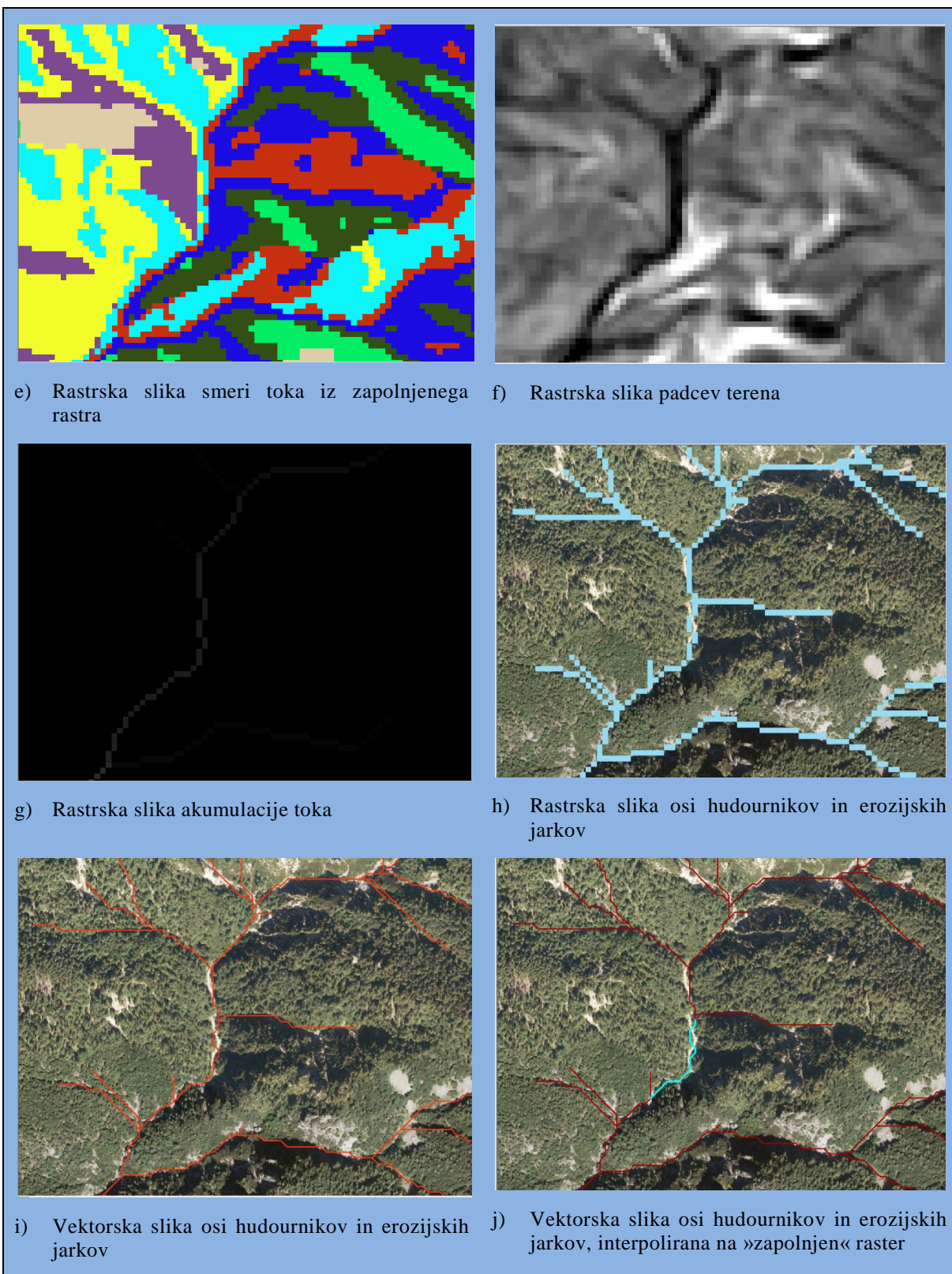


d) Zapolnjen raster iz Slike 17 c

Se nadaljuje...

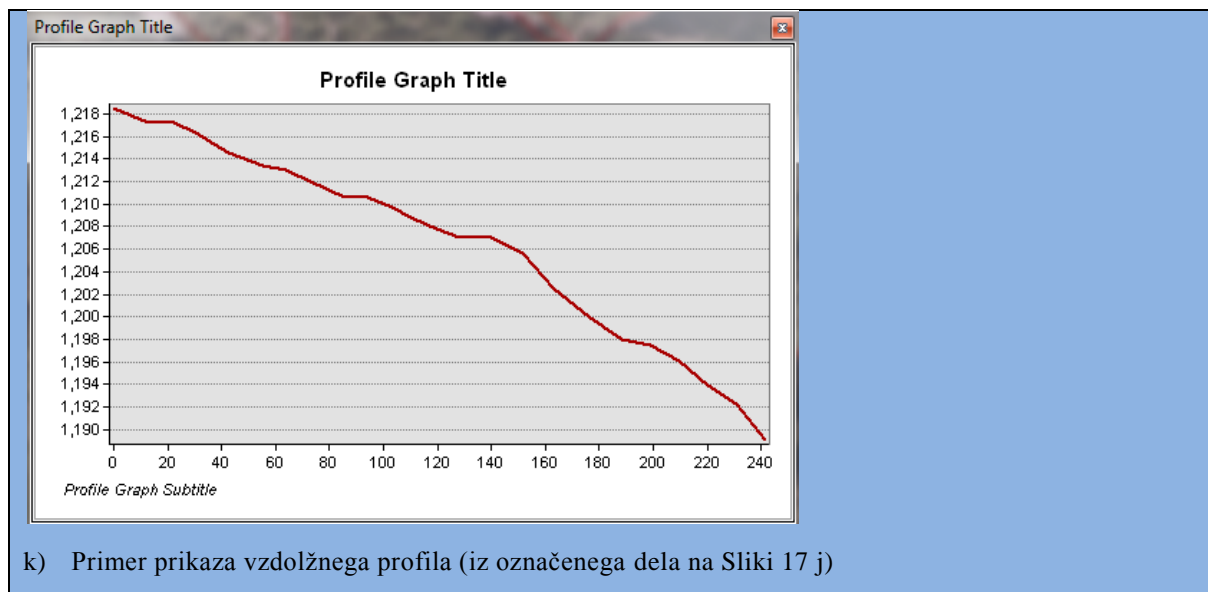


... nadaljevanje Slike 17.



Se nadaljuje...

... nadaljevanje Slike 17.



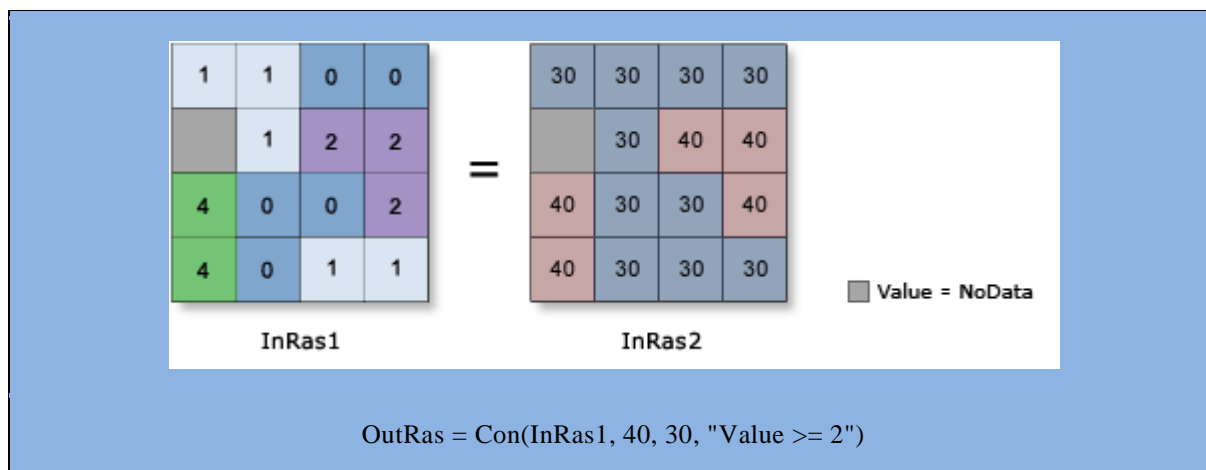
k) Primer prikaza vzdolžnega profila (iz označenega dela na Sliki 17 j)

**Slika 17: Prikaz postopka obdelave podatkov DMV na hudourniškem območju Mlince (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič)**

Nato je sledila uporaba hidroloških orodij. Kot prva je bila izvedena »zapolnitev« (fill) rastra (Slika 17 d), ki je zapolnil ponore v rastrski mreži ter odstranil manjše nepravilnosti v podatkih. Ta raster se je nato uporabil za določitev smeri toka (Slika 17 e) in rastrskega sloja padcev (ki sicer ni bil uporabljen) (Slika 17 f). Raster smeri toka je vhodni podatek za akumulacijo toka (Slika 17 g). Ta operacija določi rastrsko sliko akumulacije toka v vsaki celici.

Potrebovali smo tudi datoteke v zapisu SHP (shapefile) (v istih koordinatnih sistemih kot ostalo), ki so bile vhodni podatek za določitev pozicije točk zbiranja (pour point). Dodaten vhodni podatek je bila tudi akumulacija toka. Točke zbiranja so bile potrebne za določitev prispevnih območij porečij poleg smeri toka. Običajno so bile izbrane na dolvodnem delu pred iztokom v večji hudournik ali pa na izrazitih prehodih med različnimi morfologijami. Dobljene površine porečij so bile nato še vektorizirane.

Bolj pomembna za samo magistrsko delo je določitev rastrske slike mreže hudournikov (Slika 17 h). To se je izvedlo z rastrskim računalom, in sicer z ukazom »Con«, ki se uporablja za pogojna vrednotenja if/else vsake celice vhodnega rastra (Slika 18). Na Sliki 18 so vrednosti iz tabele InRas1 transformirane po ukazu spodaj. Vrednosti, ki so manjše ali enake 2, so transformirane v vrednost 30, večje od 2 pa v 40. Uporabljen je bil postopek, ki sta ga predlagala Parmenter in Melcher (2010). Obstajajo tudi drugačni pristopi. Šantl et al. (2012) so recimo s programskim orodjem VapIdroAste, ki je vezano na ArcGIS, generirali rečno mrežo z zeleno podrobnostjo, ki je omogočal določitev izrisa določenega števila pritokov in podporečij (iz DMV 25 in DMV 90 oziroma DMV 12,5).



**Slika 18:** Skica principa delovanja funkcije »Con« v rastrskem računalu (ESRI, 2012)

Rastrska slika je bila nato transformirana v vektorsko obliko (Slika 17 i), kjer je vhodni podatek tudi smer toka, linije pa niso bile poenostavljene. Zato so linije hudournikov oglate, saj linija povezuje centre posameznih celic. Nadalje je bila mreža hudournikov v vektorski obliki interpolirana na zapolnjeno rastrsko sliko z bilinearno interpolacijo (Slika 17 j). Rezultat je bil graf (Slika 17 k), vendar pa samo za posamezne kratke odseke med presečišči osi toka vode. Potrebno je bilo združiti os hudournika s funkcijo »unsplit line«, kar se je izvedlo ročno. Šantl et al. (2012) so z orodjem VapIdroAste lahko določili, kakšno je minimalno prispevno območje, do katerega je izoblikovana struga (0,3125 km<sup>2</sup>). Ker to orodje ni bilo uporabljeno in je zato določitev prispevnega območja precej kompleksnejša, so bile gorvodno struge združene do višine, do katere je bil hudournik narisano po podatkih zbirke topografskih podatkov homogene natančnosti, ki ustreza ravni merila 1 : 5000 (DTK 5). Kjer slednji ni bil na razpolago, se je vizualno iz orto-foto posnetkov določilo, do kje je razvidna struga.

### 3.3 Hidrološke razmere

V Zgornjesavski dolini je občutna razlika med količino padavin v dolini in na grebenih Karavank zaradi orografskih padavin. Povprečna količina padavin na meteoroloških postajah v dolini je od 1545 mm do 1629 mm na leto, na postajah višje na pobočju Karavank pa 1730 mm oziroma 1989 mm (Preglednica 5). Lahko se predvideva, da višje proti vrhu grebena pade še več padavin.

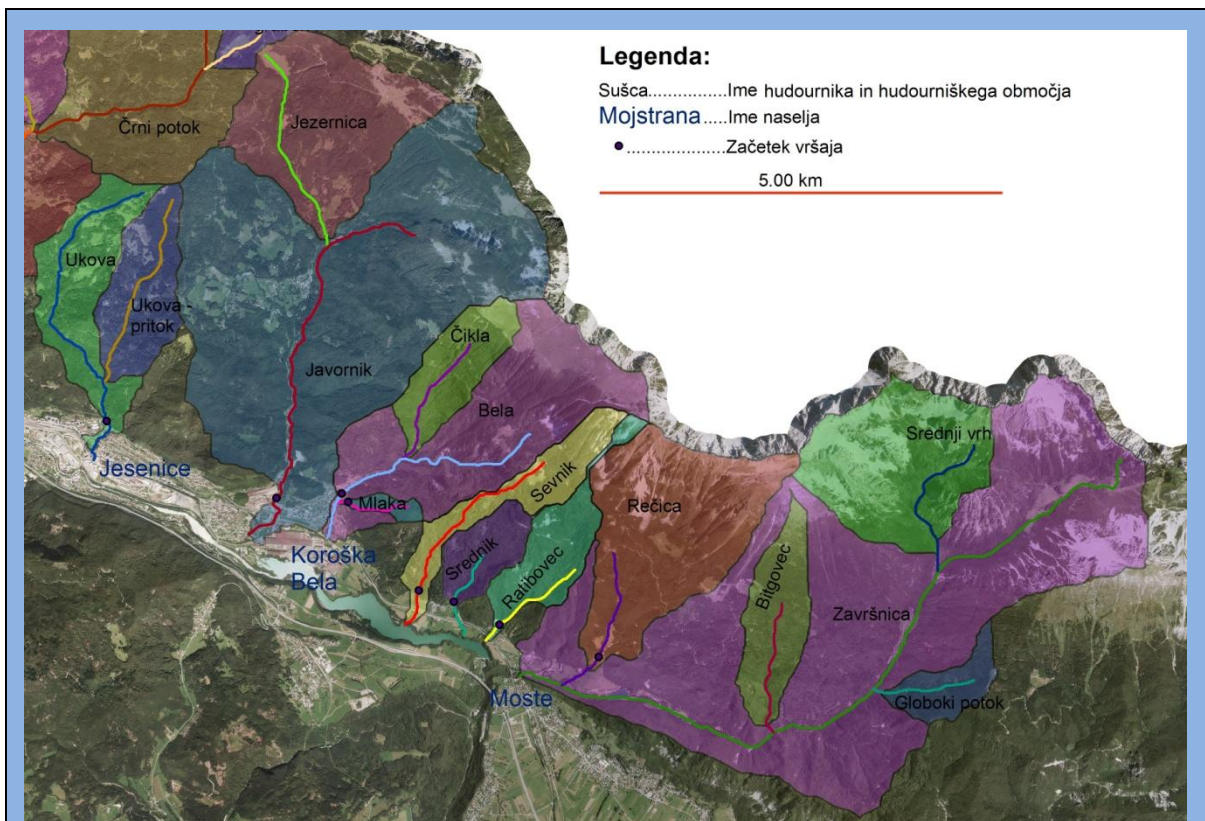
**Preglednica 5:** Povprečna količina padavin na območju Zgornjesavske doline (povzeto po Meteo.si, 2015)

Meteorološka postaja	Število let merjenja	Povprečna količina padavin [mm/leto]
Rateče	54	1545
Mojstrana	39	1610
Hrušica	28	1629
Jesenice	19	1627
Planina pod Golico	41	1730
Javorniški rovt	54	1989

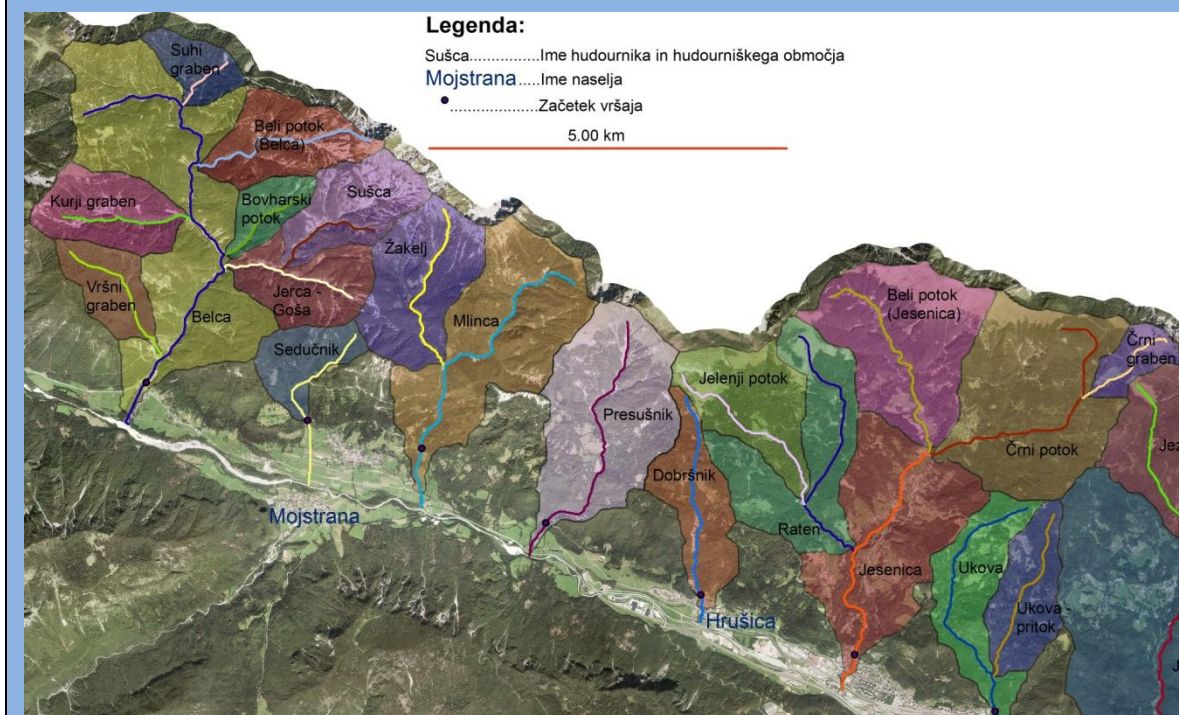
Za oceno količine padavin je najbolje, da si pomagamo z rezultati na dežemerih bližnjih meteoroloških postaj. V kolikor so te preveč oddaljene, pa so podatki lahko vprašljivi, enako velja za naš primer, kjer so lokalne razmere lahko odločilne. Na primer višje po pobočju pade več padavin kot nižje. Omeniti velja, da če so iskane maksimalne padavine v določenih časovnih intervalih, so potrebni rezultati iz ombrografov, ki pa so le v Ratečah in na Javorniškem rovtu (Sodnik in Mikoš, 2006).

Oblika hudourniškega območja lahko dodatno doprinese k času koncentracije. Podobno velja za naklone pobočij dolin – večji so, hitrejši je odtok. Ločijo se hudourniška območja z večjo razvejanostjo v zgornjem toku, v srednjem toku in spodnjem toku (pahljačasta hudourniška območja) ter z enakomerno razvejanostjo tekom celotnega območja (Gavrilović, 1972). Od oblike območja je odvisna možnost nastanka nenadne koncentracije poplavnega vala na njegovem ustju. Zlasti pahljačasta hudourniška območja so kritična (Gavrilović, 1972). Površina hudourniškega območja je pomemben podatek 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.

S programskim orodjem ArcGIS je bila na podlagi DMV 5 ustvarjena Slika 19, ki prikazuje obravnavana hudourniška območja. Vidne so zgolj struge, ki so bile obravnavane. Seveda so pri oblikah območij v naravi prisotne tudi take, za katere je težko reči, v katero kategorijo spadajo. Le pri nekaterih hudournikih, ki imajo bolj značilne oblike, je ta klasifikacija smiselna. Bolj značilna hudourniškega območja z večjo razvejanostjo v zgornjem toku so Javornik, Jelenji potok in Mlinca. Hudourniška območja Završnice, Jezernice, Ukove, pritoka Ukove, Črnega potoka in Presušnika imajo večjo razvejanost v srednjem toku. Izrazito pahljačastega hudourniškega območja ni. Najbližje temu sta območji Jesenice in Belce. Veliko je tudi hudourniških območij z dokaj enakomerno razvejanostjo vzdolž hudourniškega območja, in sicer so to Bitgovec, Ratibovec, Srednik, Sevnik, Čikla in Dobršnik.



a) Obravnavana hudourniška območja, vzhodni del



b) Obravnavana hudourniška območja, zahodni del

Slika 19: Obravnavana hudourniška območja (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič)

V Preglednici 6 so podane vrednosti površin hudourniških območij pridobljene v programskem orodju ArcGIS. Površina teh območij je bila že zbrana v delih na primer Sodnik in Mikoš (2006) in Bunčič (2014), večjih odstopanj pa z rezultati v tem delu iz DMV 5 ni. Med rezultati z uporabo DMV 5 in DMV 12,5 so razlike minimalne. Večinoma se razlika v površini območja ne razlikuje niti za en odstotek, izjeme so posamezna manjša hudourniška območja Mlake (17 %), Srednika, Ratibovca, Sevnika, Rečice (vsi pod 10 %), kjer že manjša sprememba lahko pomeni velik delež.

**Preglednica 6: Površine obravnavanih hudourniških območij, pridobljene iz DMV 5 (Vir: ESRI, 2013; avtor: Nejc Mohorič)**

Hudourniško območje	A [km <sup>2</sup> ]	Hudourniško območje	A [km <sup>2</sup> ]	Hudourniško območje	A [km <sup>2</sup> ]
Završnica	25,58	Jezernica	3,95	Žakelj	2,77
Rečica	4,48	Ukova	4,07	Sedučnik	1,18
Bitgovec	1,60	Ni imena - Ukova	1,76	Belca	17,38
Globoki potok	0,78	Jesenica in Črni potok	20,28	Vršni graben	1,24
Srednji vrh	3,59	Raten	5,67	Jerca-Goša	3,67
Srednik	0,89	Jelenji potok	2,35	Sušca	1,92
Ratibovec	1,38	Črni potok	5,88	Bovharski potok	0,81
Sevnik	1,47	Črni graben	0,73	Kurji graben	1,86
Bela	6,42	Beli potok (Jesenica)	4,15	Beli potok (Belca)	2,06
Mlaka	0,20	Dobršnik	1,92	Suhi graben	0,86
Čikla	1,39	Presušnik	4,49		
Javornik	17,18	Mlinca	7,58		

Sodnik in Mikoš (2006) sta izvedla analizo hidroloških parametrov za območje Zgornjesavske doline na podlagi 18 hudourniških območij. Določila sta zvezi med pretoki s 100-letno povratno dobo [m<sup>3</sup>/s] in površino hudourniškega območja [km<sup>2</sup>] (35) ter prostornino odtoka  $V_r$  [m<sup>3</sup>] in površino hudourniškega območja [km<sup>2</sup>] (36). Dobljeni enačbi sta dali statistično zanesljivi enačbi (z regresijskim koeficientom  $R^2 > 0,97$  za 18 območij). Tako sta primerni za uporabo tudi na drugih hudourniških na območju Zgornjesavske doline, torej tudi za tiste obravnavane v tem delu.

$$Q_{100} = 12,5 * A^{0,72} \quad (35)$$

$$V_r = 90000 * A^{0,93} \quad (36)$$

Sodnik in Mikoš (2006) sta upoštevala podane padavine na vodomerni postaji Javorniški rovt (za vsa hudourniška območja razen Belce) in Rateče (za območje Belce). Za pripravo podatkov v modelu HEC-HMS sta uporabila SCS (Soil conservation service) metodo, s katero se je določil kritični čas stekanja  $T_c$  in čas zamika  $T_p$  med težiščem padavin in konico odtoka. S pomočjo sintetičnega hidrograma iz predpostavljenih padavin so bili nato določeni pretoki pri visokovodnih valovih.

Enačbi (35) in (36) sta obravnavali hudourniška območja z od 1,8 km<sup>2</sup> do 43,7 km<sup>2</sup> prispevne površine. Kar 13 izmed obravnavanih območij ima manjšo površino. Do neke meje je dovoljena ekstrapolacija do teh vrednosti, za precej manjše, kot je na primer Mlaka, pa je uporaba te enačbe

lahko vprašljiva. V Preglednici 7 so podane vrednosti pretokov s 100-letno povratno dobo, izračunane po tej enačbi.

**Preglednica 7: Vrednosti ocenjenih pretokov s stoletno povratno dobo pri upoštevanju enačbe (35)**

Hudourniško območje	$Q_{100}$ [m <sup>3</sup> /s]	Hudourniško območje	$Q_{100}$ [m <sup>3</sup> /s]	Hudourniško območje	$Q_{100}$ [m <sup>3</sup> /s]
Završnica	129,00	Jezernica	33,59	Žakelj	26,06
Rečica	36,83	Ukova	34,32	Sedučnik	14,12
Bitgovec	17,57	Pritok Ukova	18,79	Belca	97,66
Globoki potok	10,45	Jesenica in Črni potok	109,13	Vršni graben	14,57
Srednji vrh	31,39	Raten	43,58	Jerca-Goša	31,90
Srednik	11,52	Jelenji potok	23,12	Sušca	20,02
Ratibovec	15,74	Črni potok	44,74	Bovharski potok	10,70
Sevnik	16,51	Črni graben	9,98	Kurji graben	19,54
Bela	47,70	Beli potok (Jesenica)	34,82	Beli potok (Belca)	21,03
Mlaka	3,90	Dobršnik	19,99	Suhi graben	11,23
Čikla	15,84	Presušnik	36,86		
Javornik	96,87	Mlinca	53,73		

## 4 REZULTATI IN RAZPRAVA

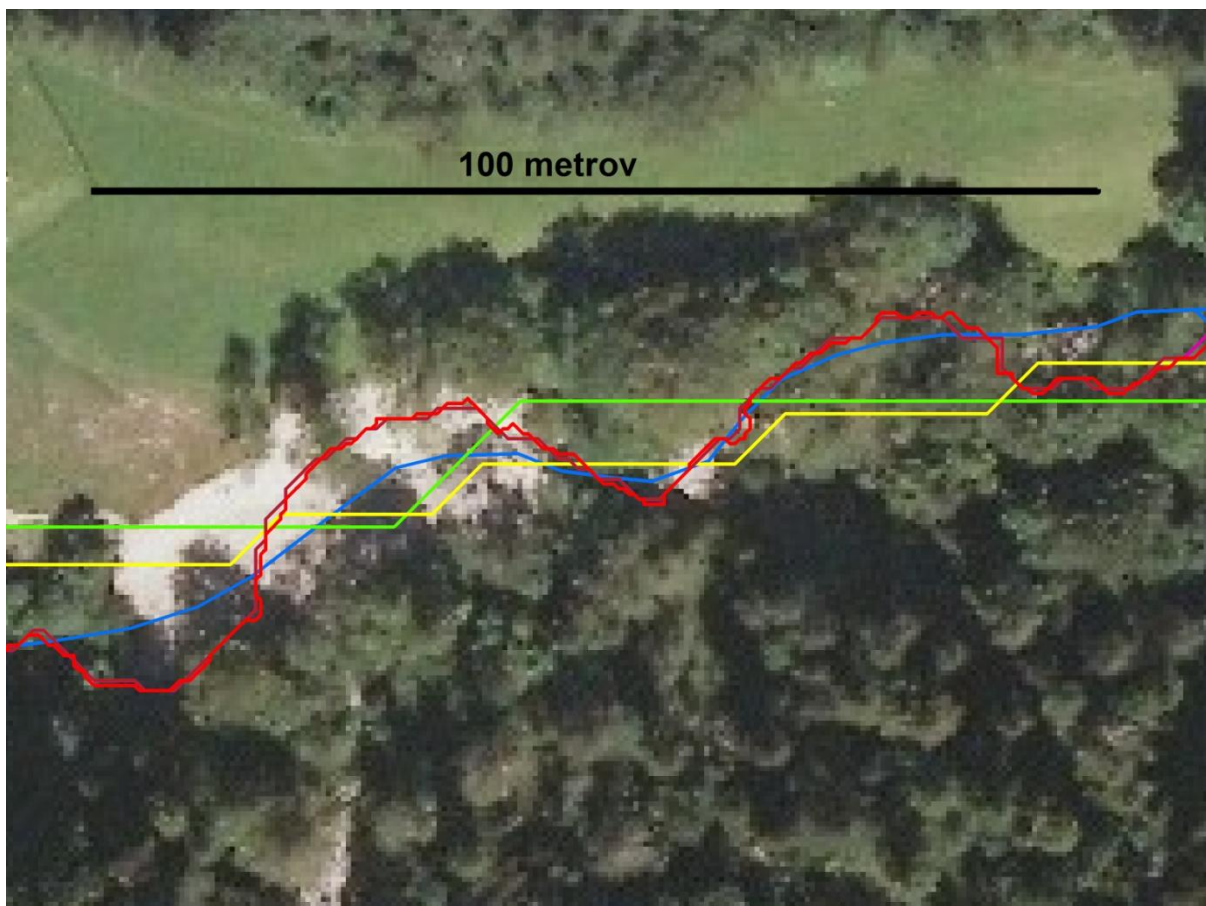
V tem poglavju je predstavljena prvo primerjava uporabnosti DMV s prostorsko ločljivostjo 12,5 m, 5 m ter lidarskih DMV s prostorsko ločljivostjo 1 m in 0,5 m za določanje osi hudournikov. Nadalje izvedena primerjava vzdolžnih padcev določenih iz vseh štirih DMV. Prestavljena je tudi uporaba lidarskih DMV za določanje oblik dna, nihanje padcev na teh odsekih, poiskati se je poskušala tudi frekvenca nihanja padcev. Iz vzdolžnih profilov se da predvideti tudi erozijsko aktivnost – odseke, kje bo prisotno poglobljanje in kje nasipavanje; to je predstavljeno v naslednjem poglavju. Nato so hudourniki obravnavani samo do začetka vršaja, določene pa so karakteristike vzdolžnih profilov. Na koncu je predstavljeno spreminjanje moči vodnega toka na izbranih hudournikih.

### 4.1 Digitaliziran potek struge in izbor digitalnega modela višin

Avtomatiziran postopek v programu ArcGIS, ki poišče točke akumuliranja toka in iz njih možne hudourniške struge, nam da različno uporabne rezultate. Ker vektorske linije niso bile poenostavljene (glajene), so linije med posameznimi središči rastrskih celic povezane z ravno linijo in lomi. Uporabnost rezultatov je odvisna od natančnosti začetnih DMV, ki so izhodišče za izvajanje računskih operacij. Problem je v tem, da je težko določiti, na kaj naj se primerja natančnost. Podmenik (2008) je recimo kakovost DMV preverjal na podlagi lidarskih DMV, ki so bili preverjeni s kontrolnimi točkami. V tem magistrskem delu se je tlorisna natančnost ocenjevala vizualno s primerjavo vidne struge iz orto-foto posnetkov, določene linije hudournikov po DTK 5 ter terenskih ogledov.

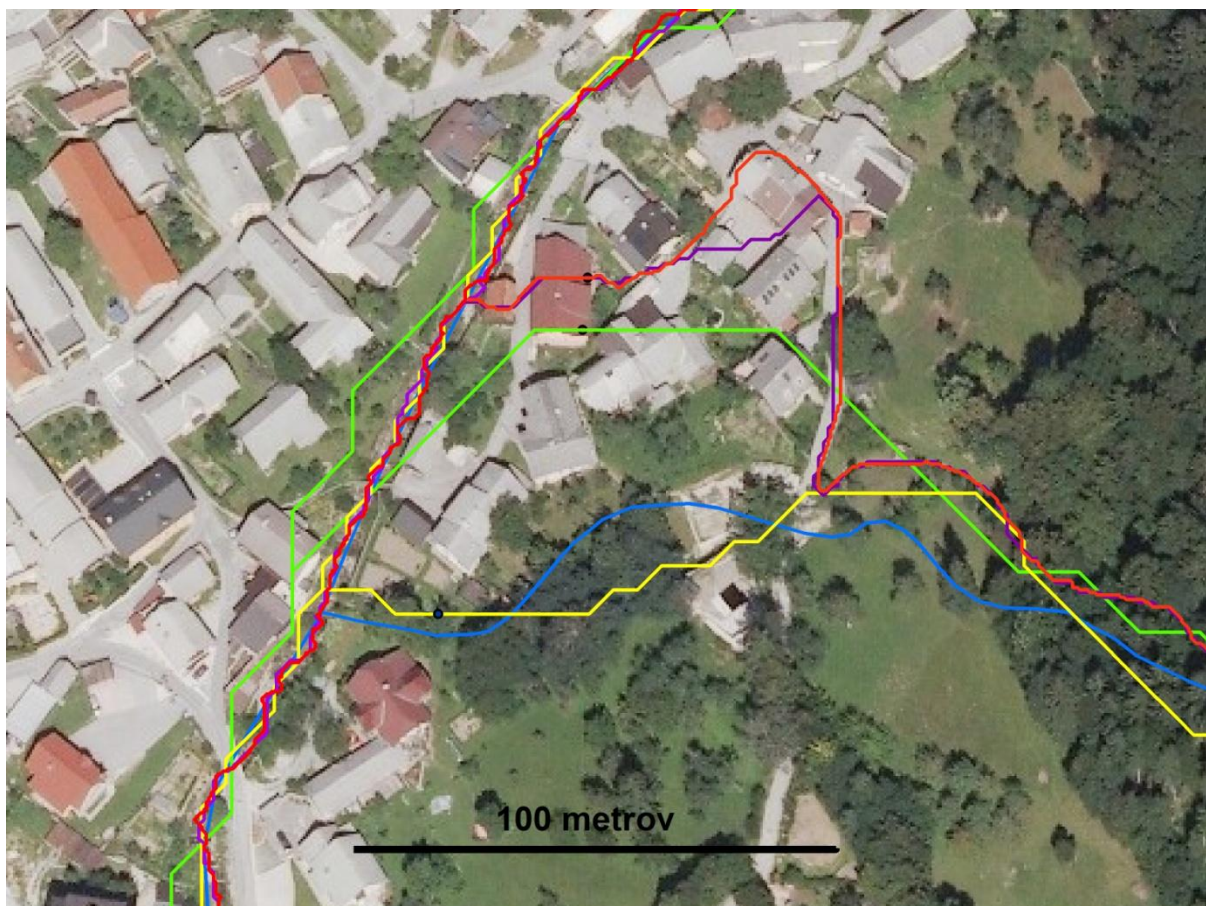
Območja brez ali z redko poselitvijo, ne glede na to, ali gre za pokritost z gozdom ali s travniki/pašniki, izkazujejo večjo stopnjo uporabnosti in zanesljivosti pridobljenih rezultatov (Slika 20). Poleg tega je pogoj za uporabnost analize, da je struga dovolj izrazita. V povirnih delih, kjer je struga izredno ozka ali pa plitva, je uporabnost take analize vprašljiva, zlasti pri DMV 12,5 in tudi DMV 5. Je pa res, da je v takih območjih običajno hudournik na dnu ozke doline in vseeno odstopanja niso tako velika. Nevarnost predstavlja dejstvo, da ni nekaterih zanesljivih podatkov o tem, kje se dejansko nahaja hudourniška struga. Najboljši približek je os hudournika iz DTK 5, ki pa žal ni izdelan za vsa območja, ki so obravnavana v tem delu. Poleg tega tudi podatki iz DTK 5 niso zanesljivi. Vseeno se na večini območij s pomočjo DTK 5 in orto-foto posnetkov da vizualno ugotoviti lokacijo in potek struge. Spodnja odseka (Slika 20, Slika 21) sta bila tudi terensko pregledana. Na Sliki 20 vidimo, da tako rezultati pridobljeni z DMV 5 kot DMV 12,5 in lidarskega DMV dobro sledijo strugi, odstopajo največ za eno velikost oddaljenosti med višinskimi točkami (12,5 m oziroma 5 m, 1 m ali 0,5 m). Na obravnavanem odseku (Slika 20), kjer je struga že nekoliko širša, so dejansko vse linije vedno znotraj struge, tudi tiste iz DMV 12,5 in DMV 5. Zlasti rezultati analize z lidarskimi podatki pa izkazujejo veliko stopnjo uporabnosti. Večje razlike v uporabnosti pri prostorski ločljivosti 0,5 m in 1 m ni zaznati na tem nivoju. Ker je bilo lidarsko snemanje izvedeno v času, ko je hudournik Bela presahnil, je linija dobljena iz lidarskih DMV, dejansko kar globočnica.





**Slika 20: Primer dobrega ujemanja rezultatov z dejanskim stanjem (struga pridobljena iz DMV 12,5 je zelena linija, iz DMV 5 je rumena linija, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 1 m je vijoličen, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 0,5 m je rdeč, linija hudournika po DTK 5 pa je modra linija) (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič)**

Uporabnost metod znatno pade na urbaniziranih območjih (Slika 21). Težave povzročajo zlasti premostitve. V primeru na Sliki 21 na sotočju Bele in levega pritoka Mlake DMV 5 še najbolje sledi dejanski liniji hudournika. V splošnem to ni pravilo za vsa podobna območja. Pri DMV 12,5, DMV 1 in DMV 0,5 hudournik pri premostitvi oziroma prepustu spremeni smer, pri DMV 12,5 nadaljuje pot preko dvorišč stanovanjskih hiš, pri DMV 1 pa po cesti. Pri DMV 12,5 je taka napaka pričakovana, saj gre v tem primeru za strugo, širine mogoče 1 m in je verjetnost, da bi se zaznala tako ozka struga, zelo majhna. Nasprotno pa je pri DMV 1 in DMV 0,5 napaka manj pričakovana. Iz orto-foto posnetkov je v tem primeru povsem jasno, da je razlog za spremenitev smeri toka prepust/most, ki je bil med filtriranjem oblaka točk očitno spregledan.

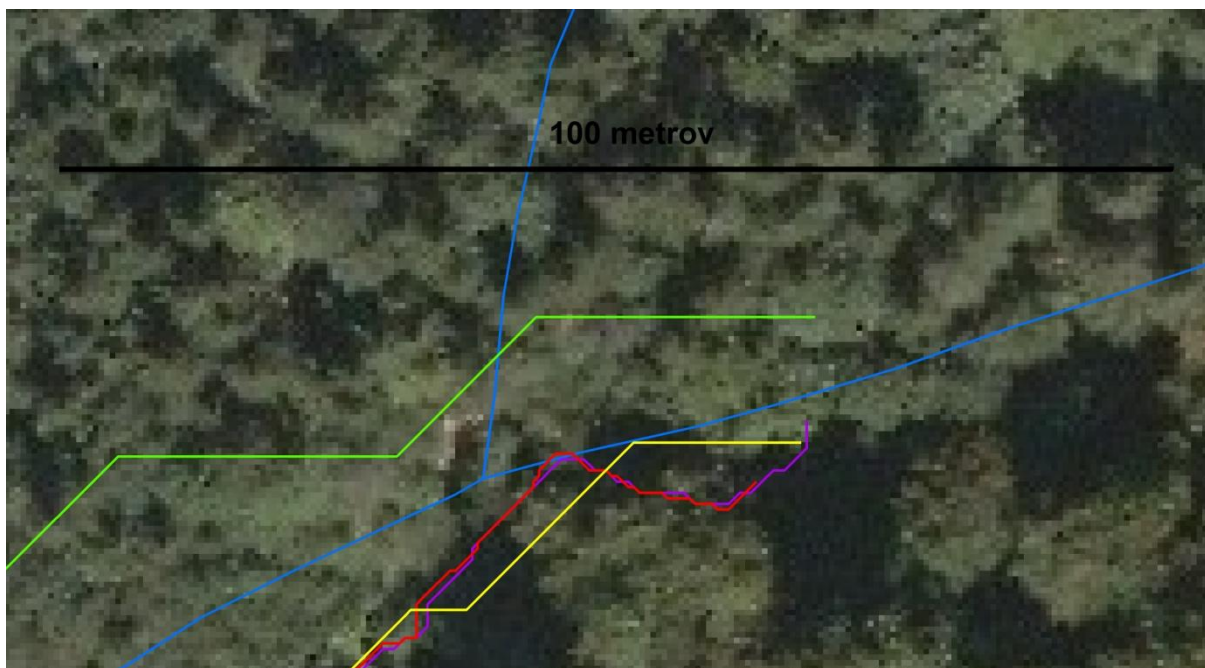


**Slika 21: Primer slabega ujemanja rezultatov z dejanskim stanjem (struga pridobljena iz DMV 12,5 je zelena linija, iz DMV 5 je rumena linija, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 1 m je vijoličen, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 0,5 m je rdeč, linija hudournika po DTK 5 pa je modra linija) (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič)**

Uporaba avtomatiziranega načina določanja osi vodotokov je lažja od ročnega zajema. Vseeno pa bi bili za zanesljivo uporabo potrebni ročni popravki ali pa bi mogoče morali poiskati boljši in zahtevnejši računski postopek od uporabljenega. Kot neuporaben se je postopek izkazal na dnu vršajev Bele, Javornika, Ukove in Jesenice, deloma pa tudi Završnice (Slika 19). Bela, Javornik, Ukova in Jesenica imajo namreč strugo na tem območju speljano v pokriti strugi, zato analiza ni mogoča. Pri Završnici DMV 12,5 in DMV 5 nista točna, saj so točke na območju regionalne ceste kar na mostu, ki je nekaj 10 metrov nad dejansko strugo. Ti krajši odseki tako niso bili obravnavani.

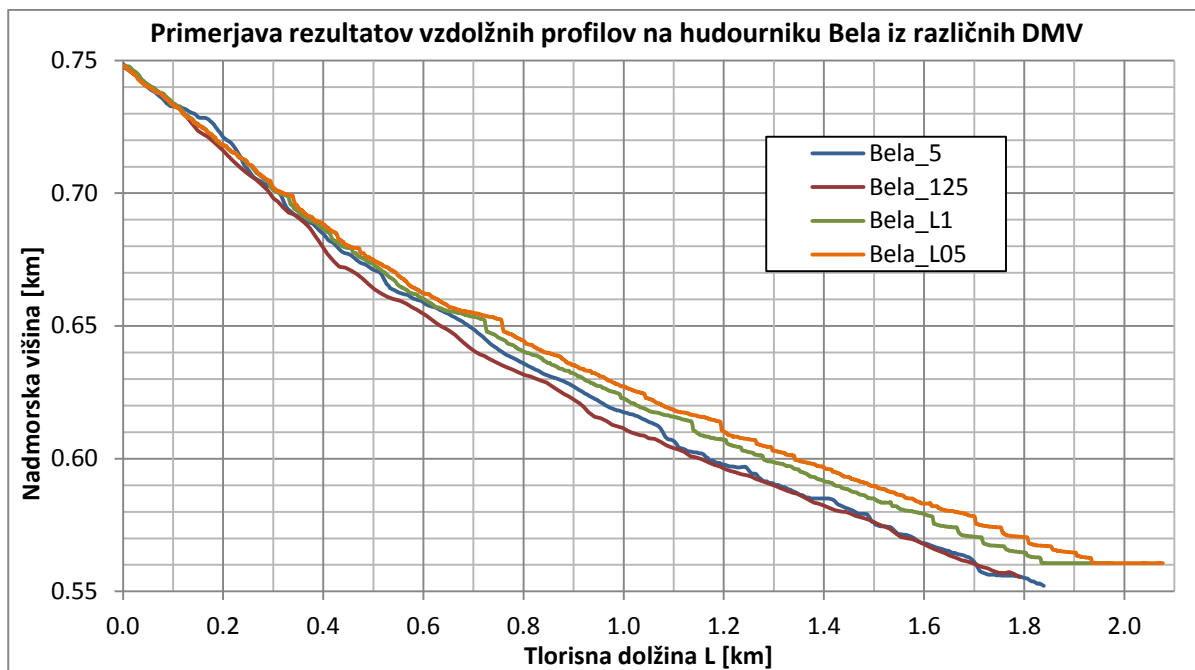
#### **4.2 Analiza vzdolžnih profilov hudourniških strug z uporabo različnih digitalnih modelov višin**

Analiza se je izvedla tako, da se je pri vseh prostorskih ločljivostih uporabilo približno isto točko začetka in konca obravnave (Slika 22). Da bi bila izbrana popolnoma ista točka, ni smiselno, možno bi bilo sicer to s spreminjanjem rezultatov avtomatiziranega postopka. Na ta način zadnja točka ne bi predstavljala osi struge pri vseh prostorskih ločljivostih. Za primerjavo sta bila uporabljena 2 odseka, in sicer odsek Bele ter celoten hudournik Mlaka, kjer je pridobljen lidarski DMV s prostorsko ločljivostjo 1 m oziroma 0,5 m.



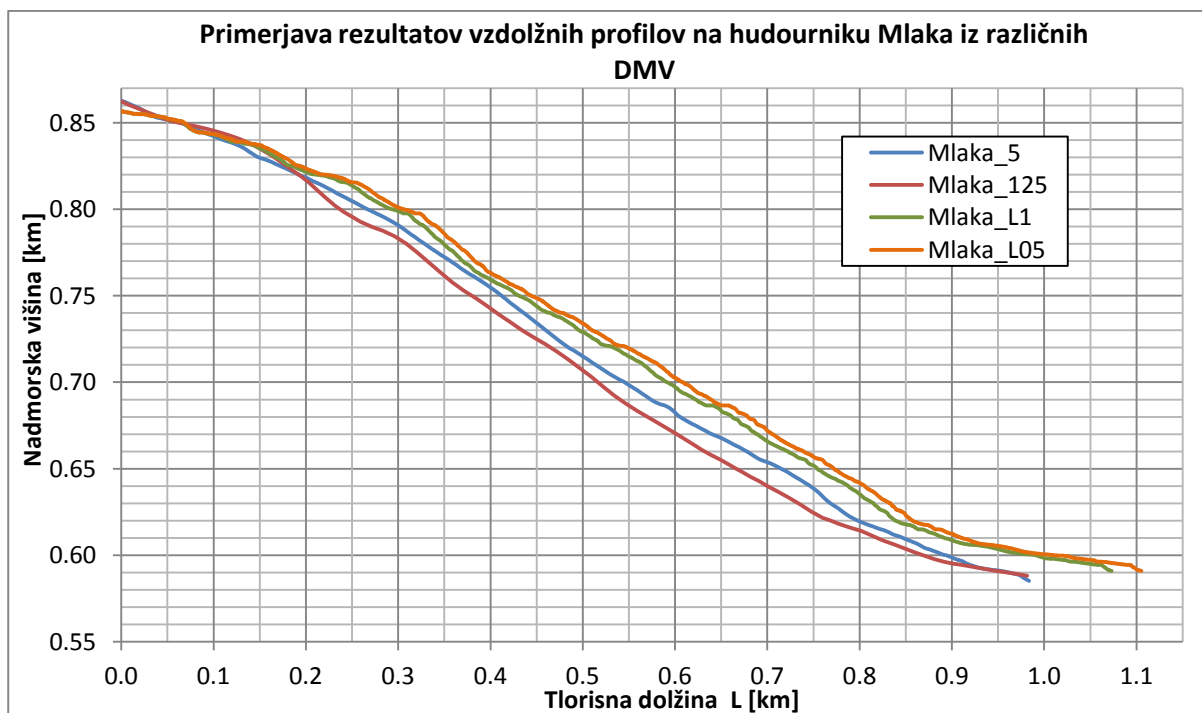
**Slika 22: Začetek linije na odseku Bele (struga pridobljena iz DMV 12,5 je zelena linija, iz DMV 5 je rumena linija, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 1 m je vijoličen, iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo 0,5 m je rdeč, linija hudournika po DTK 5 pa je modra linija) (Vir: ESRI, 2013; avtor: Nejc Mohorič)**

Grafikon 3 prikazuje vzdolžno padanje Bele na odseku, kjer so na voljo podatki lidarskega snemanja. To je od območja približno 300 m nad sotočjem s Čiklo do vstopa hudournika v pokrito strugo pod železarno. Vidimo, da profili enakomerno padajo. Dolžina struge po DMV 12,5 m je najkrajša, to pa zato, ker gre za najbolj izravnano linijo zaradi velikih razdalj med točkami mreže. Zaplavne in hudourniške pregrade niso vidne. Podobno velja za DMV 5, kjer je dolžina struge že daljša, da se pa že slutiti spremembe v morfologiji struge (hudourniške in zaplavne pregrade). Lete so že zelo dobro razločne pri rezultatih iz lidarskih DMV. Na dolžini 0,7 km in 1,2 km sta vidni zaplavni pregradi, od 1,6 km do 1,8 km oziroma 1,9 km pa so vidne hudourniške pregrade. Med rezultatoma DMV 1 m in 0,5 m je spet vidno, da je stopnja generalizacije poteka hudourniške struge pri bolj podrobni podatkih manjša. Posledično je zato dolžina struge daljša.



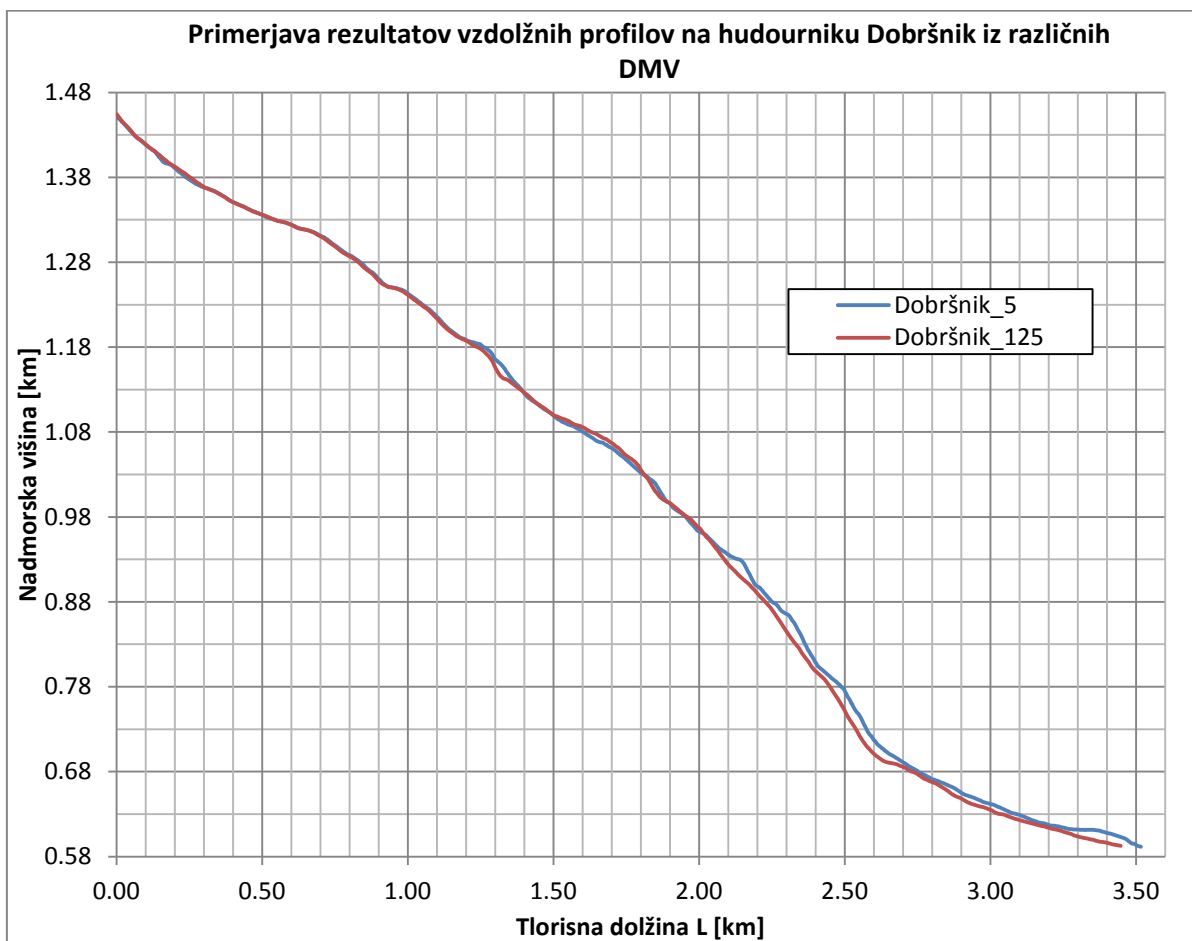
**Grafikon 3: Primerjava vzdolžnih padcev hudourniške struge Bele pri različnih prostorskih ločljivostih (12,5 m; 5 m; 1 m; 0,5 m)**

V Grafikonu 4, ki prikazuje hudournik Mlaka, je prisoten podoben vzorec kot pri Beli. Manjša je prostorska ločljivost, manjša je izračunana dolžina hudourniške struge. Na Mlaki je na nadmorski višini 0,62 km (oziroma 620 m n. m.) tudi dobro viden lom pri prehodu struge na vršaj, medtem ko je le-ta pri Beli (Grafikon 3) iz vzdolžnega profila težko določljiv.



**Grafikon 4: Primerjava vzdolžnih padcev hudourniške struge Mlake pri različnih prostorskih ločljivostih (12,5 m; 5 m; 1 m; 0,5 m)**

Grafikon 5 predstavlja vzdolžni profil Dobršnika. Spet je profil pridobljen iz DMV 5 daljši od tistega iz DMV 12,5. Na območju približno od 2 km do 2,5 km so prisotni slapovi. Profil iz DMV 5 daje precej bolj stopničasto obliko.

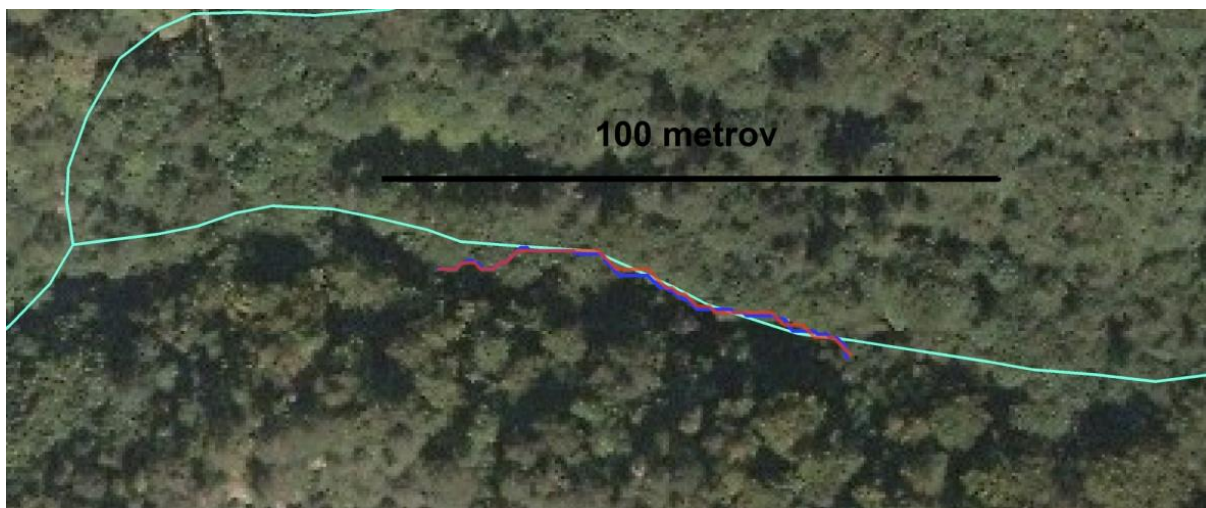


**Grafikon 5: Primerjava vzdolžnih padcev hudourniške struge Dobršnik pri različnih prostorskih ločljivostih (12,5 m; 5 m)**

Enaki vzorci vzdolžnih padcev so bili prisotni tudi pri ostalih hudournikih, kjer je potrebno omeniti, da so bili podatki lidarskega snemanja na razpolago samo za spodnji del hudourniškega območja Bele. Drugje so bili primerjani samo profili, pridobljeni iz DMV 5 in DMV 12,5.

#### **4.3 Uporaba lidarskih digitalnih modelov višin za določevanje geomorfoloških oblik in lokalnih padcev hudourniških strug**

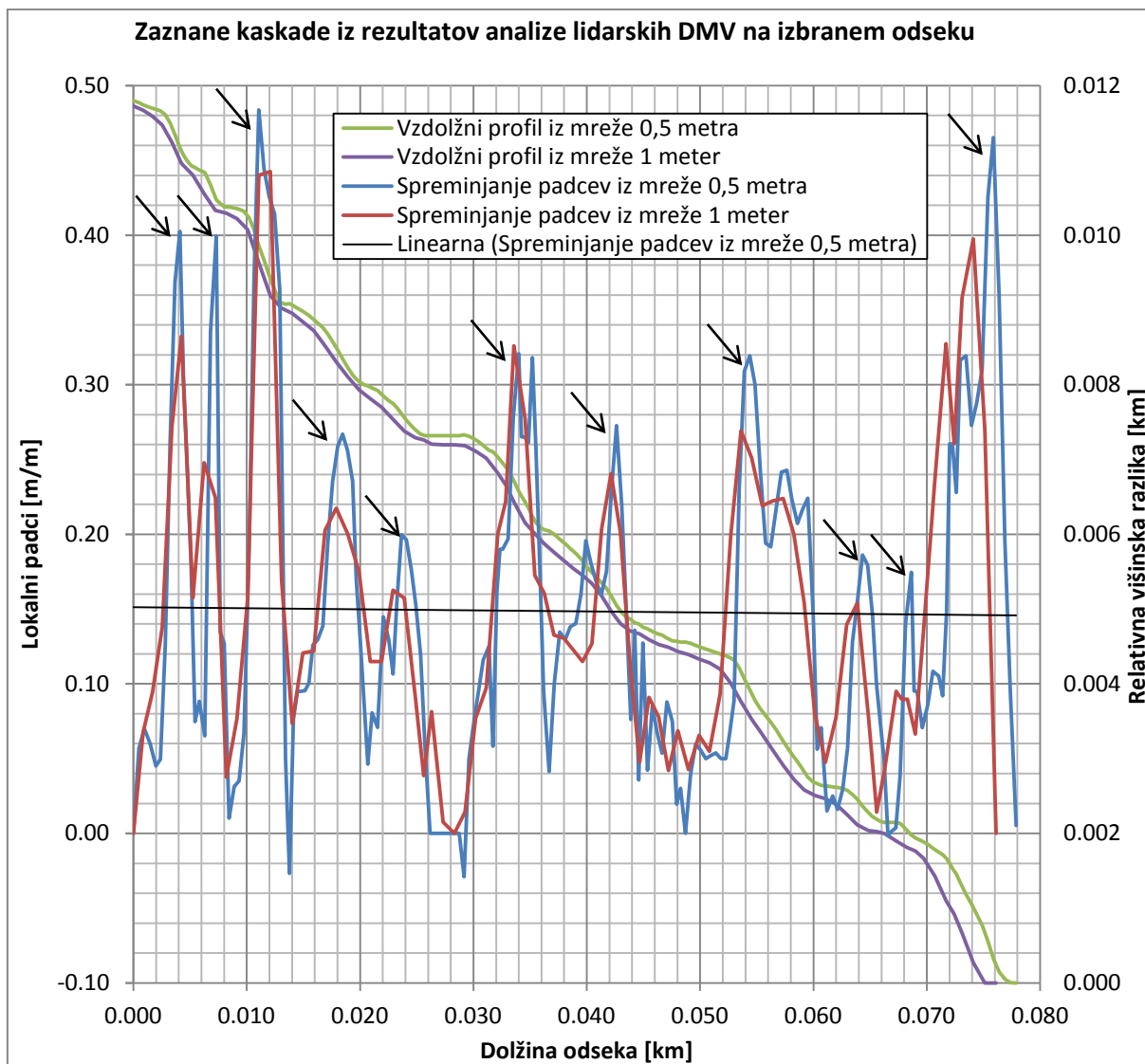
Tekom analize se je pokazalo, da bi se lahko rezultati pridobljeni iz lidarskih DMV uporabili tudi za analizo morfoloških oblik dna hudourniške struge. Ideja je bila naprej preučena na naključnem odseku Bele dolžine malo manj kot 80 m, kjer bi se lahko pojavljale kaskade (Slika 23). Preučen je bil tako DMV z rastrom 1 m kot 0,5 m.



**Slika 23:** Naključno izbran odsek hudourniške struge Bele nad sotočjem s Čiklo (modra barva je struga pridobljena iz rastra 0,5 m, rdeča 1,0 m, svetlo modre pa so struge po DTK5) (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič)

Na Grafikonu 6 se namreč dobro razloči, zlasti iz izračuna s pomočjo DMV 0,5 m, spreminjanje v strmini vzdolžnega profila in periodičnega pojavljanja večjih padcev. Na izbranem odseku je tako prisotnih 11 sekvenc dobro razvidnih stopenj in položnejših delov (tolmunov), ki so sicer različnih dolžin. Povprečni padec na opazovanem odseku znaša 15,4 %. Glede na visok povprečni padec, ki presega vrednosti za stopnje-tolmune lahko sklepamo, da gre za kaskade. Izračunani so bili tudi lokalni padci na tem odseku. Glede na to, da je bilo snemanje izvedeno pri suhi strugi, so negativne vrednosti pričakovane v strugah tipa stopnja-tolmun ali kaskadah. Tu se tudi vidi, da DMV s prostorsko ločljivostjo 1 m nima negativnih vrednosti, kar nakazuje na to, da je mogoče za analizo oblik dna vseeno še preveč grob. Pričakovati bi bilo več negativnih vrednosti padca, tudi pri polmetrskem DMV. Lahko, da jih ni zato, ker so tolmini vseeno zapolnjeni z vodo, čeprav je hudournik presahnil. Posledično snemanje ni pravilno oziroma je popravljeno s programskim orodjem. Verjetnost za kaj takega pa je zaradi velikih plavin manjša, saj voda tudi iz tolmunov lahko odteče skozi prepustne plavine. Druga možnost bi bila, da bi bile točke v tolmunu odstranjene pri čiščenju točk, ki niso na terenu.

Dodana je bila tudi linearna trendna črta. Vidi se, da kljub oscilacijam padcev ti v povprečju nekoliko padajo (Grafikon 6). Pričakovano je trend v višini povprečnega padca odseka.

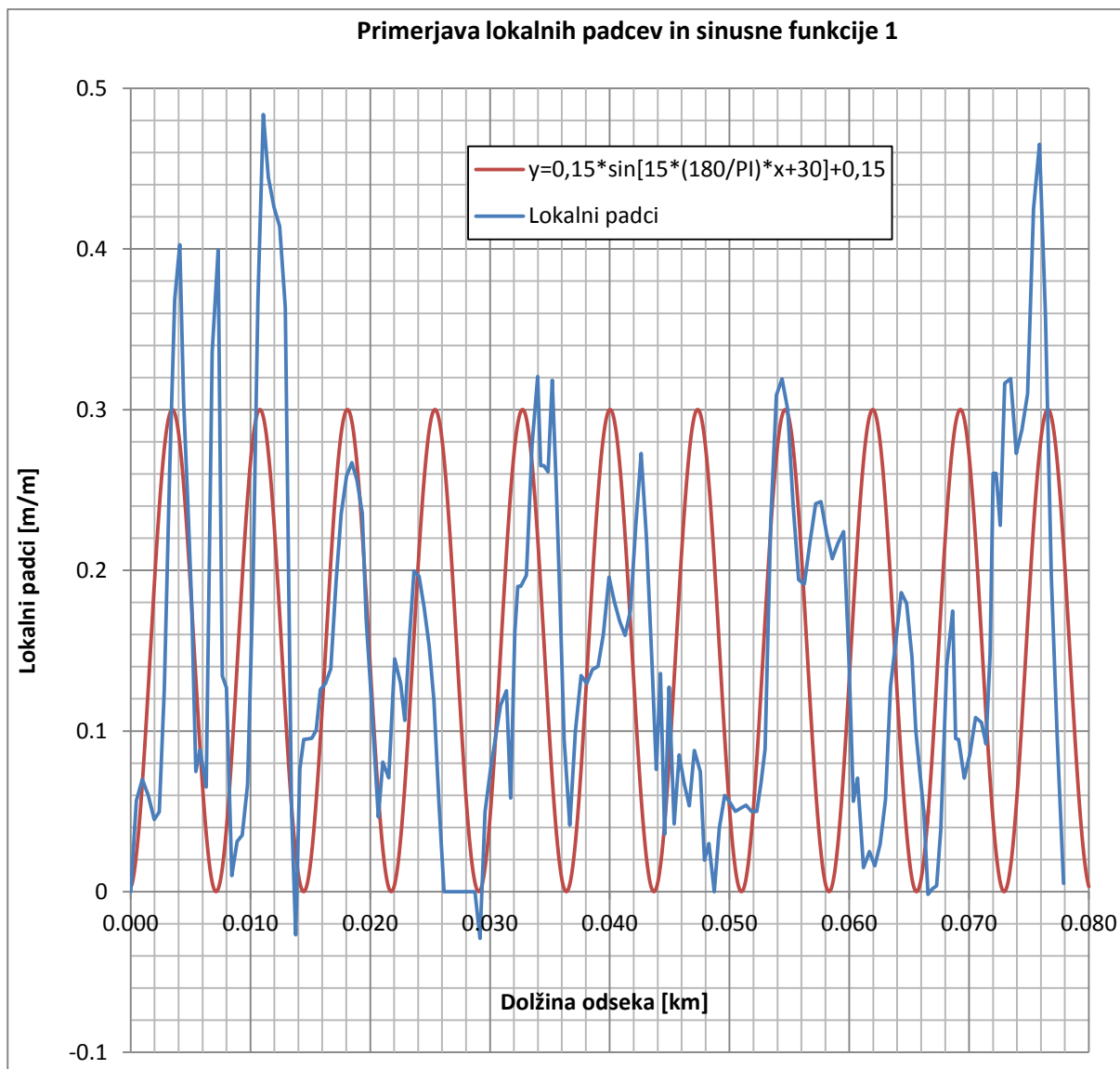


**Grafikon 6: Vzdolžni profil in spreminjanje lokalnih vzdolžnih padcev na odseku hudourniške struge Bele (s črnimi puščicami so nakazane kaskade)**

Preiskana je bila tudi možnost iz lidarskega DMV s prostorsko ločljivostjo pol metra, da je pojavljanje večjih padcev, ki so posledica stopenj, periodično. Grafikon 7 prikazuje sinusno funkcijo 1 (37), ki se je izkazala kot možna perioda stopenj in tolmunov.

$$y = 0,15 * \sin\left(15 * \left(\frac{180}{\pi}\right)x + 30\right) + 0,15 \quad (37)$$

V zgornji enačbi je y vrednost funkcije na izbrani dolžini odseka x. Na ta način je bilo pridobljenih 11 viškov padcev, kot je bilo zgoraj ocenjeno. Vsi viški se ujemajo večinoma s tistimi v naravi, večji izjemi sta le 7. in 9. višek. Višina padcev ne sledi tako dobro izbrani funkciji, le 3., 5. in 8. višek se skoraj ujamejo.



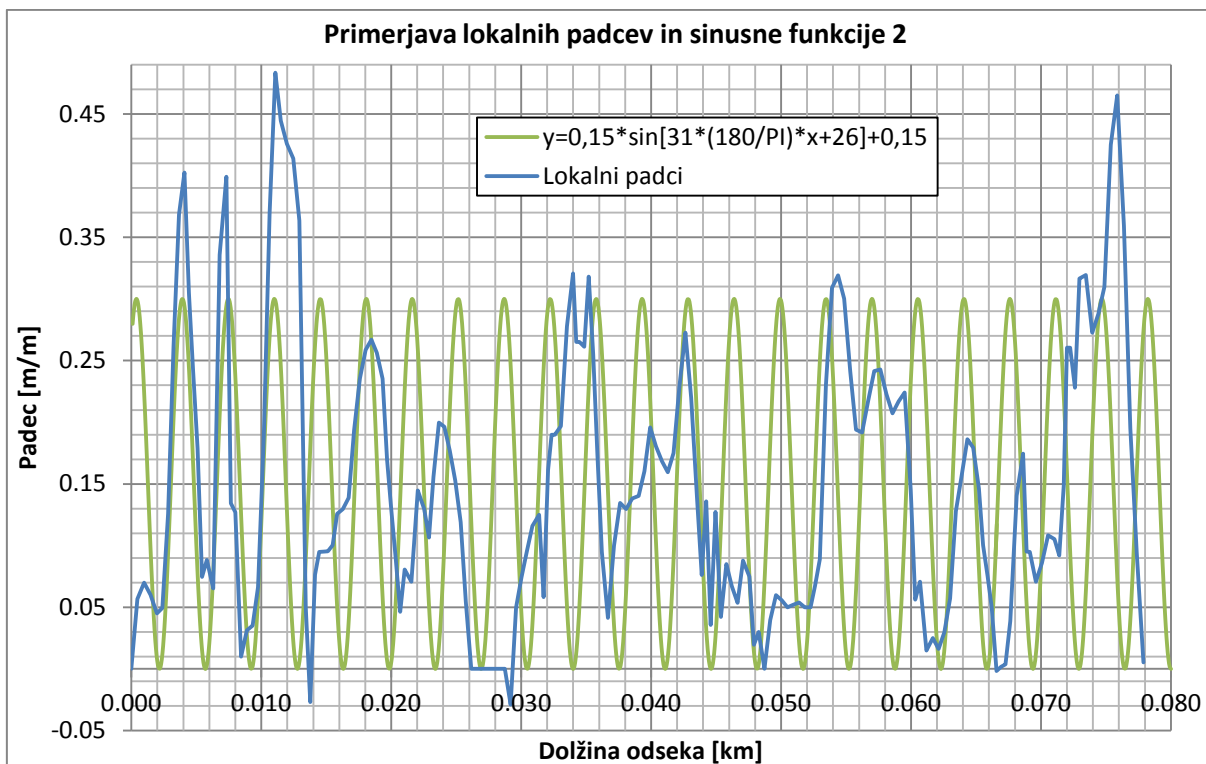
**Grafikon 7: Primerjava lokalnih padcev na odseku hudourniške struge Bele in sinusne funkcije 1**

Ker so oscilacije padcev pogostejše, kot so vrednosti zgornje funkcije, je bila razvita še ena podobna sinusna funkcija 2 (38) s pol manjšo periodo.

$$y = 0,15 * \sin\left(31 * \left(\frac{180}{\pi}\right) x + 26\right) + 0,15 \quad (38)$$

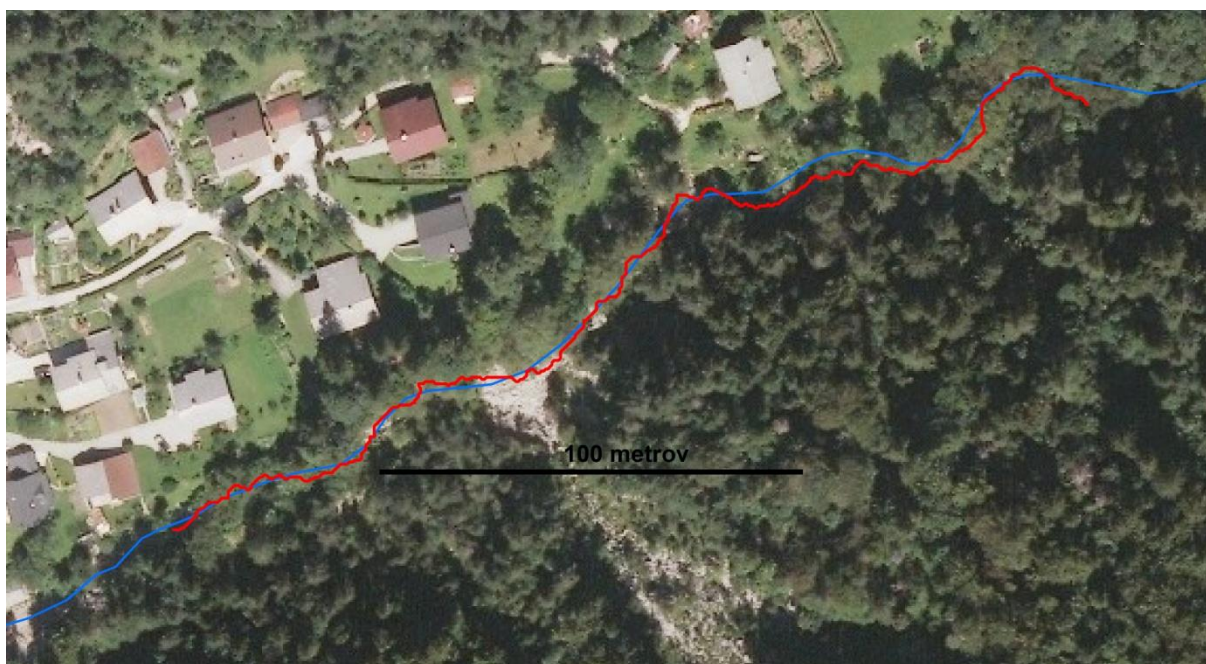
Primerjava te funkcije 2 (38) in lokalnih padcev (Grafikon 8) izkažejo še boljše ujemanje. Prve štiri periode se popolnoma ujamejo, kjer so vrednosti vrhov sicer nekoliko drugačne. Za 19 period od 22 period (zadnja ni upoštevana) se vidi, da vrednosti lokalnih padcev približno sledijo izbrani funkciji. Velikosti padcev se ne ujemajo s sinusno funkcijo tako dobro, kar je posledica lokalnih značilnosti. Razlog za odstopanja gre iskati zlasti v tem, da so stopnje lahko tvorjene kot posledica tega, da se nek kamen na primer zaklini slučajno na nekem mestu, nato pa se okrog njega tvori stopnja, ali da se stopnja tvori okrog nekega balvana ali zapadlega lesa, zato je popolno sledenje neki matematični funkciji v naravi nemogoče.





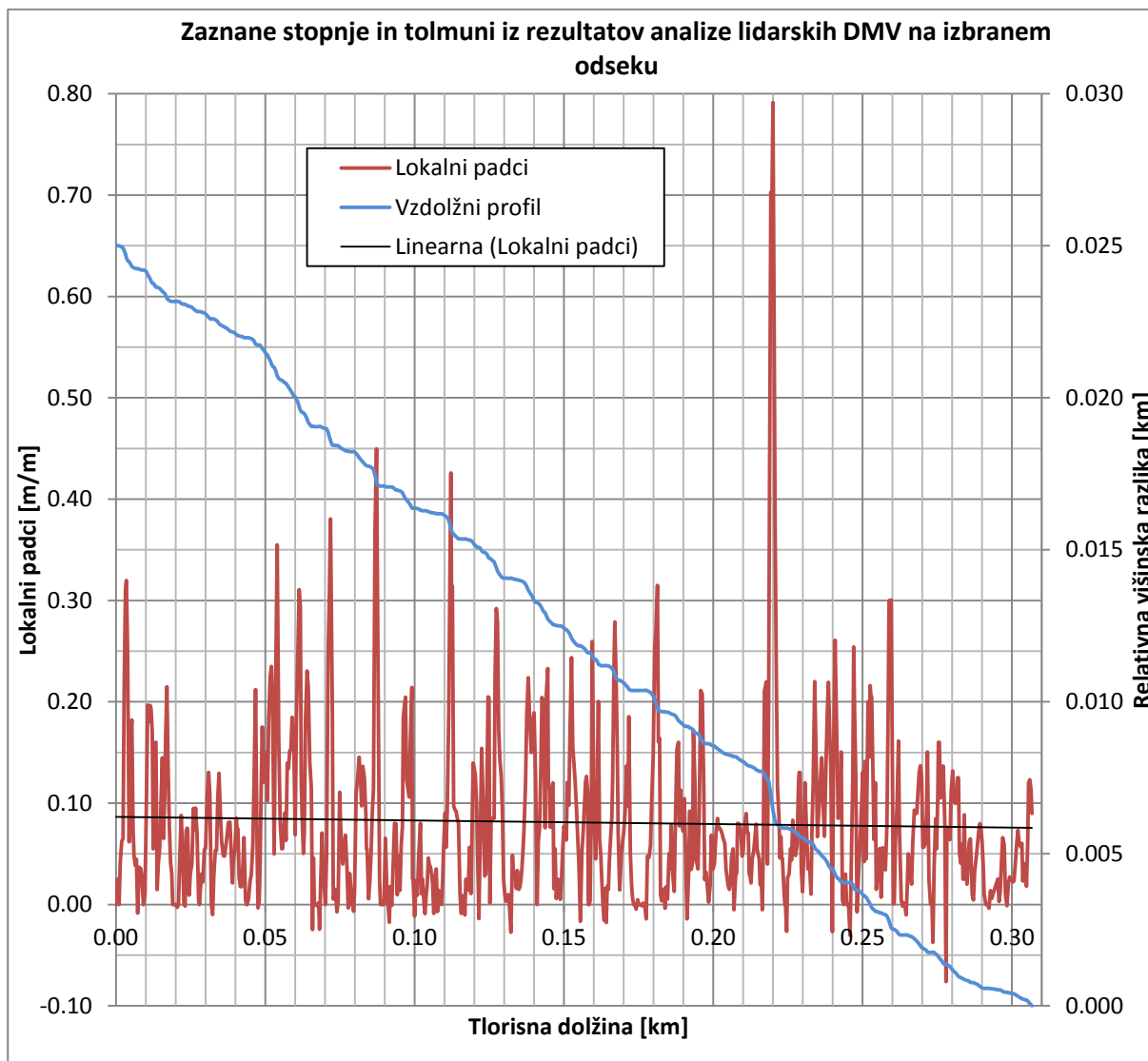
**Grafikon 8: Primerjava lokalnih padcev na odseku hudourniške struge Bele in sinusne funkcije 2**

Ker se je izkazalo, da so podatki pridobljeni pri prostorski ločljivosti 0,5 m najboljše, je bil obravnavan še tristometrski odsek na hudourniku Bela (Slika 24), dolvodno na vrhu vasi gorvodno od prodnega zadrževalnika (kjer nima več večjega vpliva). Vse slike terenskega ogleda hudournika Bela so posnete na tem odseku.



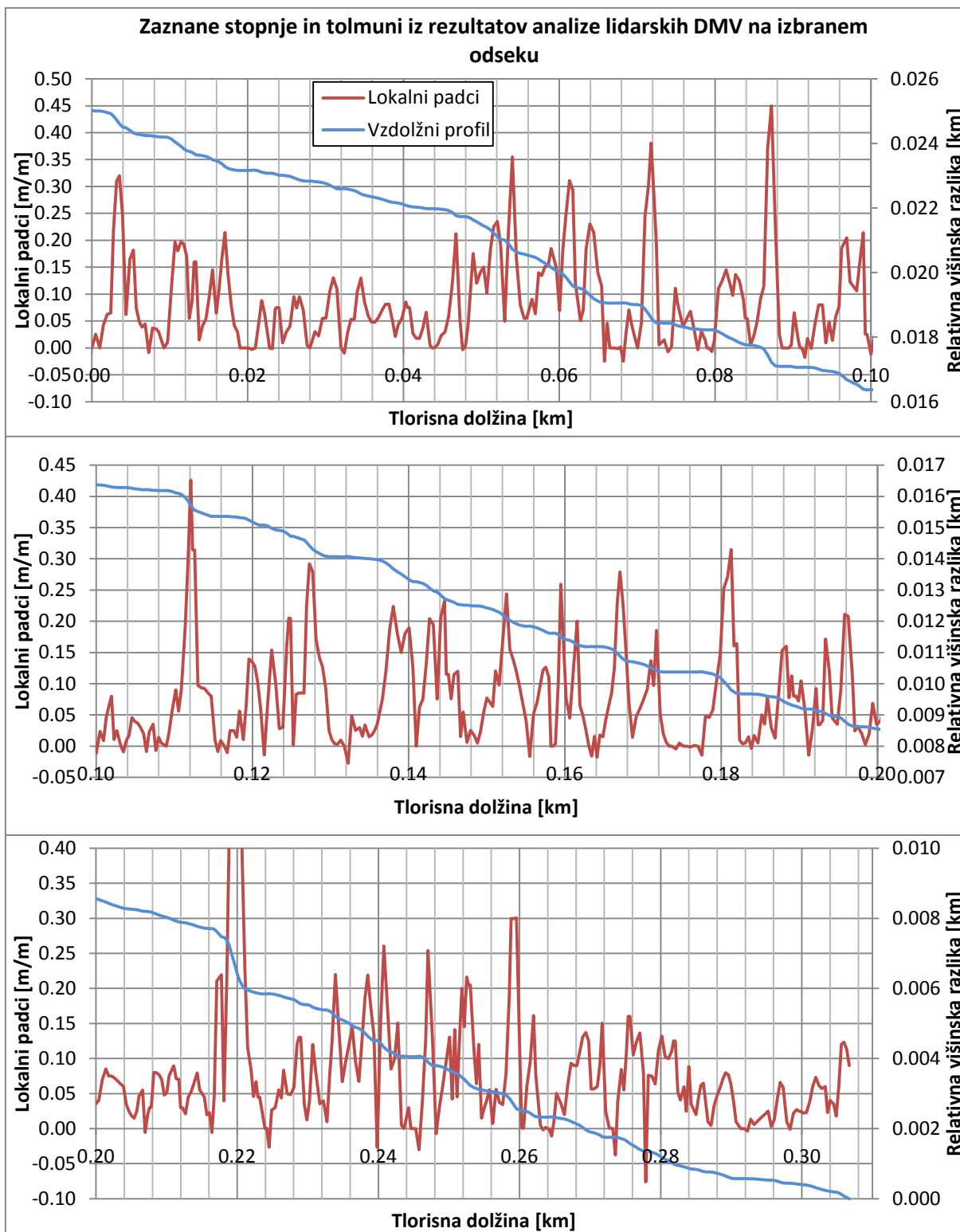
**Slika 24: Drugi obravnavani odsek hudournika Bela (podatki iz rastra 0,5 m so označeni z rdečo, modra je pozicija struge po DTK 5) (Vir: ESRI, 2013, Sinergise, 2011; avtor: Nejc Mohorič)**

Povprečni padec na odseku znaša 8,1 %, kar pomeni, da bi se na tem odseku lahko pojavljale tako oblike stopnja-tolmun kot kaskade. Iz terenskega ogleda je bilo določeno, da se na odseku nahajajo stopnje-tolmuni (Slika 10). Grafikon 9 prikazuje vzdolžni profil odseka in spreminjanje lokalnih padcev.



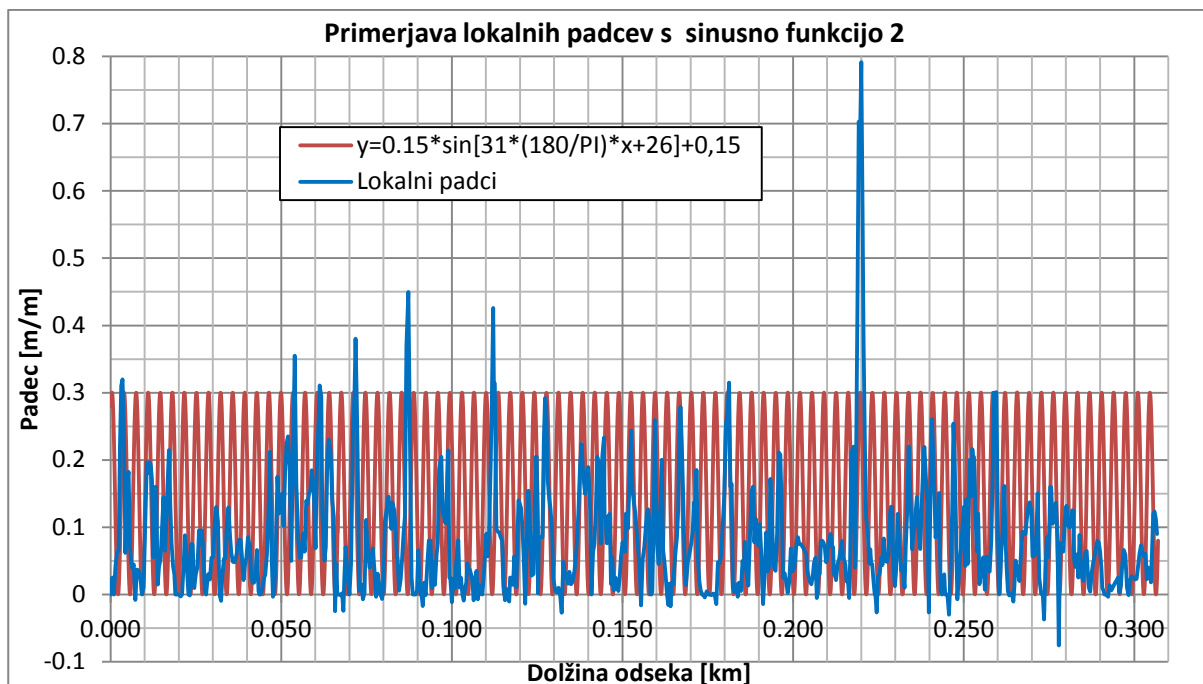
**Grafikon 9: Stopnje-tolmuni zaznani v vzdolžnem profilu in spreminjanje vzdolžnih padcev na drugem obravnavanem odseku hudourniške struge Bele (odsek Bele nad Koroško Belo)**

Spreminjanje vzdolžnega profila in lokalnih padcev je dodatno prikazano na Grafikonu 10. Zelo dobro je viden stopničast vzdolžni profil in spreminjanje padcev. Na območjih tolmunov se pričakovano pojavljajo negativni padci. Čeprav je povprečni padec odseka dvakrat manjši kot na prvem obravnavanem odseku, se vseeno pojavijo celo večji lokalni padci. Na dolžini 0,22 km je prisotna zelo velika oscilacija padcev, kar je posledica manjšega slapa. To spet nakazuje, da imajo lokalne posebnosti lahko velik vpliv. Če uporabimo linearno trendno funkcijo (Grafikon 9), ima ta prav tako manjši padec dolvodno, kar pomeni, da se povprečni padci vseeno zmanjšujejo. Trendna črta je seveda tudi v tem primeru v območju okrog povprečnega padca celotnega odseka. Odsek ima pogoste negativne vrednosti, ki nakazujejo na tipične negativne lokalne padce v tolmunih.



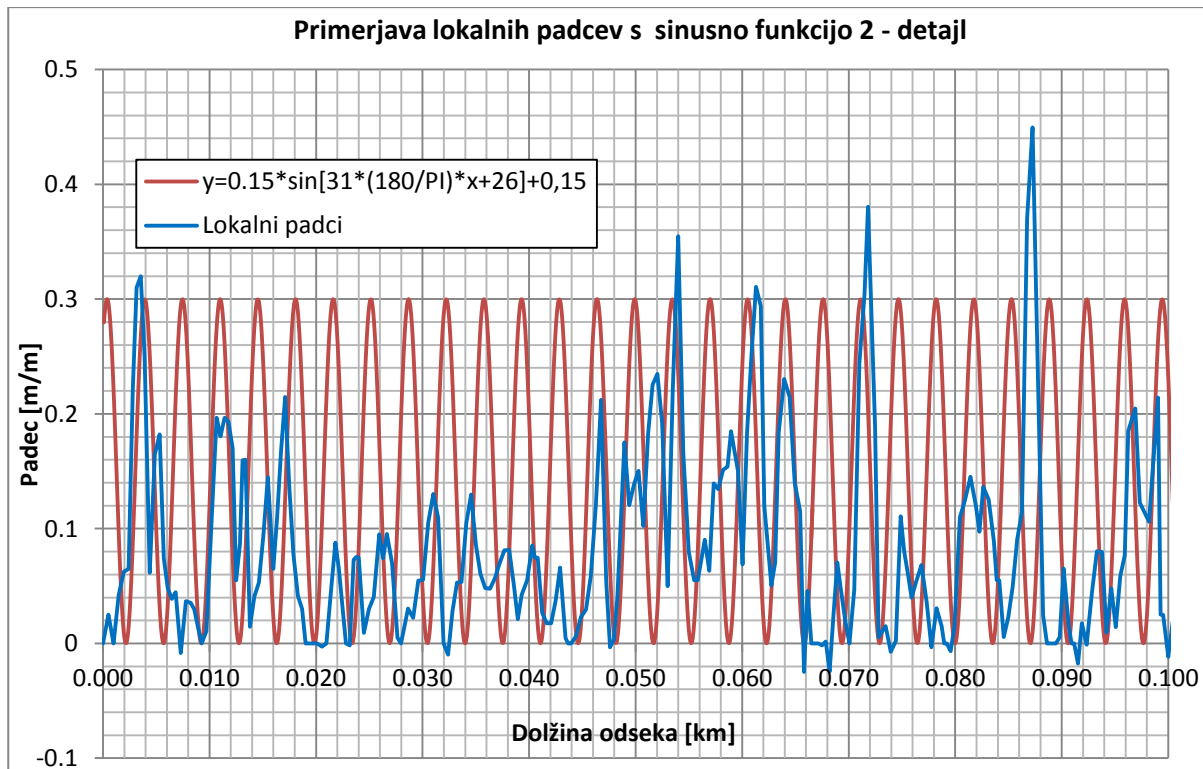
**Grafikon 10: Grafikon 9 razdeljen na tri zaporedne odseke (odsek Bele nad Koroško Belo)**

Prav tako se je uporabila sinusna funkcija 1, ki je sicer dokaj dobro sledila nihanjem, vendar pa ni nadalje predstavljena, saj se je izkazalo, da so periode prevelike. Dodana je bila tako raje funkcija 2 (Grafikon 11) – kot v prvem primeru. Izkazalo se je, da bi lahko prav tako deloma ustrezala. Višji lokalni padci se večinoma ujamejo z vrhovi vrednosti funkcije 2.



**Grafikon 11: Primerjava lokalnih padcev in sinusne funkcije 2 (drugi obravnavani odsek hudourniške struge Bele)**

Za večjo preglednost je na Grafikonu 12 prikazanih zgolj prvih 100 m odseka. Od 29 vrhov sinusne funkcije jih 20 približno ujame nihanje padcev.

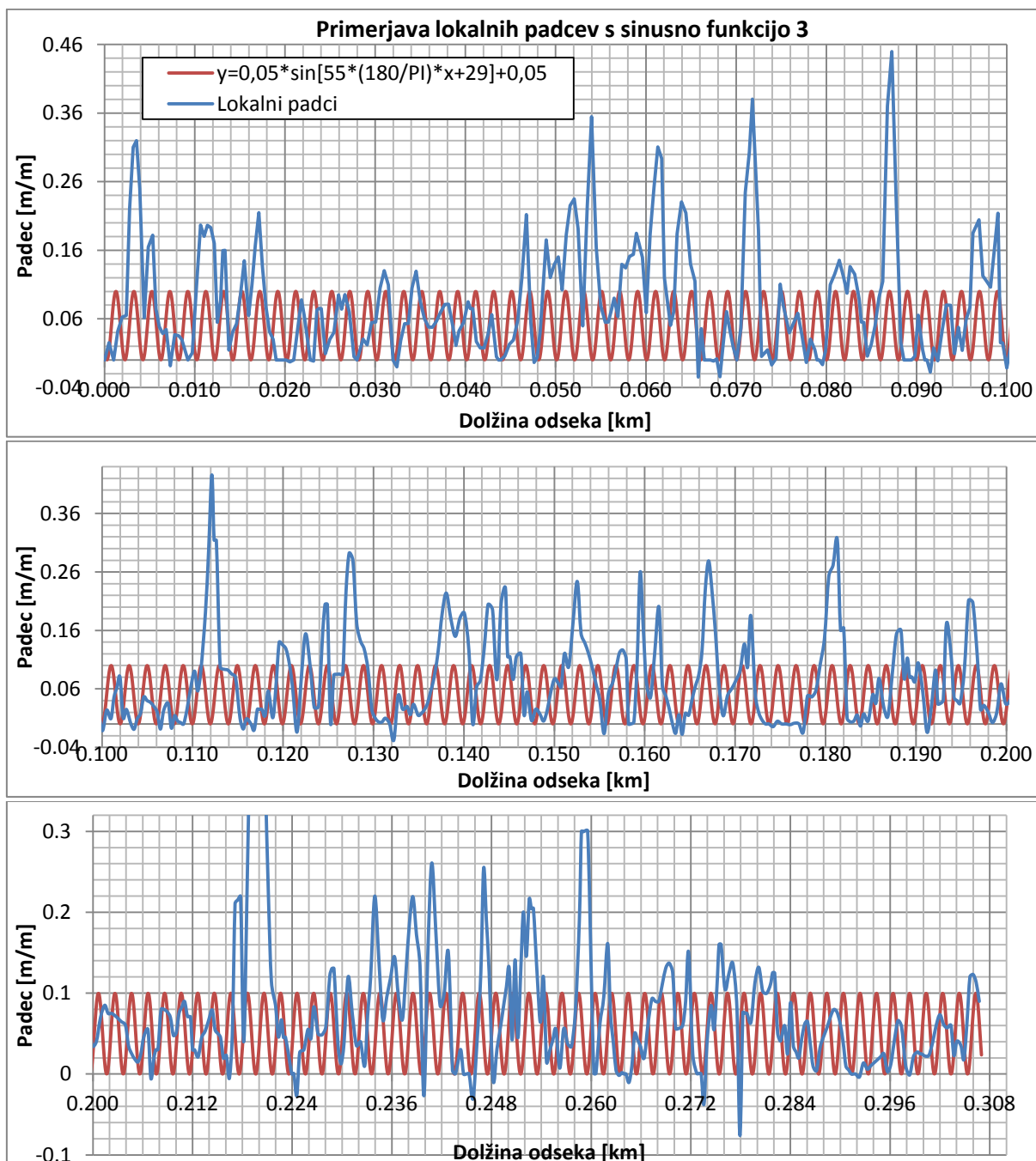


**Grafikon 12: Primerjava lokalnih padcev in sinusne funkcije 2 za prvih 100 m opazovanega odseka (drugi obravnavani odsek hudourniške struge Bele)**

Ker so lokalni padci povprečno manjši, je bila dodatno razvita še funkcija 3 (39).

$$y = 0,05 * \sin\left(55 * \left(\frac{180}{\pi}\right) * x + 29\right) + 0,05 \quad (39)$$

Ta še nekoliko bolj ustreza temu drugemu primeru, amplitude in periode pa so manjše. To funkcijo prikazuje Grafikon 13.



Grafikon 13: Primerjava lokalnih padcev in sinusne krivulje 3 (drugi obravnavani odsek hudourniške struge Bele)

Iz zgoraj navedenih rezultatov analize se lahko sklepa, da je za analizo najbolj primerno uporabiti lidarske DMV, saj se z njimi lahko zazna tudi morfologijo struge. Vseeno se je potrebno zavedati, da je čas izračuna rezultatov iz lidarskih DMV občutno daljši, poleg tega pa je ročno spajanje delov struge zelo zamudno. Programska orodja omogočajo pisanje programov, ki se lahko uporabijo v ArcMap. Tako bi postopek spajanja linij lahko močno poenostavili, vendar za to magistrsko delo, ko je bil obseg teh operacij manjši, to ni bilo potrebno. Kot najboljši se je izkazal lidarski DMV z rastrom 0,5 m. Z njim je mogoče predvideti tudi geomorfološke oblike, kot so stopnje-tolmuni ali kaskade. Spreminjanje lokalnih padcev je bilo preiskano tudi na vseh ostalih hudournikih iz DMV 5, vprašljiva pa je uporabnost pri prostorski ločljivosti 5 m, zato to ni nadalje predstavljeno.

Samo iz lokalnih padcev in vzdolžnih profilov odsekov pridobljenih iz lidarskih DMV prostorske ločljivosti pol metra, pridobljenih z masovnim zajemom točk, ni videti, da bi bilo mogoče razlikovati med strugami stopnja-tolmun in kaskadami. Sekvence se pojavljajo periodično. Mogoče je, da bi se v idealnih pogojih padci spreminjali sinusoidno, v naravi pa je zaradi lokalnih posebnosti, kot so stopnje iz zaplavnega in zapadlega lesa, balvani, ki so preveliki za aluvialni transport in tako dalje, to onemogočeno. Občasno se pojavijo zelo veliki lokalni padci, ki presežejo pričakovane vrednosti 0,3 m/m oziroma 0,4 m/m, kar naj bi bila zgornja meja v hudournikih. To je posledica manjših slapov, lahko pa ponekod tudi zaplavnih pregrad, hudourniških pregrad, pregrad akumulacij in tako dalje.

#### 4.4 Vzdolžni profili hudourniških strug in erozijska aktivnost

Preučevanje vzdolžnih profilov ima dolgo zgodovino. Padeč se običajno dolvodno zmanjšuje in tako imajo vsaj večji vodotoki značilno konkavno obliko podobno obliki (40), kjer se ta seveda nekoliko razlikuje glede na geološko zgradbo območja (Hack 1957).

$$I = k * L^n \quad (40)$$

$I$  je padeč vodotoka v čevljih na miljo,  $L$  razdalja v miljah,  $n$  indeks konkavnosti profila,  $k$  pa konstanta. Enačba je bila razvita na vodotokih v peščenjakih, poleg tega pa je potrebno biti previden tudi pri enotah. Take konkavne oblike pa niso vedno značilne za hudourniške struge, ki so lahko tako konveksni, ravni ali pa imajo posamezna kolena. Razlog za to je lahko izrazito tektonsko delovanje, drugi procesi erozije, spremembe v sestavi matične kamnine, ali pa v tem, da velik delež hudournika teče po matični kamnini, medtem ko je v dolinskih vodotokih običajno v naplavinah. Vzrok je lahko tudi manjša erozijska sposobnost nekaterih hudournikov. Uravnoveženost vzdolžnega profila naj bi nastopila, ko bi v dvojno logaritmičnem grafu odvisnosti nadmorske višine od dolžine hudournika nastopila ravna linija (Goldrick in Bishop, 1995, cit. po Wohl, 2000b). To v naravi lahko traja tudi več milijonov let. Ena glavnih komponent za razlago vzdolžnih profilov strug je razumevanje procesov, pod katerimi se struga vreže (Wohl, 1998). Struge v matični kamnini so še posebej pomembne zato, ker lahko vrezovanje v matično kamnino omeji hitrost, s katero se erozijske spremembe prenašajo vzdolž struge (Tinkler in Wohl, 1998). Padeč naplavinških strug je določen s hidravličnim režimom, medtem ko je padeč v strugah v matični kamnini lahko neodvisna spremenljivka, kjer je preperevanje pred erozijo (Howard, 1980; Howard, 1998). Če lokalna ali končna osnovna raven ostane konstantna ali se zelo počasi pogloblja ali kjer je padeč matične kamnine manjši, kot je potreben za transport plavin, ki prihajajo iz gorvodnih delov, se razvijejo odseki v aluvialnih naplavinah (Howard, 1980).

Uporabnost vzdolžnih profilov je predstavljena predvsem pri projektiranju ureditve nekega območja. Poleg tega pa se da iz vzdolžnega profila hudournika tudi predvideti, v katerih delih bi lahko prišlo do poglobljanja struge, kje pa do dvigovanja. Seveda to velja za hudournike, ki nimajo večjih ureditvenih ukrepov. Poleg tega se lahko ravnovesno stanje doseže tudi drugače, na primer s hudourniškiimi pregradami in zadrževalniki plavin. Vzdolžni padec je tudi eden bistvenih elementov načrtovanja hidrotehničnih ureditev. V preteklem stoletju so se uporabljali grobi tehnični posegi v prostor, danes pa je taka oblika nezaželena, prevladuje sonaravno urejanje hudournikov. Še vedno pa velja, da je potrebno hudournike razdeliti na določene odseke s posameznimi nakloni, da je tako oblika struge čim bolj podobna blagi paraboli, ki naj bi predstavljala neko stabilno obliko (Gavrilović, 1972).

Krivulja vzdolžnega poteka struge je običajno nepravilnih oblik. Na krajših odsekih je konveksna, konkavna, parabolična, kot celota pa sestavljena iz kombinacije le-teh (Gavrilović, 1972). Ker imamo na razpolago nepravilno krivuljo, imamo na voljo tri padce:

- povprečni padec celotne struge,
- povprečni padec nekega krajšega odseka, ki nas zanima na primer za določitev moči vodnega toka, in
- lokalni padec na nivoju geomorfoloških oblik, na primer stopenj, ki je bil predstavljen v prejšnjem poglavju.

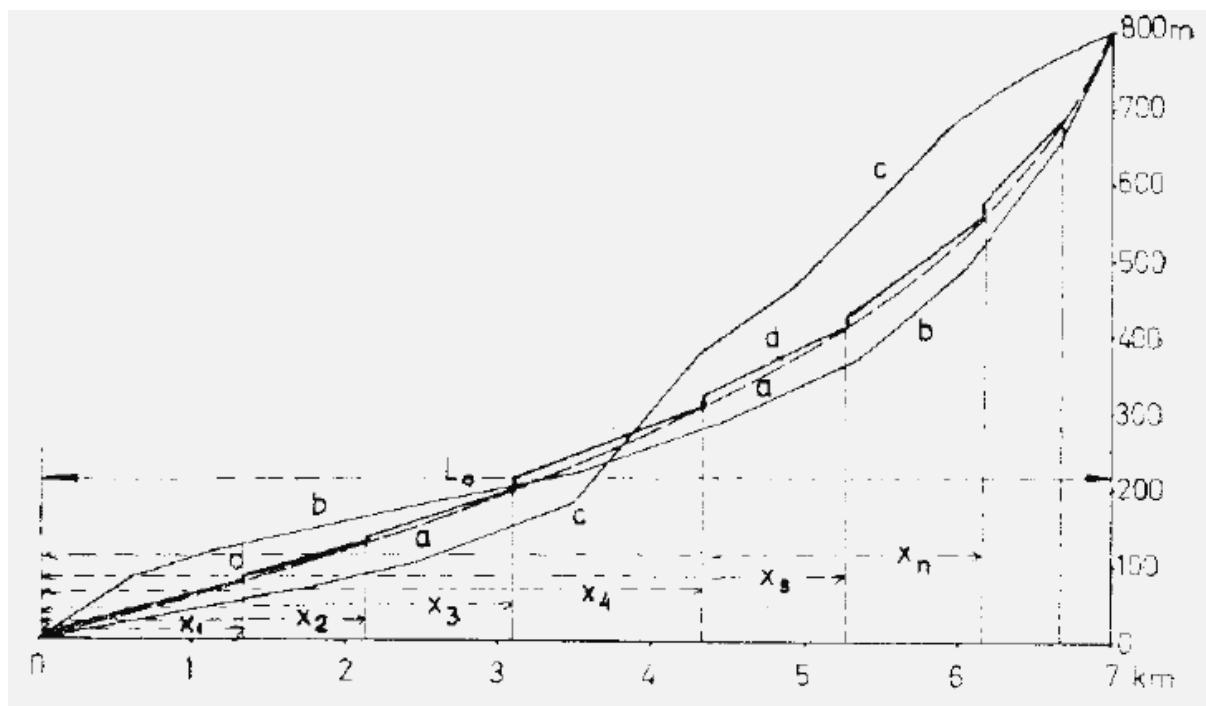
V projektiranju je uporaben le drugi. Struge lahko razdelimo na zgornji, srednji in spodnji del. V zgornjem so značilni veliki padci in pogosto presihanje, v srednjem manjši padci in že stalnejši tok, v spodnjem je običajno prisoten lom v padcu pri prehodu na vršaj. Največji padci so lahko prisotni tudi v srednjem ali spodnjem delu struge pri vtoku v večji hudournik, to pa na »račun« daljšega in izrazitejšega poglobljanja glavnega hudournika. Poleg tega na te neznačilne pojave lahko vplivajo drugi primeri erozije, na primer ledeniško delovanje.

Značilnost geološko mladih hudournikov so konveksni vzdolžni profili (izbočeni navzgor), medtem ko so za geomorfološko stare hudournike značilni konkavni profili (izbočeni navzdol). Razvoj geomorfološko mladih hudournikov je v začetni fazi, medtem ko je geomorfološko starih v končni fazi. Škodljivo delovanje geomorfološko starih hudournikov ima precej nižjo stopnjo od mladih, saj so blizu ravnotežnemu stanju. Vzdolžni potek hudourniških strug ima običajno idealno parabolično obliko krivulje, ki ustreza krivulji erozijske terminante glede na geološke lastnosti hudourniškega območja, torej da ne prihaja niti do erodiranja niti do akumuliranja materiala (Gavrilović, 1972).

Stalno menjavanje konkavnih in konveksnih odsekov je znak neuravnovešene struge z izrazitim geomorfološkim delovanjem (Gavrilović, 1972). K temu lahko pripomorejo tudi pritoki z izrazitejšim erozijskim delovanjem in prodonosnostjo. Če je struga pod pritokom konkavna (vbočena), na območju vtoka pa konveksna (izbočena), je to znak, da je pritok erozijsko izrazito aktiven in prispeva v glavno strugo velike količine plavin (Gavrilović, 1972). Ta odvisnost ni vedno razvidna oziroma zanesljiva, saj ima lahko tudi glavni hudournik zaradi geoloških značilnosti matične kamnine ali lokalnega erozijskega žarišča ob njem konveksno obliko na nekem območju. Poleg tega lahko pride do sočasnega nastopa poplavnega dogodka tako na pritoku kot na glavnem hudourniku in tako poplavni val odplavi plavine dolvodno, ki jih je

prinesel pritok. Seveda pa lahko pritok tudi ni tako izrazito erozijsko aktiven. Tudi če hudournik izkazuje stabilno stanje, to ni garancija, da bo tako ostalo tudi v naprej. Zemeljski plazovi, skalnati podori in celo snežni plazovi lahko porušijo ravnotežno stanje in lahko tako pride do nastajanja novega ravnovesnega stanja.

Na Sliki 25 so prikazani različni vzdolžni profili hudourniških strug. Profil »a« je tisti, ki je optimalen. Za profil »b« je značilno poglobljanje v zgornjem delu in odlaganje v spodnjem delu struge. Profil »c« predstavlja mlad hudournik v matični kamnini. Profil »d« pa prikazuje enega od primerov projektiranja hudourniških pregrad, ki najbolje sledi profilu parabole.



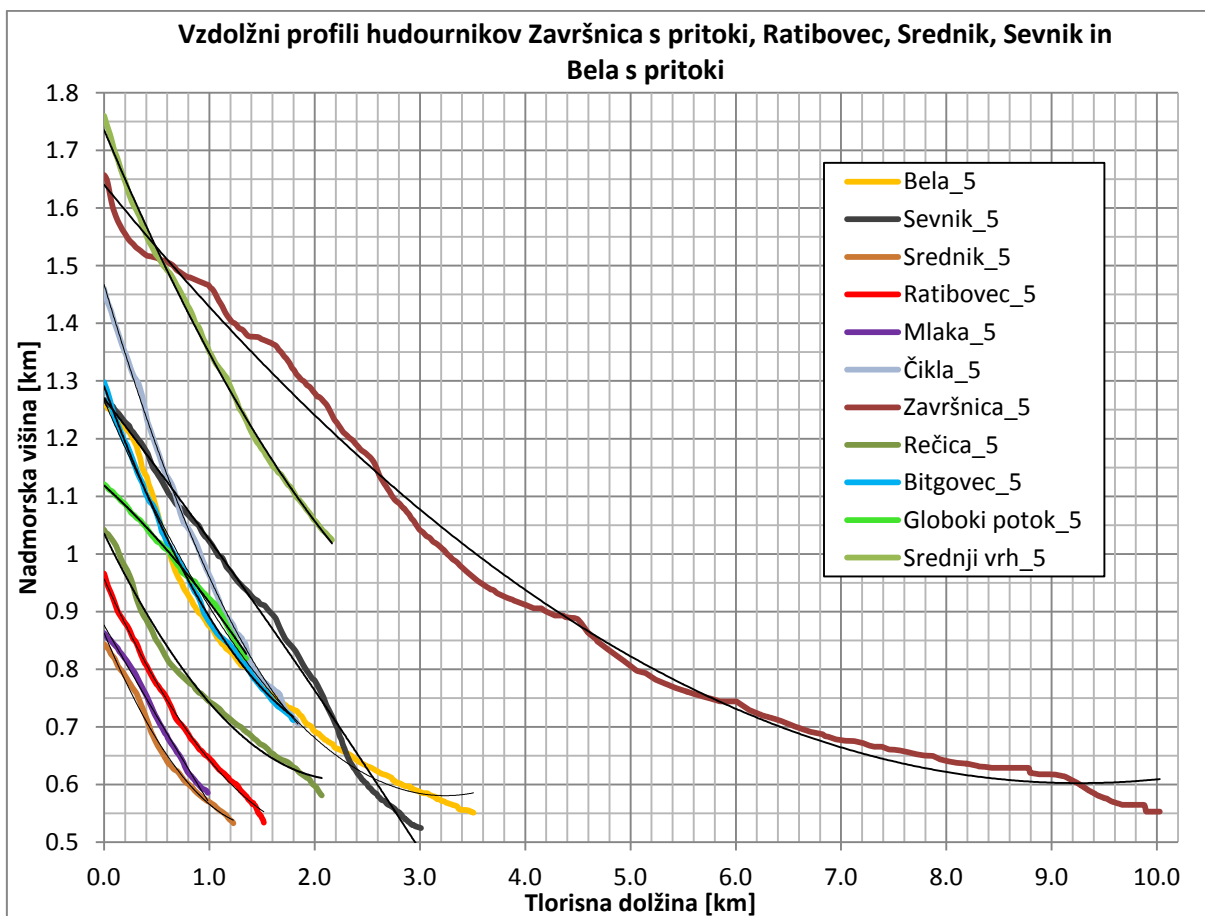
**Slika 25: Različne oblike vzdolžnih profilov hudourniških strug (a – uravnoteženi vzdolžni profil, b – profil aktivnega odnašanja in nasipavanja dna, c – izprani vzdolžni profil v matični kamnini, d – vzdolžni padec po enem izmed postopkov projektiranja (Gavrilović, 1972, str. 147)**

V nadaljevanju je za izbrane hudournike opisan predviden potek nadaljnjega spreminjanja vzdolžnih padcev struge. Uporabljeni so bili vzdolžni padci 34 hudournikov, pridobljeni iz DMV 5, ki so se izkazali za primerno uporabne za podobne analize in so bili na voljo za celotno območje analize. Obravnavani so hudourniki po vrstnem redu od vzhoda proti zahodu. Ocena ali prihaja do poglobljanja ali nasipavanja struge je lahko dana že s pomočjo trendnih črt. Kot je bilo že omenjeno, nekateri hudourniki nimajo izrisane celotne struge do sotočja s Savo (Završnica, Bela, Javornik, Ukova, Jesenica), vendar so ti odseki relativno kratki.

Pri Završnici se tako lahko na odseku od 0,9 km do 2,6 km (Grafikon 14) pričakuje poglobljanje, medtem ko od 2,6 km do 4,2 km lahko pričakujemo dvigovanje dna struge (nasipavanje). Pomembno je omeniti, da Završnica v tem delu teče po matični podlagi, zato je tudi oblika enaka krivulji »c« na Sliki 25. Hudournik ob Srednjem vrhu ter Bitgovec izkazujeta zelo enakomerno linijo manjšanja padca, večje erozije tekom struge ni pričakovati. Globoki potok nasprotno s konveksnim profilom nakazuje na to, da gre za geološko mlad hudournik ali pa da ima manjšo



erozijsko moč (mogoče se nahaja v bolj odporni matični kamnini). Rečica v zgornjem toku izkazuje erodiranje materiala, v srednjem nasipavanje, nato spet erodiranje in nasipavanje. Od vseh pritokov Završnice ni, razen komaj opazno pri pritoku s Srednjega vrha, vidnih vplivov erozijskega materiala na glavno strugo. Nasprotno pa je glavna struga Završnice »kriva«, da hudourniki pred sotočjem povečajo padec. Zlasti izrazito je to pri Rečici. Podoben trend je opaziti tudi pri Ratibovcu, ki se izliva direktno v Savo Dolinko oziroma akumulacijsko jezero hidroelektrarne (HE) Moste, medtem ko višje zelo dobro sledi potenčni funkciji. Pri Sredniku vtoka v Savo Dolinko ni zaznati, slutiti pa je erodiranje od 0,2 km do 0,4 km in bodoče akumuliranje plavin dolvodno. Sevnik izkazuje najbolj nenavadne rezultate od vseh. Večinoma je konveksen, če pa na primer ne bi upoštevali vršaja, bi dobili praktično premico. Na te rezultate bi lahko vplivala izrazita oblika hudourniškega območja, ki je približno enakomerno široko tekom celotne hudourniške struge oziroma kljub dolžini ne ravno veliko prispevno območje, kar onemogoča večjo erozijsko sposobnost hudournika. Iz teh ugotovitev lahko sklepamo, da gre za geološko mlad hudournik. Bela ne izraža ravnovesnega stanja. V zgornjem toku je prisotna konveksna oblika, kjer je prisotno poglobljanje. V srednjem toku izraža ravnovesno stanje, v spodnjem pa je ponovno prisoten hipen padec v strugo Save Dolinke. Čikla dobro sledi liniji potenčne funkcije in ne izkazuje območij večje erozije v strugi ali akumuliranja. Mlaka nasprotno s konveksnim začetkom struge nakazuje na erozijo na odseku 0,1 km do 0,4 km. Spremembe v morfologiji struge Bele kot glavnega hudournika zaradi teh dveh pritokov niso vidne.



Grafikon 14: Vzdolžni profili hudournikov Završnica s pritoki, Ratibovec, Srednik, Sevnik ter Bela s pritoki; podane so tudi trendne črte vseh vzdolžnih padcev

V Preglednici 8 so prikazane funkcije, ki najbolj sledijo vzdolžnim profilom posameznih hodournikov, kjer je  $H$  nadmorska višina v km,  $L$  pa oddaljenost od izvira prav tako v km. Podani so tudi korelacijski koeficienti, ki imajo zelo visoke vrednosti, večinoma nad 0,99. Globoki potok in Sevnik v splošnem izkazujeta konveksno obliko, ostali hudourniki konkavno.

**Preglednica 8: Funkcije, ki najbolj ustrezajo dejanskemu vzdolžnemu profilu posamezne hudourniške struge, ter korelacijski koeficienti**

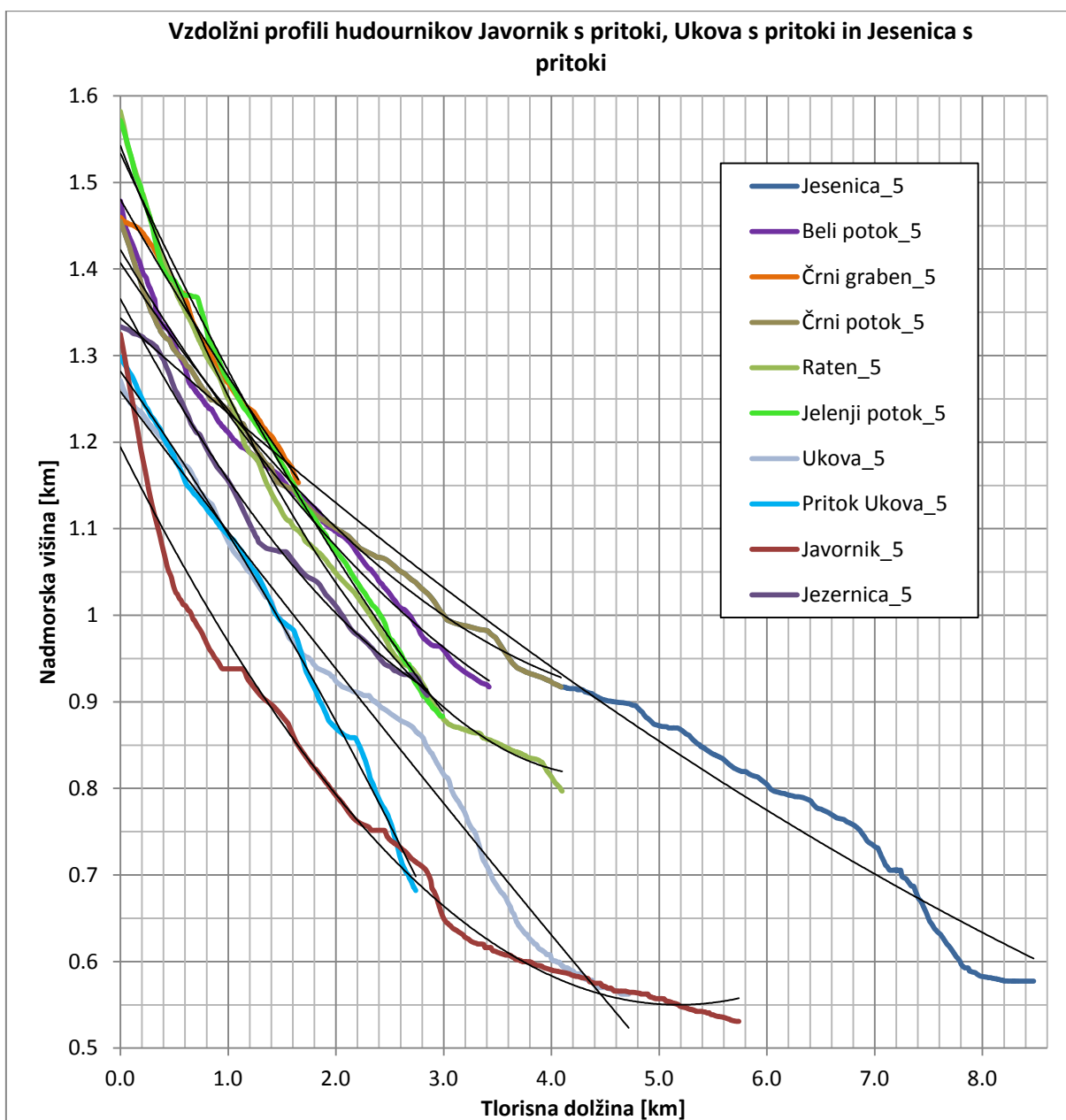
Hudournik	Trendna črta	Korelacijski koeficient
Završnica	$H = 0,0121 * L^2 - 0,2242 * L + 1,6408$	$R^2 = 0,9935$
Srednji vrh	$H = 0,0483 * L^2 - 0,4359 * L + 1,7355$	$R^2 = 0,9983$
Globoki potok	$H = -0,0381 * L^2 - 0,1649 * L + 1,1187$	$R^2 = 0,9977$
Bitgovec	$H = 0,1018 * L^2 - 0,5021 * L + 1,2908$	$R^2 = 0,9993$
Rečica	$H = 0,0829 * L^2 - 0,3764 * L + 1,0353$	$R^2 = 0,9900$
Ratibovec	$H = 0,0929 * L^2 - 0,4073 * L + 0,9566$	$R^2 = 0,9986$
Srednik	$H = 0,1431 * L^2 - 0,4403 * L + 0,8628$	$R^2 = 0,9939$
Sevnik	$H = -0,0079 * L^2 - 0,2376 * L + 1,2698$	$R^2 = 0,9954$
Bela	$H = 0,0653 * L^2 - 0,4233 * L + 1,2661$	$R^2 = 0,9894$
Čikla	$H = 0,1113 * L^2 - 0,6193 * L + 1,4675$	$R^2 = 0,9992$
Mlaka	$H = 0,0124 * L^2 - 0,3216 * L + 0,8763$	$R^2 = 0,9952$

Hudournik Javornik (Grafikon 15) v začetnem delu izraža erodiranje, medtem ko je od 0,4 km do 1,2 km pričakovana akumulacija plavin. Tudi dolvodno od 2,4 km do 3,0 km je pričakovati erodiranje, medtem ko so naprej pogoji primernejši za odlaganje. Pritok Jezernica v začetnem delu in tudi dolvodno izkazuje konveksno obliko. Pričakovano je še aktivno erodiranje in nasipavanje. Na sotočju z Javornikom je vidna manjša izboklina, kar pomeni, da je Jezernica bolj aktivna pri prodonosnosti kot Javornik, kar je logično, saj je erozijsko delovanje Javornika zmanjšano zaradi akumulacijskega jezera gorvodno.

Ukova ima dvojno konkavno krivuljo, vmes pa je prisoten konveksni del. Glede na ugotovitve Gamsa (1992) ta lom na nadmorski višini približno 0,87 km ustreza višini ledenika v poledenitvah. Tako so v tem območju posledice ledeniške erozije še vedno bolj izrazite od rečne, posledično pa gre za zdaj za hudournik, ki bo v območju tega loma težil k izrazitemu poglobljanju na odseku od 1,6 km do 3,8 km. Pritok Ukove te odvisnosti ne kaže tako očitno, ima pa konveksno obliko, kar nakazuje na to, da je geološko mlad hudournik.

Jesenica se na Planini pod Golico razcepi v Črni in Beli potok. Povezava Črnega potoka in Jesenice (Grafikon 15) prikazuje tipičen profil intenzivnega odnašanja v zgornjem delu in akumulacije v spodnjem delu kot kaže Slika 25, »b« krivulja. Črni in Beli potok imata

individualno gledano obliko profila zelo blizu ravnotežnemu stanju in sta geološko starejša, izjemi sta začetna odseka do približno 0,3 km, kjer je premestitvena zmogljivost še zelo nizka. Nasprotno ima Črni graben videz mladega hudournika s konveksnim začetkom in rahlo konkavnim nadaljevanjem. Raten ima lepo konkavno obliko, pričakovati je mogoče le poglobljanje v začetnem delu struge. Na koncu je opazno tudi izrazito povečanje padca pri vstopu v dolino Jesenice. Pritok Jelenji potok izkazuje lastnosti geološko mladega hudournika, večje poglobljanje struge je pričakovati zlasti v zgornjem delu.



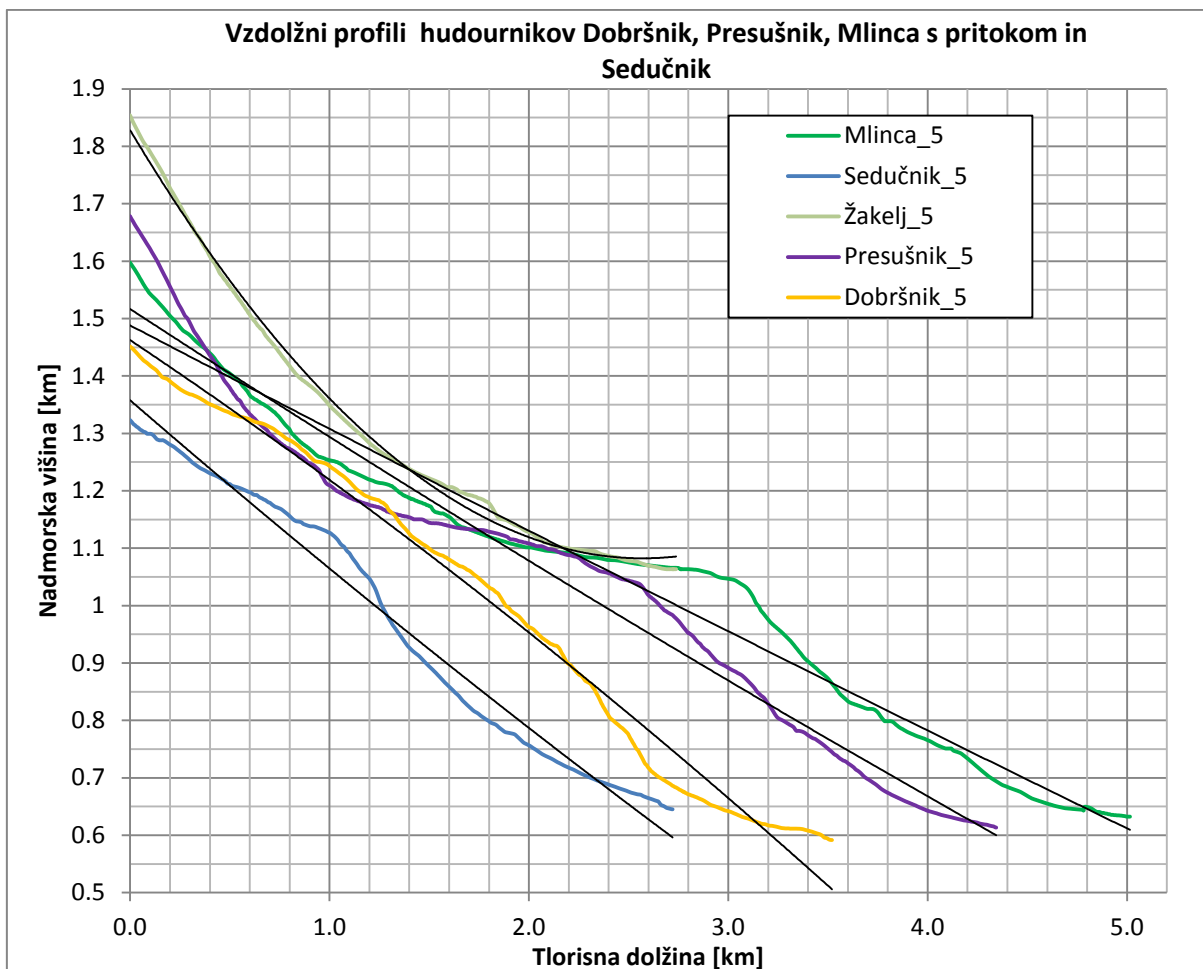
**Grafikon 15: Vzdolžni profili hudournikov Javornik s pritoki, Ukova s pritoki ter Jesenica s pritoki; podane so tudi trendne črte vseh vzdolžnih padcev**

V Preglednici 9 so prikazane funkcije, ki najbolj ustrezajo vzdolžnemu profilu strug hudournikov ter njihovi korelacijski koeficienti. Vsi, razen pritoka Ukove, v splošnem izkazujejo konkavno obliko.

**Preglednica 9: Funkcije, ki najbolj ustrezajo dejanskemu vzdolžnemu profilu posamezne hudourniške struge, ter korelacijski koeficienti**

Hudournik	Trendna črta	Korelacijski koeficient
Javornik	$H = 0,0240 * L^2 - 0,2488 * L + 1,1943$	$R^2 = 0,9843$
Jezernica	$H = 0,0273 * L^2 - 0,2362 * L + 1,3655$	$R^2 = 0,9942$
Ukova	$H = 0,0016 * L^2 - 0,1633 * L + 1,2584$	$R^2 = 0,9894$
Ukova – pritok	$H = -0,0144 * L^2 - 0,1734 * L + 1,2817$	$R^2 = 0,9962$
Jesenica	$H = 0,0030 * L^2 - 0,1128 * L + 1,3433$	$R^2 = 0,9802$
Črni potok	$H = 0,0171 * L^2 - 0,1869 * L + 1,4069$	$R^2 = 0,9936$
Črni graben	$H = 0,0127 * L^2 - 0,2169 * L + 1,4802$	$R^2 = 0,9936$
Beli potok (Jesenica)	$H = 0,0180 * L^2 - 0,2072 * L + 1,4221$	$R^2 = 0,9880$
Raten	$H = 0,0363 * L^2 - 0,3251 * L + 1,5424$	$R^2 = 0,9974$
Jelenji potok	$H = 0,0177 * L^2 - 0,2683 * L + 1,5334$	$R^2 = 0,9963$

Na Grafikonu 16 so prikazani hudourniki, ki imajo vzrok za lomljeno obliko vzdolžnega profila v izrazitem močnejšem delovanju Zgornjesavskega ledenika v preteklih poledenitvah. Gams (1992) opisuje, da naj bi bila kota površine ledenika na 930 m nadmorske višine, hkrati pa omenja, da je na primer v dolini Belce segala celo do 1500 m nadmorske višine. Značilno je, da se hudourniki lomijo nekoliko višje, kot naj bi bila kota površine ledenika v zadnji večji poledenitvi, vendar hkrati ni natančnih podatkov za poledenitve v posameznih dolinah. Tako se lahko sklepa, da je poledenitev in njeno erozijsko delovanje segalo tudi višje po dolinah. Lom na vzdolžnih profilih je na 1150 m nadmorske višine pri Sedučniku, 1050 m nadmorske višine pri Mlinci, 1150 m pri Presušniku, medtem ko pri Dobršniku ni dobro viden. Razlog bi lahko bil v tem, da gre očitno za geološko mlad hudournik, na katerega poledenitve iz preteklosti vseeno niso vplivale. Na to kaže že malenkostno konveksna oblika. Na pobočjih med temi hudourniki se nahaja tudi Jesenica, ki pa ne kaže izrazitega loma in je zato predstavljena že zgoraj. Če gledamo linije nad lomi vzdolžnih profilov, je opazno, da gre za relativno ravnovesne odseke, vendar v celoti sedaj, ko ni ledenika, niso stabilni. V prihodnosti je pričakovati poglobljanje na odsekih loma. Hudournik Žakelj kot pritok Mlince imata sotočje nad lomom zaradi ledeniškega delovanja. Sicer ima Žakelj ravnovesni vzdolžni profil, vendar pa bi ob vzpostavitvi ravnovesne oblike Mlince prišlo do poglobljanja na spodnjem koncu struge.



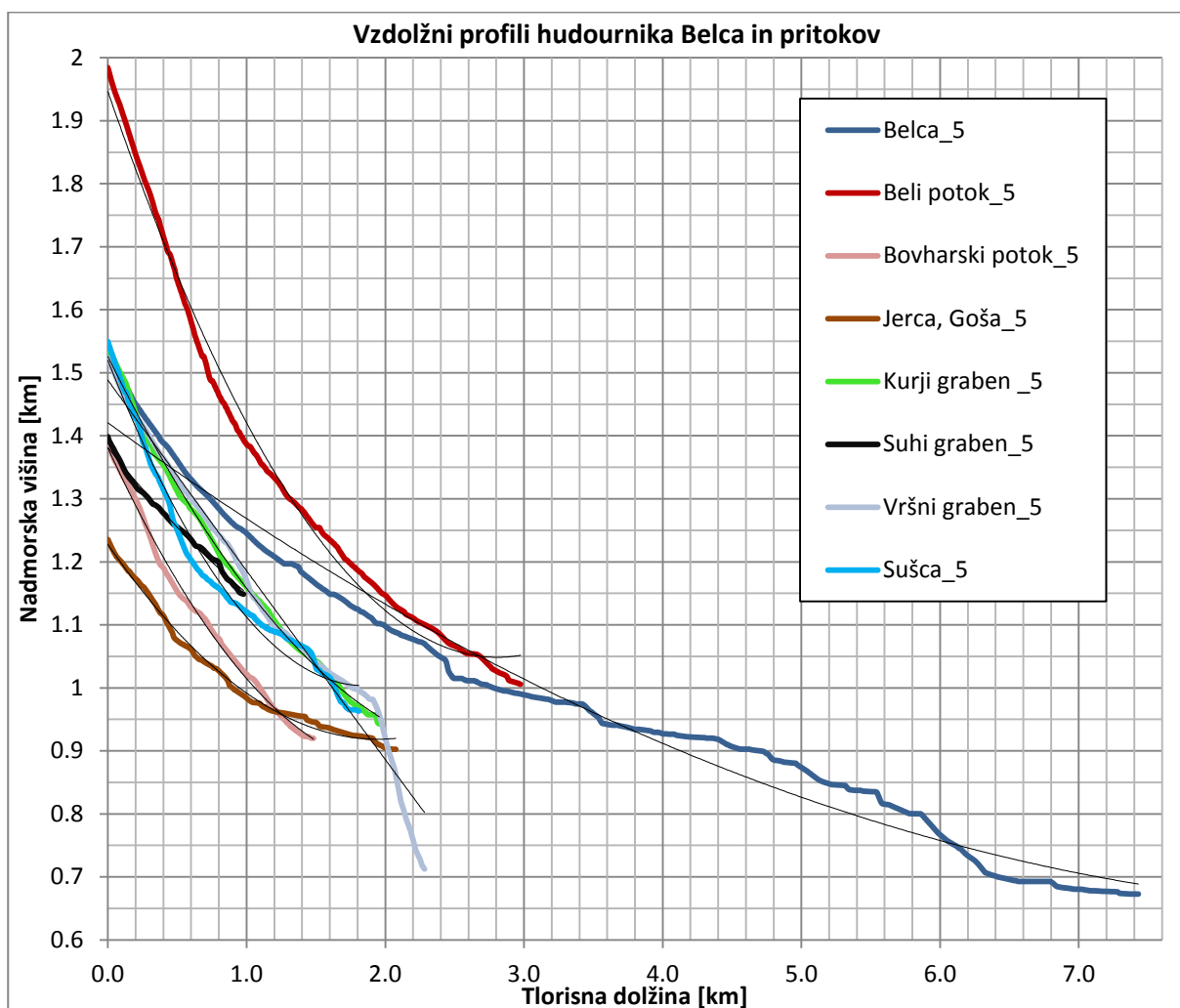
**Grafikon 16:** Vzdolžni profili hudournikov Dobršnik, Presušnik, Mlinca s pritokom in Sedučnik; podane so tudi trendne črte vseh vzdolžnih padcev

V Preglednici 10 vidimo, da je korelacijski koeficient v primerjavi s predhodnimi tabelami hudournikov z lomom precej nižji, kar je posledica loma zaradi ledeniškega roba. To seveda ne velja za Žakelj; združi se z Mlinco na višji nadmorski višini, kot so vidni vplivi delovanja ledenika. Dobršnik ima konveksno obliko.

**Preglednica 10:** Funkcije, ki najbolj ustrezajo dejanskemu vzdolžnemu profilu posamezne hudourniške struge, ter korelacijski koeficienti

Hudournik	Trendna črta	Korelacijski koeficient
Dobršnik	$H = -0,0112 * L^2 - 0,2322 * L + 1,4625$	$R^2 = 0,9876$
Presušnik	$H = 0,0035 * L^2 - 0,2262 * L + 1,5167$	$R^2 = 0,9633$
Mlinca	$H = 0,0012 * L^2 - 0,1812 * L + 1,4881$	$R^2 = 0,9723$
Žakelj	$H = 0,1128 * L^2 - 0,58 * L + 1,8281$	$R^2 = 0,9966$
Sedučnik	$H = 0,0077 * L^2 - 0,3007 * L + 1,3577$	$R^2 = 0,9792$

Pri Belci je prisoten profil, ki nakazuje na intenzivno odnašanje gorvodno in odlaganje dolvodno (Slika 25, krivulja b). Razlog za konveksnost na odseku od 3,5 km do 6,3 km je lahko tudi v povečanem vnosu plavin iz pritokov (Kurji graben, Jerca z Gošo in Sušco, Bovharski potok, tudi Beli potok gorvodno). Lom zaradi ledeniškega delovanja na hudourniškem območju Belce ni viden. Lom pa se pojavi pri Vršnem grebenu, razlog za to pa je v tem, da ima slednji bistveno manjšo erozijsko sposobnost kot glavni hudournik Belca, zato pride do strmega padca na koncu v strugo Belce. Hudourniki Jerca z Gošo, Bovharski potok in Kurji graben so dobro približani ravnotežnim razmeram. Nekoliko manj velja to za Sušco, kjer je v spodnjem delu pričakovano poglobljanje, ter Belco, kjer je pričakovano poglobljanje v zgornjem delu in odlaganje dolvodno. Suhi graben prav tako nima značilne oblike uravnoveženega padca, sklepa se lahko, da gre za mlad hudournik ali pa za hudournik z zmanjšano premestitveno zmogljivostjo.



**Grafikon 17: Vzdolžni profili hudournika Belca s pritoki; podane so tudi trendne črte vseh vzdolžnih padcev**

V Preglednici 11 vidimo, da je korelacijski koeficient za hudournike blizu ravnovesne oblike povsod nad 0,99. Izstopajo nekoliko Belca, Vršni graben in Sušca, ki imajo koeficiente nekoliko nižje. Od te skupine hudournikov noben ni v povprečju konveksen.

**Preglednica 11: Funkcije, ki najbolj ustrezajo dejanskemu vzdolžnemu profilu posamezne hudourniške struge, ter korelacijski koeficienti**

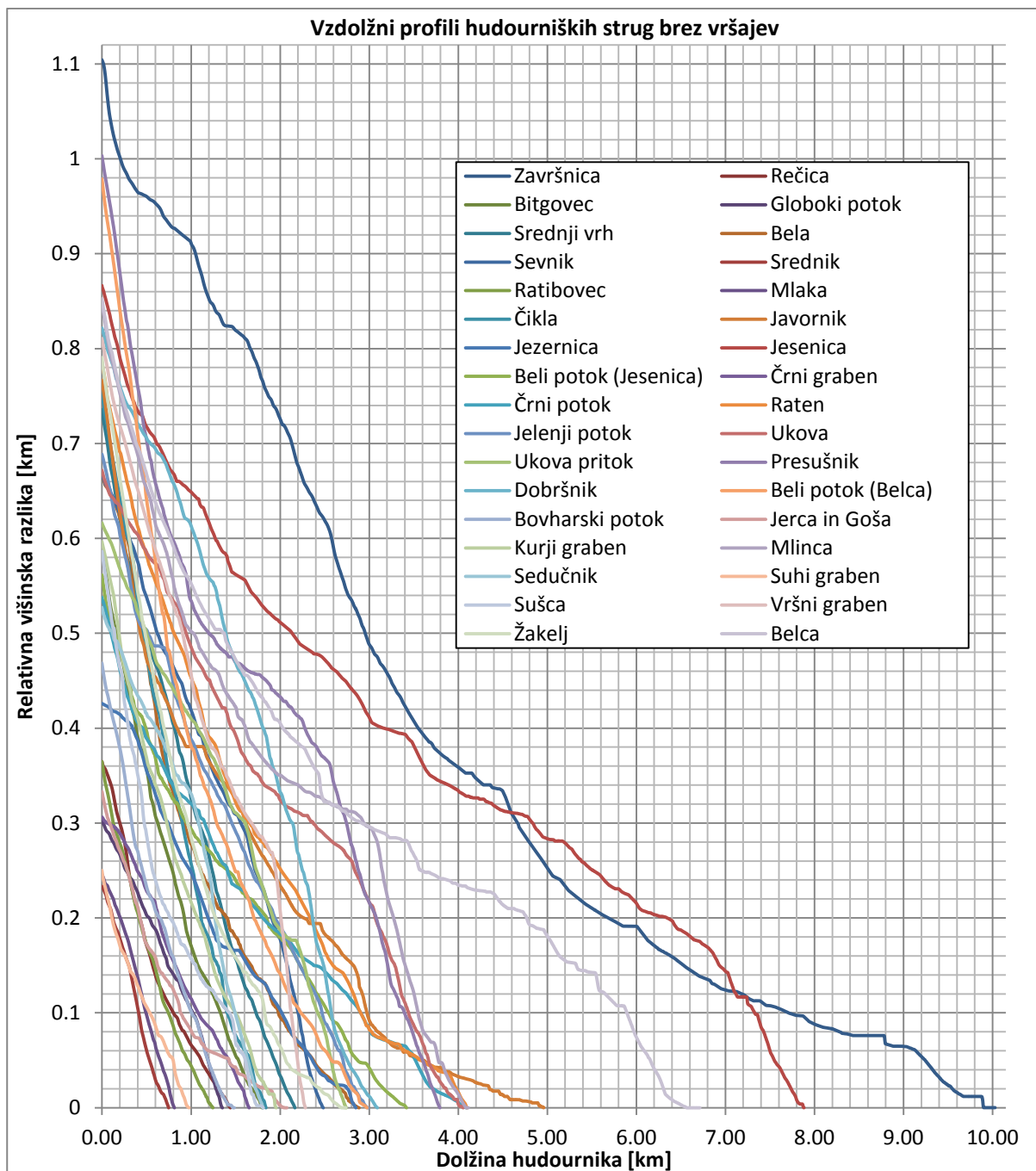
Hudournik	Trendna črta	Korelacijski koeficient
Belca	$H = 0,0084 * L^2 - 0,1606 * L + 1,4207$	$R^2 = 0,9756$
Vršni graben	$H = 0,0014 * L^2 - 0,3039 * L + 1,4883$	$R^2 = 0,9781$
Jerca in Goša	$H = 0,0814 * L^2 - 0,3173 * L + 1,2275$	$R^2 = 0,9939$
Sušca	$H = 0,1511 * L^2 - 0,5585 * L + 1,5196$	$R^2 = 0,9787$
Bovharski potok	$H = 0,1124 * L^2 - 0,4781 * L + 1,3804$	$R^2 = 0,9959$
Kurji graben	$H = 0,0792 * L^2 - 0,4471 * L + 1,5258$	$R^2 = 0,9982$
Beli potok (Belca)	$H = 0,1139 * L^2 - 0,6396 * L + 1,9464$	$R^2 = 0,9924$
Suhi graben	$H = 0,0434 * L^2 - 0,2744 * L + 1,3813$	$R^2 = 0,9931$

Če gledamo vse hudournike skupaj, nekih skupnih karakteristik ni zaznati. Vsi glavni pritoki Save Dolinke nimajo ravnotežnih oblik, vendar pa so vsi na večini odsekov konkavni, izjeme so hudourniki, na katerih so vidne posledice delovanja Zgornjesavskega ledenika. Le nekaj njihovih pritokov je konveksnih, kar kaže na njihovo geološko mladost, večina pa jih ima že obliko podobno paraboli.

#### 4.5 Primerjava vzdolžnih profilov različnih hudournikov

Primerjani so bili vzdolžni profili hudournikov nad vršaji. Na Sliki 19 so to hudourniki od začetka struge do vijoličnih točk. Vršaji so bili odstranjeni, ker imajo drugačne karakteristike kot hudourniki v ozkih rečnih strugah. Struge na vršajih so vedno v rečnih odkladninah, vendar pa je tipično obnašanje vršajev, kjer se s preboji vedno spreminja potek struge, v obravnavanih hudournikih onemogočeno. Praktično povsod gre za urejene struge preko vršajev ali zgolj za ureditve s hudourniški pregradami ali pa celo za popolnoma betonirano strugo. Izjeme so le Sevnik, Srednik in Ratibovec, ki pa so bili najbrž urejeni že v času gradnje železniške proge. Njihove struge so močno vrezane v vršaj brez večjih ureditev, kljub temu pa so v zgornjih delih, kjer so poseljeni, močno urejeni.

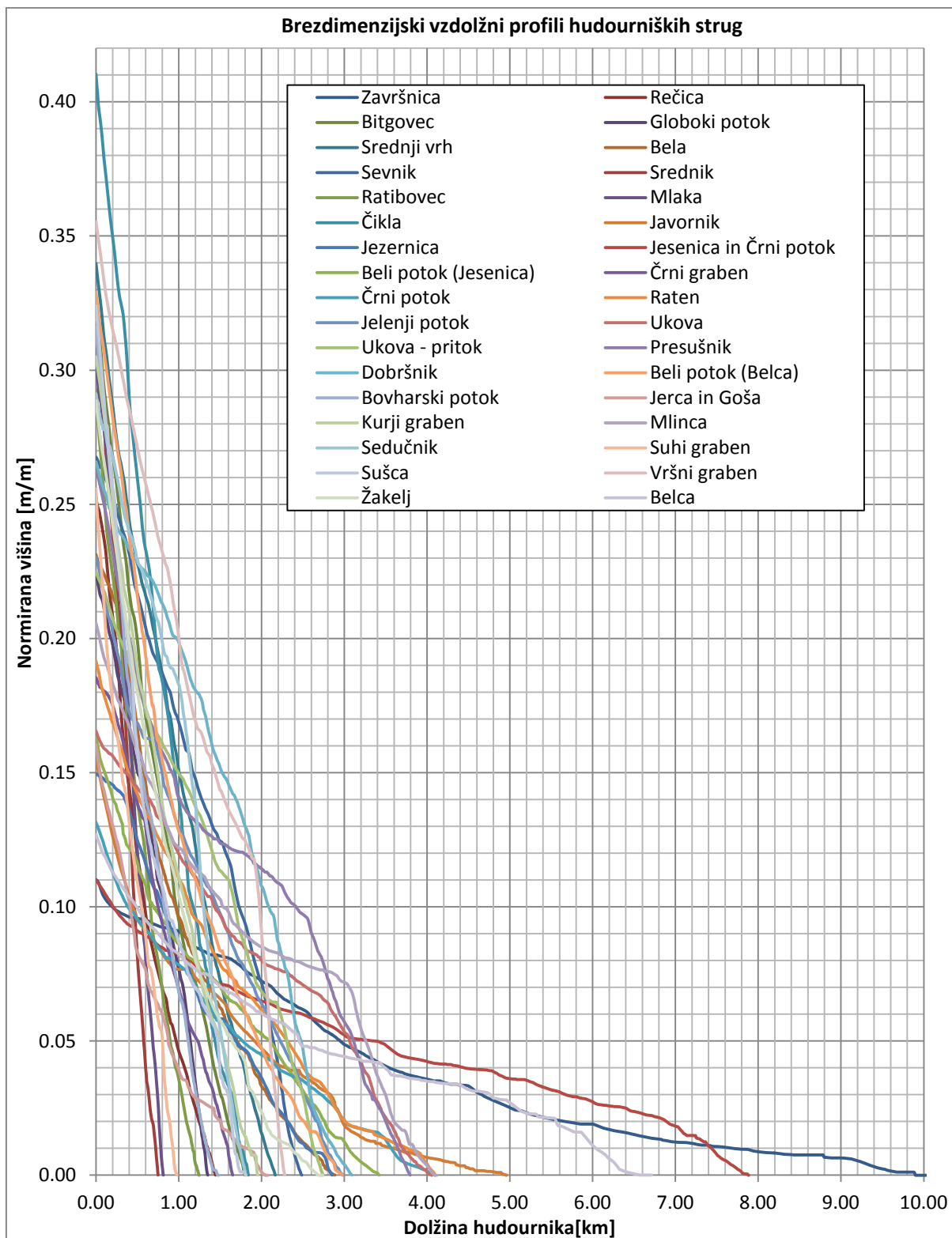
Nadmorske višine spremenjene v relativno višino, torej da je na koncu hudournika oziroma začetku vršaja vrednost višine 0 (Grafikon 18). Izstopajo Završnica, Belca in Jesenica, saj gre za daljše hudournike, pri višini pa niti ni tako velike razlike, izstopa le Završnica. Višinska razlika od izvira oziroma začetka struge do vrha vršaja se tako giblje od približno 200 m do 1000 m. Odvisna je od velikosti in oblike hudourniškega območja, geologije in topografije ter dolžine hudournika.



**Grafikon 18: Vzdolžni profili hudourniških strug do vršajev**

Grafikon 19 prikazuje povprečni padec, ki bi ga imel hudournik na svoji dolžini pri neki razpoložljivi višinski razliki. Največje višinske razlike hudournikov so bile deljene s celotno dolžino hudournikov. Tako imajo kratki hudourniki z velikim padcem bolj strmo obliko. Čikla tako na primer na manj kot 1850 dolžinskih metrov struge izgubi 750 m višine. Vrednost v dolžini 0 predstavlja tako povprečen padec [m/m] hudournika na celotni dolžini. Odčitana vrednost, na primer pri Dobršniku odčitek pri 1,4 km dolžine in 0.16 m/m normirane višine, predstavi, da bi pri razpoložljivi višinski razliki, ki je na voljo od vrha vršaja do 1,4 km, imel hudournik na svoji dolžini tak povprečen padec – 16 m/m. Ta podatek nima neke večje uporabne vrednosti.

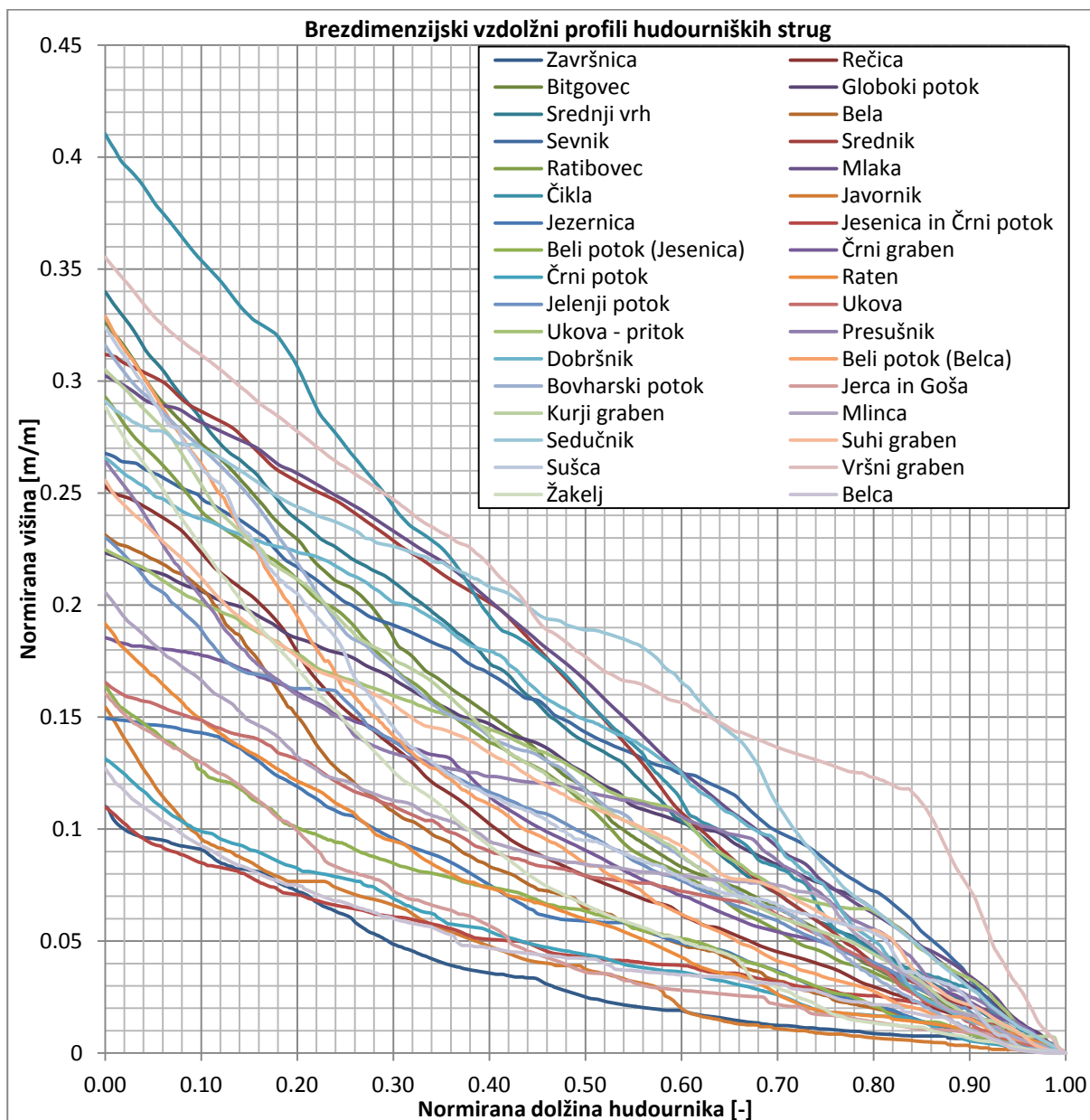




**Grafikon 19: Vzdolžni profili hudourniških strug; prikaz povprečnega padca, ki bi ga imel hudournik na svoji dolžini pri neki razpoložljivi višinski razliki**

Podoben je tudi Grafikon 20, kjer so dodatno normirane dolžine hudournikov (dolžina od začetka vršaja do neke točke, deljena s svojo maksimalno dolžino). Prav tako vrednosti pri normirani

dolžini 0 predstavljajo povprečen padec, ki ga ima celoten hudournik. S pomočjo tega grafa lahko denimo ugotovimo, na primer pri Završnici, če odčitamo 0,36 (36 % zgornjega toka hudournika) na x osi in 0,04 m/m, da če bi bila na voljo samo višinska razlika od dolvodnega konca hudournika do vrednosti 0,36, bi bil povprečen padec celotnega hudournika 0,04 m/m. Pričakovano imajo daljši hudourniki najnižje vrednosti, krajši pa višje.



**Grafikon 20: Vzdolžni profili hudourniških strug; prikaz povprečnega padca, ki bi ga imel hudournik na nekem deležu svoje dolžine pri neki razpoložljivi višinski razliki**

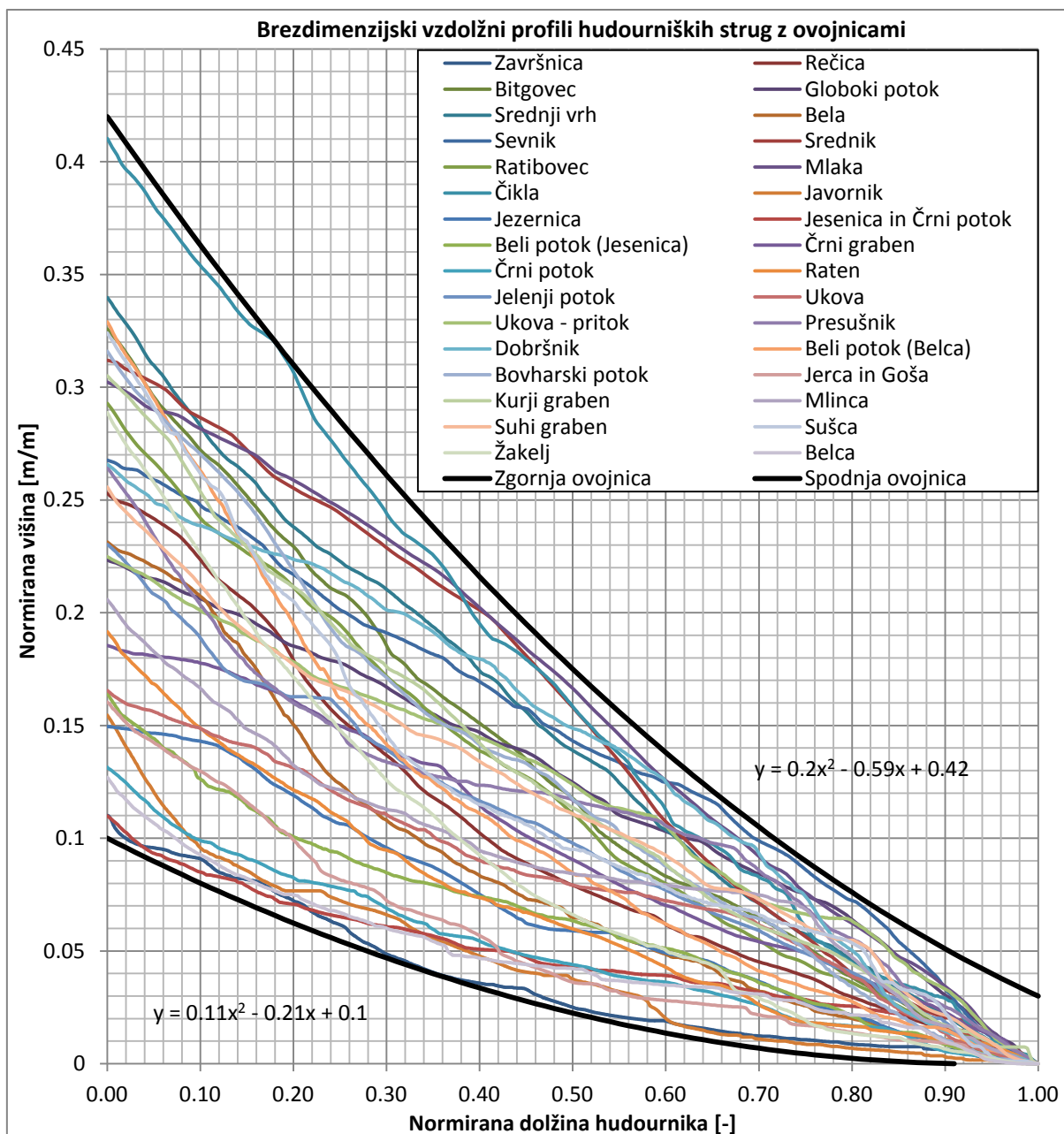
Na Grafikonu 20 sta izrazito ekstremna primera Sedučnik in Vršni graben. Razlog za to so geomorfološke značilnosti. Pri Sedučniku je konveksen del posledica ledeniškega delovanja, ki je bilo močnejše od hudourniškega. Zaradi manjše dolžine hudournika pa je ta oblika toliko bolj izrazita. Pri Vršnem grabnu gre za to, da pride zaradi precej močnejšega erozijskega delovanja Belce do strmega padca struge hudournika v dolino Belce. Izstopa nekoliko še Čikla, pri kateri pa

je sama oblika krivulje podobna ostalim, izjemen je le začetni padec. Na Grafikonu 21 sta bila Sedučnik in Vršni graben izločena, narejena pa je bila ovojnica rezultatov. Vrednost zgornjega roba je tako funkcija (41).

$$y = 0,20 * x^2 - 0,59 * x + 0,42 \quad (41)$$

Funkcija spodnjega roba ovojnice je (42).

$$y = 0,11 * x^2 - 0,21 * x + 0,10 \quad (42)$$



Grafikon 21: Vzdolžni profili hudourniških strug; prikaz povprečnega padca, ki bi ga imel hudournik na nekem deležu svoje dolžine pri neki razpoložljivi višinski razliki brez ekstremnih primerov hudournikov in z ovojnicami

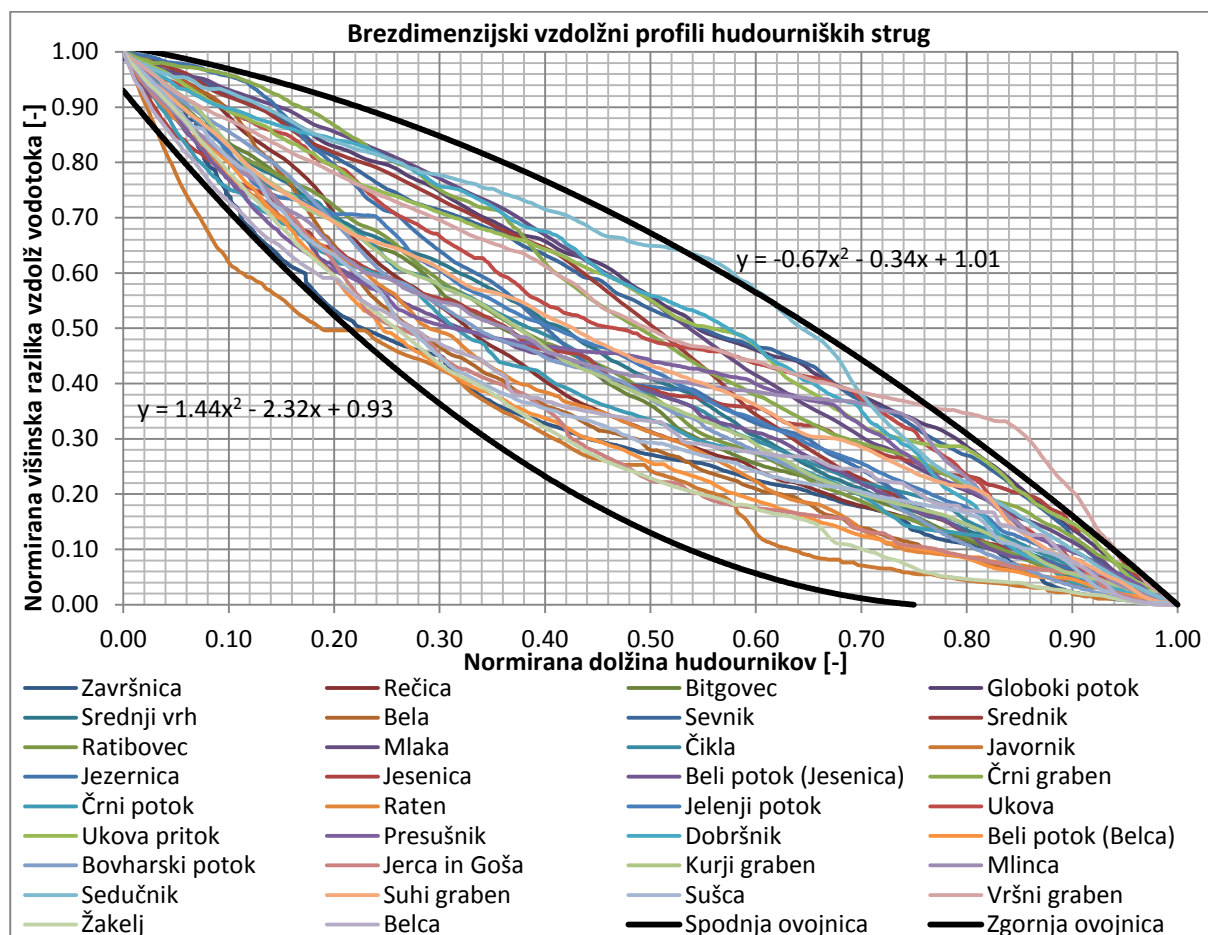
Izdelan je bil še Grafikon 22, kjer je bila celotna dolžina hudournika deljena s svojo maksimalno dolžino, prav tako pa celotna višinska razlika s svojo maksimalno vrednostjo. Graf predstavlja, na primer za Sedučnik, pri vrednosti dolžine 0,42 in višinski razliki 0,70, da je na 42 % dolžine hudournika razpoložljivo še 70 % padca. Izstopajo trije hudourniki. Ponovno sta ekstremna Sedučnik in Vršni graben zaradi istih razlogov, kot je navedeno že zgoraj. Na spodnji strani se pojavi ekstrem pri Javorniku, zlasti v začetnem delu pred akumulacijo, ki je vidna po 50 % porabljenih razpoložljive višinske razlike. Razlog za to bi lahko bila rudniška dejavnost na tem območju v preteklosti, saj je v tem povirju prisotnih veliko manjših strug v kamniti oblogi in so padci posledično zelo veliki. Ti trije hudourniki niso bili upoštevani v izdelavi ovojnice rezultatov. Zgornji rob tako predstavlja funkcija (43).

$$y = -0,67 * x^2 - 0,34 * x + 1,01 \quad (43)$$

Spodnji rob pa predstavlja funkcija (44).

$$y = 1,44 * x^2 - 2,32 * x + 0,93 \quad (44)$$

Grafikon 22 bi se lahko uporabil tudi za analizo bodoče erozijske aktivnosti oziroma geološke starosti hudournika, tako kot je to storjeno v poglavju 4.4, kjer je potrebno biti pozoren na to, da pri spodaj prikazanem ni upoštevanih hudourniških vršajev.



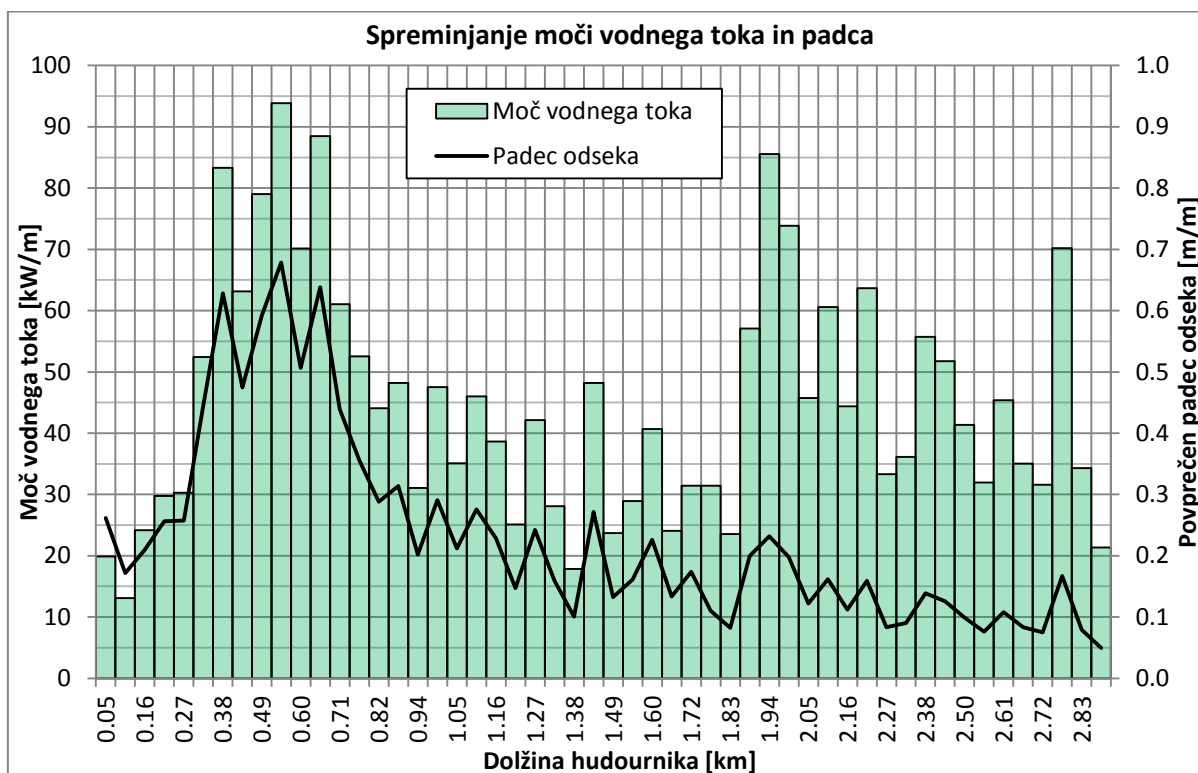
**Grafikon 22: Brezdimenzijski vzdolžni profili**

Kljub temu da se analizirani hudourniki nahajajo na nekem območju, tu v Zgornjesavski dolini na pobočjih Karavank, so prisotne precejšnje razlike med njimi. Gledano v celoti pa se jih vseeno da vstaviti v neko ovojnico, saj sledijo večinoma istim trendom.

#### 4.6 Analiza moči vodnega toka hudournikov

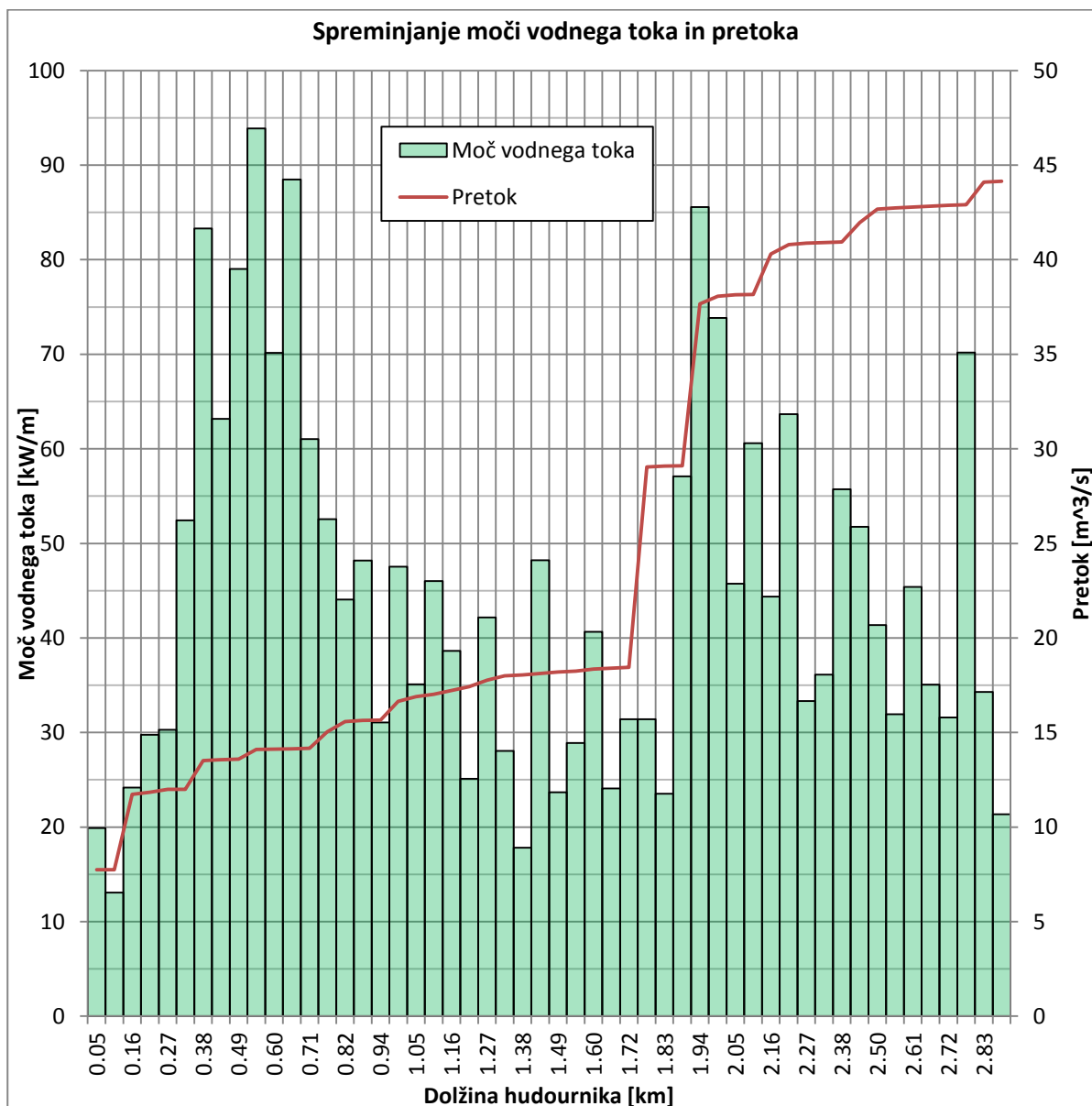
Moč vodnega toka se lahko uporabi namesto računa strižnih napetosti. Uporabljeni sta enačbi za izračun stoletnih pretokov na območju Zgornjesavske doline (35) ter enačba za celotno moč vodnega toka na nekem prerezu (29). V enačbo (29) so vstavljene vrednosti stoletnih pretokov iz enačbe (35). Tako so dobljene vrednosti moči vodnega toka v primeru poplav s stoletno povratno dobo. Vhodni podatki so velikost prispevnega območja gorvodno od prereza [ $\text{km}^2$ ], padec na odseku [ $\text{m/m}$ ], ki je upoštevan kot povprečje 50-metrskega odseka, ter gravitacijski pospešek in gostota vode. Obravnavani so bili hudourniki Bela, Sevnik, Bitgovec in Mlinca, ki imajo različne oblike porečij. Vršaji niso bili obravnavani. Izračuni so se izvedli za odseke dolge od 49,7 m do 50,2 m (odvisno od dolžine hudournika), izjema je Bela, kjer so odseki dolgi 55,7 m. Za moč vodnega toka so bili uporabljeni stolpčni grafi, saj gre na nekem opazovanem odseku za povprečne vrednosti (Reinfelds et al., 2004).

Moč vodnega toka je bila naprej izračunana za Belo (Grafikon 23). Prisotna sta dva viška, prvi je v začetku hudournika kot posledica velikih padcev, nižje pa zaradi povečanih pretokov zaradi sotočja Bele s Čiklo. Padec ima na moč vodnega toka močan vpliv. Iz Grafikona 23 se vidi močno ujemanje viškov padca z viški moči. Potrebno je omeniti, da so ponekod padci na odsekih izjemno visoki, na primer pri Beli do 0,7 m/m, kar pa je posledica kakšnih slapov na odsekih ali pa lahko tudi hudourniških ali zaplavnih pregrad.



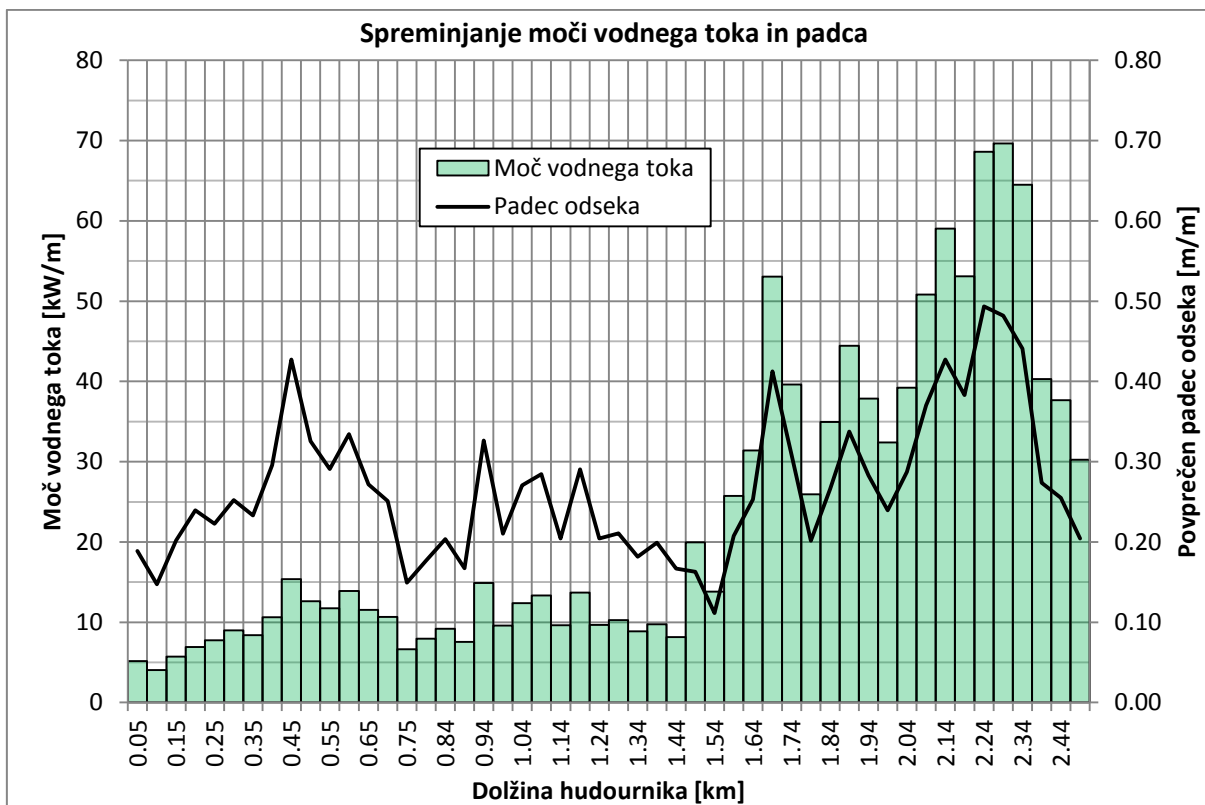
Grafikon 23: Spreminjanje moči vodnega toka in padca vzdolž hudournika Bela

Nasprotno pa se iz Grafikona 24 vidi, da se pri spreminjanju pretokov moč vodnega toka spremeni le nekoliko. Odvisnost med pretokom in močjo vodnega toka ni tako izrazita. Pri pretoku sta na dolžini od 1,72 km do 1,94 km vidna dva večja skoka v pretokih. To je posledica večjega neimenovanega pritoka in pa Čikle. Pri drugem povečanju pretokov zaradi vtoka Čikle, kjer pride tudi do manjšega povečanja padcev, je moč vodnega toka visoka.

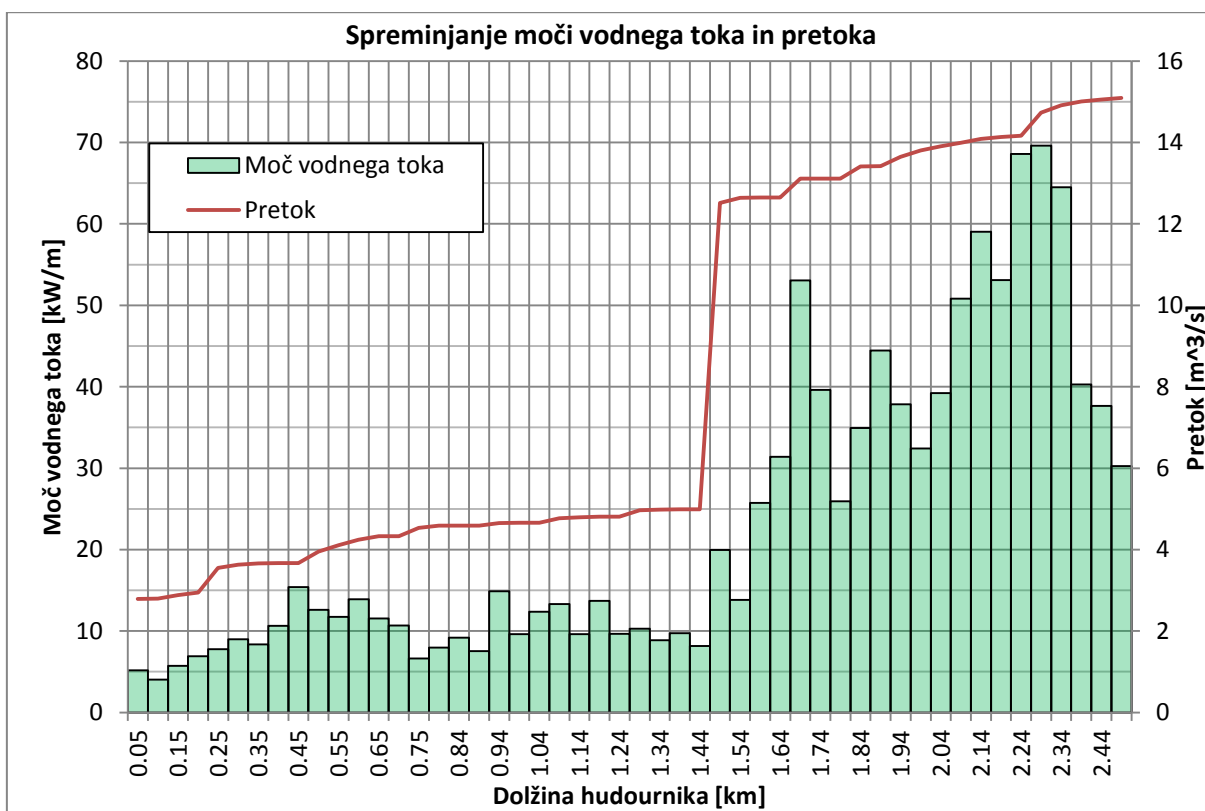


**Grafikon 24: Spreminjanje moči vodnega toka in pretokov s 100-letno povratno dobo vzdolž hudournika Bela**

Podobno je bilo ugotovljeno pri Sevniku (Grafikon 25). Padec ima velik pomen pri velikosti moči vodnega toka, ta pa se spreminja glede na pretok in lokalni padec in ni možno ugotoviti nekih trendov. Moč vodnega toka je pri Sevniku visoka zlasti v spodnjem delu, kot posledica večjega neimenovanega pritoka (Grafikon 26) in večjih padcev.

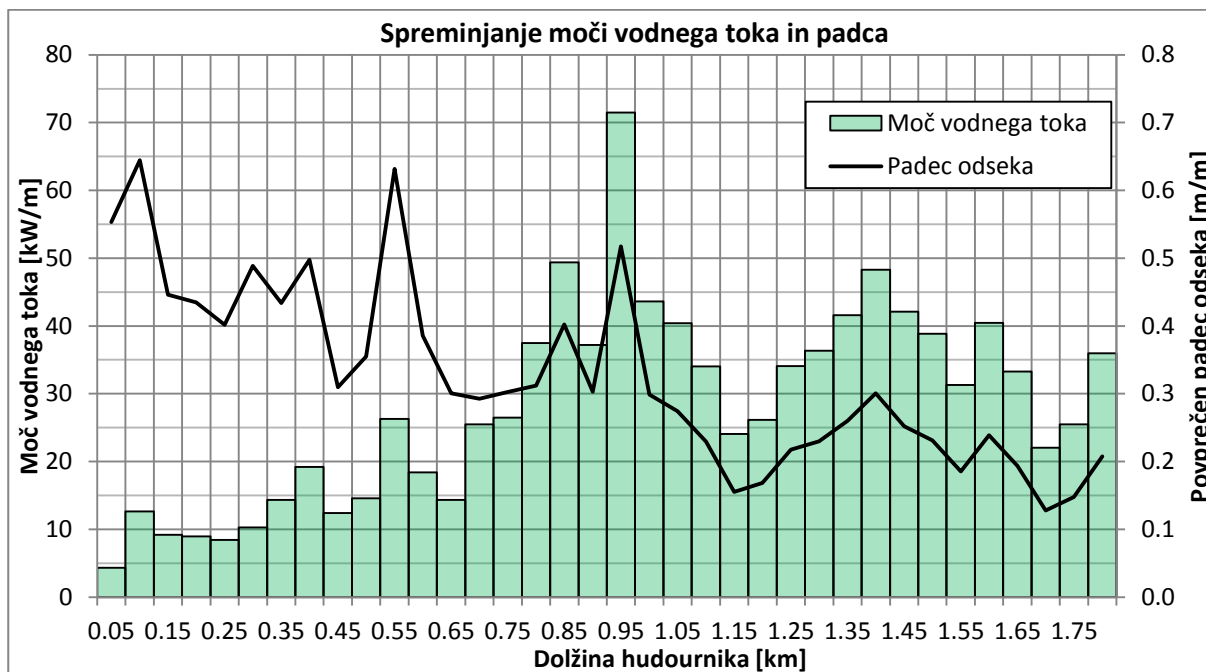


Grafikon 25: Spreminjanje moči vodnega toka in padca vzdolž hudournika Sevnik



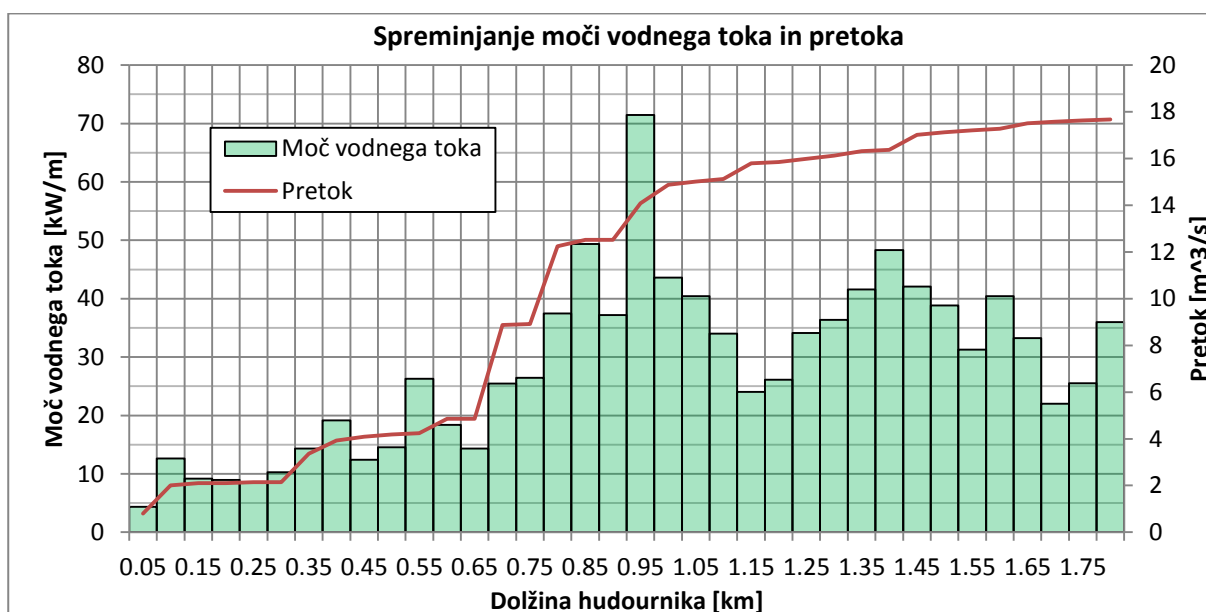
Grafikon 26: Spreminjanje moči vodnega toka in pretokov s 100-letno povratno dobo vzdolž hudournika Sevnik

Izračunana je bila moč vodnega toka tudi na manjšem hudourniku Bitgovec v hudourniškem območju Završnice. Spet je izrazito sledenje moči vodnega toka padcem, ki pa v začetnem delu zaradi nizkih pretokov ni tako izrazito (Grafikon 27). Hudournik ima v srednjem toku prisotne najvišje vrednosti moči vodnega toka, ki pa ostanejo podobno visoke do sotočja z Završnico.



**Grafikon 27: Spreminjanje moči vodnega toka in padca vzdolž hudournika Bitgovec**

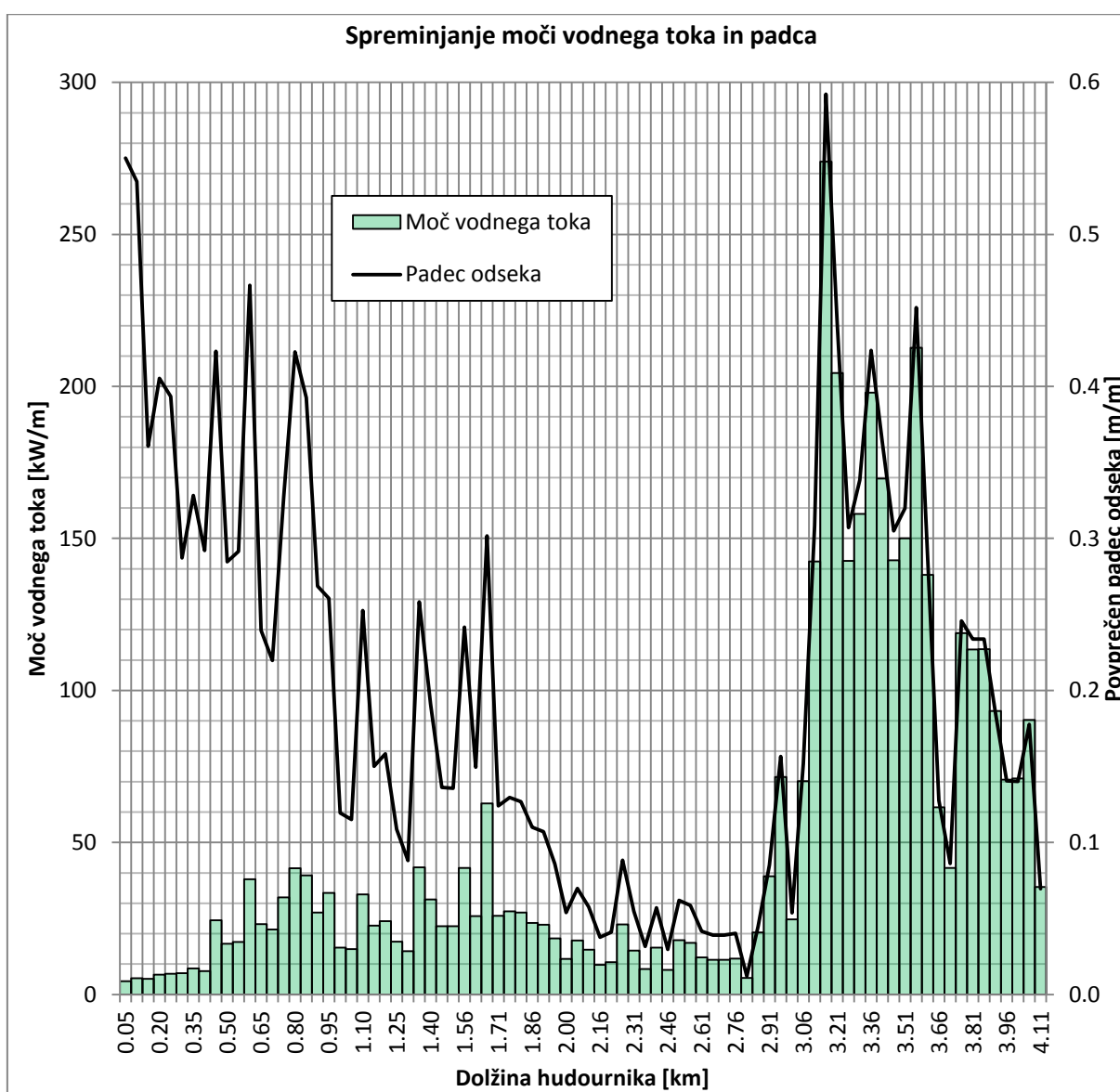
Na Grafikonu 28 se pri dolžinah hudournika 0,65 km in 0,70 km, kjer je padec praktično enak (Grafikon 27), dobro vidi prispevek pretoka k moči vodnega toka, saj ta naraste iz 15 kW/m na 25 KW/m.



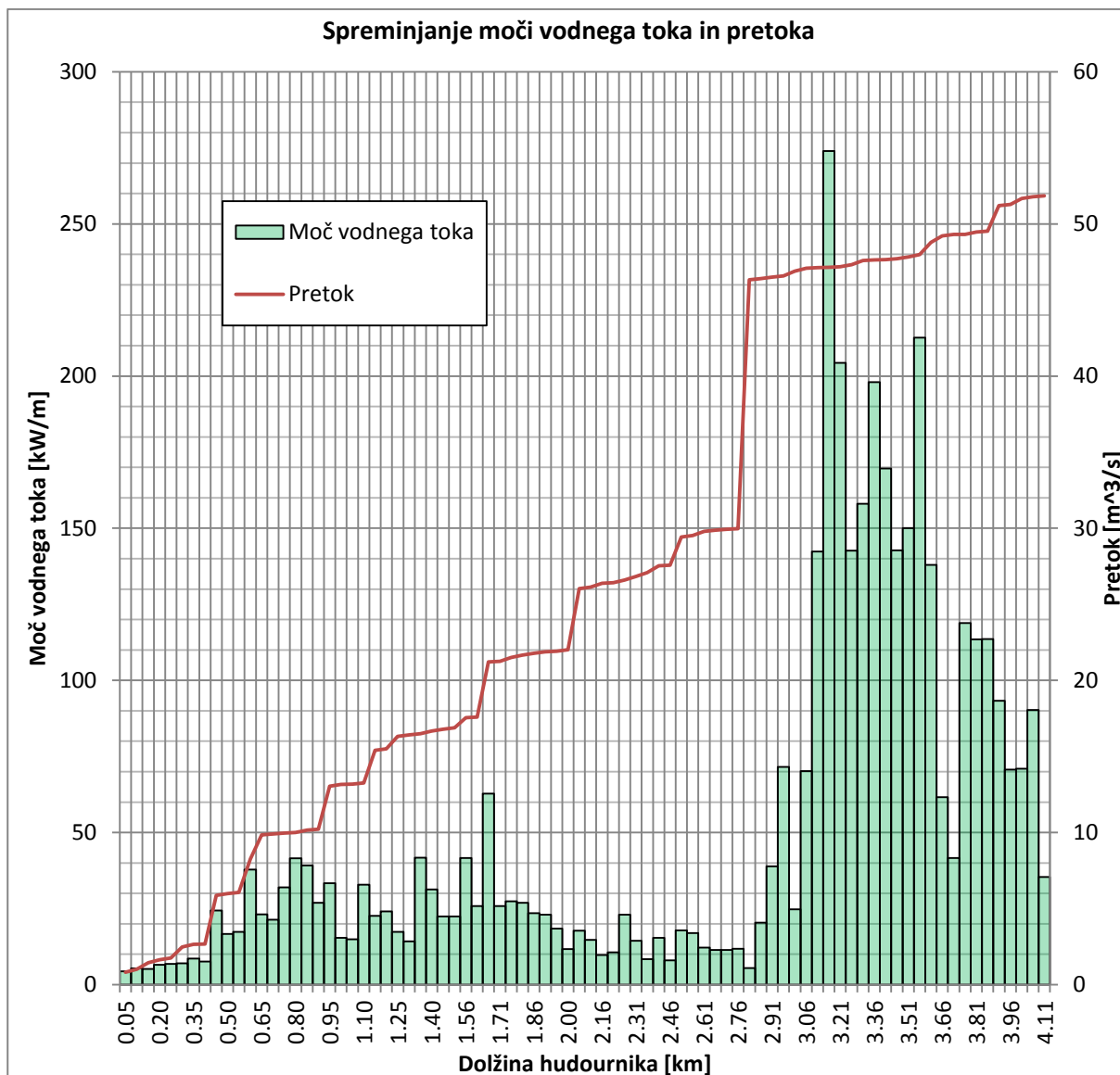
**Grafikon 28: Spreminjanje moči vodnega toka in pretokov s 100-letno povratno dobo vzdolž hudournika Bitgovec**



Za konec je bil preiskan še hudournik Mlinca, ki ima v primerjavi z zgornjimi večje hudourniško območje, posledično pa so vrednosti moči vodnega toka višje. Poleg tega ima konveksen profil kot posledica ledeniškega delovanja v preteklosti. Grafikon 29 prikazuje spreminjanje padca Mlinca in moč vodnega toka. Ta je zelo izrazita v delu, kjer se ponovno poveča padec kot posledica oblike vzdolžnega profila struge zaradi delovanja ledenikov. Dobro vidno je iz spremembe pretokov na Grafikonu 30 sotočje z hudournikom Žakelj, kjer se pretok poveča za približno  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ . Zanimivo je, da se tu padci znižajo, kar bi bilo lahko posledica povečane prodonosnosti Žaklja ali pa tudi zaplavne pregrade pod sotočjem. Ta je manj verjetna, glede na to da je to območje zavarovano tudi kot naravna vrednota, in sicer soteska, zato lahko tudi to vpliva na te karakteristike. Obsežno prodišče s pramenasto strugo na sotočju je vidno tudi iz orto-foto posnetkov, ki se nato nenadoma konča. Povečani padci, ki presegajo  $0,4 \text{ m/m}$  dolvodno so najbrž posledica karakteristik struge v soteski z manjšimi slapovi.



Grafikon 29: Spreminjanje moči vodnega toka in padca vzdolž hudournika Mlinca



**Grafikon 30: Spreminjanje moči vodnega toka in pretokov s 100-letno povratno dobo vzdolž hudournika Mlinca**

Izkazalo se je, da je padec precej bolj pomemben parameter kot pa pretok. Iz zgornjih grafikonov v splošnem velja, da se moč vodnega toka dolvodno viša. Vendar pa so izbrani hudourniki taki, da imajo v spodnjem delu vsi precej velik padec ali pa da je ta tam še celo največji.

## 5 ZAKLJUČKI

V tem magistrskem delu je predstavljena vloga padcev v hudourniških strugah. Njihova velikost vpliva na vrsto dejavnikov. Veliki vzdolžni padci so ena glavnih karakteristik hudourniških strug. V prvem delu so zbrani izsledki raziskav avtorjev, ki so preučevali obnašanje v hudourniških strugah. Najprej so predstavljene karakteristike geomorfoloških oblik strug, ki se lahko pojavijo v hudournikih, struge tipa stopnja-tolmun pa so še dodatno predstavljene. Predstavljena je tudi vloga lesa v hudourniških območjih, procesi erozije, transporta in akumulacije plavin ter energetskega potenciala tako v smislu premeščanja plavin kot tudi za hidroenergetsko izrabo.

Nato so predstavljena obravnavana hudourniška območja in vseh 34 obravnavanih hudournikov v Zgornjesavski dolini na pobočju Karavank. Izpostavljene so geomorfološke oblike tudi kot naravne vrednote, opisana je pokritost tal na hudourniških območjih ter geološka zgradba. Opisana je metoda analize pridobivanja podatkov iz DMV s pomočjo programskega orodja ArcGIS. Predstavljeno so še hidrološke razmere in obseg porečij na območju Zgornjesavske doline, ki so bila pridobljena iz orodja ArcGIS.

Iz primerjave uporabnosti DMV različnih prostorskih ločljivosti pri digitaliziranem poteku struge se je izkazalo, da najbolje sledijo dejanskemu poteku struge rezultati pridobljeni iz lidarskih DMV s prostorsko ločljivostjo 0,5 m, tudi DMV s prostorsko ločljivostjo 1 m da zelo podobno dobre rezultate. Kljub temu da so lidarski DMV najboljši izmed uporabljenih, se je pokazalo, da oblaki točk niso bili dobro filtrirani. Tako so na nekaterih mestih v DMV še vedno prisotni mostovi oziroma prepusti. Računski postopek za določanje hudourniških strug na takih mestih je manj uporaben. Uporabnost pridobljenih rezultatov iz DMV 5 ali DMV 12,5 je za celostno analizo porečij primerna nad vršaji, kadar gre za izrazite doline in večje vodotoke, pri poteku struge na vršajih in urbaniziranih območjih, pa so v DMV pogosto prisotne napake in niso več primerni.

Analiza vzdolžnih profilov izbranih odsekov je pokazala, da je za grobe ocene primeren že DMV 12,5, vendar pa na primer slapovi in zaplavne pregrade niso vidne. Pri DMV 5 se jih že da slutiti, medtem ko pri lidarskih DMV lahko jasno razločimo vertikalne padce v profilu struge. Lidarski DMV so dali podrobno obliko vzdolžnih profilov. Zato je bila dodatno še preiskana možnost, da bi se geomorfološke oblike ocenile iz vzdolžnih profilov in lokalnih padcev. Tu se je izkazalo, da je DMV s polmetrsko prostorsko ločljivostjo dal še nekoliko boljše rezultate. Predvsem iz lokalnih padcev na odseku se je izkazalo, da se da določiti pozicije stopenj in tolmunov. Prisotne so bile tudi negativne vrednosti padcev, ki so značilne za tolmane. Jasne ocene ali gre za stopnje-tolmune ali kaskade ni možno podati zgolj iz tega parametra. Ugotovljeno je bilo, da se visoki padci na območju stopenj pojavljajo periodično. Razvite so bile 3 sinusne funkcije, ki kažejo na to, da bi se zaporedje spreminjanja lokalnih padcev lahko opisalo z njimi. Vendar pa veliko vlogo pri formaciji stopenj igrajo lokalne karakteristike, kot so del struge po matični kamnini, veliki balvani ali zaplavni les. Zato bi bilo mogoče, da bi se spreminjanje lokalnih padcev v obliki sinusne funkcije pojavilo zgolj na krajših odsekih, kjer so stopnje samo iz prodnikov. To bi bilo mogoče še v idealiziranih razmerah v laboratorijskem žlebu. Lidarski DMV so se v vseh primerih izkazali za najbolj uporabne, kljub temu da je obdelava podatkov časovno in pomnilniško potratna ter, da z lidarjem ni možno snemanje vodnih površin. To se namreč lahko izniči v hudournikih tako, da se snema v času, ko hudournik v celoti presahne ali ko so pretoki zelo nizki in je vodnih površin zanemarljivo malo. Ker lidarskih DMV ni bilo na

razpolago za vsa obravnavana hudourniškega območja, se je v nadaljnjih analizah uporabilo DMV 5, ki se je izkazal za bolj uporabnega, zlasti zaradi manjšega rastra v primerjavi z DMV 12,5, čas računanja pa se je zanemarljivo podaljšal.

Iz DMV 5 so bili izdelani celotni vzdolžni profili hudournikov, iz katerih je mogoče oceniti erozijsko aktivnost. Na večini hudournikov so se pojavili posamezni konveksni odseki, ki so značilni za geološko mlade hudournike z veliko erozijsko aktivnostjo. Pri nekaterih hudournikih se je pojavilo tudi konveksno območje na delu, kjer struge padejo iz svoje rečne doline v ledeniško dolino Zgornjesavske doline. Podane so tudi kvadratne funkcije, ki najboljše opišejo obliko vzdolžnega profila.

V nadaljevanju se je vzdolžnim profilom odstranilo območja vršajev, saj gre za drugačne hidravlične razmere zaradi dovolj razpoložljivega prostora na bokih, če so naravni. Vendar pa so hudourniki zaradi urbanizacije pogosto tehnično urejeni in je naravno obnašanje hudournika na tem območju okrnjeno, razmere pa so še vedno drugačne kot v ozkih rečnih strugah. Poleg tega se je uporabnost DMV 5 tam izkazala za nekoliko manj zanesljivo.

Izvedena je bila primerjava vzdolžnih profilov izbranih hudournikov. Uporabile so se normirane vrednosti višine ter normirane vrednosti tako višine kot dolžine hudournika, ki so bile vse normirane z dolžino hudournika od začetka struge do začetka vršaja. Za vrednosti iz obeh normiranih vrednosti je bila izdelana ovojnica šopa vzdolžnih profilov. Na ta način se je določil značilen obseg vzdolžnih profilov na območju Zgornjesavske doline. Izvedlo se je še normiranje višinske razlike same s sabo ter dolžine hudournikov same s sabo. Tako dobljen graf prikazuje, kolikšen delež višinske razlike je porabljen na nekem deležu celotne dolžine hudournika. Rezultatom se je ponovno dodelila ovojnica, znotraj katere se nahajajo značilne oblike vzdolžnih profilov v Zgornjesavski dolini. V nadaljnjih raziskavah bi bilo smiselno povečati obseg raziskanih območij na različne klimatske in geološke razmere v Sloveniji in preveriti, ali sta omenjeni ovojnici primerni za vse hudournike in ali lokalne razmere bistveno vplivajo na njihovo uporabnost.

Na koncu se je analizirala še moč vodnega toka. Izkazalo se je, da je to spreminjanje odvisno od lokalnih razmer, zato ni mogoče določiti nekega trenda. Spremembe padca imajo bistveno večji vpliv na spreminjanje moči vodnega toka kot pa na spremembe v količini pretoka. V kolikor bi se v nadaljnjih raziskavah lahko določilo še širino hudournika, bi bil mogoč tudi izračun specifične moči vodnega toka, ki se pogosteje uporablja v obstoječih raziskavah.

**»Ta stran je namenoma prazna.«**

**»Ta stran je namenoma prazna.«**

## VIRI

### Uporabljeni viri

Abbe, T.B., Montgomery, D.R. 1996. Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regulated rivers: research and management* 12: 20–221.

[DOI: 10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199603\)12:2/3<201::AID-RRR390>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199603)12:2/3<201::AID-RRR390>3.0.CO;2-A)

Abrahams, A.D., Li, G., Atkinson, J.F. 1995. Step-pool streams: Adjustment to maximum flow resistance. *Water Resources Research* 31, 10: 2593–2602.

[DOI: 10.1029/95WR01957](https://doi.org/10.1029/95WR01957)

ARSO, Agencija Republike Slovenije za Okolje. 2014. Atlas okolja. Ljubljana, ARSO.

<http://gis.arso.gov.si/atlasokolja> (Pridobljeno 11. 12. 2014.)

Bagnold, R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics, Geological Survey professional paper 422–I. Washington, ZDA, U. S. Govt. Print. Off.: 37 str.

[https://www.uvm.edu/~wbowden/Teaching/Stream\\_Geomorph\\_Assess/Resources/Private/Documents/1966\\_Bagnold\\_river\\_sediments.pdf](https://www.uvm.edu/~wbowden/Teaching/Stream_Geomorph_Assess/Resources/Private/Documents/1966_Bagnold_river_sediments.pdf) (Pridobljeno 8. 2. 2015.)

Berk, S. 2008. Stari in novi državni horizontalni koordinatni sistem ter stara in nova državna kartografska projekcija. Ljubljana, Geodetski inštitut Slovenije: 10 str.

[http://www.gu.gov.si/fileadmin/gu.gov.si/pageuploads/ogs/Nova\\_drz\\_karto\\_projekcija.doc](http://www.gu.gov.si/fileadmin/gu.gov.si/pageuploads/ogs/Nova_drz_karto_projekcija.doc)

(Pridobljeno 11. 9. 2014.)

Bilby, R.E., Ward, J.W. 1989. Changes in characteristics and function of woody debris with increasing size of streams in western Washington. *Transactions of the American fisheries society* 118, 4: 368–378.

[DOI: 10.1577/1548-8659\(1989\)118<0368:CICAFO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1989)118<0368:CICAFO>2.3.CO;2)

Bilby, R.E., Ward, J.W. 1991. Characteristics and function of large woody debris in streams draining old-growth, clear-cut second-growth forests in Southwestern Washington. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 48, 12: 2499–2508.

[DOI: 10.1139/f91-291](https://doi.org/10.1139/f91-291)

Bisson, P.A., Bilby, R.E., Bryant, M.D., Dolloff, C.A., Grette, G.B., House, R.A., Murphy, M.L., Koski, K.V., Sedell, J.R. 1987. Large woody debris in forested streams in the Pacific Northwest: past, present, and future. *Streamside management forestry and fishery implications*. Washington, ZDA, University of Washington, Institute of forest resource,. Contribution 57: 143–190.

<http://andrewsforest.oregonstate.edu/pubs/pdf/pub1316.pdf> (Pridobljeno 15. 5. 2014.)

Bitenc, M. 2007. Analiza podatkov in izdelkov zračnega laserskega skeniranja na projektu Neusidler See. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Bitenc): 123 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/179/> (Pridobljeno 12. 12. 2014.)

Bunčič, G. 2014. Geografski potencial za male hidroelektrarne v Zgornjesavski dolini. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta (samozaložba G. Bunčič): 82 str.  
[http://geo.ff.uni-lj.si/pisnadela/pdfs/dipl\\_201405\\_gregor\\_buncic.pdf](http://geo.ff.uni-lj.si/pisnadela/pdfs/dipl_201405_gregor_buncic.pdf) (Pridobljeno 12. 12. 2014.)

Camenen, B. 2012. Discussion of »Understanding the influence of slope on the threshold of coarse grain motion: Revisiting critical stream power« by C. Parker, N.J. Clifford, and C.R. Thorne *Geomorphology*, Volume 126, March 2011, Pages 51–65. *Geomorphology* 139–140: 34–38.  
[DOI:10.1016/j.geomorph.2011.10.033](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.033)

Ceriani, M., Crosta, G., Frattini, P., Quattrini, S. 2000. Evaluation of hydrological hazard on alluvial fans. Tagungspublikation, Internationales Symposium 2000, Villach, Österreich. Villach, Avstrija, Interpraevent 2000, 2: 213–225.  
[http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload\\_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2000\\_2\\_213.pdf](http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2000_2_213.pdf) (Pridobljeno 8. 1. 2015.)

Chartrand, S.M., Whiting, P.J., 2000. Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step–pool topography. *Earth Surface Processes Landforms* 25, 6: 583–600.  
[DOI: 10.1002/1096-9837\(200006\)25:6<583::AID-ESP92>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200006)25:6<583::AID-ESP92>3.0.CO;2-3)

Chin, A. 1989. Step pools in stream channels. *Progress in Physical Geography* 13, 3: 391–407.  
[DOI:10.1177/030913338901300304](https://doi.org/10.1177/030913338901300304)

Chin, A. 1998. On the stability of step-pool mountain streams. *The Journal of Geology* 106, 1: 59–70.  
[DOI: 10.1086/516007](https://doi.org/10.1086/516007)

Chin, A. 1999. The morphologic structure of step-pools in mountain streams. *Geomorphology* 27, 3–4: 191–204.  
[DOI:10.1016/S0169-555X\(98\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00083-X)

Chin, A. 2002. The periodic nature of step-pool mountain streams. *American Journal of Science* 302, 2: 144–167.  
[DOI: 10.2475/ajs.302.2.144](https://doi.org/10.2475/ajs.302.2.144)

Chin, A. 2003. The geomorphic significance of step-pools in mountain streams. *Geomorphology* 55, 1–4: 125–137.  
[DOI: 10.1016/S0169-555X\(03\)00136-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00136-3)

Chin, A., Anderson, S., Collison, A., Ellis-Sugai, B.J., Haltiner, J.P., Hogervorst, J.B., Kondolf, G.M., O'Hirok, L.S., Purcell, A.H., Riley, A.L., Wohl, E. 2009. Linking theory and practice for restoration of step-pool streams. *Environmental Management* 43, 4: 645–661.  
[DOI: 10.1007/s00267-008-9171-x](https://doi.org/10.1007/s00267-008-9171-x)

Chin, A., Wohl, E.E. 2005. Toward a theory for step pools in streams channels. *Progress in Physical Geography* 29, 3: 275–296.  
[DOI: 10.1191/0309133305pp449ra](https://doi.org/10.1191/0309133305pp449ra)



Church, M. 1992. Channel morphology and typology. V: Calow, P. (ur.), Petts, G.E. (ur.), The Rivers handbook volume 1. Oxford, Blackwell scientific publications: 526 str.

[DOI: 10.1002/aqc.3270030208](https://doi.org/10.1002/aqc.3270030208)

Church, M. 2002. Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater Biology* 47: 541–557.

[http://palmerlab.umd.edu/restoration\\_course\\_docs/2008resources/Church\\_2002.pdf](http://palmerlab.umd.edu/restoration_course_docs/2008resources/Church_2002.pdf) (Pridobljeno 11. 2. 2015.)

Church, M., Zimmermann, A. 2007. Form and stability of step-pool channels: Research progress. *Water Resources Research* 43, 3: 21 str.

[DOI:10.1029/2006WR005037](https://doi.org/10.1029/2006WR005037)

Comiti, F., Andreoli, A. Lenzi, M.A. 2005. Morphological effects of local scouring in step-pool streams. *Earth Surface Processes and Landforms* 30, 12: 1567–1581.

[DOI: 10.1002/esp.1217](https://doi.org/10.1002/esp.1217)

Cooley, S.W. 2014. GIS 4 Geomorphology, Stream power notes.

<http://gis4geomorphology.com/stream-power-erosion/> (Pridobljeno 8. 2. 2015.)

Curran, J.H., Wohl, E.E. 2003. Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, Cascade Range, Washington. *Geomorphology* 51, 1–3: 141–157.

[DOI:10.1016/S0169-555X\(02\)00333-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00333-1)

Dietrich, W.E., Kirchner, J.W., Ikeda, H., Iseya, F. 1989. Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Nature* 340: 215–217. [DOI:10.1038/340215a0](https://doi.org/10.1038/340215a0)

Duckson, D.W., Jr., Duckson, L.J. 1995. Morphology of bedrock step-pool systems. *Water Resources Bulletin* 31, 1: 43–51.

[DOI: 10.1111/j.1752-1688.1995.tb03362.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb03362.x)

Eaton, B.C., Church, M.A. 2011. A rational sediment transport scaling relation based on dimensionless stream power. *Earth Surface Processes and Landforms* 36, 7: 901–910.

[DOI: 10.1002/esp.2120](https://doi.org/10.1002/esp.2120)

Ergenzinger, P. in Schmidt, K.H. 1990. Stochastic elements of bedload transport in a step-pool mountain river. V: Sinniger, R. (ur.) in Monbaron, M. (ur.). 1990. Hydrology in mountainous regions II, artificial reservoirs, water and slopes, Lausanne symposia, August 1990. Lausanne, Švica, IAHS, IAHS Publication 194: 39–46.

[http://www.researchgate.net/publication/255592948 Stochastic elements of bed load transport in a step-pool mountain river](http://www.researchgate.net/publication/255592948_Stochastic_elements_of_bed_load_transport_in_a_step-pool_mountain_river) (Pridobljeno 5. 11. 2014.)

ESRI<sup>©</sup>. 2012. ArcGIS Help 10.2. Redlands, ZDA, ESRI<sup>©</sup>.

<http://resources.arcgis.com/en/help/> (Pridobljeno 11. 9. 2014.)

ESRI<sup>©</sup>. 2013. Geografski informacijski sistem za delo s kartami in geografskimi informacijami: programsko orodje ArcGIS 10.2. Redlands, ZDA, ESRI<sup>©</sup>.

Fetherston, K.L., Naiman, R.J., Bilby, R.E. 1995. Large woody debris, physical process, and riparian forest development in montane river networks of the Pacific Northwest. *Geomorphology* 13, 1–4: 133–144.

[DOI:10.1016/0169-555X\(95\)00033-2](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00033-2)

Fonstad, M.A. 2003. Spatial variation in the power of mountain streams in the Sangre de Cristo Mountains, New Mexico. V: Butler, D.R. (ur.), Walsh, S.J.(ur.), Malanson, G.P. (ur.). 2003. *Mountain Geomorphology – Integrating Earth Systems*, Proceeding of the 32nd annual Binghamton symposium in geomorphology, 19th – 21nd October 2001. Amsterdam, Nizozemska, Elsevier B.V., *Geomorphology* 55, 1–4: 75–96.

[DOI:10.1016/S0169-555X\(03\)00133-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00133-8)

Franklin, J.F. 1982. Ecosystem studies in the Hoh River Drainage, Olympic National Park. V: Starkey, E.E. (ur.), Franklin, J.F. (ur.), Matthews, J.W. (ur.). *Ecological research in national parks of the Pacific Northwest*, Proceedings of second conference on scientific research in the national parks on November 1979. San Francisco, ZDA, USDA Forest Service: 8 str.

<http://lterdev.fsl.orst.edu/lter/pubs/pdf/pub111.pdf> (Pridobljeno 8. 9. 2014.)

Galia, T., Hradecký, J. 2012. Bedload transport and flow resistance in steep channels – introduction to the issues in the context of mountain basins of the Central European region. *AUC Geographica* 47, 1: 23–33.

[http://web.natur.cuni.cz/gis/aucg/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&download=95:toma-galia-jan-hradecky-bedload-transport-and-flow-resistance-in-steep-channels--introduction-to-the-issues-in-the-context-of-mountain-basins-of-the-central-european-region&id=14:issue-12012&Itemid=98](http://web.natur.cuni.cz/gis/aucg/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=95:toma-galia-jan-hradecky-bedload-transport-and-flow-resistance-in-steep-channels--introduction-to-the-issues-in-the-context-of-mountain-basins-of-the-central-european-region&id=14:issue-12012&Itemid=98) (Pridobljeno 16. 1. 2015.)

Gams, I. 1992. Prispevek k mladokvartarni geomorfologiji v Zgornjesavski dolini. *Geografski zbornik XXXII*: 49 str.

[URN:NBN:SI:DOC-XHDTQV8M](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:si:doc-xhdtqv8m)

Gavrilović, S. 1972. Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji. Časopis »Izgradnja,« specijalno izdanje. Beograd, Jugoslavija, Republički fond voda SR Srbije, Vodoprivredna organizacija »Beograd«, Institut za eroziju, melioracije i vodoprivredu bujičnih tokova pri Šumarskom fakultetu u Beogradu: 292 str.

Geološki zavod Slovenije (Geo ZS). 2006. Osnovna geološka karta. Ljubljana, Geo ZS.

<http://kalcedon.geo-zs.si/website/OGK100/viewer.htm> (Pridobljeno 5. 1. 2014.)

Gippel, C.J. 1995. Environmental hydraulic of large woody debris in streams and rivers. *Journal of Environmental Engineering* 121, 5: 388–395.

[DOI: 10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1995\)121:5\(388\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1995)121:5(388))

Grant, G.E. 1997. Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams. *Water Resources Research* 33, 2: 349–358.

[DOI:10.1029/96WR03134](https://doi.org/10.1029/96WR03134)

Grant, E.G., Mizuyama, T. 1991. Origin of step-pool sequences in high gradient streams: A flume experiment. Proceedings of the Japan–U.S. workshop on snow avalanche, landslide, debris flow prediction and control. Tskuba, Japonska, Organizing committee of the Japan–U.S. workshop on snow avalanche, landslide, debris flow prediction and control: 523–532.

[http://wpg.forestry.oregonstate.edu/sites/wpg/files/bibliopdfs/92\\_Grant%26Mizuyama.pdf](http://wpg.forestry.oregonstate.edu/sites/wpg/files/bibliopdfs/92_Grant%26Mizuyama.pdf)

(Pridobljeno 27. 4. 2014.)

Grant, E.G., Swanson, F.J., Wolman, M.G. 1990. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon. Geological Society of America Bulletin 102, 3: 330–352.

[DOI: 10.1130/0016-7606\(1990\)102<0340:PAOSB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1990)102<0340:PAOSB>2.3.CO;2)

Grodek, T., Inbar M., Schick, A.P. 1994. Step-pool geometry and flow characteristics in low-sediment storage channel beds. Hydraulic engineering – national conference 2: 819–823.

[https://getinfo.de/app/Step-Pool-Geometry-and-Flow-Characteristics-](https://getinfo.de/app/Step-Pool-Geometry-and-Flow-Characteristics-in/id/BLCP%3ACN011152260)

[in/id/BLCP%3ACN011152260](https://getinfo.de/app/Step-Pool-Geometry-and-Flow-Characteristics-in/id/BLCP%3ACN011152260) (Pridobljeno 27. 4. 2014.)

GURS, Geodetska uprava Republike Slovenije. 2011. Projekt »Lasersko skeniranje in aerofotografiranje 2011« za določitev poplavnih območij. Ljubljana, GURS: 4 str.

[http://www.gu.gov.si/fileadmin/gu.gov.si/pageuploads/novice/Teksti\\_novic/LIDAR\\_opis.pdf](http://www.gu.gov.si/fileadmin/gu.gov.si/pageuploads/novice/Teksti_novic/LIDAR_opis.pdf)

(Pridobljeno 15. 12. 2014.)

Grigillo, D. 2014. Magistrsko delo. Poslano: Mohorič, N. 15. 12. 2014. Osebna komunikacija.

Hack, J.T. 1957. Stream profiles in Virginia and Maryland, Geological survey professional paper 294 – B. Washington, ZDA, U. S. Govt. Print. Off.: 59 str.

<http://pubs.usgs.gov/pp/0294b/report.pdf> (Pridobljeno 11. 2. 2015.)

Harris, R.R. 1987. Occurrence of vegetation on geomorphic surfaces in the active floodplain of a California alluvial stream. American Midland Naturalist 118, 2: 393–405.

<http://www.jstor.org/stable/2425796> (Pridobljeno 20. 5. 2014.)

Hayward, J.A. 1980. Hydrology and stream sediments in a mountain catchment. New Zealand, Lincoln College. Tussock Grasslands and Mountain Lands Institute, Special Publication 17: 236 str.

[DOI: 10182/5664](https://doi.org/10.182/5664)

Howard, A.D. 1980. Thresholds in river regime. V: Coates, D.R. (ur.) in Vitek, J.D. (ur.). The Concept of Geomorphic Thresholds. Boston, ZDA, Allen and Unwin: 227–258.

<http://erode.evsc.virginia.edu/papers/papers.htm> (Pridobljeno 3. 2. 2015.)

Howard, A.D. 1998. Long profile development of bedrock channels: interaction of weathering, mass wasting, bed erosion and sediment transport. V: Tinkler, K.J. (ur.), Wohl, E.E. (ur.). Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels. American geophysical union, Geophysical Monograph 107: 297–319.

[DOI: 10.1029/GM107p0297](https://doi.org/10.1029/GM107p0297)

Hribar, A. 2009. Geomorfološka dediščina in varstvo narave. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hribar): 83 str.

Hribar, A. 2010. Vplivi vodarskih posegov na rečno morfologijo notranje Mure. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hribar): 108 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/id/eprint/284> (Pridobljeno 6. 1. 2015.)

Jež, J., Mikoš, M., Trajanova, M., Kumelj, Š., Budkovič, T., Bavec, M. 2008. Vršaj Koroška Bela – Rezultat katastrofičnih pobočnih dogodkov. *Geologija* 51, 2: 219–227.

<URN:NBN:SI:DOC-M9GUDCBF>

Jiménez, M.A., Wohl, E.E. 2013. Solute transport modeling using morphological parameters of step-pool reaches. *Water Resources Research* 49: 1345–1359.

<DOI: 10.1002/wrcr.20102>

Kaufmann, P.R. 1987. Channel morphology and hydraulic characteristics of torrent-impacted forest streams in the Oregon Coast Range, U.S.A. Doktorska disertacija. Corvallis, ZDA, Oregon State University, Department of Forest Engineering/Hydrology (samozaložba P.R. Kaufmann): 235 str.

<https://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/handle/1957/9681> (Pridobljeno 13. 5. 2014.)

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

<DOI:10.1016/j.geomorph.2007.10.007>

Keller, E.A., Melhorn, W.N. 1978. Rhythmic spacing and origin of pools and riffles. *Geological Society of America Bulletin* 89, 5: 723–730.

[DOI: 10.1130/0016-7606\(1978\)89<723:RSAOOP>2.0.CO;2](DOI: 10.1130/0016-7606(1978)89<723:RSAOOP>2.0.CO;2)

Knighton, A.D. 1999. Downstream variation in stream power. *Geomorphology* 29, 3–4: 293–306.

[DOI:10.1016/S0169-555X\(99\)00015-X](DOI:10.1016/S0169-555X(99)00015-X)

Lavtižar, J. 1897. Zgodovina župnij in zvonovi v dekaniji Radolica. Ljubljana (samozaložba J. Lavtižar): 148 str.

<URN:NBN:SI:DOC-K9BDCEL4>

Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P. 1964. *Fluvial processes in geomorphology*. San Francisco, ZDA, W.H. Freeman: 522 str.

[http://www.google.si/books?hl=sl&lr=lang\\_en%7Cclang\\_de&id=KXnCAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Leopold,+L.+B.,+Wolman,+M.+G.,+and+Miller,+J.+P.,+1964,+Fluvial+processes+in+geomorphology:&ots=FiTm0tNMIy&sig=7Jqnys8S22uVAq0gi1nJTdPPwjk&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](http://www.google.si/books?hl=sl&lr=lang_en%7Cclang_de&id=KXnCAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Leopold,+L.+B.,+Wolman,+M.+G.,+and+Miller,+J.+P.,+1964,+Fluvial+processes+in+geomorphology:&ots=FiTm0tNMIy&sig=7Jqnys8S22uVAq0gi1nJTdPPwjk&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) (Pridobljeno 9. 9. 2014.)

Lee, A.J., Ferguson, R.I. 2002. Velocity and flow resistance in step-pool streams. *Geomorphology* 46, 1–2: 59–71.

[DOI:10.1016/S0169-555X\(02\)00054-5](DOI:10.1016/S0169-555X(02)00054-5)

---

Lenzi, M.A. 2002. Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in Northern Italy. *Geomorphology* 45, 3–4: 243–260.

[DOI:10.1016/S0169-555X\(01\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00157-X)

Marchi, L., D'Agostino, V. 2004. Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 2: 207–220.

[DOI: 10.1002/esp.1027](https://doi.org/10.1002/esp.1027)

Marion, D.A., Weirich, F. 1999. Fine-grained bed patch response to near-bankfull flows in a step-pool channel. Proceedings, AWRA (American Water Resources Association) specialty conference: wildland hydrology in Bozeman, ZDA, June 30–July 2, 1999. Bozeman, ZDA, American Water Resources Association: 93–100.

<http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/viewpub.jsp?index=1103> (Pridobljeno 13. 5. 2014.)

Marston, A.M. 1982. The Geomorphic Significance of Log Steps in Forest Streams. *Annals of the Association of American Geographers* 72, 1: 99–108.

[DOI: 10.1111/j.1467-8306.1982.tb01386.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1982.tb01386.x)

Maxwell, A.R., Papanicolaou, A.N. 2001. Step-pool morphology in high-gradient streams. *International Journal of Sediment Research* 16, 3: 380–390.

<http://tpapanicolaou.engr.utk.edu/files/2013/01/step-pool.pdf> (Pridobljeno 27. 4. 2014.)

Meteo.si. 2015. Agencija Republike Slovenije za Okolje. Vreme podrobneje. Ljubljana.

<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/> (Pridobljeno 26. 1. 2015.)

Mikoš, M. 2007. Urejanje vodotokov, skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 200 str.

Mikoš, M. 2009. Osnove hudourništva, varstvo pred hudourniki in zemeljskimi plazovi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 217 str.

Miller, M.C., McCave, I.N., Komar, P.D. 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology* 24, 4: 507–527.

[DOI: 10.1111/j.1365-3091.1977.tb00136.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1977.tb00136.x)

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

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/id/eprint/3916> (Pridobljeno 5. 2. 2015.)

Montgomery, D.R., Abbe, T.B., Buffington, J.M., Peterson, N.P., Schmidt, K.M., Stock, J.D. 1996. Distribution of bedrock and alluvial channels in forested mountain drainage basins. *Nature* 381: 587–589.

[DOI: 10.1038/381587a0](https://doi.org/10.1038/381587a0)

Montgomery, D.R., Buffington, J.M. 1993. Channel classification, prediction of channel response, and assessment of channel condition. Olympia, ZDA, Washington State Department of Natural Resources, poročilo TFW-SH10-93-002: 84 str.

[http://www.capr.us/PDFs/workshop\\_2011/References/Fluvial%20Geomorphology/Channel\\_Report\\_1993.pdf](http://www.capr.us/PDFs/workshop_2011/References/Fluvial%20Geomorphology/Channel_Report_1993.pdf) (Pridobljeno 7. 7. 2014.)

Montgomery, D.R., Buffington, J.M., Smith, R.D., Schmidt, K.M., Pess, G. 1995. Pool spacing in forest channels. *Water Resources Research* 31, 4: 1097–1105.

[DOI: 10.1029/94WR03285](https://doi.org/10.1029/94WR03285)

Montgomery, D.R., Buffington, J.M. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin* 109, 5: 596–611.

[DOI: 10.1130/0016-7606\(1997\)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2)

Murphy, M.L. and Koski, K.V. 1989. Input and depletion of woody debris in Alaska streams and implications for streamside management. *North American Journal of Fisheries Management* 9, 4: 427–436.

[DOI: 10.1577/1548-8675\(1989\)009<0427:IADOWD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(1989)009<0427:IADOWD>2.3.CO;2)

NUPB ZON, Neuradno prečiščeno besedilo Zakona o ohranjanju narave. 1999. Uradni list RS, št. 96/04 - uradno prečiščeno besedilo, 61/06 – ZDru-1, 8/10 – ZSKZ-B in 46/14. Služba Vlade RS za zakonodajo: 86 str.

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1600> (Pridobljeno 6. 1. 2014.)

Okazaki, T., Gonda, Y., Nishii, Y., Kawabe, H. 2006. Characteristics of step-pool morphology in the mountain streams of Japan. Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides: proceedings of the Interpraevent international symposium Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides. Niigata, Japonska, Interpraevent 2006: 379–390.

[http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload\\_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2006\\_1\\_379.pdf](http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2006_1_379.pdf) (Pridobljeno 13. 1. 2014.)

Parker, C., Clifford, N.J., Thorne, C.R. 2011. Understanding the influence of slope on the threshold of coarse grain motion: Revisiting critical stream power. *Geomorphology* 126: 51–65.

[DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.10.027](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.027)

Parmenter, B., Melcher, J. 2010. Watershed and drainage delineation in ArcMap 9.3.1. Boston, ZDA, Tufts University: 12 str.

<https://wikis.uit.tufts.edu/confluence/download/attachments/38341714/Tutorial+2+-+Watershed+and+Drainage+Delineation+in+ArcMap.pdf?version=1> (Pridobljeno 11. 9. 2014.)

Podmenik, M. 2008. Primerjava digitalnih modelov reliefa pridobljenih z zračnim laserskim skeniranjem in digitalno fotogrametrijo na delu Krške kotline. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Podmenik): 82 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/510/> (Pridobljeno 11. 12. 2014.)

---

Podobnikar, T. 2001. Digitalni model reliefa iz geodetskih podatkov različne kakovosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Podobnikar): 343 str.

[http://www.geospace.si/Portals/6/Podobnikar\\_PhD\\_2001.pdf](http://www.geospace.si/Portals/6/Podobnikar_PhD_2001.pdf) (Pridobljeno 10. 2. 2015.)

Podobnikar, T. 2008. Nadgradnja modela reliefa Slovenije z visokokakovostnimi podatki. Geodetski vestnik 52, 4: 834–853.

[URN: nbn:si:doc-hlyk5ocz](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:si:doc-hlyk5ocz)

Reinfelds, I., Cohen, T., Batten, P., Brierley, C. 2004. Assessment of downstream trends in channel gradient, total and specific stream power: a GIS approach. *Geomorphology* 60, 3–4: 403–416.

[DOI: 10.1016/j.geomorph.2003.10.003](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.10.003)

Repnik, P. 2006. Prispevek k hidromorfološki tipizaciji slovenskih vodotokov. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Repnik): 105 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/id/eprint/892> (Pridobljeno 13. 11. 2014.)

Richmond, A.D., Fausch, K.D. 1995 Characteristics and function of large woody debris in subalpine Rocky Mountain streams in northern Colorado. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52, 8: 1789–1802.

[DOI: 10.1139/f95-771](https://doi.org/10.1139/f95-771)

Rickenmann, D. 1990. Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Doktorsko delo. Zurich, ETH Zurich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (samozaložba D. Rickenmann): 249 str.

[DOI: 10.3929/ethz-a-000555802](https://doi.org/10.3929/ethz-a-000555802)

Rickenmann, D. 1991. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering* 117, 11: 1419–1439.

[DOI: 10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:11\(1419\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:11(1419))

Rickenmann, D. 2001. Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Water resources research* 37, 12: 3295–3305.

[DOI: 10.1029/2001WR000319](https://doi.org/10.1029/2001WR000319)

Rickenmann, D., Chiari, M., Friedl, K. 2006. SETRAC – A sediment routing model for steep torrent channels. V: Ferreira, R. (ur.), Alves, E. (ur.), Leal, J. (ur.) in Cardoso, A. (ur.). *River flow: proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, Lisbon, Portugal, 6–8 September 2006. London, Anglija, Taylor & Francis: 843–852.

[DOI: 10.1201/9781439833865](https://doi.org/10.1201/9781439833865)

Rickenmann, D., Koschni, A. 2010. Sediment loads due to fluvial transport and debris flows during the 2005 flood events in Switzerland. *Hydrological processes* 24, 8: 993–1007.

[DOI: 10.1002/hyp.7536](https://doi.org/10.1002/hyp.7536)

---

Rihtaršič, M., Fras Z. 1991. Digitalni model reliefa. Del 1, Teoretične osnove in uporaba DMR. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 135 str.

Robison, E.G., Beschta, R.L. 1990. Identifying trees in riparian areas that can provide coarse woody debris to streams. *Forest Science* 36, 3: 790-801.

<http://www.ingentaconnect.com/content/saf/fs/1990/00000036/00000003/art00024> (Pridobljeno 27. 9. 2014.)

Rudolf-Miklau, F., Hübl, J., Rauch, H.P., Habersack, H., Kogeling, A., Schulev-Steindl, E. 2011. Handbuch Wildholz – Praxisleitfaden. Klagenfurt, Avstrija, Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent: 32 str.

Rudolf-Miklau, F., Hübl, J. 2010. Managing risk related to drift wood (woody debris). *Interpraevent* 2010: 868–878.

[http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload\\_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2010\\_868.pdf](http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2010_868.pdf) (Pridobljeno 27. 1. 2014.)

Shields, A. 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Berlin, Nemčija, Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau 26: 26 str.  
[UUID: 61a19716-a994-4942-9906-f680eb9952d6](https://www.ingentaconnect.com/uid/61a19716-a994-4942-9906-f680eb9952d6)

Sigafoos, R.S., 1964. Botanical evidence of floods and flood plain deposition. U.S. Geological Survey Professional Paper 485-A: 35 str.

<http://pubs.usgs.gov/pp/0485a/report.pdf> (Pridobljeno 20. 5. 2014.)

Sinergise, d. o. o. 2011. WMS FGG, Slovenija. Ljubljana, Sinergise, d. o. o.

<http://services.geopedia.si/wms> (Pridobljeno 26. 7. 2014.)

Skroza, A. 2011. Ovrednotenje hidroenergetskega potenciala ob upoštevanju okoljskih ciljev na pohorskih vodotokih. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Skroza): 76 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/id/eprint/1813> (Pridobljeno 20. 1. 2014.)

Snoj, M., 1997. Slovenski etimološki slovar, 1. izdaja. Ljubljana. Mladinska knjiga (Zbirka Cicero): 900 str.

Sodnik, J. 2009. Matematično modeliranje drobirskih tokov in priprava podrobnih kart nevarnosti. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Sodnik): 218 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/761/> (Pridobljeno 16. 12. 2014.)

Sodnik, J., Mikoš, M. 2005. Ocenjevanje magnitud drobirskih tokov. Kozmus Trajkovski, K. (ur.), Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2005: zbornik predavanj. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 75–87.

[http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2006/SZGG2006\\_Sodnik\\_Mikos.pdf](http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2006/SZGG2006_Sodnik_Mikos.pdf) (Pridobljeno 15. 12. 2014.)



Sodnik, J., Mikoš, M. 2006. Ocena magnitud drobirskih tokov v izbranih hudourniških območjih v Sloveniji. *Acta Geographica Slovenica, Geografski zbornik* 46, 1: 93–123.

[DOI: 10.3986/AGS46104](https://doi.org/10.3986/AGS46104)

Sodnik, J., Petje, U., Mikoš, M. 2009. Topografija površja in modeliranje gibanja drobirskih tokov. *Geodetski vestnik* 53, 2: 291–304.

[URN:NBN:SI:DOC-0DUNECZF](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:si:doc-0duneczf)

Sodnik, J., Vrečko, A., Podobnikar, T., Mikoš, M. 2012. Digitalni modeli reliefa in matematično modeliranje drobirskih tokov. *Geodetski vestnik* 56, 4: 826–837.

[URN:NBN:SI:doc-I8THSBCK](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:si:doc-i8thsbck)

Steinblums, I., Froelich, H.A., Lyons, J.K. 1984. Designing stable buffer strips for stream protection. *Journal of Forestry* 82, 1: 49–52.

<http://www.ingentaconnect.com/content/saf/jof/1984/00000082/00000001/art00013> (Pridobljeno 27. 5. 2014.)

Šantl, S., Mrak, S., Kozelj, D. 2010. Načrtovanje hidroenergetske rabe voda – večkriterijska analiza. Maribor, Mišičev vodarski dan 2010, Gradnja hidroenergetskih objektov v Sloveniji: 53–60 str.

<http://www.mvd20.com/LETO2010/R9.pdf> (Pridobljeno 12. 1. 2015.)

Šantl, S., Alterach, J., Kozelj, D. 2012. Razvoj informacijskega orodja za ugotavljanje učinkovitega hidroenergetskega potenciala. *Acta hydrotechnica* 25, 42: 19–30 str.

[ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a42ss.pdf](http://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a42ss.pdf) (Pridobljeno 12. 1. 2015.)

Tinkler, K., Wohl, E.E. 1998. A primer on bedrock channels. V: Tinkler, K.J. (ur.), Wohl, E.E. (ur.). *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*. Washington, ZDA, American geophysical union, Geophysical monograph 107: 1–18.

[DOI: 10.1029/GM107p0001](https://doi.org/10.1029/GM107p0001)

Trobec, T. 2007. Hidrogeografske metode ocenjevanja nemerjenih pretokov v Sloveniji. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta (samozaložba T. Trobec): 87 str.

[http://geo.ff.uni-lj.si/pisnadela/pdfs/dipl\\_200710\\_tajan\\_trobec.pdf](http://geo.ff.uni-lj.si/pisnadela/pdfs/dipl_200710_tajan_trobec.pdf) (Pridobljeno 13. 12. 2014.)

UZNV, Uredba o zvrsteh naravnih vrednot. 2002. Uradni list RS, št. 52/02. Služba vlade RS za zakonodajo: 6 str.

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED2354> (Pridobljeno 6. 1. 2014.)

Uredba o spremembah in dopolnitvah uredbe o zvrsteh naravnih vrednot. 2003. Uradni list RS, št. 67/03. Služba vlade RS za zakonodajo: 6 str.

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED2354> (Pridobljeno 6. 1. 2014.)

Walker, L.A., Zasada, J.C. Chapin, F.S. III. 1986. The role of life history processes in primary succession on an Alaskan floodplain. *Ecology*, 67, 5: 1243–1253.

[DOI: 10.2307/1938680](https://doi.org/10.2307/1938680)

---

Warburton, J. 1992. Observations of bed load transport and channel bed changes in a proglacial mountain stream. *Arctic and Alpine Research* 24, 3: 195–203.

[DOI: 10.2307/1551657](https://doi.org/10.2307/1551657)

Wilcox, A.C., Wohl, E.E. 2006. Flow resistance dynamics in step-pool stream channels: 1. Large woody debris and controls on total resistance. *Water Resources Research* 42, 5: 16 str.

[DOI:10.1029/2005WR004277](https://doi.org/10.1029/2005WR004277)

Wohl, E.E. 1998. Bedrock channel morphology in relation to erosional processes. V: Tinkler, K.J. (ur.), Wohl, E.E. (ur.). *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*. Washington, ZDA, American geophysical union, Geophysical monograph 107: 133–151.

[DOI: 10.1029/GM107p0133](https://doi.org/10.1029/GM107p0133)

Wohl, E.E. 2000a. Substrate influences of step-pool sequences in the Christopher Creek drainage, Arizona. *The Journal of Geology*: 108, 1: 121–129.

[DOI:10.1086/314385](https://doi.org/10.1086/314385)

Wohl, E.E. 2000b. *Mountain rivers*, Water resources monograph 14. Washington, ZDA, American Geophysical Union: 320 str.

[DOI: 10.1029/WM014](https://doi.org/10.1029/WM014)

Wohl, E.E., Grodek, T. 1994. Channel bed-steps along Nahal Yael, Negev Desert, Israel. *Geomorphology* 9, 2: 117–126.

[DOI: 10.1016/0169-555X\(94\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90070-1)

Wohl, E.E., Madsen, S., MacDonald, L. 1997. Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana, USA. *Geomorphology* 20, 1–2: 1–10.

[DOI:10.1016/S0169-555X\(97\)00021-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00021-4)

Wohl, E.E., Thompson, D. M. 2000. Velocity characteristics along a small step-pool channel. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 4: 353–367.

[DOI: 10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200004\)25:4<353::AID-ESP59>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200004)25:4<353::AID-ESP59>3.0.CO;2-5)

Wohl, E.E., Wilcox, A. 2005. Channel geometry of mountain streams in New Zealand. *Journal of Hydrology* 300, 1–4: 252–266.

[DOI:10.1016/j.jhydrol.2004.06.006](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.006)

Yochum, S., Bledsoe, B. 2010. Flow resistance estimation in high-gradient streams. 4. federal interagency conference on sedimentation and hydrologic modeling in Las Vegas, ZDA, June 27–July 1, 2010. Las Vegas, ZDA, U. S. Geological Survey: 12 str.

[http://www.engr.colostate.edu/~bbledsoe/pubs/2010/Yochum\\_Bledsoe\\_2010.pdf](http://www.engr.colostate.edu/~bbledsoe/pubs/2010/Yochum_Bledsoe_2010.pdf) (Pridobljeno 15. 5. 2014.)

Zimmermann, A., Church, M. 2001. Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel. *Geomorphology* 2001, 40, 3–4: 311–327.

[DOI: 10.1016/S0169-555X\(01\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00057-5)

---

### **Ostali viri**

Mikoš, M. 2014. Primerni prevodi izrazov iz angleške literature. Poslano: Mohorič, N. 19. 9. 2014. Osebna komunikacija.

Mikoš, M., Krajnc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2002. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. Acta hydrotechnica 20, 32: 325 str.  
<http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/acta/> (Pridobljeno 14. 8. 2014.)

NUPB ZV-1, Neuradno prečiščeno besedilo Zakona o vodah. 2002. Uradni list RS, št. 67/02, 2/04 - ZZdrI-A, 41/04 - ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13 in 40/14). Služba Vlade RS za zakonodajo: 106 str.  
<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1244> (Pridobljeno 3. 4. 2014.)

SAZU, Slovenska akademija znanosti in umetnosti. 2000. Slovar slovenskega knjižnega jezika (Elektronski vir). Ljubljana, Slovenska akademija znanosti in umetnosti in Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU, elektronska knjigarna – Ljubljana: Založba ZRC.  
<http://bos.zrc-sazu.si/skj.html> (Pridobljeno 9. 12. 2014.)