



Kandidatka:

MAJA KOPRIVŠEK, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.

**VPLIV RAZLIČNIH VRST SUBSTRATA NA
STRUKTURO HITROSTI VODNEGA TOKA
TER NJEN VPLIV NA BIOCENOZO NA PRIMERU
POTOKA GLINŠČICA**

Magistrsko delo štev.: 220

**THE INFLUENCE OF DIFFERENT TYPES OF
SUBSTRATE ON THE STREAM VELOCITY
STRUCTURE AND ITS IMPACT ON BIOCEENOSIS OF
THE GLINŠČICA STREAM**

Master of Science Thesis No.: 220

Mentor:

prof. dr. Mitja Brilly

Predsednik komisije:

prof. dr. Matjaž Mikoš

Somentor:

prof. dr. Mihael J. Toman, UL BF

Član:

prof. dr. Boris Kompare

prof. dr. Alenka Gaberščik, UL BF

Ljubljana, 13. julij 2011

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
63	16	1 m/s	0,1 m/s

IZJAVE

Podpisana Maja Koprivšek izjavljam, da sem avtorica magistrskega dela z naslovom »Vpliv različnih vrst substrata na strukturo hitrosti vodnega toka ter njen vpliv na biocenozo na primeru potoka Glinščica«.

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

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

Ljubljana, 13. 7. 2011

Maja Koprivšek

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 556.51:627.152.152Glinščica:(043.3)
Avtor: Maja Koprivšek
Mentor: prof. dr. Mitja Brilly
Somentor: prof. dr. Mihael Jožef Toman
Naslov: Vpliv različnih vrst substrata na strukturo hitrosti vodnega toka ter njen vpliv na biocenozo na primeru potoka Glinščica
Obseg in oprema: 108 str., 3 pregl., 74 sl., 2 pril.
Ključne besede: hitrost vodnega toka, vertikalni profili, vrste substrata, morfološka spremenjenost struge, makroinvertebrati, perifiton

Izvleček

V magistrski nalogi obravnavamo vpliv različnih vrst substrata in morfološke spremenjenosti struge na strukturo hitrosti vodnega toka. Poudarek je na merjenju hitrosti vodnega toka tik ob dnu, kjer živi večina vodnih organizmov, predvsem makroinvertebratov. Predstavljene so meritve hitrosti vodnega toka nad različnimi vrstami substrata, ki smo jih izvajali na potoku Glinščica v Ljubljani poleti 2010. Uporabljali smo Dopplerjev merilnik pretočnih hitrosti FlowTracker Handheld ADV proizvajalca SonTek. V rezultatih pri različnih vodostajih primerjamo vertikalne profile hitrosti po širini prečnih prereзов nad različnimi naravnimi substrati in umetnim substratom. Na morfološko različnih odsekih struge primerjamo še gostoto turbulentne kinetične energije. Ocenjen je tudi vpliv življenjskih združb na hitrosti vodnega toka in vpliv vodnega toka na organizme.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 556.51:627.152.152Glinščica:(043.3)
Author: Maja Koprivšek
Supervisor: Prof. Mitja Brilly, Ph. D.
Cosupervisor: Prof. Mihael Jožef Toman, Ph. D.
Title: The influence of different types of substrate on the stream velocity structure and its impact on biocenosis of the Glinščica stream
Scope and tools: 108 p., 3 tab., 74 fig., 2 ann.
Keywords: flow velocity, vertical profiles, types of substrate, morphological changes of stream, macroinvertebrates, periphyton

Abstract

In the master's thesis we discuss the influence of different types of substrate and morphological changes of riverbed on the stream velocity structure. The emphasis is on velocity measurements close to the riverbed, where the most of water organisms, especially macroinvertebrates, actually live. The measurements of flow velocities above different substrates in the Glinščica stream, carried out in the summer 2010, are presented. The instrument used for velocity measurements was acoustic Doppler velocimeter FlowTracker Handheld ADV. In the results, we compare vertical velocity profiles across the river cross-section, the velocity profiles above different natural substrates or above the concrete channel and the velocity profiles at the same point at different water stages. We also compare turbulent kinetic energy density on morphologically different stream reaches. Furthermore, we estimate the influence of biocenosis on water velocities and vice versa.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju podiplomskega študija in somentorju, prof. dr. Mihaelu Jožefu Tomanu, za idejo, izbor merilnih mest in številne koristne napotke. Prav tako se za številne koristne napotke zahvaljujem mentorju, prof. dr. Mitji Brillyju. Prof. dr. Alenki Gaberščik in prof. dr. Borisu Kompare se zahvaljujem za temeljit pregled naloge.

Za pomoč in družbo pri terenskem delu se zahvaljujem dr. Sašu Petanu, mag. Anji Horvat, Toniju Čotarju in Maruši Špitalar, za številne nasvete pa dr. Simonu Rusjanu in mag. Andreju Vidmarju.

Za pregled angleškega besedila se zahvaljujem Mojci Vilfan.

Vsem sodelavcem se zahvaljujem za vzpodbudo in prijetno vzdušje.

Za prevoze na teren, vsestransko pomoč na terenu in za računalnikom, predvsem pa neizmerno potrpežljivost se najlepše zahvaljujem mojemu Petru, mojim domačim pa za vsesplošno podporo in razumevanje.

KAZALO

1	UVOD	1
2	TEORETIČNA IZHODIŠČA.....	3
2.1	Hidrološke značilnosti vodotoka	3
2.2	Fluktuacije hitrosti in razvoj turbulence	6
2.3	Vodotok kot življenjski prostor organizmom	16
2.4	Vpliv vodnega toka na organizme	17
2.4.1	Razporeditev organizmov	19
2.4.2	Pridobivanje virov	20
2.4.3	Vpliv na odnose med organizmi	20
2.5	Prilagoditve organizmov na vodni tok.....	21
2.6	Vpliv vodnih organizmov na vodni tok	23
3	METODOLOGIJA.....	25
3.1	Meritve hitrosti	25
3.2	Meritve pretoka.....	27
3.3	Določevanje suhe mase snovi obrasti	27
4	MERILNA MESTA.....	28
4.1	Glinščica in njeno porečje	28
4.2	Merilno mesto GL1.....	31
4.3	Merilno mesto GL2.....	32
4.4	Merilno mesto GL3.....	33
4.5	Merilno mesto GL4.....	33
4.6	Merilno mesto GL5.....	35
4.7	Merilno mesto GL6.....	36
5	REZULTATI.....	37
5.1	Hitrostne razmere po vertikalah na betonskem odseku z »naravno« razporejenimi kamni na merilnem mestu GL1	37
5.2	Primerjava povprečnih hitrosti in hitrosti ob dnu nad nezaraščenim in nad zaraščenim betonskim koritom na merilnem mestu GL2	38
5.3	Vpliv objekta na vertikalni profil hitrosti v matici struge nezaraščenega betonskega korita na merilnem mestu GL2	45
5.4	Tok vode okrog dveh gruč kamenja na merilnem mestu GL3.....	49
5.5	Primerjava vertikalnih profilov hitrosti nad naravnim substratom in nad betonskim koritom na merilnem mestu GL4	55
5.6	Vertikalni profili hitrosti na vzorčnem mestu GL5, zaraščenem z rmancem	60
5.7	Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom in brzico na merilnem mestu GL6	65
5.8	Spreminjanje hitrosti v odvisnosti od pretoka	70
5.9	Primerjava pretočne krivulje med nezaraščenim in zaraščenim prerezo nad betonsko strugo	73
5.10	Primerjava hitrosti ob dnu in debeline laminarne mejne podplasti med naravnim in umetnim substratom.....	75
5.11	Vpliv različnih morfoloških oblik na povprečne hitrosti vertikale ter na hitrosti pri dnu	78
5.12	Gostota turbulentne kinetične energije (TKE).....	81
6	BIOLOŠKE RAZISKAVE	84
6.1	Makroinvertebratska združba na potoku Glinščica	85
6.2	Perifitonska združba na potoku Glinščica	87
7	DISKUSIJA	90
7.1	Vpliv morfološke spremenjenosti struge na hitrosti pri dnu in na 6/10 globine.....	90

7.2	Vpliv obraščenosti struge na hitrost vodnega toka.....	93
7.3	Tok okrog ovire	94
7.4	Težave pri meritvah.....	95
7.5	Vpliv hitrosti na perifitonsko združbo.....	96
7.6	Vpliv hitrosti na združbo makroinvertebratov	96
8	ZAKLJUČKI	98
9	POVZETEK.....	100
10	SUMMARY.....	102
VIRI		104
Uporabljeni viri		104
Ostali viri.....		107

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 5.1: Poimenovanje prečnih prerezov pri analizi vpliva morfologije.....	78
Preglednica 5.2: Velikosti pretoka ob različnih merjenjih	78
Preglednica 6.1: Število vrst v vzorcih, zajetih na različnih vzorčnih mestih (Štendler, 2007)	88

INDEX OF TABLES

Table 5.1: List of cross-sections for the analysis of the morphologic impact.....	78
Table 5.2: List of flow discharges at different measurements.....	78
Table 6.1: Number of species on different sampling sites (Štendler, 2007)	88

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Porazdelitve hitrosti: (a) vertikalna porazdelitev hitrosti; (b) porazdelitev hitrosti po prečnem prerezu struge; (c) porazdelitev hitrosti okrog večjega kamna v strugi (Giller in Malmqvist, 2005: str 58).....	3
Slika 2.2: Merjenje hitrosti 2 mm od dna (prodnika) v naravnem vodotoku z merilnikom hitrosti z vročim filmom (Hart in Finelli, 1999: str 378).....	7
Slika 2.3: Izmenjevanje hitrih in počasnih con (Yalin, 1992: str. 31).....	8
Slika 2.4: Nastanek vrtnca (Yalin, 1992: str. 32).....	9
Slika 2.5: Nastanek vrtnca (Yalin, 1992: str. 33).....	10
Slika 2.6: Širjenje vrtncev v različnih vrstah turbulentnega toka: (a) tok vode v odprtem kanalu; (b) mešanje različnih tekočin; (c) dim iz dimnika (Yalin, 1992: str. 37).....	11
Slika 2.7: Viskozna podplast (Yalin, 1992: str. 43).....	12
Slika 2.8: Zaporedje izbruhov (Yalin, 1992: str. 45); slika c (Klaven, 1966).....	13
Slika 2.9: Shematična ponazoritev splošne strukture turbulence na hidravlično hrapavi podlagi (Kirkbride, 1993: str. 189).....	14
Slika 2.10: (a) Konvekcija zunanjega toka; (b) pobeg vrtncev v cono z nižjim tlakom; (c) odcepitev vrtncev in naval vode iz zunanje cone v izprazen prostor (Kirkbride, 1993: str. 191).....	15
Slika 2.11: (a) Zatišje pred zunanjim tokom; (b) raztezanje vrtnca; (c) odcepitev vrtnca in naval vode iz zunanje cone v izprazen prostor (Kirkbride, 1993: str. 192).....	16
Slika 2.12: Vzorci toka blizu dna in vodnih organizmov: (a) profil rečnega dna; (b) kratkoročno variiranje hitrosti 2 mm od prodnika, usidranega v posteljico dna; (c) povprečna hitrost in standardna deviacija na različnih višinah nad najvišjo točko ukrivljenega dna; (d) črte, ki povezujejo točke z enako hitrostjo, nad ukrivljenim delom dna; (e-f) črte, ki povezujejo točke z enako hitrostjo, nad dvema različnima vrstama ličink moljarice; (g) črte, ki povezujejo točke z enako hitrostjo, nad ličinko enodnevnice (Statzner, 2008: str. 601).....	21
Slika 2.13: Ličinki dveh vrst enodnevnice za prehranjevanje izkoriščata vrtnce, ki nastajajo v jamicah v substratu (Vogel, 1994: str 220).....	22
Slika 4.1: Kategorizacija urejenosti vodotoka Glinščice (ARSO).....	28
Slika 4.2: Položaj merilnih mest.....	30
Slika 4.3: Prečni prerez Glinščice na odseku z betonskim koritom (Brilly in sod., 2006: str 1093).....	31
Slika 4.4: Merilno mesto GL1.....	31
Slika 4.5: Merilno mesto GL2: nezaraščen prerez ob nizkem vodostaju (levo), zaraščen prerez ob nizkem vodostaju (sredina), nezaraščen prerez ob visokem vodostaju (desno).....	32
Slika 4.6: Merilno mesto GL3 ob zelo nizkem vodostaju (levo) in ob višjem vodostaju (desno).....	33
Slika 4.7: Merilno mesto GL4: ob nizkem vodostaju (levo zgoraj), ob visokem vodostaju (desno zgoraj), seminaraven substrat (levo spodaj), umeten substrat (desno spodaj).....	34
Slika 4.8: Merilno mesto GL 5: ob nizkem vodostaju (levo), ob visokem vodostaju (desno).....	35
Slika 4.9: Merilno mesto GL6: ob visokem vodostaju (levo), brzica ob visokem vodostaju (sredina), brzica ob nizkem vodostaju (desno).....	36
Slika 5.1: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti pred in za kamnom ob desnem bregu struge, v matici toka ter ob levem bregu ob različnih vodostajih.....	38
Slika 5.2: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 6,5 cm.....	39
Slika 5.3: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 9,5 cm.....	40
Slika 5.4: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 18 cm (masa vzorca alg na zaraščenem delu: 2,4 g).....	41
Slika 5.5: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 18 cm (masa alg na zaraščenem delu: 1,1 g).....	42
Slika 5.6: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 35 cm.....	43
Slika 5.7: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 47 cm.....	44

Slika 5.8: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 59 cm	45
Slika 5.9: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v matici toka v odvisnosti od vodostaja	46
Slika 5.10: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v matici toka v odvisnosti od vodostaja pred kamnom.....	47
Slika 5.11: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v matici toka v odvisnosti od vodostaja za kamnom	47
Slika 5.12: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v matici toka brez ovire ter pred in za njo ob različnih vodostajih (višina kamna je v prvih treh primerih 10 cm, v zadnjem pa 14 cm)	48
Slika 5.13: Skica prečnih prerezov in merilnih točk na merilnem mestu GL3	50
Slika 5.14: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) smeri na treh točkah (ob desnem bregu struge, v matici toka ter ob levem bregu) in na treh prečnih prerezih ob vodostaju 7 cm	51
Slika 5.15: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) smeri na treh točkah (ob desnem bregu struge, v matici toka ter ob levem bregu) in na treh prečnih prerezih ob vodostaju 20 cm.....	53
Slika 5.16: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) smeri na treh točkah (ob desnem bregu struge, v matici toka ter ob levem bregu) in na treh prečnih prerezih ob vodostaju 37 cm.....	54
Slika 5.17: Primerjava hitrosti na prečnem prerezu preko seminaravnega substrata (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 27 cm nad naravnim substratom in 18,5 cm nad betonskim koritom	56
Slika 5.18: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti nad seminaravnim substratom (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 27 cm nad naravnim substratom in 18,5 cm nad betonskim koritom	57
Slika 5.19: Primerjava hitrosti na prečnem prerezu preko naravnega substrata (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 38 cm nad naravnim substratom in 30 cm nad betonskim koritom	58
Slika 5.20: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti nad naravnim substratom (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 38 cm nad naravnim substratom in 30 cm nad betonskim koritom	58
Slika 5.21: Primerjava hitrosti na prečnem prerezu preko naravnega substrata (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 50 cm nad naravnim substratom in 48 cm nad betonskim koritom	59
Slika 5.22: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti nad naravnim substratom (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 50 cm nad naravnim substratom in 48 cm nad betonskim koritom	59
Slika 5.23: Skica položaja merilnih točk na merilnem mestu GL5	60
Slika 5.24: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) na različnih točkah okrog rmanca ob vodostaju 36 cm (1 - med desnim bregom in rmancem, 3 - tik za rmancem dolvodno, 6 - med rmancem, 7 - matica toka ob rmancu).....	62
Slika 5.25: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) na različnih točkah okrog rmanca ob vodostaju 48 cm (1 - med desnim bregom in rmancem, 3 - tik za rmancem dolvodno, 6 - med rmancem, 7 - matica toka ob rmancu).....	63
Slika 5.26: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) na različnih točkah okrog rmanca ob vodostaju 71 cm (1 - med desnim bregom in rmancem, 2 - dolvodno od rmanca, 4 - gorvodno ni rmanca, 6 - med rmancem, 8 - matica toka preko rmanca).....	64
Slika 5.27: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) na različnih točkah okrog rmanca ob vodostaju 78 cm (3 - tik za rmancem dolvodno, 6 - med rmancem, 7 - ob rmancu, 9 - gorvodno od rmanca)	65
Slika 5.28: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom (levo) in brzico (desno) pri vodostaju 14 cm v tolmunu in 6 cm na brzici	66
Slika 5.29: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom (levo) in brzico (desno) pri vodostaju 17 cm v tolmunu in 8 cm na brzici	66
Slika 5.30: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom (levo) in brzico (desno) pri vodostaju 21 cm v tolmunu in 14 cm na brzici	67
Slika 5.31: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom (levo) in brzico (desno) pri vodostaju 36 cm v tolmunu in 30 cm na brzici	68

Slika 5.32: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom (levo) in brzico (desno) pri vodostaju 52 cm v tolmunu in 44 cm na brzici.....	68
Slika 5.33: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti na sredini prereza v tolmunu v odvisnosti od vodostaja.....	69
Slika 5.34: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti na sredini prereza na brzici v odvisnosti od vodostaja.....	70
Slika 5.35: Povprečna hitrost v odvisnosti od pretoka na delu struge z betonskim koritom.....	71
Slika 5.36: Hitrost ob dnu v odvisnosti od pretoka na delu struge z betonskim koritom (Hitrosti pri manjših treh pretokih so merjene na oddaljenosti 0,5 cm od dna, hitrosti pri večjih treh pretokih pa na oddaljenosti 1,6 cm od dna.).....	72
Slika 5.37: Primerjava povprečnih hitrosti v odvisnosti od vodostaja na nezaraščenem in zaraščenem delu betonskega korita.....	73
Slika 5.38: Primerjava pretočnih krivulj med prerezoma nad golo in zaraščeno betonsko strugo.....	74
Slika 5.39: Primerjava največje hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna pri različnih vodostajih.....	75
Slika 5.40: Primerjava največje hitrosti na 6/10 globine pri različnih vodostajih.....	76
Slika 5.41: Ocena debeline laminarne mejne podplasti.....	77
Slika 5.42: Primerjava največjih hitrosti na 6/10 globine na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih.....	79
Slika 5.43: Primerjava največjih hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih.....	80
Slika 5.44: Primerjava turbulentne kinetične energije na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih.....	82
Slika 6.1: Vzorčna mesta bioloških raziskav (Geopedia).....	84
Slika 6.2: Število osebkov makroinvertebratske združbe na kvadratni meter na 6 vzorčnih mestih od maja 2005 do marca 2006 (Kereži, 2007)	85
Slika 6.3: Vrednosti Shannon – Wienerjevega diverzitetnega indeksa (H') na 6 vzorčnih mestih v obdobju od maja 2005 do marca 2006 (Kereži, 2007)	86
Slika 6.4: Spreminjanje vrednosti saprobnega indeksa na 6 vzorčnih mestih v obdobju od maja 2005 do marca 2006 (Kereži, 2007)	86
Slika 7.1: Razpored nizov maksimalnih hitrosti prečnega prereza na 6/10 globine.....	90
Slika 7.2: Razpored nizov maksimalnih hitrosti prečnega prereza na oddaljenosti 1,6 cm od dna.....	91
Slika 7.3: Razmerje med povprečno hitrostjo vodnega stolpca in hitrostjo pri dnu.....	92
Slika 7.4: Razpored nizov merjenja hitrosti po vrednosti TKE na 6/10 globine	92

INDEX OF FIGURES

Figure 2.1: Velocity distributions: (a)vertical velocity distributions; (b)velocity distribution across a river cross-section; (c) velocity distribution around a larger stone on a riverbed (Giller and Malmqvist, 2005: str 58)	3
Figure 2.2: Velocity measurements 2 mm above river bed (gravel) in a natural stream using hot film anemometer (Hart and Finelli, 1999: str 378)	7
Figure 2.3: Exchanging of fast and slow flow zones (Yalin, 1992: p. 31)).....	8
Figure 2.4: Formation of vortex (Yalin, 1992: p. 32).....	9
Figure 2.5: Formation of vortex (Yalin, 1992: p.33).....	10
Figure 2.6: The growth of eddies in three different turbulent flows: (a) open-channel flow of water; (b) mixing layer of two liquids; (c) circular jet flow of a gas (Yalin, 1992: p. 37)	11
Figure 2.7: Viscous sublayer (Yalin, 1992: p. 43)	12
Figure 2.8: Sequence of bursts (Yalin, 1992: p. 45); figure c (Klaven, 1966)	13
Figure 2.9: Schematic illustration of general turbulence structure over hydraulically rough river bed (Kirkbride, 1993: p. 189).....	14
Figure 2.10: (a) Convection of outer flow; (b) vortices ejection into a low pressure zone; (c) separation of vortices and rush of water from outer zone into an empty space (Kirkbride, 1993: p. 191).....	15
Figure 2.11: (a) Lull before an outer flow; (b) distension of vortex; (c) separation of vortex and rush of water from outer zone into an empty space (Kirkbride, 1993: p.1921)	16
Figure 2.12: Flow patterns near the stream bottom and near benthic stream invertebrates: (a) profile of a stream bottom; (b) short-term velocity variation measured 2 mm above the surface of a natural stone; (c) mean and standard deviation of the velocity at different height above the highest point of the curved bottom; (d) profile of the curved bottom and isovels; (e-f) isovel pattern over two caddisflies: <i>Micrasema</i> (e) and <i>Silo</i> (f); (g) isovel pattern over a dorsoventrally flattened mayfly (<i>Ecdyonurus</i>) (Statzner, 2008: p. 601)	21
Figure 2.13: Two mayfly larvae that take advantage of the upstream part of a horseshoe vortex (Vogel, 1994: str 220)	22
Figure 4.1: Categorization of the Glinščica stream (ARSO).....	28
Figure 4.2: Position of the measuring sites	30
Figure 4.3: Cross-section over the river reach with a concrete channel (Brilly et. al., 2006: str 1093)	31
Figure 4.4: Measuring site GL1	31
Figure 4.5: Measurement site GL2: pure cross-section at low water level (left), overgrown cross-section at low water level (center), pure cross-section at high water level (right)	32
Figure 4.6: Measuring site GL3 at very low water level (left) and at higher water level (right)	33
Figure 4.7: Measuring site GL4: at low water level (left above), at high water level (right above), semi-natural substrate (left below), artificial substrate (right below)	34
Figure 4.8: Measuring site GL5: at low water level (left), at high water level (right)	35
Figure 4.9: Measuring site GL6: at high water level (left), riffle at high water level (center), riffle at low water level (right)	36
Figure 5.1: Comparison of vertical velocity profiles upstream and downstream of the stone at right riverbank, in thalweg and at left riverbank at different water levels.....	38
Figure 5.2: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 6.5 cm.....	39
Figure 5.3: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 9.5 cm.....	40
Figure 5.4: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 18 cm (mass of algae sample on the overgrown cross-section: 2.4 g)	41
Figure 5.5: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 18 cm (mass of algae sample on the overgrown cross-section: 1.1 g)	42
Figure 5.6: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 35 cm.....	43
Figure 5.7: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 47 cm.....	44

Figure 5.8: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 59 cm	45
Figure 5.9: Comparison of vertical velocity profiles in dependence of water level.....	46
Figure 5.10: Comparison of vertical velocity profiles upstream of the stone in dependence of water level	47
Figure 5.11: Comparison of vertical velocity profiles downstream of the stone in dependence of water level	47
Figure 5.12: Comparison of thalweg vertical velocity profiles without an underwater obstacle, upstream of obstacle and downstream of obstacle at different water levels (height of the stone is 10 cm in first three cases and 14 cm in the last case).....	48
Figure 5.13: Drawing of cross-sections and measuring points at the measuring site GL3.....	50
Figure 5.14: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components (at right riverbank, in thalweg and at left riverbank) at three cross-sections at water level 7 cm	51
Figure 5.15: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components (at right riverbank, in thalweg and at left riverbank) at three cross-sections at water level 20 cm	53
Figure 5.16: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components (at right riverbank, in thalweg and at left riverbank) at three cross-sections at water level 37 cm	54
Figure 5.17: Comparison between water velocities above the “semi-natural substrate” (left) and the “artificial substrate” (right) at water level 27 cm (“semi-natural substrate”) and 18.5 cm (“artificial substrate”).....	56
Figure 5.18: Comparison of vertical velocity profiles on the “semi-natural substrate” and on the “artificial substrate” at water level 27 cm (“semi-natural substrate”) and 18.5 cm (“artificial substrate”)	57
Figure 5.19: Comparison between water velocities above the “semi-natural substrate” (left) and the “artificial substrate” (right) at water level 38 cm (“semi-natural substrate”) and 30 cm (“artificial substrate”).....	58
Figure 5.20: Comparison of vertical velocity profiles on the “semi-natural substrate” and on the “artificial substrate” at water level 38 cm (“semi-natural substrate”) and 30 cm (“artificial substrate”)	58
Figure 5.21: Comparison between water velocities above the “semi-natural substrate” (left) and the “artificial substrate” (right) at water level 50 cm (“semi-natural substrate”) and 48 cm (“artificial substrate”).....	59
Figure 5.22: Comparison of vertical velocity profiles on the “semi-natural substrate” and on the “artificial substrate” at water level 50 cm (“semi-natural substrate”) and 48 cm (“artificial substrate”)	59
Figure 5.23: Drawing of measuring points on measuring site GL5.....	60
Figure 5.24: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components on different measuring sites around macrophytes at water level 36 cm (1 - between right riverbank and macrophytes, 3 - just downstream of macrophytes, 6 - between macrophytes, 7 - thalweg beside macrophytes).....	62
Figure 5.25: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components on different measuring sites around macrophytes at water level 48 cm (1 - between right riverbank and macrophytes, 3 - just downstream of macrophytes, 6 - between macrophytes, 7 - thalweg beside macrophytes).....	63
Figure 5.26: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components on different measuring sites around macrophytes at water level 71 cm (1 - between right riverbank and macrophytes, 2 - downstream of macrophytes, 4 - no macrophytes upstream, 6 - between macrophytes, 8 - thalweg through the macrophytes)	64
Figure 5.27: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components on different measuring sites around macrophytes at water level 78 cm (3 - just downstream of macrophytes, 6 - between macrophytes, 7- beside macrophytes, 9 - upstream of macrophytes)	65

Figure 5.28: Comparison of vertical velocity profiles on the “pool” (left) and on the “riffle” (right) at water level 14 cm (“pool”) and 6 cm (“riffle”)	66
Figure 5.29: Comparison of vertical velocity profiles on the “pool” (left) and on the “riffle” (right) at water level 17 cm (“pool”) and 8 cm (“riffle”)	66
Figure 5.30: Comparison of vertical velocity profiles on the “pool” (left) and on the “riffle” (right) at water level 21 cm (“pool”) and 14 cm (“riffle”)	67
Figure 5.31: Comparison of vertical velocity profiles on the “pool” (left) and on the “riffle” (right) at water level 36 cm (“pool”) and 30 cm (“riffle”)	68
Figure 5.32: Comparison of vertical velocity profiles on the “pool” (left) and on the “riffle” (right) at water level 52 cm (“pool”) and 44 cm (“riffle”)	68
Figure 5.33: Comparison of thalweg vertical velocity profiles in the “pool” in dependence of water level	69
Figure 5.34: Comparison of thalweg vertical velocity profiles on the “riffle” in dependence of water level	70
Figure 5.35: Mean velocity in dependence of discharge on the river reach with concrete channel	71
Figure 5.36: Near-bottom velocity in dependence of discharge (Velocities are measured 0.5 cm above riverbed at lower three discharges and 1.6 cm above riverbed at higher three discharges.)	72
Figure 5.37: Comparison of mean profile velocities in dependence of water level above pure and overgrown concrete channel	73
Figure 5.38: Comparison of stage-discharge curves above pure and overgrown concrete channel	74
Figure 5.39: Comparison of maximal velocities 1.6 cm above the bottom at different water levels	75
Figure 5.40: Comparison of maximal velocities on 6/10 of water depth at different water stages	76
Figure 5.41: Assessment of laminar boundary sub layer thickness	77
Figure 5.42: Comparison of maximum cross-section velocities on 6/10 of water depth on morphologically different cross-sections at different discharges	79
Figure 5.43: Comparison of maximum cross-section velocities 1.6 cm above bottom on morphologically different cross-sections at different discharges	80
Figure 5.44: Comparison of TKE on morphologically different cross-sections at different discharges	82
Figure 6.1: Sampling sites of biologic investigation (Geopedia)	84
Figure 6.2: Number of specimens of macroinvertebrate community per m ² on 6 sampling sites from May 2005 to March 2006 (Kereži, 2007)	85
Figure 6.3: Values of the Shannon - Wiener diversity index on 6 sampling sites from May 2005 to March 2006 (Kereži, 2007)	86
Figure 6.4: Values of saprobic index on 6 sampling sites from May 2005 to March 2006 (Kereži, 2007)	86
Figure 7.1: The order of precedence of maximum cross-section velocities sets on 6/10 of water depth	90
Figure 7.2: The order of precedence of maximum cross-section velocities sets 1.6 cm above river bed	91
Figure 7.3: Ratio between mean water column velocity and near-bottom velocity	92
Figure 7.4: The order of precedence of TKE values on 6/10 of water depth	92

KAZALO PRILOG

PRILOGA A: Pulziranje hitrosti v izbranih intervalih merjenja

A1: Nezaraščeno betonsko korito (GL2)

A2: Zaraščeno betonsko korito (GL2)

A3: Tolmun (GL6)

A4: Brzica (GL6)

PRILOGA B: Fizikalne lastnosti vode (Vir: Brilly in Šraj, 2000)

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ADV	Acoustic Doppler velocimeter
D	premer prodnika [mm]
e	turbulentni vrtinec
E	makroturbulentni vrtinec
EPT	Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera
h	vodostaj [cm]
k_s	hrapavost posteljice dna
l	dolžina [m]
l_{min}	premer najmanjših turbulentnih vrtincev
l_{max}	premer največjih turbulentnih vrtincev
L	pot, ki jo prepotuje turbulentni vrtinec v času T
R_h	regija hitrega vodnega toka
R_l	regija počasnega vodnega toka
Re	Reynoldsovo število [-]
Re_*	hrapavostno Reynoldsovo število [-]
SNR	razmerje signal – šum (signal to noise ratio)
t	čas [s]
T	čas, v katerem vrtinec obdrži svojo koherentno strukturo
TKE	gostota turbulentne kinetične energije [N/m^2]
v	hitrost [m/s]
v_x	vzdolžna komponenta hitrosti [m/s]
v_y	prečna komponenta hitrosti [m/s]
v_z	navpična komponenta hitrosti [m/s]
v_*	strižna hitrost [m/s]
β	največji turbulentni izbruh
ε	ovojnica procesov v ciklu izbruha
μ	dinamična viskoznost vode [$kg/m \cdot s$]
σ	standardna deviacija
ρ	gostota [kg/m^3]
τ	strižna napetost [Pa]
τ_t	turbulentna komponenta strižne napetosti [Pa]
τ_v	viskozna komponenta strižne napetosti [Pa]
δ_L	laminarna mejna podplast [mm]
ν	kinematična viskoznost [m^2/s]

1 UVOD

Vodni tok je najpomembnejši abiotski dejavnik v lotičnih sistemih, saj na vodne organizme vpliva na najrazličnejše načine. Neposredno vpliva nanje z odnašanjem dolvodno, s silo upora, prinašanjem hrane in plinov ter odnašanjem metabolitov, posredno pa vpliva nanje z določanjem velikosti delcev in strukture substrata, morfologije struge vodotoka in preskrbo s kisikom. Hitrost in struktura vodnega toka pa pomembno vplivata tudi na odnose med organizmi, med njimi najbolj očitno na kompeticijo in predatorstvo. Ker se vodni tok v naravnih vodotokih krajevno in časovno zelo spreminja, je potrebno za določitev dejanskega vpliva vodnega toka na vodne organizme zelo natančno izmeriti smer in hitrost vode na mestih, kjer se organizmi zadržujejo. Povprečna hitrost vodnega toka na posamezni vertikali prečnega profila nam namreč ne bo povedala ničesar o hitrostnih razmerah tik ob posteljici dna, kjer se zadržuje največ vodnih organizmov. Prav merjenje hitrosti tik ob dnu pa predstavlja velik problem, saj tehnologija za merjenje hitrosti in pretokov v naravnih vodotokih ni prilagojena za merjenje tako blizu dna. Nove raziskave v zadnjih dveh desetletjih so namreč pokazale, da je laminarna mejna plast na kamnih v vodotoku velika le nekaj 100 mikrometrov in s tem mnogo premajhna za zavetje vodnih nevretenčarjev (makroinvertebratov). Kot zavetje ta plast služi le mikroorganizmom, makroinvertebrati pa se vodnemu toku umikajo ali prilagajajo na različne načine. Da bi razumeli, kakšnim razmeram so vodni organizmi podvrženi in kako se nanje prilagajajo, je bistvenega pomena poznavanje dinamike tekočin v naravnih vodotokih kot tudi ekologije.

Veliko študij vertikalnih profilov hitrosti, hitrosti pri dnu, strižnih sil in turbulence je bilo narejenih v kontroliranih razmerah v laboratorijih, šele v zadnjih desetletjih pa so se začele pojavljati tudi podobne študije, izvedene na naravnih vodotokih. Namen te naloge je primerjati vertikalne profile hitrosti nad različnimi vrstami substrata na potoku Glinščica ob različnih vodostajih. Meritve smo izvajali na odsekih potoka Glinščica z različnimi vrstami substrata, na katerih smo si izbrali več prečnih prereзов, na vsakem od njih pa več karakterističnih merilnih točk. Na teh točkah smo z Dopplerjevim merilnikom hitrosti merili hitrosti vodnega toka v vzdolžni, prečni in navpični smeri na različnih oddaljenostih od dna. Iz varianc hitrosti smo izračunali še gostoto turbulentne kinetične energije. Na odseku z betonskim koritom smo izmerili še pretoke in ovrednotili vpliv obrasti na pretočno krivuljo. Rezultate smo nato primerjali z rezultati predhodno izvedenih študij združb makroinvertebratov in perifitona na istem potoku.

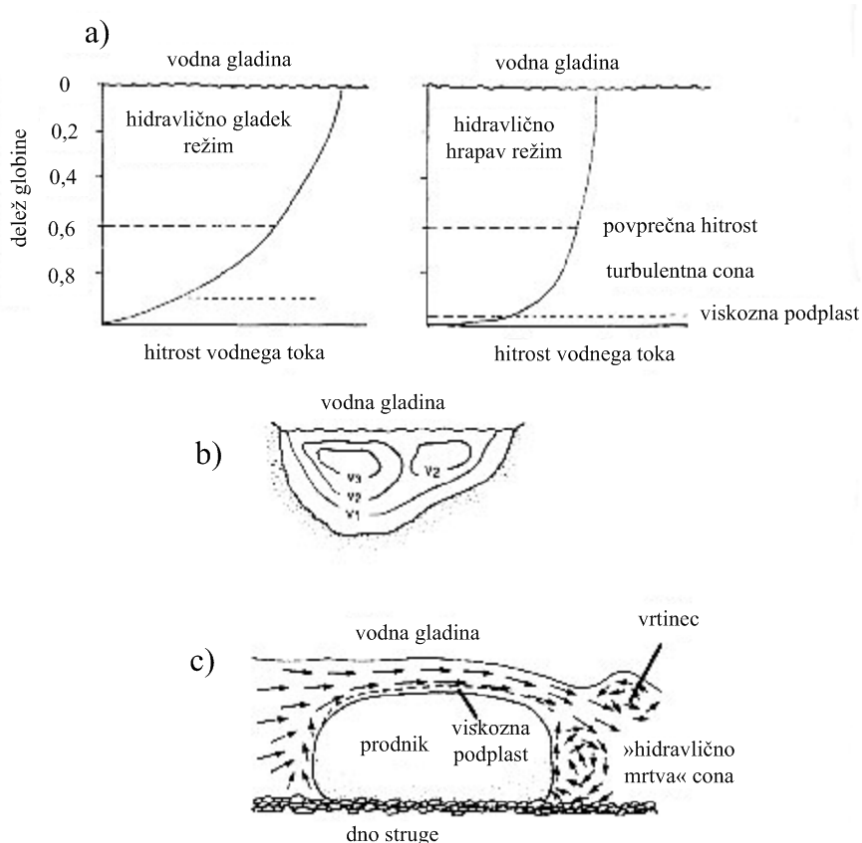
V prvem delu magistrske naloge najprej povzemamo splošne hidrološke značilnosti vodotoka ter opisujemo razvoj turbulence na hidravlično gladki in hidravlično hrapavi posteljici dna, nato pa hidrološke razmere v vodotoku predstavimo še z vidika vodnih organizmov. Vodni tok namreč na različne načine tako neposredno kot tudi posredno vpliva na vodne organizme kot osebkke ter tudi na vrste in združbe ter odnose med njimi. Na koncu teoretičnega dela predstavljamo še najznačilnejše

prilagoditve organizmov na vodni tok. Ne vpliva pa le vodni tok na vodne organizme, temveč tudi obratno: vodni organizmi, še posebej združba obrasti (perifiton) in veliki makrofiti zelo vplivajo na hidravlične razmere v vodotoku. V drugem delu predstavljamo rezultate hidroloških meritev na potoku Glinščica in povzemamo rezultate vzorčenja makroinvertebratov in perifitona, opravljenega s strani biologinj Vesne Kereži in Elene Štendler na podobnih merilnih mestih na potoku Glinščica, vendar v drugem časovnem obdobju. V diskusiji primerjamo rezultate na morfološko značilno različnih prečnih prerezih s poudarkom na razlikovanju med povsem togim, betonskim substratom in seminaravnim substratom. Rezultate ovrednotimo še z vidika življenjskih združb in izpostavimo problematiko merjenja blizu dna.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

2.1 Hidrološke značilnosti vodotoka

Za vodni tok v lotičnem sistemu (sistemu tekočih voda) je značilno, da je tridimenzionalen ter se spreminja v prostoru in času. Ne spreminja pa se le vodni tok, pač pa tudi širina in globina struge, nagibi dna struge ter zrnavost substrata. Zaradi trenja ob dno in ostenje struge se v prečnem prerezu hitrost vodnega toka zmanjšuje proti dnu in ostenju struge, največja pa je tik pod površjem nad mestom na prečnem prerezu, kjer je globina vode največja. Povprečna hitrost posamezne vertikale je na šestih desetinah globine, merjeno od vodne gladine proti dnu in znaša približno 80 do 90 odstotkov vrednosti hitrosti na vodni gladini (slika 2.1).



Slika 2.1: Porazdelitve hitrosti: (a) vertikalna porazdelitev hitrosti; (b) porazdelitev hitrosti po prečnem prerezu struge; (c) porazdelitev hitrosti okrog večjega kamna v strugi (Giller in Malmqvist, 2005: str 58)

Figure 2.1: Velocity distributions: (a) vertical velocity distributions; (b) velocity distribution across a river cross-section; (c) velocity distribution around a larger stone on a riverbed (Giller and Malmqvist, 2005: p 58)

Ena glavnih značilnosti habitatov tekočih voda je velika spremenljivost hitrosti in strižnih napetosti v prostoru. Razlike v padcu dna struge in globini vode znotraj posameznega rečnega odseka vodijo v zaporedje brzic s hitrim tokom in velikimi strižnimi napetostmi ter tolmunov s počasnim tokom in majhnimi strižnimi napetostmi. Razlike so tudi na notranji in zunanji strani meandrov. Na zunanji

strani je hitrost večja, strižne napetosti prav tako, zato je tam erozijska cona, na notranji strani pa so hitrosti in strižne napetosti manjše, zato pride tam do odlaganja materiala. Na hitrost vodnega toka in strižne napetosti pa vplivajo tudi manjše reliefne značilnosti substrata na določenem odseku. Lesno plavje, balvan ali le sprememba substrata na primer zelo vplivajo na hitrost vodnega toka, zato rečni odsek s heterogenim substratom predstavlja mozaik različnih hitrosti vodnega toka (Giller in Malmqvist, 2005). Na hitrosti blizu dna pa znatno vplivajo že zelo majhne razlike v substratu. Way s sod. (1995) je preučeval hitrosti in gostoto makroinvertebratov na betonski podlagi z različno hrapavostjo. Meritve so izvajali s toplotnim merilnikom hitrosti na oddaljenosti 1 mm od dna. V vseh treh primerih so bile pri večji povprečni hitrosti večje razlike med hitrostmi pri dnu in višje v vodnem stolpcu. Te razlike pa so bile na hrapavem betonu večje kot na gladkem, še večje pa na razbrazdanem. Hitrosti znotraj 1,3 cm globoke in prav toliko široke brazde so bile 7× do 24× (odvisno od povprečne hitrosti ga toka) manjše od povprečne hitrosti. Turbulenca pa je bila bistveno večja na hrapavem in razbrazdanem betonu v primerjavi z gladkim, in sicer je bila največja pri dnu.

Velikost in razporeditev substrata torej vplivata na lokalne hitrosti, obenem pa je struktura substrata v veliki meri odvisna od hitrosti vode, poleg tega pa še od padca dna struge ter geološke sestave dna in prispevnega območja. Hitrejši kot je tok in strmejša kot je dno struge, večja zrna substrata se premikajo po potoku. Z zmanjšanjem hitrosti in naklona se najprej posedejo večji delci, nato pa vse manjši, zato običajno v izvirnem predelu prevladujejo večji delci substrata, v nižinskem toku pa drobnejši delci. Poleg različnih frakcij substrata pa na razporeditev hitrosti po prečnem prerezu zelo vpliva tudi razrast v vodi. Bolj kot so makrofiti razvejani, bolj upočasnijo hitrost vodnega toka in tako dajejo zatočišče mnogim vodnim organizmom. Do posebnih pretočnih razmer pride tudi v rečnih krivinah. Rezultanta med komponento sile teže v smeri toka in centrifugalno silo nosi vodne delce proti zunanji krivini vodotoka. Posledično nastopi v prečnem prerezu sekundarni vodni tok, ki je na vodni površini usmerjen k zunanji brežini in jo dodatno obremenjuje, na dnu struge vodotoka pa je sekundarni tok usmerjen k notranji brežini in dodatno prispeva k tvorbi prodišč ali sipin na notranji strani krivine (Mikoš, 2000).

Poleg krajevne spremenljivosti se v naravnih vodotokih hitrost in strižne napetosti spreminjajo tudi časovno, odvisno od padavinskih dogodkov. Padavine povečajo pretok, kar imenujemo visokovodni val, katerega oblika je odvisna od trajanja in intenzivnosti padavin ter od oblike, velikosti in prepustnosti prispevnega območja. Poplavni val je enkratno neponovljiv dogodek, za katerega je značilno, da hitrosti drugače naraščajo kakor upadajo. Velik vpliv na ta proces ima akumuliranje vode v sami strugi in na poplavnih območjih vzdolž vodotoka. Prostornine in razporeditev akumulirane vode vzdolž vodotoka so namreč izredno pester, zato so tudi hitrosti vode v strugi in poplavnih površinah pri naraščanju in upadanju poplavnega vala različne. Pomembna je tudi velika razlika v sami strukturi vodnega toka pri višjih in nižjih vodostajih, posebno pri naravnih razčlenjenih strugah z

neenakomerno globino po prečnem profilu. Pri nizkih vodostajih so hitrosti zelo različne (mozaična struktura), odvisno od substrata. Na brzicah je globina manjša, hitrosti pa so večje, v tolmunih pa so hitrosti majhne, globina pa večja. Včasih v strugi nastanejo tudi otočki. Pri visokih vodostajih pa so hitrosti vzdolž celotnega odseka zelo velike, za večjimi prodniki in balvani pa se ustvarjajo vrtinci in protitok (slika 2.1).

Ob padavinskih dogodkih pride tudi do prodnega premika. Od intenzivnosti padavin in z njimi povečanih hitrosti in pretokov je odvisno, kako veliki delci substrata se bodo premikali. Manjši delci se premikajo že ob običajnih poplavnih valovih, veliki pa le ob ekstremnih dogodkih. Premik večjih delcev predstavlja za vodne organizme motnjo že zaradi same spremembe življenjskega prostora ter zaradi fizičnega poškodovanja organizmov (obrus alg s prodnikov). Bolj pogost pa je premik drobnejših frakcij substrata, ki predstavlja motnjo predvsem zaradi zapolnjevanja praznih delcev med večjimi prodniki, ki so zatočišča za veliko vrst vodnih organizmov, predvsem makroinvertebratov. Za drobnejši substrat je značilna velika akumulacija snovi (tudi toksičnih), ki se ob premiku substrata sprostijo v vodo in bistveno poslabšajo njeno kvaliteto. Zaradi tega bi morali pri ocenjevanju kakovosti vode analizirati tudi substrat in ne samo vode. Kdaj se bo zrno plavin premaknilo, je v veliki meri odvisno od debeline zrna in debeline laminarne mejne plasti. Bolj kot je zrno drobno, večjo vlogo pri njegovi stabilnosti ima razmerje med njegovo velikostjo in debelino laminarne mejne plasti. Če je zrno plavin bistveno manjše od debeline laminarne mejne plasti, se lahko zrno premakne le zaradi sil trenja in nič več zaradi potisne sile, saj je zrno popolnoma potopljeno v laminarni mejni plasti (Mikoš, 2000). Začetek prodnega premika je podan s Shieldsovim diagramom, ki ponazarja zvezo med strižno napetostjo in Reynoldsovim številom. Začetek prodnega premika je selektiven. Sprva se izpirajo samo drobna zrna in tako ostanejo le bolj groba zrna, ki tlakujejo posteljico dna in s tem onemogočajo nadaljnje izpiranje drobnega substrata iz podpovršinske plasti. Premeščajo se le drobne plavine iz gorvodnih odsekov. Šele pri veliki hidravlični obremenitvi, ko se posteljica dna spere, se začne premeščanje rinjenih plavin direktno iz dna struge (Mikoš, 2000). Razlikujemo tudi lebdeče in rinjene plavine. Če so vzgonske sile na delec veliko večje od za statični vzgon zmanjšane teže delca, je hitrost usedanja mnogo manjša kakor turbulentno prečno gibanje. V tem primeru so zrna plavin enakomerno porazdeljena po vodnem stolpcu in lebdiijo. V primeru, da je teža zrna, zmanjšana za statični vzgon, mnogo večja od vzgonske sile, pa zrna padejo na tla in se lahko premeščajo le kot rinjene plavine. Groba zrna plavin se pri manjši hidravlični obtežbi premeščajo le po dnu, z naraščanjem hidravlične obtežbe pa narašča tudi vzgonska sila in tako poskakujoča zrna plavin na koncu preidejo v lebdeče gibanje.

Upor toku vode pa ni odvisen le od zrnastosti hrapavosti, pač pa tudi od oblik dna. Glavne tri vrste oblik dna so rebra, dine in antidine. Upor zaradi oblike dna pri položnih oblikah večinoma kar zanemarimo.

Za vodne organizme je problematičen reguliran pretok za akumulacijskimi pregradami, kjer se pretok predvsem v sušnem obdobju pri nezmanjšanem odvzemu vode kritično zniža ali pa pretoka celo ni. Govorimo o minimalnem pretoku, ki naj bi še zagotavljal normalno delovanje ekosistema in estetsko funkcijo vodotoka, vendar si različne stroke niso enotne, kakšen in kako določljiv bi ta minimalni oz. ekološko sprejemljiv pretok bil. Nasprotje presihanju vodotokov so poplave, ki so v naravnih vodotokih večinoma sezonske, npr. po pomladnem deževju, ki povzroča taljenje snega ali pri monsunih, zato so se živa bitja nanje prilagodila in zanje ne predstavljajo stresa. Periodične poplave so za naravni vodotok zaželeni, saj pomenijo izmenjavo snovi med vodnim in kopenskim ekosistemom.

Kljub temu, da je dinamika spreminjanja hidroloških, hidravličnih, geoloških, bioloških ali kemijskih razmer zelo velika, je naravni vodotok sposoben obdržati določeno obliko stabilnosti, ki jo imenujemo dinamično ravnotežje. Stabilnost sistema lahko opišemo kot kombinacijo naslednjih lastnosti:

- odpornost sistema: zmožnost ohranjanja originalne oblike in funkcije,
- prožnost sistema: stopnja, pri kateri se sistem vrne v stabilno stanje po pojavu motnje in
- obnovljivost sistema: stopnja, pri kateri se sistem vrne v prvotno stanje po pojavu motnje.

Naravni sistemi so razvili različne načine, s katerimi se lahko prilagodijo na določene motnje. Antropogeno povzročene motnje pa včasih spodbudijo še dodatne motnje, ki presežejo obnovitveno sposobnost sistema. Sistem po določenem času sicer zopet vzpostavi neko novo dinamično ravnotežje, vendar ima lahko manjšo ekološko vrednost v primerjavi s prvotnim stanjem. Motnje pa niso nujno vedno le negativne: poplava ima na primer pozitiven učinek glede preskrbe vegetacije poplavnih ravnic s hranilnimi snovmi (Rusjan, 2003a).

2.2 Fluktuacije hitrosti in razvoj turbulence

Vpliv turbulence je bil dolgo časa zanemaren, češ da se ob dnu, kjer živijo mikroorganizmi, hitrost tako zmanjša, da vpliv turbulence ni pomemben. Kot vidimo s slike 2.2 pa hitrost tudi na oddaljenosti le 2 mm od tal niha za več kot eno magnitudo. Proces izbruha z vdorom hitrejši vode proti dnu in izgonom počasnejše vode navzgor močno vpliva na transport sedimentov in je lahko prav tako pomemben pri transportu bentoških organizmov.

Poznamo dva mehanizma izvora turbulence: na hidravlično gladki postelji dna in na hidravlično hrapavi postelji.

Turbulentni tok je sestavljen iz številnih vrtincev različnih velikosti (Yalin, 1992). Premer najmanjših vrtincev znaša:

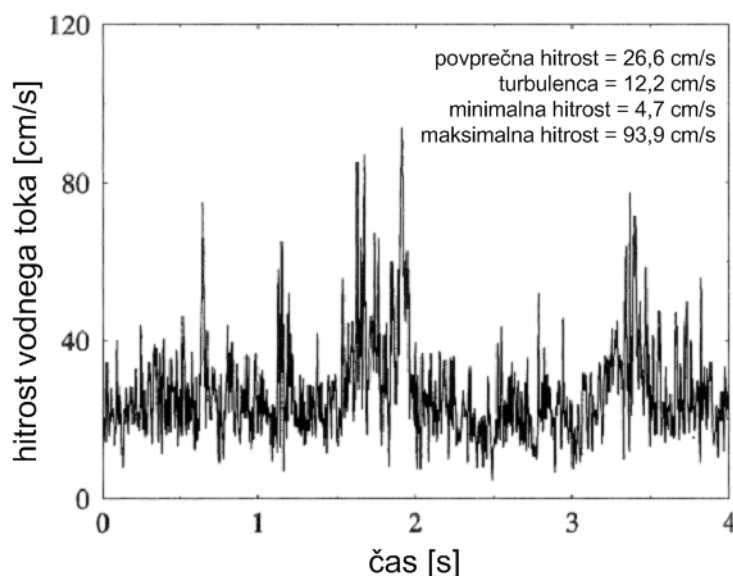
$$l_{\min} \approx \frac{\nu}{v_*}, \text{ kjer je:}$$

ν - kinematična viskoznost

v_* - strižna hitrost

Premer največjih vrtincev pa je: $l_{\max} \approx h$, kjer je:

h - globina vode



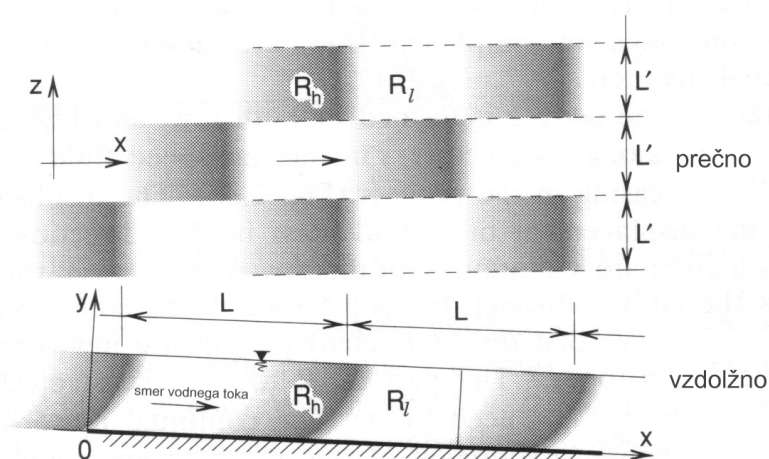
Slika 2.2: Merjenje hitrosti 2 mm od dna (prodnika) v naravnem vodotoku z merilnikom hitrosti z vročim filmom (Hart in Finelli, 1999: str 378)

Figure 2.2: Velocity measurements 2 mm above river bed (gravel) in a natural stream using hot film anemometer (Hart and Finelli, 1999: p 378)

Turbulenco, pri kateri se razvijejo največji vrtinci, t.i. makrovrtinci, imenujemo makroturbulenca. Večji kot je vrtinec, daljša je njegova perioda razvoja. V turbulentnem toku imajo pomembno vlogo največji vrtinci s premerom h na tistem območju (Landau in Lifshitz, 1986). Veliko avtorjev iz obdobja, ko še niso raziskovali procesa izbruha, navaja, da se najprej razvijejo največji vrtinci in nato manjši, kar pa ni res. Yalin (1992) namreč navaja, da največji vrtinci niso že ob nastanku velikosti h , temveč so mnogo manjši. V odprtem kanalu nastajajo ob posteljici dna. Bližje dna kot vrtinec nastane, manjša je njegova začetna velikost glede na globino vode h . Takoj po nastanku je bodoči makrovrtinec porinjen navzgor in ko se premakne od posteljice dna, ga odnese vzdolž toka. Med potovanjem po toku hitrost njegovega dvigovanja upada, njegova velikost l pa se povečuje zaradi združevanja in zlitja z manjšimi vrtinci. S časom se velikost vrtinca l poveča do h in nastane makroturbulentni vrtinec E_l , ki kmalu zatem zadene v dno in se uniči. Uničenje enega vrtinca pa vzpodbudi nastanek novega, kar imenujemo »izbruh«. Izbruh je torej zaporedje dogodkov, ki se zgodijo med nastankom dveh

zaporednih vrtincev (e_i in e_{i+1}). Nastane nepretrgana struktura, ki se razvije z odnašanjem po toku navzdol v ciklu izbruha. Vrtinec in koherentna struktura sta tridimenzionalna, njuna razsežnost v prečni smeri pa je omejena ne glede na razmerje širine in globine vodotoka (razmerje B/h). Čeprav se izbruhi pojavljajo naključno v času in prostoru, posamezen izbruh predstavlja neko zaporedje dogodkov, zato danes turbulence ne smatramo več kot popolnoma naključen pojav.

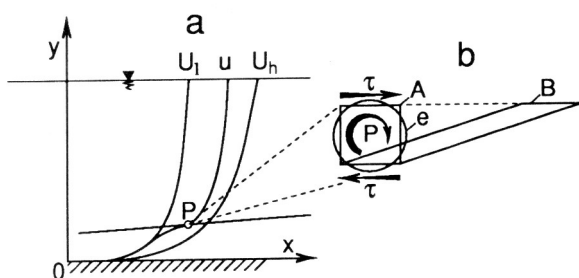
Grass (1971) je eksperimentalno pokazal, da se izbruhi pojavljajo neodvisno od tega, ali je prisoten viskozni vpliv na mejni tok, t.j. da se pojavljajo v vsakem režimu turbulentnega strižnega toka.



Slika 2.3: Izmenjevanje hitrih in počasnih con (Yalin, 1992: str 31)

Figure 2.3: Exchanging of fast and slow flow zones (Yalin, 1992: p 31)

Različne raziskave (Nychas in sod., 1973; Offen in Kline, 1974; Nakagawa in Nezu, 1981) navajajo, da je turbulentni tok sestavljen iz dveh velikih regij: hitre R_h in počasne R_l , ki so v obliki šahovnice razporejene po vodnem toku, gledano od zgoraj (slika 2.3). Prehod iz počasnejše v hitrejšo regijo je bolj zvezen kakor iz hitrejše v počasnejšo. Med prehodom počasne regije R_l preko neke točke je vertikalni profil hitrosti manjši od povprečnih (časovno gledano) hitrosti na tisti vertikali, ob prehodu hitre regije R_h pa so te hitrosti večje od povprečnih. Do prehoda iz diagrama U_l v U_h pride s pomočjo pregibanja U -diagramov. Do največje trenutne strižne sile pride na upogibni točki P (kjer je trenutna sprememba hitrosti v navpični smeri največja); večinoma je ta točka v nižjem delu toka. Če je strižna sila dovolj velika, se volumen vode pri točki P ne raztegne v podolgovat paralelogram, pač pa nastane vrtinec (slika 2.4) in začne se proces izbruha (Yalin, 1992).



Slika 2.4: Nastanek vrtinca (Yalin, 1992: str 32)

Figure 2.4: Formation of vortex (Yalin, 1992: p 32)

Čeprav vrtinec nastane iz mešanice hitre in počasne vode, se naprej giblje po trajektoriji s v počasni vodi (slika 2.5a). Premik vrtinca v smeri trajektorije s pomeni tudi premik vodne mase, zaradi česar nastane krožno gibanje e' na območju počasne vode. Hitra voda prehiti vrtinec nad njim. Počasna voda med vrtincem e' in hitro vodo povzroči izgon – »katapultira« vrtinec e navzgor po trajektoriji s . Na delu med vzgonom (trajektorijo) in hitro vodo nastane novo kroženje e'' (slika 2.5b). Nadaljnji dvig vrtinca e proti površju zmanjša prostor med njim in vodno gladino, kar po eni strani oslabi vzgonski tok, po drugi pa oteži prehod hitre vode med vrtincem in površjem. V določenem trenutku izgon pod vrtincem in kroženje e'' postaneta tako šibka, ovira zaradi zmanjšanja vrzeli med vrtincem in vodno gladino pa tako močna, da začne voda z večjo hitrostjo prehitevati vrtinec pod njim. Pride do »zamaha« hitre vode pod vrtincem (slika 2.5c). Ko ta voda zaobide vrtinec, se razširi in upočasni ter reagira z vrtincem e' . Tako je tok okrog vrtinca e nevtraliziran. Vrtinec e , ki se še vedno povečuje, se zato pomakne navzdol. Hiter tok sedaj obdaja vrtinec le na majhni vrzeli med njim in prosto gladino. Na koncu se premer vrtinca e zelo približa globini vode, se dotakne gladine in v interakciji z njo izgubi svojo koherenco ter se odkloni proti dnu, ob dotiku z dnem pa se razblini. Glede na kaskadno teorijo vrtincev makroturbulentni vrtinec E razpade na manjše vrtince, le-ti pa še na manjše, vse dokler ne dosežejo velikosti mikroturbulentnega vrtinca $l_{\min} \approx \frac{V}{v_*}$. Kinetična energija vrtinca E je skoraj brez

izgub prenesena do najmanjše stopnje mikroturbulence, kjer se porazgubi zaradi viskoznega trenja. To pomeni konec napetosti v tekočini in je povod za nastanek nove napetosti, ki se izkaže v nastanku novih hitrih in počasnih regij na mestu razpadlega vrtinca E . Interakcija med hitro in počasno regijo vodi v nastanek novega vrtinca e in tako se krog (cikel izbruha) zaključi (Yalin, 1992).

Dimenzija L s slike 2.3 je povprečna razdalja v vzdolžni smeri, ki jo naredi posamezen cikel izbruha, dimenzija L' pa povprečna maksimalna širina koherentne strukture v prečni smeri; imenujemo ju lahko dolžina in širina izbruha (Yalin, 1992). Yalin (1992) z opazovanjem širjenja vrtincev v različnih vrstah turbulentnega toka (slika 2.6) ugotavlja, da se izbruh v vseh primerih širi pod zelo podobnim kotom, in sicer v razmerju:

$$l \approx \frac{1}{6}x,$$

kjer je:

l - premer vrtinca,

x - razdalja od mesta nastanka vrtinca in

$$1/6 \approx \tan \theta.$$

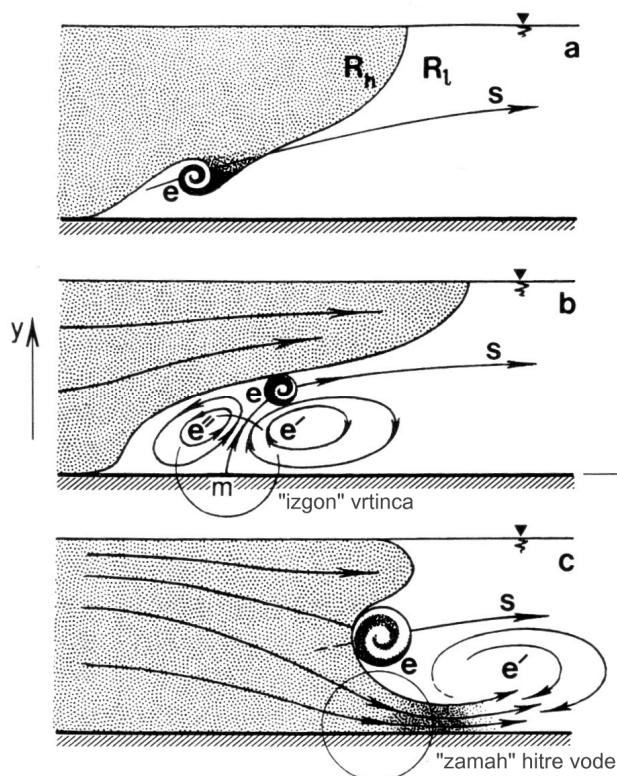
Tako raste tudi premer vrtinca e , ki oblikuje izbruh, med gibanjem po trajektoriji s :

$$l \approx \frac{1}{6}s.$$

Če privzamemo, da je trajektorija s ravna, lahko zapišemo:

$$l = l_{\max} = h, \text{ ko } s \approx x = L,$$

iz česar sledi, da je dolžina izbruha L približno enaka šestkratniku globine h (Yalin, 1992).



Slika 2.5: Nastanek vrtinca (Yalin, 1992: str 33)

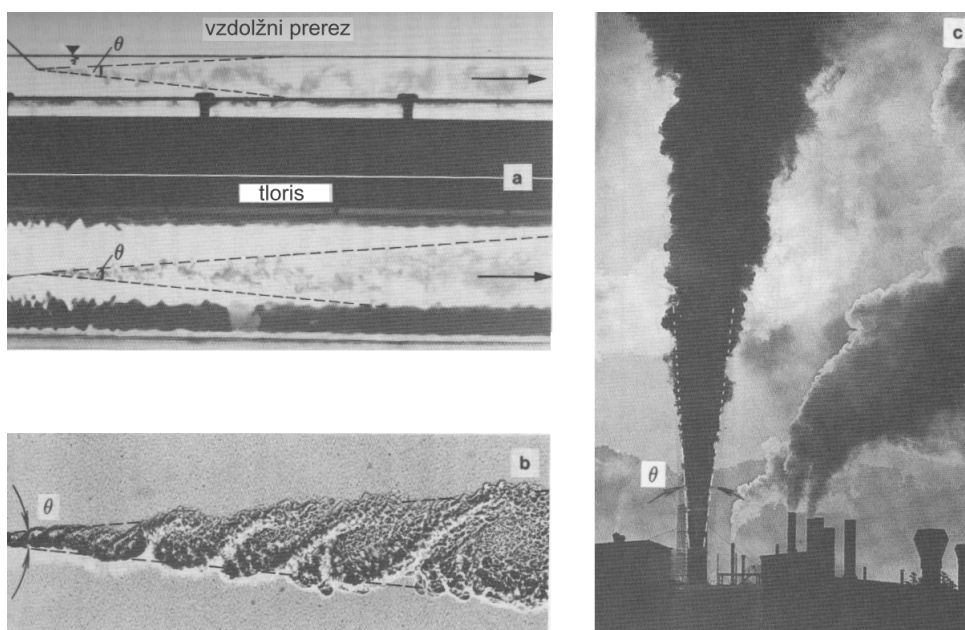
Figure 2.5: Formation of vortex (Yalin, 1992: p 33)

Nastanek izbruhov v vseh delih vodnega toka pomeni nenehno pretvarjanje energije povprečnega vodnega toka v kinetično-turbulentno energijo, ki se na koncu porazgubi v mikroturbulenci. Energija

povprečnega vodnega toka, ki se izgublja s proizvajanjem izbruhov in vzdrževanjem turbulence, se dopolni z nenehno izgubo potencialne energije pri pomiku vodne mase navzdol (dolvodno). Potencialna energija se sprva pretvori v napetostno energijo na upogibnih točkah P . S kotaljenjem vrtincev se ta energija pretvarja v kinetično energijo vrtinca in spremljajočih pojavov. Kar 70 do 80 odstotkov kinetične energije se sprosti v začetnem stadiju cikla izbruha, preostala energija pa se sprosti ob nastanku spremljevalnih vrtincev e_i v naslednjih stadijih. Vsak vrtinec e_i obdrži svojo koherentno strukturo določen čas T_i in v tem času prepotuje dolžino L_i . Iz tega sledi, da so izbruhi zgoraj navedene eksperimentalno določene dolžine $L/h \approx 6$ in časovne periode $T \approx L/v$ le največji izbruhi v turbulenci, ki pa je sestavljena še iz mnogih manjših izbruhov (Yalin, 1992):

$$L_i < L/h \approx 6 \text{ in } T_i < T.$$

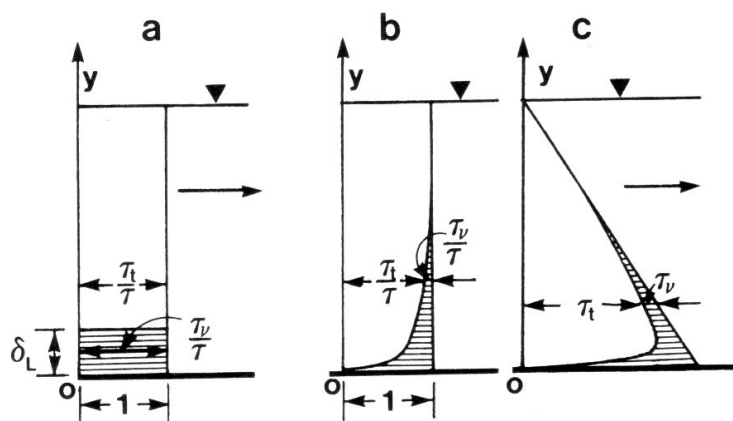
Turbulenca torej nastaja s formiranjem organizirane (sledljive) rasti vrtincev in razpada kot neorganizirano razširjanje ostankov vrtinca. Zaključimo lahko, da je turbulenca sestavljena iz organiziranega in neorganiziranega gibanja.



Slika 2.6: Širjenje vrtincev v različnih vrstah turbulentnega toka: (a) tok vode v odprtem kanalu; (b) mešanje različnih tekočin; (c) dim iz dimnika (Yalin, 1992: str 37)

Figure 2.6: The growth of eddies in three different turbulent flows: (a) open-channel flow of water; (b) mixing layer of two liquids; (c) circular jet flow of a gas (Yalin, 1992: p 37)

Študije s konca 20.st. so pokazale, da je vpliv turbulence zaznan tudi tik ob posteljici dna. Klasične viskozne podplasti δ_L v smislu izrazitih potez ni (slika 2.7a). Skupna strižna napetost τ je sestavljena iz turbulentne in viskozne komponente: τ_t in τ_v . Vpliv kinematične viskoznosti v smeri proti gladini vode postopoma izginja, kot je prikazano na sliki 2.7 (b in c).



Slika 2.7: Viskozna podplast (Yalin, 1992: str 43)

Figure 2.7: Viscous sublayer (Yalin, 1992: p 43)

Viskozni tok ob posteljici dna je definiran z naslednjimi parametri: ρ (gostota), ν (kinematična viskoznost), v_* (strižna hitrost), k_s (hrapavost posteljice dna) in tako je brezdimenzijski ekvivalent Π_A katerekoli veličine A definiran kot:

$$\Pi_A = \Phi_A(Re_*) \quad (Re_* = \frac{v_* k_s}{\nu}).$$

Če je parameter A recimo dolžina, λ , potem je:

$$\frac{\lambda}{k_s} = \phi_\lambda(Re_*).$$

Če je Reynoldsovo število manjše ali približno enako 5, kar pomeni hidravlično gladek režim, je tok ob posteljici dna popolnoma viskozen in njegove lastnosti niso več odvisne od hrapavosti posteljice dna k_s . Zato k_s izpade iz zgornje enačbe, kar pa je mogoče le, če je $\Phi_\lambda(Re_*)$ naslednje oblike (Yalin, 1992):

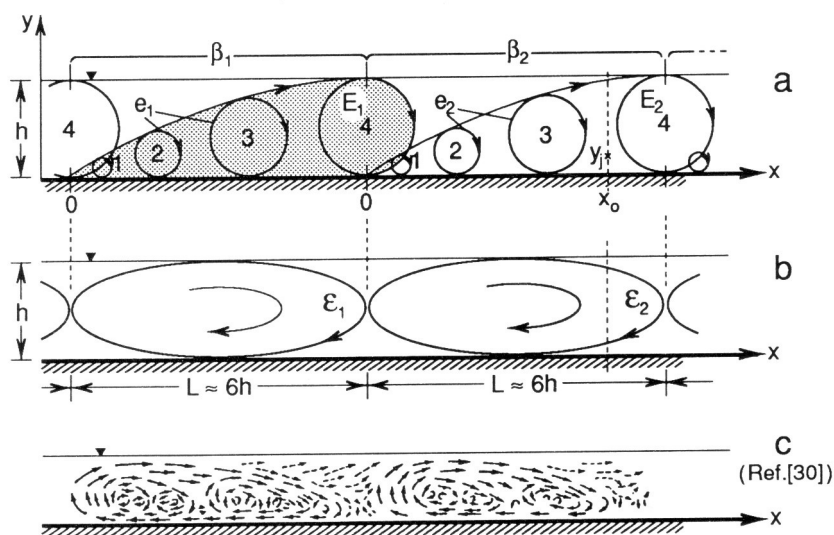
$$\phi_\lambda(Re_*) = \frac{(const.)}{Re_*} \quad \text{in tako dobimo:}$$

$$\lambda = (const.) \frac{\nu}{v_*}.$$

Iz tega sledi, da če je tok ob posteljici dna popolnoma viskozen, potem je katerakoli dolžina λ v smislu kinematične viskoznosti določena samo z razmerjem ν/v_* (Yalin, 1992).

Slika 2.8a prikazuje zelo idealizirano zaporedje največjih izbruhov $\beta_1, \beta_2, \dots$ vzdolž osi x . Vrtinec 1 na sliki simbolizira vrtinec, ki oblikuje izbruh, neposredno po nastanku ($t = 0$), vrtinec 4 pa predstavlja največji vrtinec tik pred njegovim razpadom ob času $t = T$. Privzemamo, da je zaporedje izbruhov urejeno, kar pomeni, da so izbruhi enaki in nastajajo v enakomernem časovnem zaporedju T . Variacije v prečni smeri z nimajo vpliva na cikel izbruha, zato je zaporedje izbruhov obravnavano dvodimenzionalno.

Vrtinec ε je v bistvu nekakšna ovojnica vseh procesov v ciklu enega izbruha in je bila opisana v publikacijah že preden je bil odkrit celoten razvoj izbruha. Linearne dimenzije tega vrtinca so približno h in $6h$, njegova perioda pa je približno $6h/v$. Ker se vrtinci e in ε pomikajo dolvodno z isto hitrostjo v in ker je razdalja med zaporednimi vrtinci $e_1, e_2, \dots$, dolžina izbruha L (kar je tudi vzdolžna razsežnost vrtinca ε), premikajoča se ovojnica v enem trenutku vsebuje le en vrtinec e . Vrtinec e , ki je v času T vsebovan v vrtincu (ovojnici) ε , se v času njegovega trajanja razvija (stadiji od 1 do 4 na sliki 2.8a). Posledično se tudi tekočina v vrtincu ε razvija v času od 0 do T . Slika 2.8c (Klaven, 1966) prikazuje konfiguracijo tekočine dveh zaporednih vrtincev ε v nekem trenutku. Slika je posneta s kamero, ki se je gibala vzdolž toka z enako hitrostjo v kot vrtinec ε (Kondratiev in sod., 1982). Največjih turbulentnih vrtincev ε (dimenzije približno hL) pa ne smemo zamenjati z makroturbulentnim vrtincem E (dimenzije $\sim h^2$), ki je v bistvu vrtinec e v trenutku $t = T$. Območje, ki ga prepotuje vrtinec e med potekom cikla izbruha je imenovano kot standardna mera izbruha (Yalin, 1992).



Slika 2.8: Zaporedje izbruhov (Yalin, 1992: str 45); slika c (Klaven, 1966)

Figure 2.8: Sequence of bursts (Yalin, 1992: p 45); figure c (Klaven, 1966)

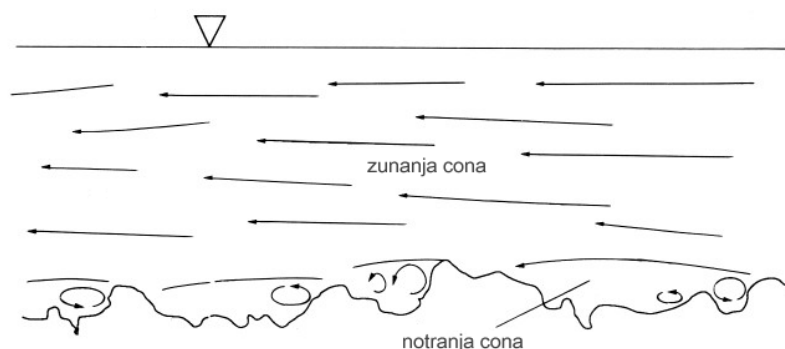
V naravnih vodotokih hidravlično gladka podlaga skoraj nikoli ni prisotna, zato so nekateri avtorji začeli preučevati nastanek turbulence na hidravlično hrapavi podlagi. Kirkbride (v Clifford, 1993) je s poskusi v laboratoriju ponazoril tok vode preko posteljice dna iz slabo sortiranih kamnov srednje velikosti. Opazovan tok je razdelil na dve coni:

- cono tik ob posteljici dna, kjer dominirajo vrtinci, ki nastajajo zaradi ovir in
- zunanjo cono (glavni tok), kjer je tok pretežno enodimenzionalen.

V mejni plasti zaradi hrapavosti posteljice dna neprestano nastajajo vrtinci in se širijo v plast glavnega toka, ki s svojimi karakteristikami vpliva na vrtinčenje. Predlagal je dva mehanizma širjenja vrtincev, in sicer aktivno razširjanje v mejno plast in pasivno širjenje zaradi zaviranja v glavnem toku.

Poskus je bil izveden v Armfieldovem kanalu, dimenzij $10 \times 0,3 \times 0,3$ m, ki je bil pokrit z 20 milimetrsko posteljico iz prodnikov z reke Wharfe (Velika Britanija) z dimenzijami $D_{50} = 9,8$ mm in $D_{84} = 22,1$ mm in konstantnim naklonom 0,002. Pri globini vode 15 cm je bilo odnašanje materiala minimalno in se je po šestih urah ustavilo. Ponazoritev toka vode je bila omogočena z uporabo laserske svetlobe, ki je prihajala iz ravnine vzdolž vodnega toka, dolge $5D_{84}$. Za boljši učinek so bili v vodo dodani kosmiči sljude, obdani s titanom. Posnetki so se snemali z ločljivostjo 1/25 sekunde. Posnetih je bilo 6 sosednjih sektorjev, skupne dolžine $30D_{84}$, pri šestih različnih pretokih. Globine vode so se gibale od 20 do 200 mm.

Glavni vzorec toka je shematično prikazan na sliki 2.9. Razdeljen je na dve glavni coni: t.i. zunanjo cono, kjer prevladuje povprečni enodimenzijski vodni tok in t.i. notranjo cono, v kateri prevladujejo vrtinci, od katerih so nekateri »pripeti« na oviro, drugi pa prosti. Mejna ploskev med tema dvema conama je označena kot dobro vidna ločilna plast, »pripeta« na grebene večjih ovir in upada proti dnu dolvodno od ovire. Točka, kjer se ponovno dotakne posteljice, je odvisna od geometrije ovire in povprečne hitrosti. Povečanje hitrosti teži k povečanju vzdolžne dimenzije vpliva ovire oz. cone vrtinčenja.

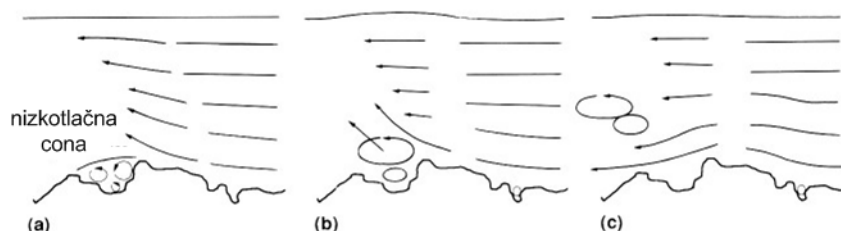


Slika 2.9: Shematična ponazoritev splošne strukture turbulence na hidravlično hrapavi podlagi (Kirkbride, 1993: str 189)

Figure 2.9: Schematic illustration of general turbulence structure over hydraulically rough river bed (Kirkbride, 1993: p 189)

Ta mejna plast vertikalno oscilira, občasno pa nenaden »švig« mejne plasti povzroči njeno popolno zrušitev, zaradi česar pride do izriva tekočine iz t.i. notranje cone. Pri tem je treba razlikovati med splošno rabo pojma izgon pri obravnavi turbulentne strukture na hidravlično gladki posteljici in popolnoma opisno rabo pojma tukaj. V mnogih primerih so vzdolžne hitrosti vode zunanje cone, večje

od povprečnih ($v > \bar{v}$), povezane z v presledkih ponavljajočimi se dinamičnimi vzgoni mejne plasti. V teh eksperimentalnih pogojih velike relativne hrapavosti so se vplivi intenzivnejših dinamičnih vzgonov poznali prav do gladine toka. Izgoni in povratni tokovi so trajali do ene sekunde, presledki med temi dogodki pa 1 – 10 sekund.

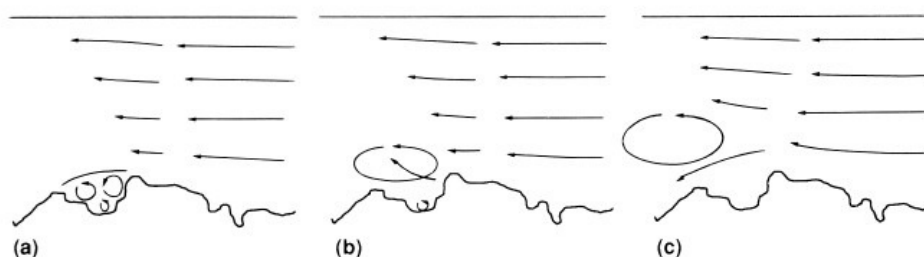


Slika 2.10: (a) Konvekcija zunanega toka; (b) pobeg vrtincev v cono z nižjim tlakom; (c) odcepitev vrtincev in naval vode iz zunanje cone v izprazenjen prostor (Kirkbride, 1993: str 191)

Figure 2.10: (a) Convection of outer flow; (b) vortices ejection into a low pressure zone; (c) separation of vortices and rush of water from outer zone into an empty space (Kirkbride, 1993: p 191)

Določiti je potrebno, ali izgoni tekočine z nizkim momentom poganjajo psevdo-periodičnost ali prisotnost psevdo-periodične strukture toka poganja njih. Obstajajo tri različne oblike izgona tekočine, od teh sta dve povezani z grobimi ovirami:

- (i) Osciliranje gorvodno pripete ločilne plasti omogoča zunanji coni velike hitrosti, tako da zadane ob oviro na njeni gorvodni strani. To privzdigne hitro tekočino preko ovire, kar ustvari nizkotlačno cono v zavetju ovire (slika 2.10a). Vrtinec iz zavetja ovire se razširi v nizkotlačno cono in povzroči izgon tekočine z nizko vztrajnostjo v zunanjo cono (slika 2.10b). To pa povzroči blokado zunanega toka z veliko vztrajnostjo, ki se kaže v skrajšanju tokovnic in njihovim dvigom na površje. Vrtinec se dokončno odlepi od ovire in vstopi v zunanjo cono (slika 2.10c). Blokirani tok izkoristi priložnost in se s hitrostjo, večjo od povprečne, zažene okrog pojemajočega vrtinca. Tako v zavetju ovire nastane nov vrtinec.
- (ii) Vrtinčnost vrtinca, pripetega na oviro (slika 2.11a), narašča z njegovim razvijanjem. Hkrati se povečuje tudi njegova velikost (slika 2.11b), dokler vrtinec kaotično ne razpade ali pa izkoristi upočasnen zunanji tok in se dvigne iz notranje cone. Ko se vrtinec sprosti v zunanjo cono, se spet zažene zunanji tok z večjo hitrostjo od povprečne (slika 2.11c).
- (iii) Preko območij, kjer se ločilna plast ponovno združi z dnom, prihaja do izgonov tekočine iz mnogih manjših ovir. Pojavijo se takoj za pulzom hitrega toka, ko se v zunanji coni ustvari zatišje. Mehanizem je podoben tistemu pod točko (ii).



Slika 2.11: (a) Zatišje pred zunanjim tokom; (b) raztezanje vrtinca; (c) odcepitev vrtinca in naval vode iz zunanje cone v izprazenjen prostor (Kirkbride, 1993: str 192)

Figure 2.11: (a) Lull before an outer flow; (b) distension of vortex; (c) separation of vortex and rush of water from outer zone into an empty space (Kirkbride, 1993: p 192)

Ti pojavi so bili preučevani v razponu različnih globin vode in povprečnih strižnih sil ob posteljici dna. V splošnem so bile pri manjši strižni sili in/ali manjši globini vode strukture manj koherentne kot pri večjem pretoku. Nastali vrtinci so se razblinili skoraj takoj po razširjenju v zunanji tok, ki jih je »zatrl«. Prostorska ureditev opisanih struktur je bila prisotna povsod, razen pri najnižjih pretokih, in je vztrajala tudi pri prodnih premikih. V kasnejših stopnjah poskusov je bil pretok namreč povečan toliko, da je prišlo do prodnega premika. Pri tem sta bila opažena dva načina vstopa delcev v glavni tok: drobni delci vstopajo v glavni tok z vertikalnimi vrtinci, bolj grobe delce pa deroči tok odnese dolvodno.

2.3 Vodotok kot življenjski prostor organizmom

Zaradi posebnih ekoloških značilnosti predstavljajo tekoče vode (lotični sistemi) edinstveno življenjsko okolje. Giller in Malmqvist (1998) navajata osem značilnosti, po katerih vodotoke razlikujemo od ostalih vodnih okolij:

- a) enosmernost vodnega toka (od izvira proti izlivu),
- b) linearna oblikovanost; vodotoki so običajno dolgi, razvejeni in zajemajo relativno majhno površino,
- c) nestabilnost usedlin in strukture usedlin,
- d) odprtost ekosistema (izmenjava snovi s terestričnimi ekosistemi),
- e) visoka stopnja prostorske in časovne heterogenosti,
- f) očitna hierarhična strukturiranost vodotoka,
- g) hidrološka različnost vodotokov in
- h) prilagoditve organizmov na življenje v tekočih vodah.

Seveda so za vse te značilnosti lotičnih ekosistemov organizmi razvili različne prilagoditve, zato se tudi razlikujejo glede na habitate, kjer živijo. Seveda pa razporeditev makroinvertebratov po prostoru ni odvisna le od okolja, pač pa tudi od medsebojnih odnosov med organizmi različnih in tudi iste vrste.

Giller in Malmqvist (1998) delita habitate na naslednje habitatne tipe: potoke nižjih do srednjih redov v zmernem klimatskem pasu, habitati z mezečo vodo (»madicolous habitats«), izviri (studenci), hudourniki in slapovi, vodotoki velikih zemljepisnih širin in višin, presihajoči in občasni potoki, reke aridnih območij, iztoki iz jezer in rezervoarjev, veletoki in reke na poplavnih ravnicah.

Človeško pogojene fizične spremembe vodotokov predstavljajo za vodne organizme velik stres, saj se te spremembe zgodijo tako hitro, da se organizmi nanje ne morejo prilagoditi. Kljub temu pa se združbe razvijejo tudi na povsem toga urejenih umetnih vodotokih. Way s sod. (1995) je preučeval vpliv različno obdelanih betonskih oblog na abundanco makroinvertebratov in opazil precejšnje razlike. Gostota makroinvertebratov je bila na hrapavih betonskih ploščah 1,4× večja kot na gladkih, na razbrazdanih pa 2,3× večja kot na gladkih ter 1,6× večja kot na hrapavih betonskih ploščah. Hitrost ob dnu se je namreč na hrapavem, še bolj pa na razbrazdanem betonu bistveno zmanjšala, povečala pa se je turbulenca, ki omogoča intenzivno prinašanje in odnašanje snovi in plinov.

Glede na velikost okolja, njegovo obstojnost in vpliv motenj so različni avtorji določili različno število prostorsko-časovnih kategorij; najpogosteje pa se uporablja razdelitev, ki so jo podali Frissell in sod. (1986). Kategorije, ki so jih določili, so:

- a) delec,
- b) mikrohabitat,
- c) tolmun/brzica,
- d) pododsek,
- e) odsek in
- f) vodotok.

Nižje kategorije imajo manjšo vztrajnost, kar pomeni, da jih že majhna sila iz okolja preoblikuje, vendar pa tudi v zelo kratkem času zopet dosežejo neko naravno dinamično ravnotežje. Nasprotno je pri višjih kategorijah, ki jih spremeni le zelo velika sila, ko pa so enkrat spremenjeni, traja zelo dolgo časa, da se spet uravnovesijo.

2.4 Vpliv vodnega toka na organizme

Vodni tok je najpomembnejši abiotski dejavnik v tekočih vodah, ki neposredno ali/in posredno vpliva na vse vrste vodnih organizmov. Franklin s sod. (2008) je v povzel vpliv vodnega toka na razrast makrofitov, pri čemer ugotavlja, da je prav hitrost vodnega toka najpomembnejši dejavnik, ki uravnava gostoto, sestavo in razporeditev združbe makrofitov v rečnem ekosistemu. Vegetacija najbolje uspeva pri povprečni hitrosti vodnega toka med 0,3 – 0,5 m/s, merjeno na delu prečnega prereza brez rastlinja (Riis in Bigs, 2003), saj se fotosintezna aktivnost povečuje s hitrostjo vode

zaradi hitrejšje izmenjave plinov. Pri hitrostih nad 1 m/s pa zaradi negativnih učinkov vodnega toka, kot so fizično poškodovanje in odtrganje makrofitov, makrofiti praktično niso več prisotni (Chambers in sod., 1991). Zaradi relativno počasne rasti makrofitov, na njihovo razrast bistveno vpliva tudi hidrološki režim. Ob velikem številu poplav letno se makrofiti namreč ne morejo uspešno razrasti (Riis in Bigs, 2003). Rezultate v skladu z zgoraj navedenim je dobil tudi Janauer s sod. (2010), ki je preučeval vpliv hitrosti vodnega toka na makrofite na reki Donavi.

Hart in Finelli (1999) pa sta povzela vpliv vodnega toka na makroinvertebrate. Vodni tok neposredno vpliva na lotične organizme, saj predstavlja stalno fizično silo, ki pomika organizme dolvodno, čemur pravimo plavljenje (drift) organizmov. Različne vrste organizmov skušajo ta negativni učinek vodnega toka na različne načine preprečiti, ublažiti, oziroma se mu umakniti, posledica česar je razvoj različnih združb. V samem toku, čeprav počasnem, zmore živeti le malo vrst, veliko več pa jih živi pritrjenih na substratu ali v njem. Hitrost tako izrazito vpliva na vedenjski vzorec, kar vključuje morfološke posebnosti, gradnjo hišic (mladoletnice, maloščetinci), mrež (mladoletnice), lokomotorne aktivnosti, drift, prostorska in respiratorna gibanja (Giller in Malmqvist, 1998). Ker se vodni tok spreminja vzdolž toka in ker imajo različni organizmi različne hidrološke zahteve, je značilna vzdolžna pojavnost vrst. Na pojavnost pa bolj kot katerikoli posamezni dejavnik vpliva korelacija hitrosti vodnega toka, velikosti substrata in globine vode. Poleg tega je vodni tok tudi dejavnik, ki posredno vpliva na organizme tako, da vpliva na velikost in razporeditev delcev, na naravo substrata, morfologijo struge, preskrbo s kisikom, razporeditev in pretvorbo hrane ter drugih virov.

Pri preučevanju vpliva vodnega toka na organizme pa se ne smemo omejiti le na hitrost vodnega toka, pač pa moramo upoštevati tudi strižne sile in intenziteto turbulence. Bouckaert in Davis (1998) sta namreč ugotovila, da se hitrosti vodnega toka na oddaljenosti 5 mm od dna pred in za večjim balvanom v strugi ne razlikujeta bistveno, vendar pa so za balvanom veliko večje strižne sile in intenzivnost turbulence. Na tem mestu je bila diverziteta združbe statistično značilno večja kakor pred balvanom, kar kaže na to, da turbulentni procesi za balvanom bistveno vplivajo na življenjske pogoje, npr. s povečanim odlaganjem delcev organskih snovi in s povečano izmenjavo raztopljenih plinov.

Vodni tok vpliva na različne ekološke procese bentonskih organizmov (Hart in Finelli, 1999):

- razporeditev organizmov zaradi plavljenja,
- uporabo habitata zaradi različne strukture habitata in različnih motenj v različnih habitatih,
- zagotavljanje privzema limitirajočih virov, ki determinirajo rast in razmnoževanje organizmov,
- kompeticijo,
- predatorstvo.

2.4.1 Razporeditev organizmov

Na razporeditev (distribucijo) vodnih organizmov vpliva vodni tok s povzročanjem plavljenja (drifta) organizmov. Plavljenje organizmov lahko razdelimo v tri faze: vstop v vodni stolpec, plavljenje in nastanitev. Vstop v vodni stolpec poteka podobno kot pri prodnem premiku, večina premikov se zgodi pri redkih turbulentnih gibanjih velikih hitrosti, vendar je kritična hitrost za vstop živih organizmov v vodni stolpec manjša kot pri neživih objektih podobne oblike in mase, kar pomeni, da nekateri makroinvertebrati izkoriščajo vodni tok za premik in zato plavijo tudi pri nižjih hitrostih. To imenujemo vedenjski drift, pri povečanih pretokih pa nastopi katastrofični drift. Ob posteljici dna se hitrosti vodnega toka sicer zmanjšajo, vendar je oddaljenost od dna, pri kateri je tok še tako počasen, da predstavlja zatočišče pred odnašanjem, le nekaj 100 mikrometrov nad površino, kar zagotavlja zatočišče le mikroorganizmom. Makroinvertebrati, veliki okrog 2 mm pa so na vrhu prodnika izpostavljeni kar trem različnim razmeram vodnega toka. Spodnji del je izpostavljen laminarnemu toku, srednji del v plasti povečane turbulence, zgornji del pa v strmem gradientu hitrosti (Statzner, 2008). Zato so proti neželenemu odnašanju dolvodno razvili številne morfološke prilagoditve, kot so priseski, izločanje lepljive sluzi, kaveljčki in podobno ali pa se izogibajo hitremu vodnemu toku z naselitvijo v hiporeiku ali v »hidravlično mrtvih« conah. Kljub tem prilagoditvam pa se ne morejo izogniti premikom pri pretokih, ki povzročajo premik posteljice dna, čeprav lahko po drugi strani nekateri makroinvertebrati celo preprečujejo premik posteljice dna (npr. zatočišče iz svilenih niti velike moljarice). Razdalja in čas plavljenja sta odvisna tako od hitrosti naselitve (kolonizacije) organizmov, kot tudi od stopnje turbulentnega mešanja, distribucijo organizmov pa lahko podamo z Rousevim številom, ki podaja razmerje med hitrostjo kolonizacije in strižno hitrostjo (Hart in Finelli, 1999). Glede na obstoječo kolonizacijo in primernost habitatov lahko veliko organizmov aktivno podaljša ali skrajša čas plavljenja in si tako »izbere« primeren habitat. Nastanitev je tako odvisna od karakteristike toka ob dnu ter od pogojev za naselitev. Včasih pride do kolonizacije izpraznjenih mest zelo hitro po poplavih, kar nakazuje na to, da so bili organizmi skriti v zatočiščih (refugijih): nekatere diatomeje se lahko skrijejo še v špranje na prodnikih, na večji skali pa se organizmi skrijejo v hidravlično mrtve cone, kjer vlečna sila tudi med poplavi le malo naraste (Reynolds in sod., 1991). Hart in Fonseca (1997) sta s poskusom ugotovila, da se nekatere vrste ob začetku poplav aktivno premaknejo v zatočišča, takoj po koncu trajanja poplav pa se zopet premaknejo na bolj izpostavljena mesta. Ni pa še raziskano, ali organizmi kot zatočišče uporabljajo tudi hiporeik. Raziskava Palmerja in sod. (1997) je namreč pokazala, da se makroinvertebrati med poplavi niso umaknili globlje v hiporeik.

2.4.2 Pridobivanje virov

Vsekakor vplivi niso le negativni; hiter vodni tok namreč pospešuje metabolizem, saj prinaša hranila in odnaša presnovne produkte in omogoča izmenjavo plinov, kar je še posebej pomembno za pritrjene organizme. Hitrosti vode nad 15 cm/s vodo fiziološko bogatijo, saj stalno prinašajo snovi v cono intenzivne izmenjave in tako zmanjšajo njen limitirajoč učinek (Weitzel, 1979). Vrsta *Oedogonium kurzii* npr. prevzema fosfor 10× hitreje pri hitrosti vode 18 cm/s kot v stoječi vodi (Štendler, 2007, cit. po Whitford, 1960), stopnja privzemanja pa se še povečuje do hitrosti 40 cm/s (Hynes, 1979), ko postanejo negativni učinki vodnega toka preveliki. Optimum hitrosti vodnega toka se sicer razlikuje od vrste do vrste; nekatere nitaste zelene alge npr. potrebujejo za bujno rast zmeren tok 30 cm/s do 60 cm/s (Štendler, 2007). Privzem virov je omejen s stopnjo molekularne difuzije v laminarni mejni plasti okoli organizma. Hitrejši kot je vodni tok, manjša je ta laminarna mejna plast in izmenjava snovi in plinov z okolico je hitrejša. V mikrohabitatih z nizko hitrostjo vode pa morajo organizmi aktivno prečrpavati vodo preko respiratornih organov. Organizmi v tekočih vodah dobijo največ informacij o primernem habitatu za naselitev preko vohalnih aparatov. Turbulenten vodni tok, razen če ni preveč deroč kot na primer pri poplavih, omogoča natančno zaznavo, od kod izvira nek vonj. Tako organizmi prepoznajo hrano ali zavohajo plenilca (Hart in Finelli, 1999).

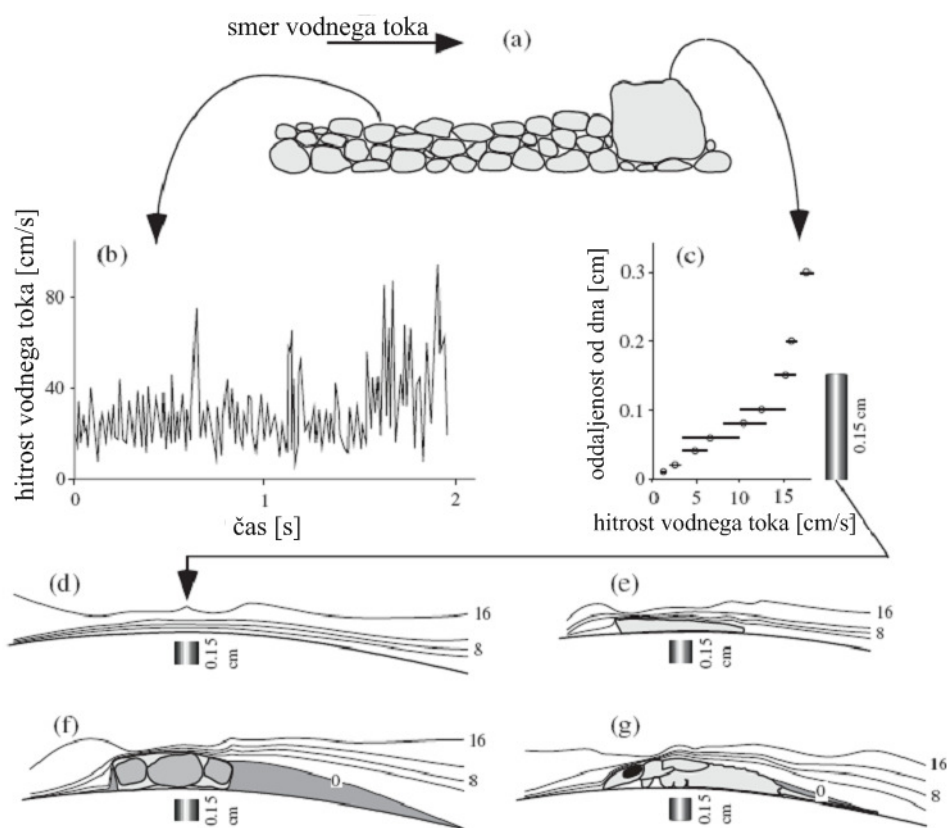
2.4.3 Vpliv na odnose med organizmi

Vodni tok na dva načina vpliva na kompeticijo med organizmi, in sicer tako, da organizmi gorvodno porabijo vire organizmom dolvodno in tudi tako, da gorvodni organizmi vplivajo na hidravlične razmere (smer in hitrost vodnega toka) dolvodno. Opaženo je bilo agresivno vedenje dolvodnih organizmov do gorvodnih. Tudi kompeticija (tekmovanje) med osebki iste ali različnih vrst ima vpliv na razporeditev organizmov: dolvodni organizmi se nikoli ne naselijo neposredno za gorvodnimi, pač pa je naselitev mozaična. Ekstremni dogodki pa so lahko priložnost za slabšega kompetitorja: ker so razmere za naselitev slabše, se tam naseli slabši kompetitor, ki pa je bolj tolerant na spremenjene razmere (Hart in Finelli, 1999).

Vodni tok ima pomemben vpliv tudi na odnos med plenilcem in plenom, vpliva namreč na pogostost srečanja med njima kot tudi na uspešnost ulova po srečanju (Hart in Finelli, 1999). Plen je običajno namreč manjši od plenilca, zato je podvržen manjši potisni sili vodnega toka in je tveganje, da ga vodni tok odnese vzdolž toka, zanj manjše, hkrati pa zaradi svoje majhnosti živi bližje posteljici dna, kjer so hitrosti vodnega toka manjše, medtem ko je večji plenilec izpostavljen hitrejšemu vodnemu toku (Hart in Merz, 1998).

2.5 Prilagoditve organizmov na vodni tok

Nekatere vrste organizmov se hitremu toku izogibajo z življenjem v hiporeiku ali iskanjem zavetij v hidravlično mrtvih conah, druge pa na različne načine kljubujejo vodnemu toku z različnimi prilagoditvami. Med fiziološke prilagoditve spadajo dihanje, prehranjevanje, osmoregulacija, odpornost na sušo; med morfološke oblika in velikost telesa organizma; prilagoditve pa se lahko kažejo tudi v obnašanju organizmov. Raziskovalci si še vedno niso enotni, ali so morfološke značilnosti telesa, kot so razni kaveljčki, krempeljčki, priseski, ščetine, izločanje svilenih niti, »spojlerčki«, sploščenost ali hidrodinamičnost, prilagoditve na vodni tok ali so predpogoj, da se organizmi v hitrem toku sploh naselijo. V stoječih vodah namreč najdemo organizme zelo podobne njihovim sorodnikom v tekočih vodah.



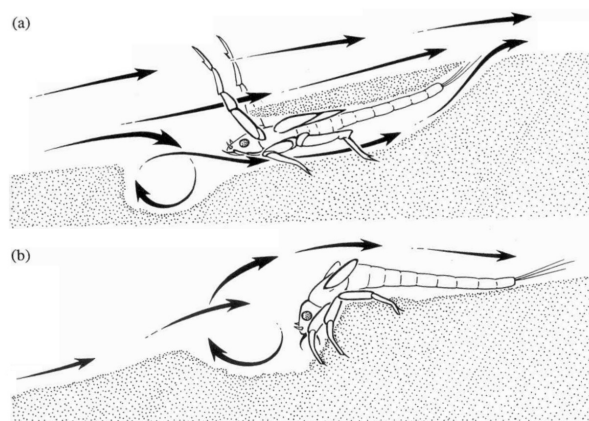
Slika 2.12: Vzorci toka blizu dna in vodnih organizmov: (a) profil rečnega dna; (b) kratkoročno variiranje hitrosti 2 mm od prodnika, usidranega v posteljico dna; (c) povprečna hitrost in standardna deviacija na različnih višinah nad najvišjo točko ukrivljenega dna; (d) črte, ki povezujejo točke z enako hitrostjo, nad ukrivljenim delom dna; (e-f) črte, ki povezujejo točke z enako hitrostjo, nad dvema različnima vrstama ličink moljarice; (g) črte, ki povezujejo točke z enako hitrostjo, nad ličinko enodnevnice (Statzner, 2008: str 601)

Figure 2.12: Flow patterns near the stream bottom and near benthic stream invertebrates: (a) profile of a stream bottom; (b) short-term velocity variation measured 2 mm above the surface of a natural stone; (c) mean and standard deviation of the velocity at different height above the highest point of the curved bottom; (d) profile of the curved bottom and isovels; (e-f) isovel pattern over two caddisflies: *Micrasema* (e) and *Silo* (f); (g) isovel pattern over a dorsoventrally flattened mayfly (*Ecdyonurus*) (Statzner, 2008: p 601)

Vodni nevretenčarji ustvarjajo okoli sebe zapleten vodni tok, ki se pogosto odlepi od njihovih teles (slika 2.12). Ločevanja tokovnic od vodnih organizmov ne moremo razložiti samo z Reynoldsovim številom živali, pač pa moramo upoštevati tudi stopnjo njihove hidrodinamičnosti. Pri nizkem Reynoldsovem številu bo oblika, ki povzroča ločevanje tokovnic, zmanjšala hrapavostni upor, medtem ko sta oblikovni upor in dinamični vzgon nepomembna. Pri velikem Reynoldsovem številu pa bo oblika, ki povzroča ločevanje tokovnic, povečala oblikovni upor in zmanjšala dinamični vzgon. Pri vseh vrednostih Reynoldsovega števila pa bo ločevanje tokovnic zmanjšalo izmenjavo vode okrog organizma, kar otežuje respiracijo, vendar bo hkrati tudi zmanjšalo nevarnost abrazije zaradi delcev mulja, ki jih prenaša vodni tok (Statzner, 2008). Vsaka oblika telesa ima torej določene prednosti in določene slabosti za življenje v različnih pogojih vodnega toka. Zanimivo je, da je organizem v času svojega razvoja podvržen zelo različnim Reynoldsovim številom. Ko se izvali, je podvržen številu Re od 1 do 10, ko odraste pa številu Re med 100 in 10000. Zato bi moral biti organizem po izvalitvi sploščen, ko odraste, pa hidrodinamične oblike, vendar pa v večini primerov ni velike razlike v obliki mladih in odraslih osebkov.

Nekatere vrste vodnih rastlin in živali za svoj obstoj nujno potrebujejo hiter vodni tok. Holmes (1999) na primer ugotavlja, da vodna zlatica, *Ranunculus penicillatus*, za cvetenje nujno potrebuje hiter vodni tok. Intenzivnost fotosinteze vodnih makrofitov je omejena s hitrostjo vode manjšo od 0,1 – 1 cm/s (Westlake, 1967).

Na zanimiv način vodni tok izkoriščata ličinki dveh vrst enodnevnice. Vrsta *Ametropus neavei*, ki živi tik pod površjem substrata, pred sabo v smeri proti toku izkoplje jamico, v kateri nastane vrtinec, ki ji prinaša hrano (slika 2.13a). Vrsta *Pseudiron centralis* pa se hrani z ličinkami trzač, ki živijo v substratu, vendar jih sama ne more izkopati, zato se na substratu namesti tako, da nastane vrtinec, ki ji izkoplje plen. Tako se potem ritensko pomika dolvodno (slika 2.13b) (Vogel, 1994).



Slika 2.13: Ličinki dveh vrst enodnevnice za prehranjevanje izkoriščata vrtince, ki nastajajo v jamicah v substratu (Vogel, 1994: str 220)

Figure 2.13: Two mayfly larvae that take advantage of the upstream part of a horseshoe vortex (Vogel, 1994: p 220)

2.6 Vpliv vodnih organizmov na vodni tok

Vodni organizmi lahko v naravnih vodotokih kot tudi v umetnih kanalih in celo zaprtih ceveh zelo vplivajo na vodni tok. Vpliv makrofitov na vodni tok na reki Spree v Nemčiji je proučeval Schulz s sodelavci (2003) in ugotovil, da enakomerno razraščene rastline hidrodinamične oblike, kot na primer navadna streluša, *Sagittaria sagittifolia*, zmanjšajo hitrost vodnega toka za približno desetkrat. Hitrosti so bile merjene z indukcijskim merilnikom hitrosti vodnega toka Nautilus Sensa Z300, ki omogoča tudi merjenje med podvodnim rastlinjem (De Doncker, 2008). Zaradi enakomerne razrasti so se hitrosti v enakem razmerju zmanjšale po celotni globini vode, prav tako pa tudi neposredno dolvodno od rastlin, medtem ko se ob rastlinah hitrost vodnega toka ni zmanjšala. Rezultat je bil drugačen pri rumenem blatniku, *Nuphar lutea*, ki ima večino listov plavajočih na površini, zato se je hitrost na površini zmanjšala precej bolj kot pod njo. Rastline posredno zaradi zmanjšanja hitrosti vodnega toka vplivajo tudi na odlaganje suspendiranega materiala, ki je bilo največje na območjih z najmanjšo hitrostjo vodnega toka, torej med makrofiti in tik dolvodno od njih.

Podobno raziskavo je opravil tudi Cotton s sodelavci (2006), ki je ugotavljal vpliv zaraščenosti z vodno zlatico, *Ranunculus sp.*, na vzorce vodnega toka na reki Frome v Veliki Britaniji. Rezultati so bili podobni: med rastlinami izmerjena hitrost vode ni presegla vrednosti 0,1 m/s, medtem ko je hitrost vode izven rastišča vodne zlatice znašala 0,8 m/s. Drobni delci suspendiranih snovi so se v začetnem razvojnem stadiju makrofitov akumulirali predvsem na gorvodnem delu rastišča, kasneje v rastni sezoni pa na dolvodnem delu. Makrofiti vplivajo na ujetje suspendiranih snovi na tri načine: z upočasnitvijo vodnega toka (tudi do 90 %), z ujetjem suspendiranih snovi na dobro razčlenjenih listih (biofilm) in s tem, da predstavljajo substrat za organizme, ki se hranijo s suspendirano snovjo (Cotton, 2006). Mozaičnost v hitrosti vodnega toka in posledično tudi v odlaganju suspendiranih snovi, do česar pride zaradi razrasti makrofitov, bistveno vpliva na večjo diverziteto habitatov (Sand-Jensen in Pedersen, 1999) in posledično tudi vrst organizmov. Sand-Jensen in Pedersen (1999) sta poleg vpliva makrofitov na vertikalni profil hitrosti preučevala tudi vpliv na turbulenco, pri čemer sta ugotovila, da je kljub ocenjenemu Reynoldsovemu številu med 200 in 400, ki je značilno za laminaren tok, tok med makrofiti vsekakor turbulenten. Hitrosti vodnega toka so namreč presegale 2 cm/s, turbulenca, merjena kot standardna deviacija 1000 meritev fluktuacij hitrosti v 50 sekundah merjenja, pa 0,2 cm/s, pri čemer se je intenzivnost turbulence značilno razlikovala med posameznimi vrstami.

Velik vpliv na vodni tok ima tudi združba obrasti (perifiton), ki povečuje hrapavost ostenja struge, kar vpliva na zmanjšanje hitrosti vode in dvig vodostaja. Raziskava, v kateri je bil vključen tudi vpliv perifitona, je bila na Glinščici opravljena že v letih 2003 in 2004, ko so Brilly in sod. (2006) primerjali povprečne hitrosti na betonskem odseku Glinščice med poletjem in zimo. Poleti, ko je bila z razliko od

zime betonska struga zaraščena s perifitonom, so opazili zmanjšanje povprečne hitrosti vodnega toka kar za 25 %.

Morda nekoliko manj vsakdanji pa je vpliv makroinvertebratov na vodni tok. Posamezen organizem seveda vpliva na mikrostrukture vodnega toka v svoji neposredni okolici, medtem ko na povprečno hitrost prečnega prereza nima vpliva. Drugače pa je, če je teh organizmov veliko in naseljujejo celotno dno struge oz. kanala, kot se je zgodilo v dovodnem kanalu HE Plave (Brilly in sod., 2003). Proizvodna moč elektrarne je v poletnem času upadla do 10 %, kar je bilo še posebej izrazito v letu 1999. Podroben pregled dovodne galerije je dal odgovor, da je zmanjšan pretok vode v dovodnem kanalu posledica obraščенosti kanala s perifitonsko združbo kremenastih in zelenih alg, med katerimi je bilo zelo veliko ličink iz družine *Simulidae*. Ličinka je namreč prilagojena na hiter tok vode tako, da se z nitkami pritruje na gladko podlago ter za hranjenje izkorišča biodetrit, ki ga vodni tok prinese iz gorvodnih tolmunov. Ličinka se je najbolj razmnožila v poletnem času, ko elektrarna deluje le s polovico kapacitete dovodnega kanala. Pretočne hitrosti so bile tako nižje, poleg tega pa je bilo v kanalu več zračnega prostora, kar je ugodno vplivalo na razvoj ličink.

3 METODOLOGIJA

3.1 Meritve hitrosti

Najprej smo izvedli dve preliminarni meritvi hitrosti vodnega toka, s katerima smo primerjali rezultate, pridobljene s hidrometričnim krilom, in rezultate, pridobljene z Dopplerjevim merilnikom hitrosti vodnega toka. Namen teh meritev je bil ugotoviti, kateri izmed razpoložljivih instrumentov omogoča natančnejše meritve hitrosti čim bližje dnu struge, bregovom in elementom substrata (večji kamni v strugi). Hkrati smo želeli tudi preveriti, ali napravi dajeta primerljive rezultate, saj je bilo v predhodnih raziskavah, ki so zajemale tudi raziskave perifitona in makroinvertebratov, večinoma uporabljeno hidrometrično krilo. Meritve smo izvajali na morfološko različnih odsekih potoka. Izbrali smo precej zaraščen odsek, reguliran s pragovi, tik pred betonsko strugo, in togo reguliran odsek z betonskim koritom.

Primerjali smo naslednja dva instrumenta: hidrometrično krilo Valeport model 104 in Dopplerjev merilnik pretočnih hitrosti FlowTracker Handheld ADV proizvajalca SonTek. Podobno kot De Doncker (2008) smo ugotovili, da je za meritve blizu dna ter v bližini objektov v strugi primernejši Dopplerjev merilnik, saj ne potrebuje prostora za vrtenje krila, pri njem pa je tudi manjša verjetnost izpada zaradi ovijanja alg in trave kot pri hidrometričnem krilu, kjer se krilce hitro zamaši z algami, ki jih prinaša vodni tok. V nadaljevanju smo merili le z Dopplerjevim merilnikom.

Ta instrument je sestavljen iz sonde, stojala in ročnega upravljalnika. Instrument ročno prestavljamo po izbranem rečnem profilu ter poljubno izbiramo globino merjenja s pomočjo merilne skale na stojalu. Vgrajen ima tudi algoritem, ki na podlagi izmerjenih hitrosti na različnih oddaljenostih od brega izračuna pretok skozi prečni profil struge, in sicer na podlagi meritev hitrosti na eni globini (6/10 globine), na dveh globinah (2/10 in 8/10 globine) ali na treh globinah (2/10, 6/10 in 8/10 globine). Seveda pa lahko merimo hitrosti na poljubnih globinah, ki jih ročno vnesemo v ročni upravljalnik, sondo pa nastavimo po višini s pomočjo merilne skale na stojalu (vendar v tem primeru instrument ne izračuna pretoka). Sonda je sestavljena iz enega oddajnika in treh sprejemnikov, zato meri hitrosti v treh smereh (vzdolžni, prečni in navpični). Razpon merjenja hitrosti vode je med 0,1 mm/s do 5 m/s dalje, meri pa tudi protitočne hitrosti. Natančnost meritev je ± 1 % izmerjene hitrosti (SonTek, 2003b).

Meritve hitrosti so potekale na merilnih mestih, opisanih v poglavju 4 – *Merilna mesta*. Merilna mesta so bila sestavljena iz dveh do treh profilov, odvisno od karakteristik posameznega merilnega mesta. Na vsakem profilu smo zbrali vsaj tri karakteristične točke (ob robu, pred kamnom, za kamnom, na zaraščenem delu, na golem delu struge) in v teh točkah merili na različnih višinah po vertikali: na

vodni gladini, na dveh desetinah globine, šestih desetinah globine (povprečna vrednost vertikale), osmih desetinah globine in pri dnu. Ob dovolj nizkem vodostaju (do približno 30 cm) je bila meritev ob dnu od posteljice dna oddaljena le 0,5 cm, ker smo sondo sneli s stojala in jo ročno držali na dnu, pri višjih vodostajih pa se je meritev približala dnu na 1,6 cm, saj je to najmanjša razdalja od dna, na kateri lahko merimo z uporabo stojala. Tu je potrebno opomniti, da so meritve brez stojala manj zanesljive, še posebno na neravnem dnu, kjer majhen vertikalni zasuk sonde vpliva na položaj točke merjenja, zato ne moremo z gotovostjo trditi, da je ta točka oddaljena od dna prav 5 milimetrov. Drug problem, ki se pojavlja pri meritvah brez stojala na neravnem dnu, pa je velika verjetnost odboja signala od delcev substrata, zato nam da tak način merjenja rezultate zadostne zanesljivosti le na merilnih mestih z betonskim koritom.

Instrument beleži tudi podatke o kakovosti izmerjenih vrednosti ter na zaslonu sproti prikazuje opozorila, če kateri izmed podatkov o kontroli kakovosti ne ustreza kriterijem za zanesljivost izmerjenih vrednosti. Ti podatki o kontroli kakovosti so: SNR – razmerje signal/šum, standardna napaka hitrosti, prilagoditev merjenja zaradi bližine roba, filtriranje konic in kot vodnega toka (SonTek, 2003a). SNR je eden izmed najpomembnejših podatkov o kakovosti meritev, njegova majhna vrednost pa pomeni majhno gostoto suspendiranih snovi v vodi. Problem nizke vrednosti SNR se je zato pojavljal pri zelo nizkih vodostajih na odseku z betonskim koritom, medtem ko na ostalih odsekih teh težav ni bilo pri nobenem vodostaju. V takih primerih smo si pomagali tako, da je pomočnik s hojo po strugi približno 20 do 30 m gorvodno od merskega profila kalil vodo, s čimer smo bistveno povečali SNR. Nizke vrednosti SNR so se drugod pojavljale le na najmanjši oddaljenosti od dna, še posebej na odseku, intenzivno zaraščenim z rmancem. V takih primerih smo meritve ponavljali. Instrument FlowTracker namreč javlja opozorilo, če je vrednost SNR v katerikoli smeri manjša od 4 dB, za zanesljiv podatek pa mora biti vrednost višja od 10 dB (SonTek, 2003a). Kadar se velikemu šumu zaradi zaraščenosti in bližine podvodnih objektov nismo mogli izogniti niti z eno ali več ponovitvami pri malo spremenjenem položaju, smo meritve obdržali in iz celotnega niza hitrosti filtrirali tiste vrednosti, pri katerih je bil SNR v smeri vzdolž vodnega toka ali prečno na vodni tok manjši od 3 dB. V nekaterih redkih primerih smo morali izvzeti celotno meritev na najnižji oddaljenosti od dna; to se je zgodilo pri vseh vodostajih ob meritvi med rmancem na merilnem mestu GL5, ter na nekaj posameznih točkah merilnih mest GL2, GL4 in GL6 pri določenih vodostajih, kakor je opisano med rezultati. Instrument tudi sproti javlja standardno napako hitrosti v intervalu merjenja, ki nam pove, kakšna je zanesljivost izmerjene vrednosti, iz nje pa lahko določimo tudi intenzivnost turbulence. Ker lahko instrument interferira z robnimi pogoji, kot so dno struge, vodna gladina ali objekti v vodi, meritve v bližini robnih pogojev niso zanesljive. Instrument te robne pogoje zazna in meritev prilagodi ter javi opozorilo, ki nam pove, kakšna stopnja prilagoditev je bila potrebna in kolikšen je njen vpliv na meritev. Večja kot je prilagoditev merjenja zaradi bližine roba, manjša je največja hitrost, pri kateri so dobljeni rezultati še zanesljivi, kar pomeni, da pri hitrostih, manjših od

1,2 m/s (sem spadajo vse naše meritve), instrument še vedno zagotavlja dokaj zanesljive rezultate, tudi če so robni pogoji slabi in so potrebne velike prilagoditve (oznaka 3) (SonTek, 2003a). FlowTracker sproti po vsakem intervalu merjenja samodejno filtrira podatke, tako da t. i. konic (spikes) ne upošteva pri izračunu povprečnih vrednosti, njihovo število pa prikaže in zabeleži. Vrednost se šteje za »konico«, če je od povprečne vrednosti večja ali manjša vsaj za trikratnik standardne deviacije in hkrati vsaj za 3 cm/s. Vzorec ni upoštevan, če se »konica« pojavi na katerikoli komponenti hitrosti (v_x , v_y ali v_z). Zadnjo kontrolo, kot vodnega toka glede na x os (vzdolž struge), instrument prikazuje le pri merjenju pretoka, saj se v tem primeru upošteva le vzdolžna komponenta hitrosti. Za zanesljivo meritev mora biti kot toka pravokoten na prečni prerez struge, po katerem merimo hitrosti.

Interval merjenja hitrosti je bil 60 sekund na posamezni točki, saj je to minimalni čas merjenja, ki ga potrebujemo, če želimo zajeti potek nastajanja turbulentnih vrtincev (Buffin-Bélanger in Roy, 2005). Izjemoma smo interval merjenja skrajšali na 40 sekund, v primerih ko smo želeli ujeti podobne pogoje med prehodom visokovodnega vala na čim več merilnih mestih.

3.2 Meritve pretoka

Na enem merilnem mestu, sestavljenem iz dveh prečnih prereзов, smo merili tudi pretok. Namen je bil ugotoviti, kako se pretočna krivulja na zaraščenem delu struge razlikuje od pretočne krivulje na nezaraščenem delu struge z enako obliko prečnega prereza. Tudi meritve pretoka smo izvajali z Dopplerjevim merilnikom pretočnih hitrosti FlowTracker Handheld ADV, in sicer tako, da smo merili hitrosti na oddaljenosti 6/10 od vodne gladine na najmanj desetih vertikalah po prečnem profilu ter ob tem v ročni upravljalnik zapisovali tudi podatke o globini vode ter oddaljenosti od brega, na podlagi česar je nato vgrajeni algoritem izračunal pretok vode. Na teh dveh profilih smo poleg hitrosti na 6/10 merili še hitrosti tik ob dnu, bodisi na 0,5 cm od dna, kolikor je vodostaj dopuščal, sicer pa na oddaljenosti 1,6 cm od dna.

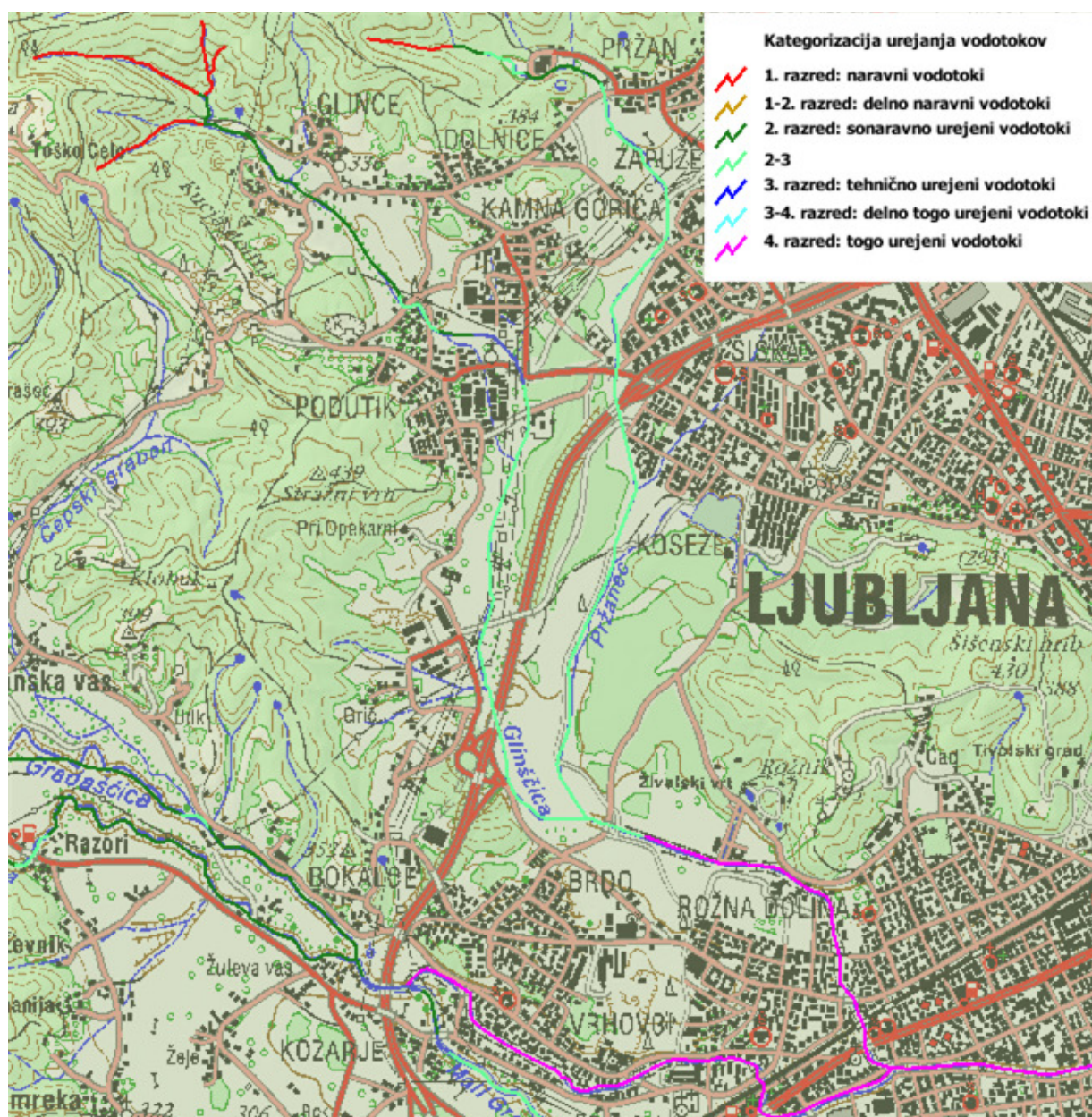
3.3 Določevanje suhe mase snovi obrasti

Na zaraščenem profilu merilnega mesta GL2 smo vsakokrat zajeli tudi vzorec obrasti. Vzorec smo zajeli na delu struge, ki je bil bolj zaraščen, in ga postrgali s površine 10 cm × 10 cm. Vzorec smo položili na urno steklo in ga sušili na temperaturi 105 °C do konstantne teže, pred tehtanjem pa smo ga ohladili v eksikatorju, da se ne bi navzel zračne vlage. Tako smo določili vsebnost suhe snovi v vzorcu (organskih in anorganskih snovi skupaj). Za potrebe naloge namreč ni bistvenega pomena, ali gre za organsko ali anorgansko snov, saj nas zanima, kakšna je masa vse snovi, ki povečuje hidravlično hrapavost ostenja struge. Gostoto obraščeniosti z mahovi smo ocenili na samem vzorčnem mestu in izmerili njihovo povprečno višino.

4 MERILNA MESTA

4.1 Glinščica in njeno porečje

Meritve so potekale na vodotoku Glinščica v Ljubljani. Vodotok je primeren zaradi različnih stopenj reguliranosti na različnih odsekih in raznolikega substrata, kot tudi zaradi velikosti, ki omogoča merjenje z ročnim merilnikom ADV SonTek ter ne nazadnje bližine, ki omogoča merjenje ob pravem času glede na potek poplavnega vala.



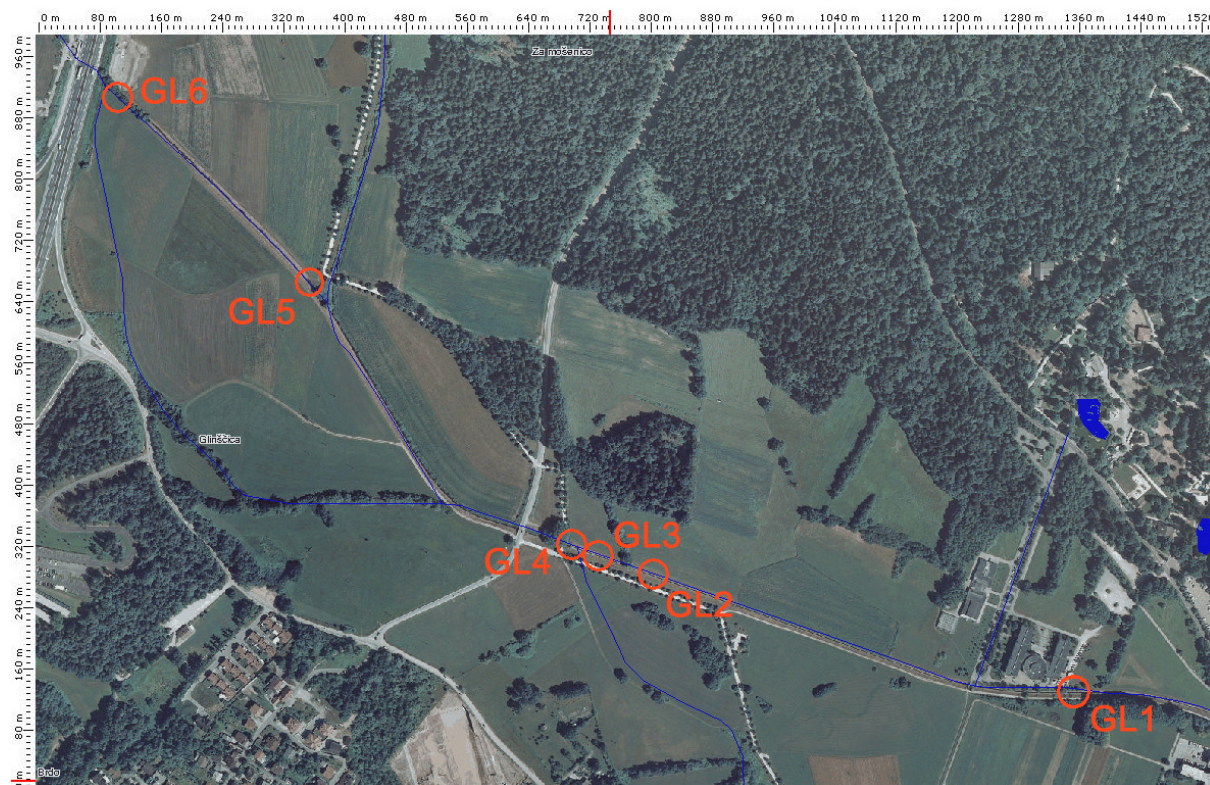
Slika 4.1: Kategorizacija urejenosti vodotoka Glinščice (ARSO)

Figure 4.1: Categorization of the Glinščica stream (ARSO)

Glinščica izvira pod severovzhodnimi obronki Toškega čela (590 m n. v.) in pri Podutiku preide v ravninski del Ljubljanske kotline. Odseki na srednjem delu Glinščice mejijo na krajinski park. Topografska slika porečja je sestavljena iz gričevnatega dela na vzhodu in zahodu ter ravninskega dela, ki se razširi v južnem delu. Relief porečja Glinščice je precej raznolik od strmih povirnih območij do ravnin. V povezavi z značilnostmi reliefa, pokrovnostjo površja z vegetacijo, karakteristično sestavo tal ter deležem prepustnih in neprepustnih površin, variirajo tudi karakteristike površinskega odtoka. Obsežne urbane površine se raztezajo predvsem na vzhodnem in južnem delu porečja ter območju Podutika in Kamne Gorice. Ravninski del porečja je slabo prepusten. Povirje Glinščice sega na severni strani v pobočje Toškega čela in Črnega vrha (482 m n. v.), razvodnica na vzhodu sega v urbano območje mesta Ljubljana (Dravlje, Šiška), preko Šišenskega hriba in Rožnika (393 m. n.v.) do izliva v Gradaščico (293 m n.v.), ki predstavlja najjužnejšo točko porečja. V smeri proti zahodu poteka razvodnica skozi urbano območje preko Brda vse do Tičnice (352 m. n. v.), kjer se usmeri proti severu preko Stražnega vrha (439 m n.v.) in Prevala do Toškega čela. Večji pritok Glinščice je Pržanec, čigar povirje sega v pobočje Velike trate (518 m n.v.) in Male trate (436 m n.v.) in odvaja vodo s pretežno ravninskega dela vzhodno od Glinščice (Rusjan, 2003b). Naravno prispevno območje Glinščice obsega 16,7 km², poleg tega pa se v porečje Glinščice po umetnem kanalu steka tudi pretežen del meteornih voda z območja med Kosezami, železniško progo in orografsko pregrado med Glinščico in Savo ter deloma z urbanega območja ob izlivnem delu Glinščice (Brilly in sod., 2006).

Po podatkih baze CORINE (Heymann, 1993) največji delež porečja Glinščice pokriva gozd (48,6 %), ki mu sledijo kmetijske površine (22,9 %), 19,2% površine pa je urbanega zemljišča. Največji delež urbaniziranega zemljišča ima podporečje potoka Pržanec, in sicer 24,7 %.

Naravna struga Glinščice je bila po celotni dolžini neenakomerna, še posebej izrazito pa je meandrirala v svojem spodnjem toku; območje, ki je sedaj deloma poseljeno, pa so bile poplavne ravnice. Pred 2. svetovno vojno so strugo Glinščice načrtno regulirali v njenem spodnjem toku pred izlivom v Mestno Gradaščico. Struga je bila izravnana, meandri so bili odstranjeni. Lastniki obvodnih zemljišč so iz struge odstranili tudi rastlinje in izkopali več drenažnih kanalov. Po letu 1973 so načrtno uredili izlivni del Glinščice za prevajanje 100-letnih poplavnih voda. S tem namenom so dno struge obložili z betonskimi ploščami od njenega izliva v Mestno Gradaščico na Viču do mosta na Brdnikovi ulici, približno 500 m dolvodno od današnjega izliva Pržanca v Glinščico. Struga je bila skoraj popolnoma izravnana in ekomorfološko zelo degradirana. Struga je bila regulirana tudi gorvodno od mosta na Brdnikovi cesti vse do Podutika, vendar je substrat struge ostal naraven (Brilly in sod., 2006).



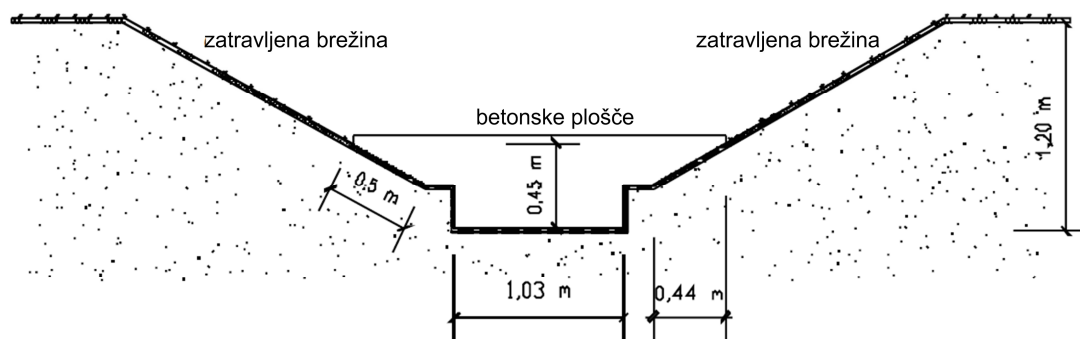
Slika 4.2: Položaj merilnih mest

Figure 4.2: Position of the measuring sites

Glede na ekomorfološko kategorizacijo, ki opisuje stopnjo naravne ohranjenosti vodotokov, je odsek Glinščice gorvodno od začetka betonskega tlakovanja uvrščen v 2. – 3. razred, kamor spadajo odseki vodotokov, ki so bili v preteklosti klasično regulirani, predvsem z vzdolžnimi zavarovanji, sčasoma pa so se ustvarili sekundarni biotopi (slika 4.1). Odsek struge s tlakovanim dnom vse do izliva v Gradaščico pa je uvrščen v 4. razred, kamor spadajo vodotoki s popolnoma utrjenimi brežinami z umetnimi ali polumetnimi materiali, pri katerih se obrežna vegetacija nahaja izven strug, razvoj sekundarnega biotopa pa ni možen (Rusjan, 2003a).

Za raziskavo smo si izbrali 6 merilnih mest na odseku med Biološkim središčem in ljubljansko obvoznico (slika 4.2). Merilna mesta smo poimenovali z oznakami od GL1 do GL6 od najbolj dolvodnega proti najbolj gorvodnemu. Prva tri mesta smo izbrali na odseku z betonsko strugo (4. razred po ekomorfološki kategorizaciji), četrto merilno mesto je bilo na prehodu iz betonske struge v klasično regulirano strugo z naravnim substratom, zadnji dve vzorčni mesti pa sta bili na odseku klasično regulirane struge z naravnim substratom (2. - 3. razred po ekomorfološki kategorizaciji). Odsek z betonsko strugo je trapezne oblike s poglobljenim osrednjim delom za prevajanje sušnega odtoka (slika 4.3). Ta del je poglobljen za 0,25 m glede na dno struge, širok pa je en meter. Utrjevanje struge je izvedeno z betonskimi ploščami, velikosti 0,5 m × 0,5 m in debeline 0,1 m. Tlakovanje se v naklonu 1:10 navezuje na obstoječe brežine ali zidove oz. do regulacijske širine dna, ena vrsta plošč pa

je položena tudi na brežino, katere nagib se spreminja od 1:1,5 do 1:2. Brežine so nad betonskimi ploščami zatravljene, višina brežin glede na osrednjo kineto pa znaša od 2,3 do 2,5 m (Rusjan, 2003a).



Slika 4.3: Prečni prerez Glinščice na odseku z betonskim koritom (Brilly in sod., 2006: str 1093)

Figure 4.3: Cross-section over the river reach with a concrete channel (Brilly et. al., 2006: p 1093)

4.2 Merilno mesto GL1

Merilno mesto GL1 je locirano pri Biološkem središču, 13 metrov dolvodno od mesta, kjer sta 2 betonski plošči odstranjeni in je nameščen stacionarni merilnik hitrosti vode StarFlow. To merilno mesto obsega le en prečni prerez. Ob desnem bregu je bil v glavni strugi manjši kamen, dva pa sta bila nekoliko gorvodno, kot je razvidno s slike 4.4. Vse ostale drobne kamne smo odstranili, te tri kamne pa označili in jih pri vsakem merjenju postavili v enak položaj. Točke merjenja so bile: tik za kamnom, tik pred kamnom, na sredini struge ter tik ob levem bregu struge, kjer v bližini ni bilo kamna. Meritve na tem merilnem mestu smo izvajali ob naslednjih vodostajih: 8 cm, 20 cm in 38 cm.

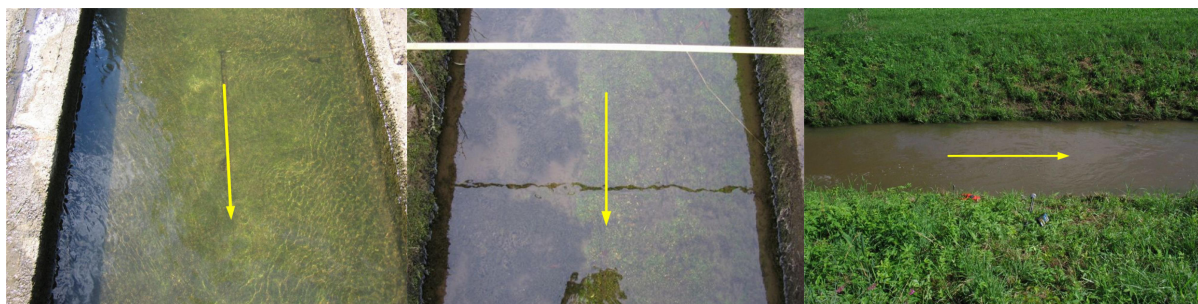


Slika 4.4: Merilno mesto GL1

Figure 4.4: Measuring site GL1

4.3 Merilno mesto GL2

Merilno mesto GL2 je locirano gorvodno glede na mesto GL1 in sicer na mestu, kjer se Pot ob žici približa Glinščici in poteka vzporedno z njo. Na tem mestu smo izbrali dva prečna prereza: enega na nezaraščenem in drugega na zaraščenem delu struge. Prvi, nezaraščeni prerez, je bil lociran 3 metre dolvodno od desnega pritoka, ob drevesu na levem bregu. Ta prerez je imel že naravno zelo malo obrasti, nato pa smo ga s strgalom postrgali do golega betona, kar smo ponovili ob vsakem prihodu pred merjenjem. Drugi prečni prerez je bil od prvega oddaljen 60 do 70 metrov dolvodno (ob tablici, ki označuje plinovod) in je bil ves čas študije precej bolj zaraščen. V glavnem pravokotnem delu struge so ga zaraščali predvsem mahovi, med katere se je ujelo tudi veliko peska, naseljevali pa so jih številni makroinvertebrati, trapezni del betonskega korita pa je bil obraščen s travami. Ta prerez je bil različno zaraščen ob različnih merjenjih, odvisno od intenzivnosti poplavnega vala. Ob vsakem večjem povečanju pretoka je bilo nekaj obrasti potrgane, zato je bilo največ obrasti pri prvi meritvi, kasneje pa približno enako. Obrasti je bilo bistveno več na senčnem delu struge, približno do 4/10 prečnega prereza (slika 4.5). Vsakokrat smo zajeli tudi vzorec obrasti, ki smo ga v laboratoriju posušili in stehali maso suhe snovi.



Slika 4.5: Merilno mesto GL2: nezaraščen prerez ob nizkem vodostaju (levo), zaraščen prerez ob nizkem vodostaju (sredina), nezaraščen prerez ob visokem vodostaju (desno)

Figure 4.5: Measurement site GL2: pure cross-section at low water level (left), overgrown cross-section at low water level (center), pure cross-section at high water level (right)

Merilno mesto GL2 je edino merilno mesto, na katerem smo merili tudi pretok, saj smo hoteli primerjati pretočne krivulje na enakem prečnem prerezu struge pri različni zaraščenosti. Prereza smo zato izbrali na takem mestu, kjer ni nobenih pritokov in dovolj blizu drug drugega, da lahko privzamemo, da je pretok skozi ta dva profila v istem trenutku enak. Pretoke smo merili pri naslednjih vodostajih na profilu 1: 6,5 cm, 9,5 cm, 18 cm, 35 cm, 47 cm in 59 cm.

Na prvem prerezu merilnega mesta GL2 smo izvajali tudi meritve vertikalnih hitrostnih profilov pred in za kamnom ob različnih vodostajih. Najprej smo izmerili vertikalni profil hitrosti na sredini struge nad gladkim dnom. Nato smo na isto mesto postavili kamen dimenzij: 25 cm × 14 cm × 10 cm. Kamen

je bil postavljen po širini glede na vodni tok. Merili smo hitrostni profil pred in za kamnom, in sicer pri naslednjih vodostajih: 10 cm, 18 cm in 42 cm. Ker se je pri vseh vodostajih voda prelivala preko kamna, smo meritev ponovili ob vodostaju 11 cm z večjim kamnom, dimenzij: 32 cm × 20 m × 14 cm, tako da se voda ni prelivala preko kamna, pač pa je tekla okrog njega.

4.4 Merilno mesto GL3

Merilno mesto GL3 je locirano še nekoliko gorvodno od merilnega mesta GL2, tik pred koncem betonskega korita. Na tem mestu so v glavnem delu betonske struge zanimivo postavljeni kamni, tako da voda ob nizkem vodostaju meandrira okrog njih (slika 4.6). Postavitev kamnov se med posameznimi meritvami ni spreminjala. Kamni so visoki med 10 cm in 15 cm. Pri vodostaju 7 cm, kar je najnižji vodostaj, pri katerem smo merili, so zato celotni sklopi kamnov gledali iz vode, pri naslednjem vodostaju, 20 cm, pa so bili že vsi potopljeni, tako da so bile hitrostne razmere popolnoma spremenjene. Tretjo meritev smo izvedli pri globini vode 37 cm. To merilno mesto je bilo sestavljeno iz treh prečnih prereзов. Prvi je bil postavljen 13 cm dolvodno od kamnov na levem bregu, drugi je bil med obema sklopoma kamnov na levem in desnem bregu, in sicer 15 cm dolvodno od kamnov na desnem bregu, tretji pa 15 cm gorvodno od kamnov na desnem bregu. Skica prečnih prereзов in merilnih točk je pri rezultatih.



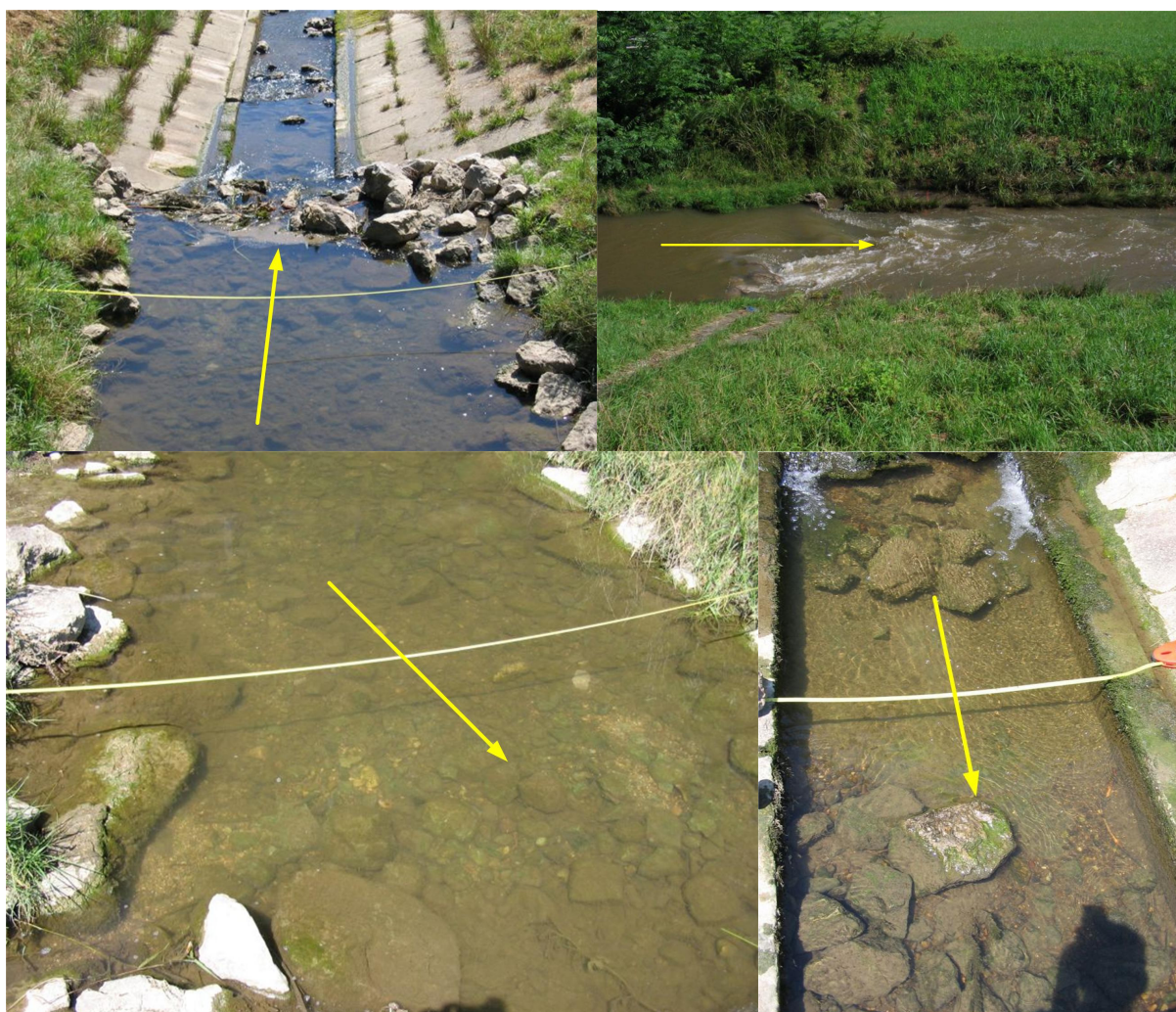
Slika 4.6: Merilno mesto GL3 ob zelo nizkem vodostaju (levo) in ob višjem vodostaju (desno)

Figure 4.6: Measuring site GL3 at very low water level (left) and at higher water level (right)

4.5 Merilno mesto GL4

Merilno mesto GL 4 je locirano na prehodu iz struge z betonskim koritom v strugo z naravnim substratom (slika 4.7). Sestavljeno je iz dveh prečnih prereзов, od katerih je prvi na delu struge s seminaravnim substratom, 2,5 m gorvodno od pričetka betonskega korita (slika 4.7, levo spodaj).

Substrat na tem profilu predstavlja mezolital (po AQEM klasifikaciji, vir Urbanič, Toman, 2003); to so majhni kamni s premerom od 6 cm do 20 cm, obraščeni z mahom, med njimi pa so veliki prodniki (mikrolital, premer od 2 cm do 6 cm). Drugi prečni prerez pa leži 1,8 m dolvodno od praga na začetku betonskega korita (slika 4.7, desno spodaj). Tik pod pragom je na sredi struge nekaj kamnov, višine do 14 cm, dolvodno od drugega prečnega prereza pa je nov sklop kamnov po vsej širini struge, pri čemer so kamni na desnem bregu višji (do 21 cm), na levem bregu pa nižji. Vsekakor ti kamni povzročajo določeno zaježbo.



Slika 4.7: Merilno mesto GL4: ob nizkem vodostaju (levo zgoraj), ob visokem vodostaju (desno zgoraj), seminaraven substrat (levo spodaj), umeten substrat (desno spodaj)

Figure 4.7: Measuring site GL4: at low water level (left above), at high water level (right above), semi-natural substrate (left below), artificial substrate (right below)

Globina vode se je ob istočasnem merjenju na teh dveh prečnih prerezih izmed vseh merilnih mest najbolj razlikovala, saj gre za največjo spremembo v morfologiji struge. Prav tako so se bistveno razlikovale tudi hitrosti med tema dvema prerezoma. Vodostaji, pri katerih smo merili na prvem prečnem prerezu, so bili tako: 27 cm, 38 cm in 50 cm, ker je enakovredno vodostajem: 18,5 cm, 30 cm

in 48 cm na drugem prečnem prerezu. Zaradi razgibanosti dna struge smo na prečnem prerezu s seminaravnim substratom merili hitrosti na šestih točkah po prerezu, medtem ko smo na delu struge z betonskim dnom merili na štirih do petih točkah po prerezu, odvisno od tega, ali se je voda prelivala izven glavnega kotita struge ali ne.

4.6 Merilno mesto GL5

To mesto je locirano nekaj metrov gorvodno od pritoka potoka Pržanec, 16 m gorvodno od tablice, ki označuje prečkanje plinovoda, na območju razširitve struge, ki je intenzivno obrasla z rmancem. Sestavlja ga le en prečni prerez, vendar smo merili hitrosti tudi nekoliko dolvodno in gorvodno od njega, odvisno od hitrostnih razmer in trenutne zaraščenosti. Na tem mestu nas je zanimal predvsem vpliv vegetacije, konkretno rmanca, na vertikalni profil hitrosti. Rmanec (*Mvriophvllum*) spada med potopljene makrofite, za katere je značilno, da so zakoreninjeni v dno struge, stebela, liste in cvetove pa imajo potopljene (Gaberščik in Kuhar, 2007). V našem primeru je bil rmanec tako razrašččen, da so se stebela z listi raztezali od dna struge do vodne gladine in so ob prvem obisku, ko je bil vodostaj najnižji, preraščali skoraj celotno širino struge (slika 4.8). Dno struge je zelo zamuljeno, ob bregovih pa je nekaj večjih kamnov. Voda je bila razen ob najnižjem vodostaju zelo kalna, zato se dna struge ni videlo. Gorvodno in dolvodno od predela z rmancem, je struga ob obeh bregovih zelo zaraščena z emergentnimi makrofiti (vodnimi travami). Hitrosti smo merili tik za rmancem, nekoliko dolvodno od rmanca v matici toka, levo in desno od rmanca, med rmancem in v enem primeru tudi pred rmancem, na ožjem delu struge. Skica merilnih točk je pri rezultatih. Globine vode, pri katerih smo merili hitrosti na tem profilu, so bile naslednje: 36 cm, 46 cm, 71 cm in 78 cm.



Slika 4.8: Merilno mesto GL 5: ob nizkem vodostaju (levo), ob visokem vodostaju (desno)

Figure 4.8: Measuring site GL5: at low water level (left), at high water level (right)

4.7 Merilno mesto GL6



Slika 4.9: Merilno mesto GL6: ob visokem vodostaju (levo), brzica ob visokem vodostaju (sredina), brzica ob nizkem vodostaju (desno)

Figure 4.9: Measuring site GL6: at high water level (left), riffle at high water level (center), riffle at low water level (right)

Merilno mesto GL6 se nahaja tik pred križanjem Glinščice z zahodno ljubljansko obvoznico, kjer se na sicer izravnani strugi da ločiti brzice z manjšo globino vode in večjo hitrostjo vodnega toka ter tolmane z večjo globino vode in manjšo hitrostjo vodnega toka. Merilno mesto je sestavljeno iz dveh prečnih prereзов, enega preko brzice in drugega preko tolmana. Ob višjem vodostaju se je razlika med brzico in tolmunom zbrisala (slika 4.9, levo). Na vsakem od njiju smo si izbrali tri vertikale, na katerih smo merili hitrosti ob naslednjih vodostajih: 15 cm, 16,5 cm, 20 cm, 36 cm in 52 cm v tolmunu oz. 6 cm, 8 cm, 14 cm, 30 cm in 44 cm na brzici. Struga je na tem delu izravnana, substrat pa predstavljajo drobni kamenčki v tolmunu in nekoliko večji na brzici. Brežine so utrjene z večjimi kamni. Struga je zelo zasenčena z vrbami, kar je najbrž glavni razlog za to, da obrasti praktično ni.

5 REZULTATI

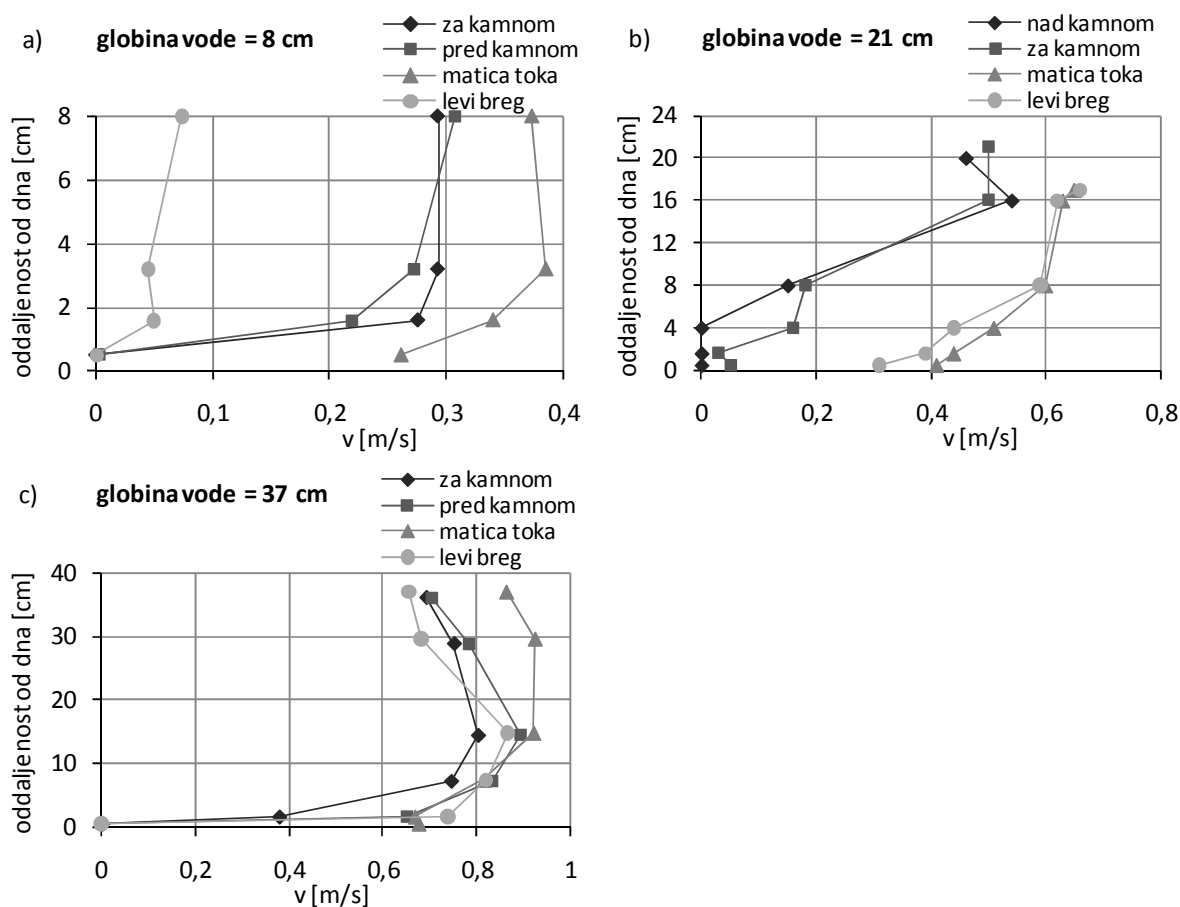
Najprej prikazujemo rezultate po posameznih merilnih mestih. Ti rezultati obsegajo primerjave vertikalnih profilov hitrosti med različnimi točkami na prečnem prerezu in med posameznimi prečnimi prerezi, kjer jih je več, ter primerjave vertikalnih profilov hitrosti ob različnih vodostajih. Za merilni mesti GL2 in GL4 so prikazane tudi razporeditve hitrosti po prečnih prerezih na različnih globinah. Na merilnem mestu GL2 je obravnavan tudi vpliv objekta na hitrostni profil. V nadaljevanju obravnavamo spreminjanje povprečnih hitrosti in hitrosti pri dnu v odvisnosti od pretoka na zaraščenem in nezaraščenem betonskem koritu in primerjamo pretočni krivulji na teh dveh prečnih prerezih. Nato primerjamo hitrosti pri dnu nad semi-naravnim in umetnim substratom ter ocenimo debelino laminarne mejne podplasti nad tema dvema substratoma. Na koncu z analizo izbranih najznačilnejših prečnih prerezov prikažemo še vpliv različnih morfoloških oblik na povprečne hitrosti vodnega stolpca in hitrosti pri dnu ter na istih prečnih prerezih primerjamo še gostoto turbulentne kinetične energije.

5.1 Hitrostne razmere po vertikalah na betonskem odseku z »naravno« razporejenimi kamni na merilnem mestu GL1

Ob Biološkem središču smo izbrali odsek z obstoječo razporeditvijo kamnov na betonskem koritu, obraščenost struge na tem mestu pa je bila majhna. Ob desnem bregu je bil manjši kamen, visok 4 cm. Merili smo pred in za tem kamnom, na sredini struge ter ob levem bregu struge. Tudi ob levem bregu je bil kamen podobne velikosti, vendar je bil od merskega profila oddaljen 30 cm gorvodno, zato je bil njegov vpliv na meritve bistveno manjši.

Ob levem bregu smo merili nekoliko bližje poglobljenega roba struge (10 cm) kot ob desnem, kjer zaradi stojala nismo mogli bližje kot 13 cm od roba, zato so bile izmerjene hitrosti ob levem bregu manjše, še posebej pri najnižjem vodostaju (slika 5.1a). Podobno kot tudi na merilnem mestu GL2 ugotovimo, da se hitrosti za kamnom zelo znižajo do višine kamna, kjer se približajo vrednostim 0 m/s ali pa se zaradi vrtnčenja pojavijo celo protitočne hitrosti. Nad višino kamna se njegov vpliv porazgubi, posebej pri visokih vodostajih. Prav tako je pri višjih vodostajih manjša razlika med vertikalnima profiloma hitrosti v matici struge in ob bregu (slika 5.1b in c).

Pred kamnom smo dobili nekoliko nižje vrednosti hitrosti kot za njim, obliki vertikalnih profilov pa sta si bili podobni. Ob vodostaju 21 cm (slika 5.1b) smo merili tudi nad kamnom ter dobili povsem primerljive vrednosti s tistimi na vertikali neposredno za kamnom nad višino kamna.



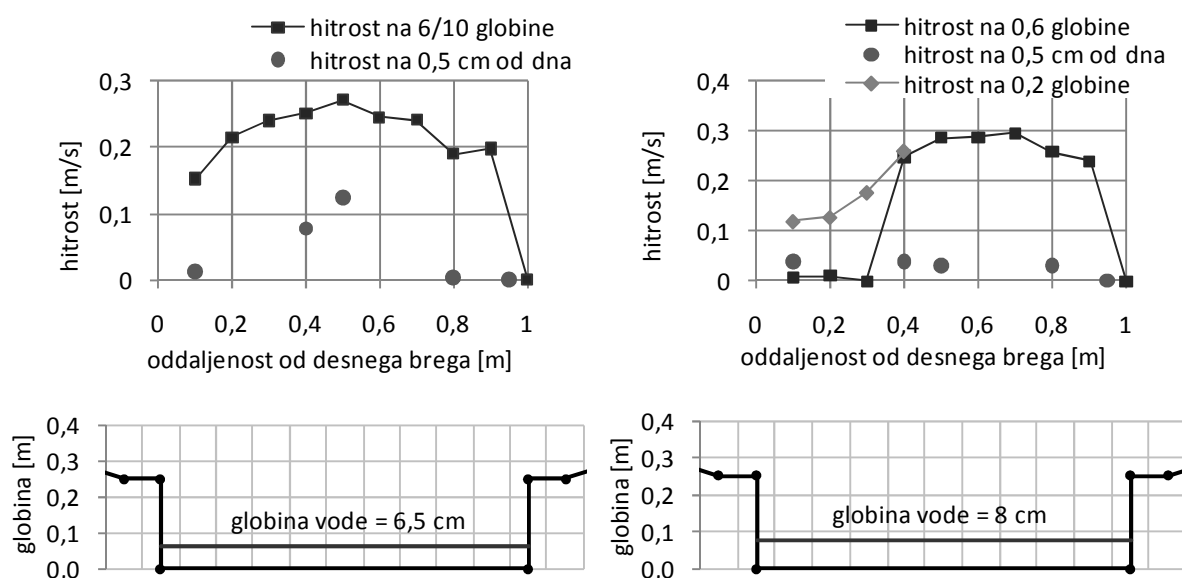
Slika 5.1: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti pred in za kamnom ob desnem bregu struge, v matici toka ter ob levem bregu ob različnih vodostajih

Figure 5.1: Comparison of vertical velocity profiles upstream and downstream of the stone at right riverbank, in thalweg and at left riverbank at different water levels

5.2 Primerjava povprečnih hitrosti in hitrosti ob dnu nad nezaraščenim in nad zaraščenim betonskim koritom na merilnem mestu GL2

Na merilnem mestu GL2 smo primerjali povprečne hitrosti in hitrosti pri dnu med prečnima prerezoma na zaraščenem in nezaraščenem betonskem koritu. Najnižji vodostaj, pri katerem smo merili na nezaraščenem prečnem prerezu merilnega mesta GL2, je bil 6,5 cm, dne 23.7.2010. Po pričakovanjih je bila največja izmerjena hitrost na 6/10 globine (povprečna hitrost vertikalne) na sredini struge, in sicer je znašala 0,27 m/s (slika 5.2). Neposredno za meritvijo na nezaraščenem prerezu smo merili tudi na zaraščenem prerezu struge. Od vseh meritev je bila tega dne struga najbolj zaraščena, in sicer je tehtala suha masa vzorca, zajetega s površine 10×10 cm na bolj zaraščenem delu, 7,1 g. Zanimivo pa je, da je bila največja izmerjena hitrost na 6/10 globine zaraščenega prečnega prereza večja od največje hitrosti na 6/10 globine na nezaraščenem prerezu, kljub temu, da je bila povprečna hitrost celotnega prečnega prereza na nezaraščenem prerezu večja od tiste na zaraščenem prerezu. Razlog je v tem, da zaraščenost ni bila enakomerna, pač pa je bil del prereza ob desnem bregu (4/10 prečnega

prereza) bistveno bolj zaraščen od preostalih 6/10 prečnega prereza (slika 4.5). Obrast, ki so jo predstavljali predvsem mahovi, je prekrivala približno 80% površine na bolj zaraščenem delu prereza in okrog 30 % površine na manj zaraščenem delu prereza. Tako je glavnina vodnega toka tekla po manj zaraščenem delu prečnega prereza in posledično so bile hitrosti na tem delu bistveno večje kot na bolj zaraščenem delu. Največja hitrost na 6/10 globine je na zaraščenem prerezu znašala 0,30 m/s, in sicer na oddaljenosti 0,7 m od desnega brega, kar je ravno na sredini manj zaraščenega dela prečnega prereza. Vodostaj je bil na zaraščenem delu nekoliko višji, 8 cm, višina obrasti pa je ob tem merjenju znašala do 5 cm na bolj zaraščenem delu prečnega prereza ter do 1 cm na manj zaraščenem delu prečnega prereza. Hitrosti na 6/10 globine so bile na bolj zaraščenem delu torej merjene med obrastjo, zato so znašale največ 1 cm/s. Meritve smo zato na bolj zaraščenem delu ponovili še na 2/10 globine, kjer obrasti ni bilo več. Tu so bile hitrosti bistveno večje, vendar še vedno manjše od tistih na manj zaraščenem delu prečnega prereza in tistih na nezaraščenem prerezu.

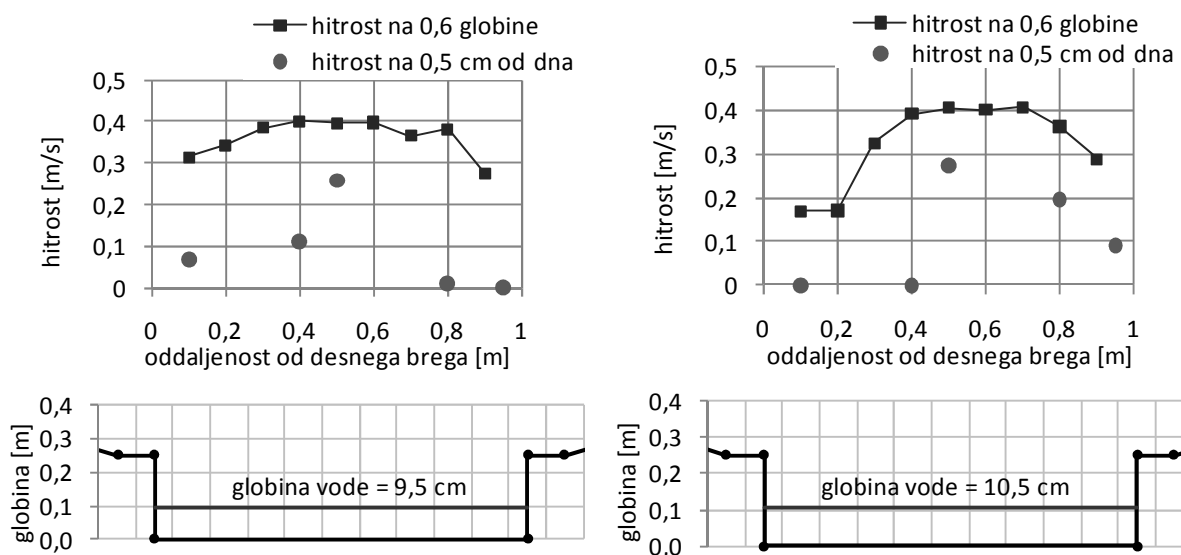


Slika 5.2: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 6,5 cm

Figure 5.2: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 6.5 cm

Meritve smo ponovili še na oddaljenosti 0,5 cm od dna struge. Na nezaraščenem prerezu smo tako kot največjo povprečno hitrost vertikale tudi največjo hitrost ob dnu struge izmerili na sredini prečnega prereza. Ta hitrost je znašala 0,12 m/s, kar je skoraj polovica povprečne hitrosti vertikale. Bistveno manjše vrednosti, le do 1 cm/s, pa smo izmerili ob bregovih struge. Seveda moramo upoštevati, da te vrednosti pomenijo povprečno vrednost v 60 sekundah merjenja. Hitrost na sredini struge se je v intervalu merjenja namreč gibala med 5 cm/s in 0,2 m/s (Priloga A), ob robovih poglobljene kinete pa med -1 cm/s in 4 cm/s (Priloga A). Na zaraščenem prečnem prerezu so bile hitrosti ob dnu preko

celotnega prereza bistveno manjše od tistih na nezaraščenem prerezu. Največja hitrost na oddaljenosti 0,5 cm od tal je na tem prerezu znašala 4 cm/s. Obrast je namreč tudi na manj zaraščenem delu segala do 1 cm visoko in je zato imela velik vpliv na hitrosti na oddaljenosti 0,5 cm od dna. Pri tem moramo seveda upoštevati, da so meritve med obrastjo bistveno manj zanesljive zaradi odboja ultrazvoka od vegetacije.



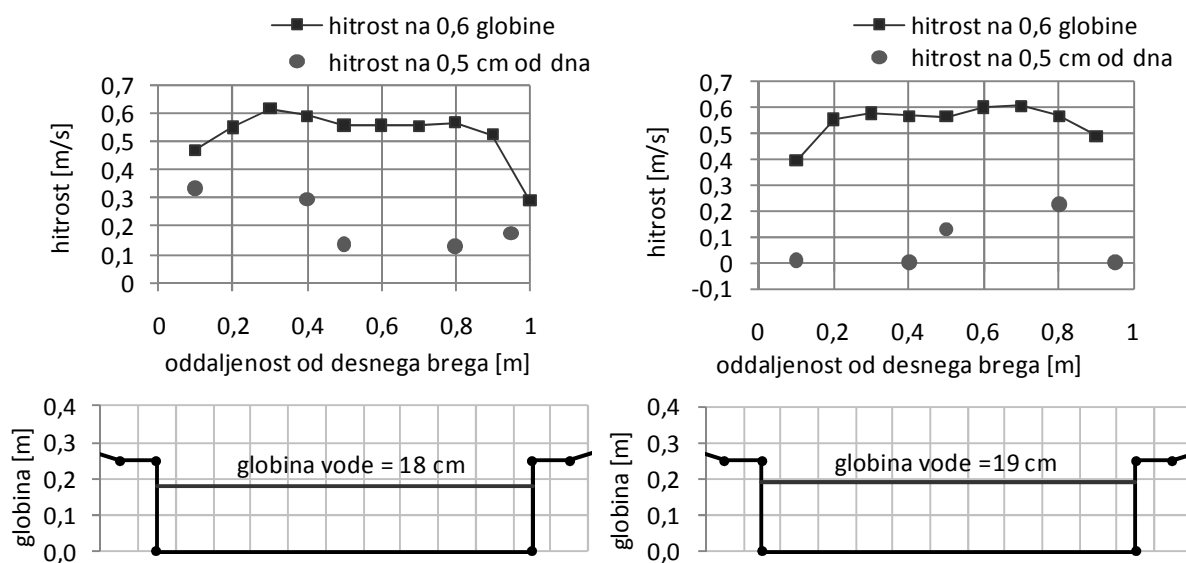
Slika 5.3: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 9,5 cm

Figure 5.3: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 9.5 cm

Naslednji vodostaj, pri katerem smo merili, je bil 9,5 cm na nezaraščenem prerezu, dne 2.8.2010. Največja hitrost na 6/10 globine je bila ponovno na sredini prečnega prereza in se je nekoliko zmanjšala ob bregovih, vendar pa je bila večja v primerjavi z meritvami pri vodostaju 6,5 cm ter je znašala 0,40 m/s (slika 5.3). Na zaraščenem delu je bil ob istem merjenju vodostaj za centimeter višji, masa suhega vzorca, zajetega z enako velike površine bolj zaraščenega dela prereza pa je tokrat znašala 2,4 g. Med tema dvema meritvama se je namreč pretok zelo povečal, pri čemer je prišlo do odtrganja obrasti in odnašanja dolvodno. Poleg manjše mase vzorca sta se zmanjšali tudi višina mahov ter pokrovnost struge z obrastjo. Bolj zaraščen del prereza je še vedno zavzemal 40% prereza ob desnem bregu, kjer je bilo pokritih približno 30% površine z mahovi višine 3 – 4 cm, med njimi pa je bilo tudi veliko peska in majhnih kamenčkov. Manj zaraščen del prereza je bil praktično brez obrasti; le-ta pa je bila zelo nizka in je zavzemala le 10% površine. Na tem delu tudi ni bilo peska ali kamenčkov. Največja hitrost na 6/10 globine zaraščenega prereza je bila le malenkost višja od tiste na nezaraščenem predelu – znašala je 0,41 m/s. Še vedno se je poznal vpliv obrasti na bolj zaraščenem delu prereza, vendar je bil manjši in ni segal tako daleč proti sredini prereza. Obrast je bila namreč

nižja in ni segala do 6/10 globine, zato so bile hitrosti na tej globini občutno večje kot ob vodostaju 8 cm in večji zaraščenosti z obrastjo.

Hitrosti na oddaljenosti 0,5 cm od dna so se povečale v primerjavi s tistimi pri nižjem vodostaju. Največja hitrost ob dnu, ki je bila tudi tokrat v sredini struge, je znašala 0,26 m/s, kar znaša že 2/3 povprečne hitrosti vertikale. Skoraj enako hitrost smo izmerili tudi na sredini zaraščenega prereza. Na bolj zaraščenem delu smo še vedno izmerili bistveno manjše hitrosti, do 1 cm/s. Podobne hitrosti smo izmerili tudi na skrajnih robovih nezaraščenega prereza.



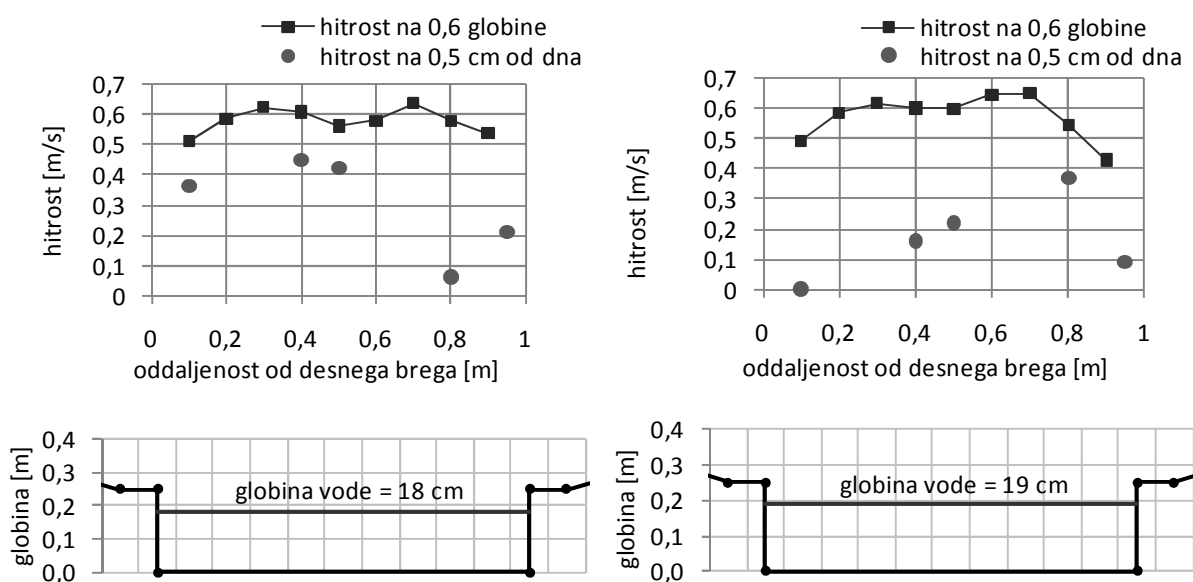
Slika 5.4: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 18 cm (masa vzorca alg na zaraščenem delu: 2,4 g)

Figure 5.4: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 18 cm (mass of algae sample on the overgrown cross-section: 2.4 g)

Ob vodostaju 18 cm, izmerjenem na nezaraščenem prečnem prerezu, smo merili ob dveh različnih gostotah obrasti. Ob meritvi dne 31.7.2010 je suha masa zajetega vzorca znašala 2,4 g, pri čemer sta bili gostota in višina obrasti enaki kot dne 2.8.2010 pri vodostaju 9,5 cm, kar je opisano že zgoraj. Dne 14.8.2010 pa je bilo ob enakem vodostaju obrasti še manj, in sicer je znašala masa suhega vzorca 1,1 g. Na nezaraščenem profilu smo seveda ob obeh merjenjih dobili podobne rezultate, še posebej pri meritvah na 6/10 globine. Največja izmerjena hitrost na 6/10 globine je bila 0,62 m/s oz. 0,64 m/s, kar je za 50% več kot pri vodostaju 9,5 cm, razporeditev hitrosti po prečnem prerezu pa je bila podobna. Za razliko od razporeditve pri najnižjem vodostaju, kjer je bila največja izmerjena hitrost na sredini prečnega prereza, nato pa je takoj začela upadati proti obema bregovoma, je pri tem vodostaju vidno upadla šele ob približanju bregovoma na 10 cm, sicer pa je bila po skoraj celotnem prečnem prerezu enako visoka (slika 5.4 in slika 5.5). Zelo podobne hitrosti in njihovo razporeditev smo dobili tudi pri obeh merjenjih na zaraščenem prerezu, še vedno pa se je nekoliko poznal vpliv obrasti, saj so bile

hitrosti bližje desnemu bregu (bolj zaraščen del) nekoliko manjše od tistih na manj zaraščenem delu prečnega prereza.

Primerjali smo tudi hitrosti na oddaljenosti 0,5 cm od dna, kjer je vpliv obrasti bolj očiten. Na nezaraščenem prerezu smo še posebej dne 2.8.2010 dobili zelo velike vrednosti hitrosti ob dnu; znašale so preko 0,4 m/s (slika 5.5). Nekoliko nižje vrednosti dne 31.7.2010, še posebno na sredini struge, so posledica nezanesljivosti meritev pri dnu, ki se pri višjih vodostajih še poveča. Na zaraščenem odseku je opazna bistvena razlika med bolj in manj zaraščenim delom prečnega prereza. Na bolj zaraščenem delu so hitrosti še vedno okrog 0 cm/s do največ 1 cm/s, v času merjenja pa se pojavljajo tudi protitočne hitrosti, medtem ko dosegajo hitrosti na manj zaraščenem delu primerljive vrednosti kot na nezaraščenem prerezu, in sicer do 0,37 m/s.

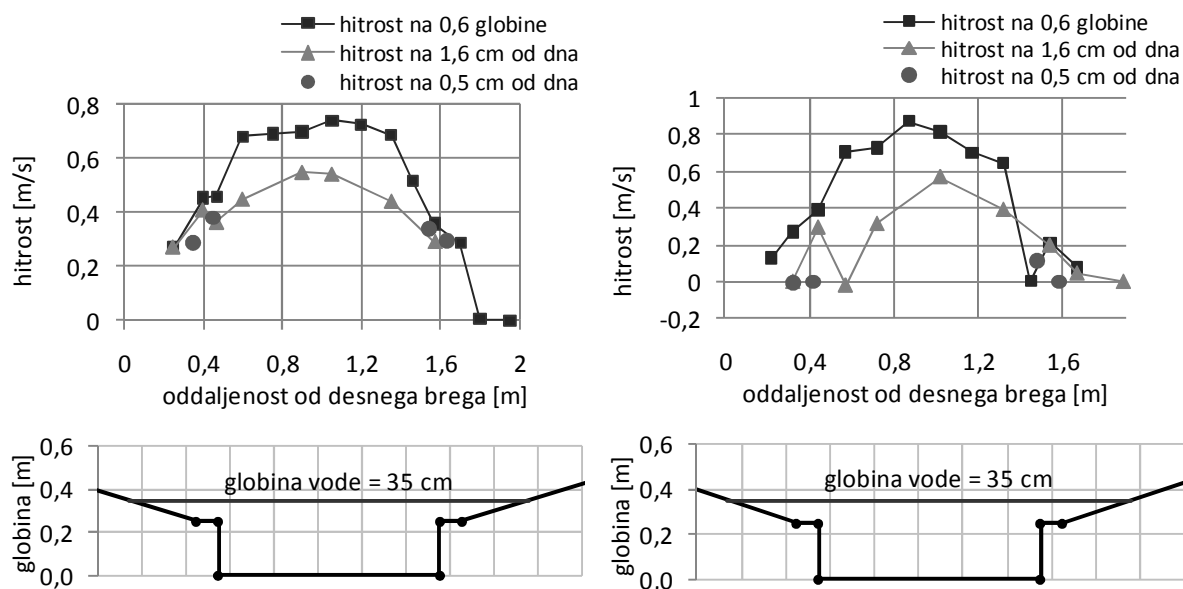


Slika 5.5: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 18 cm (masa alg na zaraščenem delu: 1,1 g)

Figure 5.5: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 18 cm (mass of algae sample on the overgrown cross-section: 1.1 g)

Kot je razvidno iz grafov povprečne hitrosti v odvisnosti od pretoka (5.35) ter hitrosti pri dnu v odvisnosti od pretoka (slika 5.36), se pri nadaljnjem povečevanju pretoka, in s tem tudi vodostaja, hitrost ni več veliko povečala. Pri vodostaju 35 cm dne 30.7.2010 se je voda že razlila izven glavne kinete, zato se je razporeditev povprečnih hitrosti vertikal po prečnem prerezu nekoliko spremenila, posebej ob bregovih (slika 5.6). Hitrosti v glavni kineti so se še nekoliko povečale glede na vodostaj 18 cm, in sicer so znašale 0,74 cm/s na nezaraščenem prerezu, medtem ko so bile na zaraščenem prerezu najvišje hitrosti celo nekoliko večje, 0,88 m/s, na račun nižjih hitrosti ob bregovih, zaraščenih s travo. Ob tem merjenju je bila zaraščenost z obrastjo namreč enaka kot dne 31.7.2010, vendar pa je

imela zaradi razlitja izven glavne kinete vpliv tudi trava, ki je rasla iz rež med betonskimi ploščami izven glavne poglobljene kinete. Hitrosti izven glavne kinete so se zato na tem prerezu zelo zmanjšale, medtem ko so na nezaraščenem prerezu dosegale vrednosti okrog 0,4 m/s. Ta vrednost je primerljiva s hitrostmi pri vodostaju 9,5 cm, saj je bila tudi globina vode na mestih izven glavne kinete 10 cm.

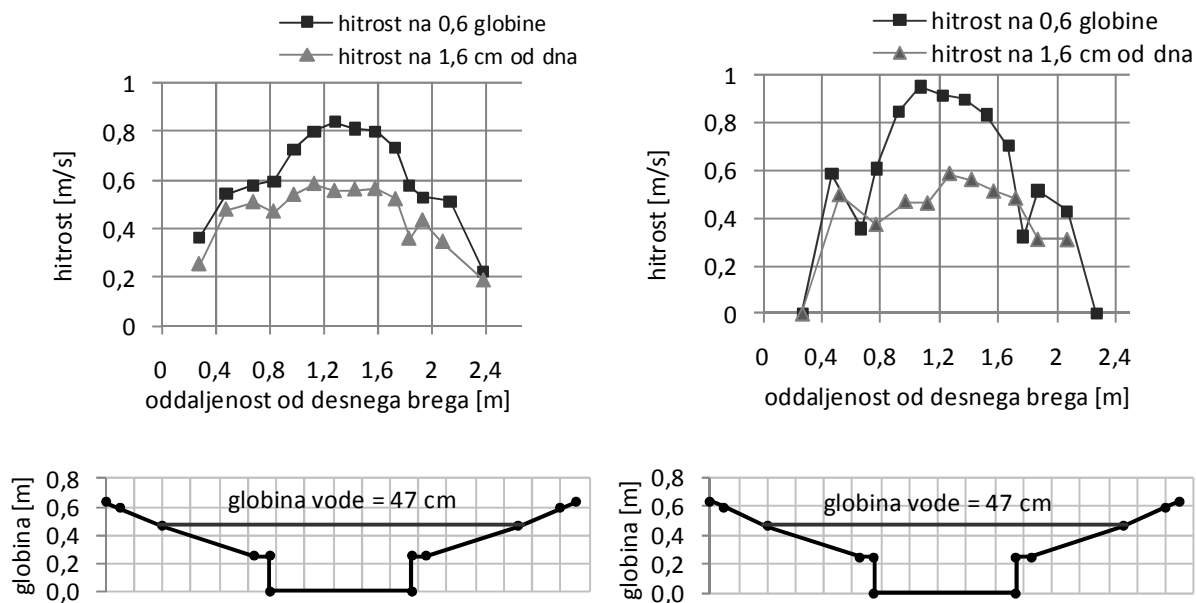


Slika 5.6: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 35 cm

Figure 5.6: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 35 cm

Ker je bil vodostaj previsok, da bi merili brez stojala, so meritve najbližje dna merjene 1,6 cm od dna. Izven glavne kinete pa smo tudi pri tem vodostaju še merili na oddaljenosti 0,5 cm od dna. Hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna predstavljajo približno 75% povprečne hitrosti vertikale. Hitrosti izven glavne kinete so na nezaraščenem prerezu na oddaljenostih 1,6 cm in 0,5 cm od dna le malo nižje od hitrosti na 6/10 globine. Drugače je na zaraščenem prerezu, kjer so se hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna zelo znižale na delih, kjer je rasla trava, na oddaljenosti 0,5 cm od dna pa so bile povsod izven glavne kinete hitrosti blizu 0 m/s, saj so bile betonske plošče zamuljene in rahlo obraščene z mahovi. Na obeh oddaljenostih od dna so se zaradi vrtninčenja pojavljale tudi protitočne hitrosti.

Pri nadaljnjem povišanju vodostaja tudi izven glavne kinete nismo več merili hitrosti na oddaljenosti 0,5 cm od dna, pač pa le na oddaljenosti 1,6 cm od dna ter na 6/10 globine. Dne 7.8.2010 smo merili pri vodostaju 47 cm (slika 5.7). Razporeditev hitrosti po prečnem prerezu je podobna kot pri prejšnjem vodostaju, največja hitrost na 6/10 globine pa se je še malo povečala, in sicer na 0,84 m/s. Sorazmerno so se povečale tudi hitrosti pri dnu, tako da še vedno znašajo malo manj kot 75% povprečne hitrosti vertikale, in sicer je to 0,58 m/s.



Slika 5.7: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 47 cm

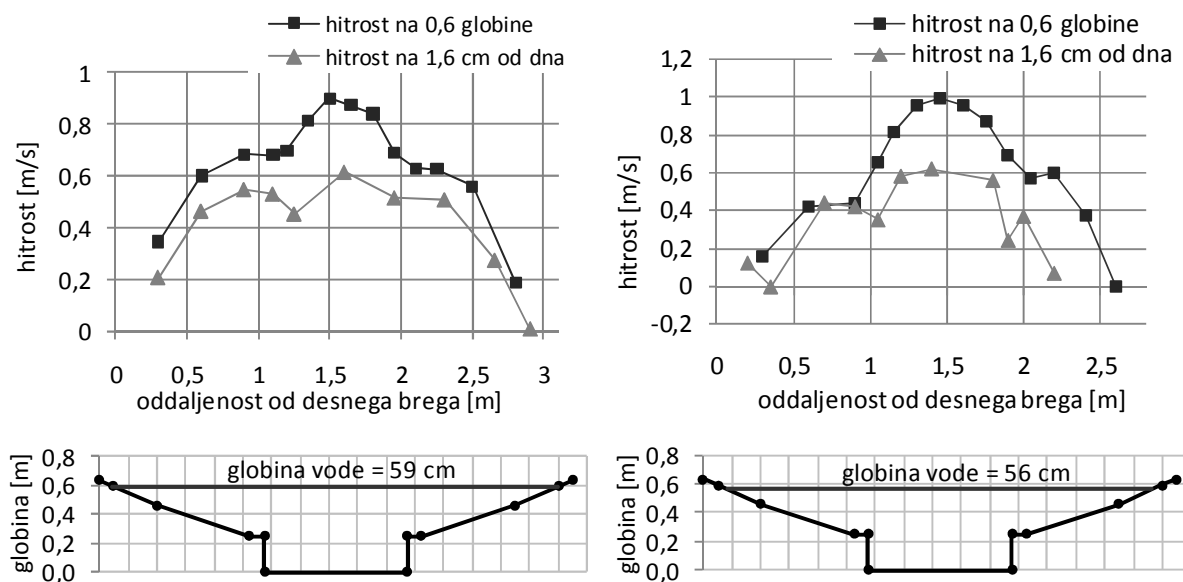
Figure 5.7: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 47 cm

Zaraščenost na zaraščenem profilu je bila podobna tisti z dne 2.8.2010, izven glavne kinete pa je iz špranj med betonskimi ploščami rasla trava. Masa suhe snovi vzorca obrasti je še vedno 2,4 g, vendar je bilo tokrat med njim več mulja. Med obrastjo, še posebno ob desnem bregu glavne kinete, je bilo skritih tudi veliko makroinvertebratov, kar pomeni, da jim tudi pri tako velikih hitrostih obrast še nudi primerno zatočišče. Razporeditev hitrosti je bila na zaraščenem prerezu nekoliko drugačna: zaradi obraščeniosti s travami so bile hitrosti izven glavne kinete precej manjše od tistih na nezaraščenem prerezu, hitrosti v glavni kineti pa precej večje in so se približale vrednosti 1 m/s. Hitrosti ob dnu so v glavni kineti dosegale podobne vrednosti kot na nezaraščenem prerezu, izven glavne kinete pa so bile te vrednosti nekoliko manjše.

Najvišji vodostaj, pri katerem smo merili na merilnem mestu GL2 je bil 59 cm na nezaraščenem prerezu, dne 15.8.2010. Tudi tokrat je bila razporeditev hitrosti na nezaraščenem prerezu primerljiva s tisto pri predhodnem vodostaju, najvišja hitrost na 6/10 globine pa je tokrat dosegla 0,9 m/s (slika 5.8). Prav tako je bilo tudi s hitrostmi na oddaljenosti 1,6 cm od dna, vendar se najvišja vrednost hitrosti ni več prav dosti povečala – za malenkost je presegla vrednost 0,6 m/s.

Zaraščenost na zaraščenem prerezu je bila podobna tisti pri prejšnjem vodostaju, le da je bila suha masa vzorca obrasti tokrat še manjša in je znašala 1,1 g. Zaradi tako majhne mase in visokega vodostaja obrast ni imela več pomembnega vpliva na hitrosti, ki smo jih merili. Še vedno pa se je poznal velik vpliv trave izven glavne kinete, kjer so bile hitrosti na 6/10 globine za približno 30%

nižje od tistih na nezaraščenem prerezu. Še bolj se je ta vpliv poznal na hitrostih na oddaljenosti 1,6 cm od dna, kjer so se pojavljale tudi protitočne hitrosti.

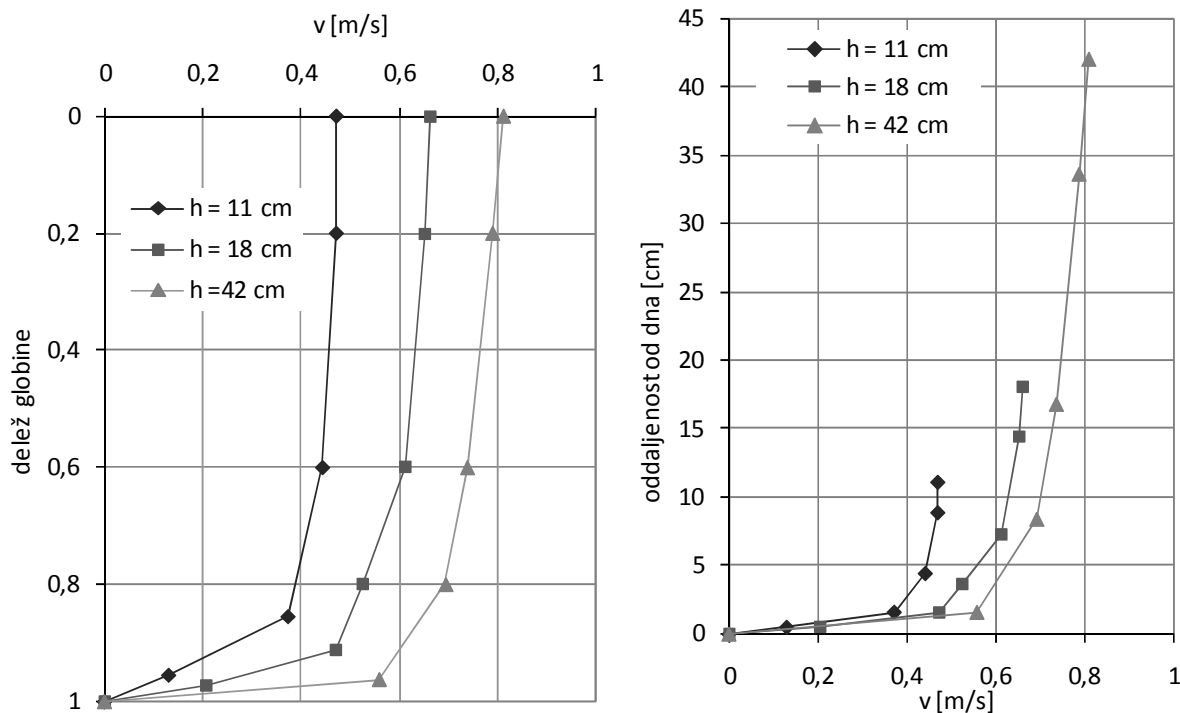


Slika 5.8: Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri vodostaju 59 cm

Figure 5.8: Comparison between water velocities above the “pure concrete” (left) and the “overgrown concrete” (right) at water level 59 cm

5.3 Vpliv objekta na vertikalni profil hitrosti v matici struge nezaraščenega betonskega korita na merilnem mestu GL2

Na istem nezaraščenem prečnem prerezu betonske struge smo izvedli še primerjavo vertikalnih profilov hitrosti v matici struge brez objekta, pred objektom in za objektom. Brez objekta smo dobili lepe eksponentne krivulje, iz katerih je razvidno, da so pri višjem vodostaju hitrosti večje po celotni vertikali (slika 5.9). Na levem grafu so krivulje hitrosti narisane glede na relativni delež globine, na desnem grafu pa glede na absolutno oddaljenost od dna. Iz desnega grafa tako vidimo, da je pri enaki absolutni oddaljenosti od dna hitrost vodnega toka manjša, kadar je vodostaj nižji.

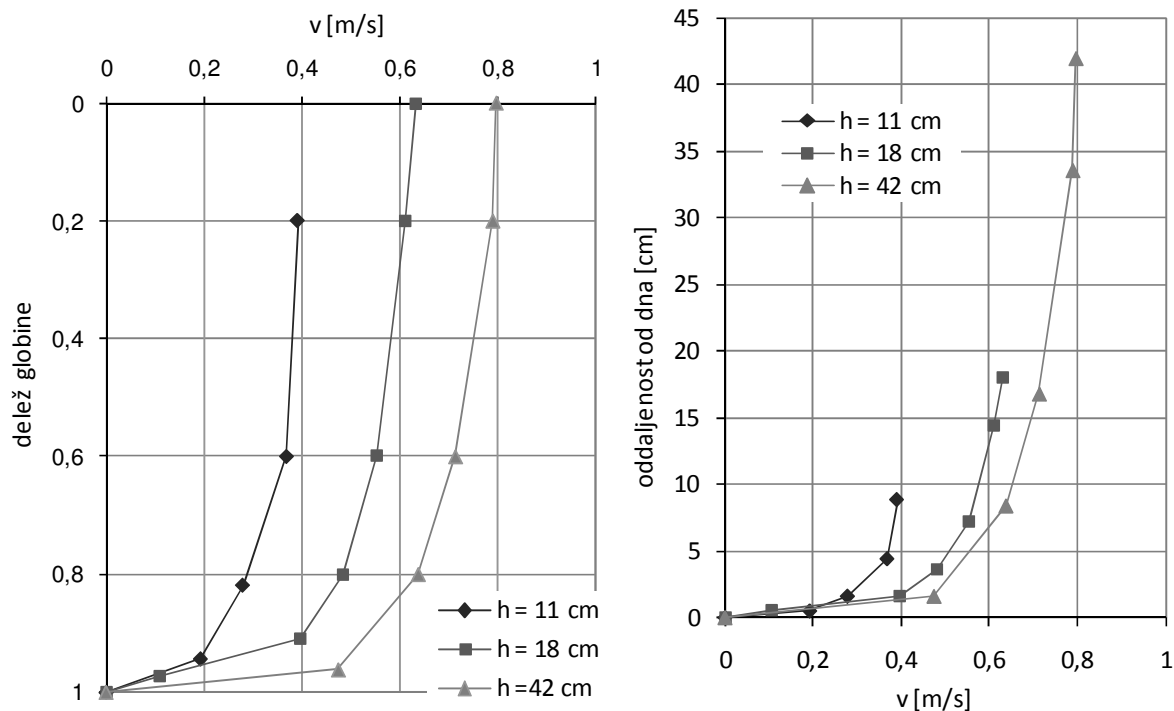


Slika 5.9: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v matici toka v odvisnosti od vodostaja

Figure 5.9: Comparison of vertical velocity profiles in dependence of water level

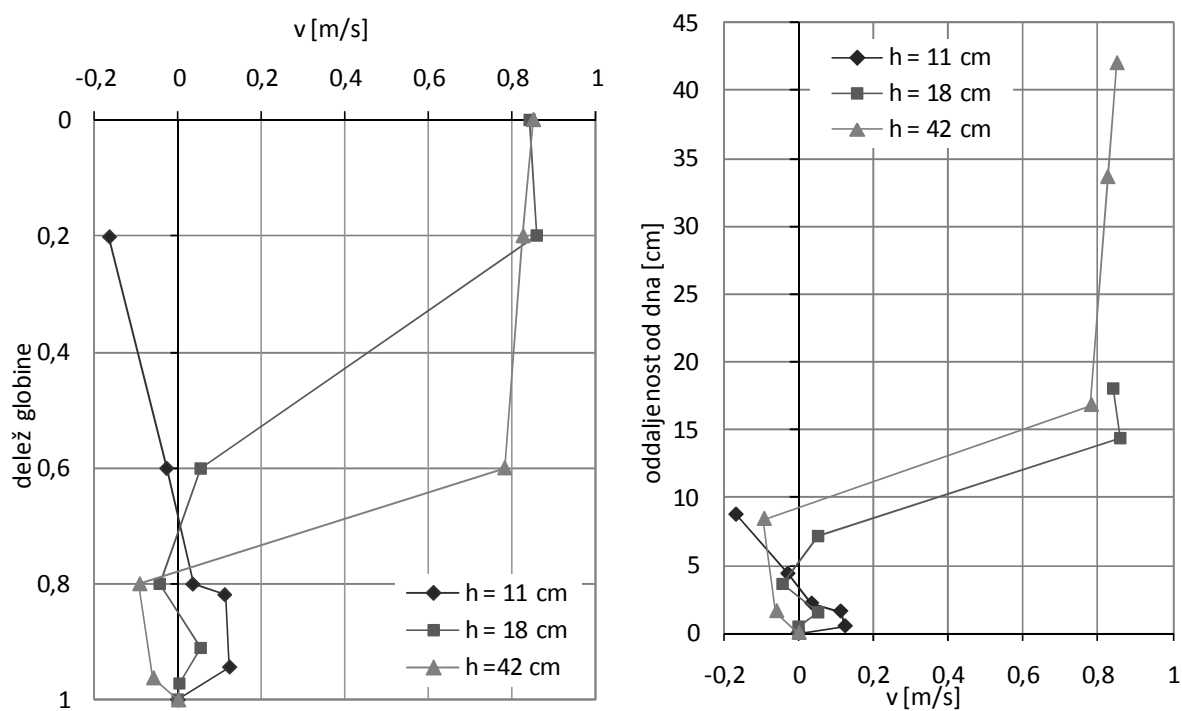
Nato smo v matico struge položili kamen dolžine 25 cm, širine 16 cm in višine 10 cm ter ga postavili na sredino struge z daljšo stranico prečno na smer toka vode. Hitrosti po vertikalnem profilu smo merili pred in za kamnom. Meritev pred kamnom je bila merjena 13 cm pred kamnom, meritev za kamnom pa 5 cm za kamnom. To je namreč najbližje, kar smo se lahko približali s senzorjem. Zaradi stojala je ta razdalja pred kamnom večja kot za njim.

Hitrosti pred kamnom se niso prav dosti spremenile od tistih, merjenih v matici struge brez kamna (slika 5.10). Pri nižjih vodostajih so bile zabeležene nekoliko manjše hitrosti kakor brez kamna, pri najvišjem vodostaju pa se je ta razlika praktično izničila. Za kamnom je bila situacija bolj zapletena, saj prihaja do vrtnčenja vode, zato v višini kamna vrednosti hitrosti nihajo od pozitivnih do negativnih (slika 5.11). Nad višino kamna pa so hitrosti še večje zaradi vpliva ovire.



Slika 5.10: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v matici toka v odvisnosti od vodostaja pred kamnom

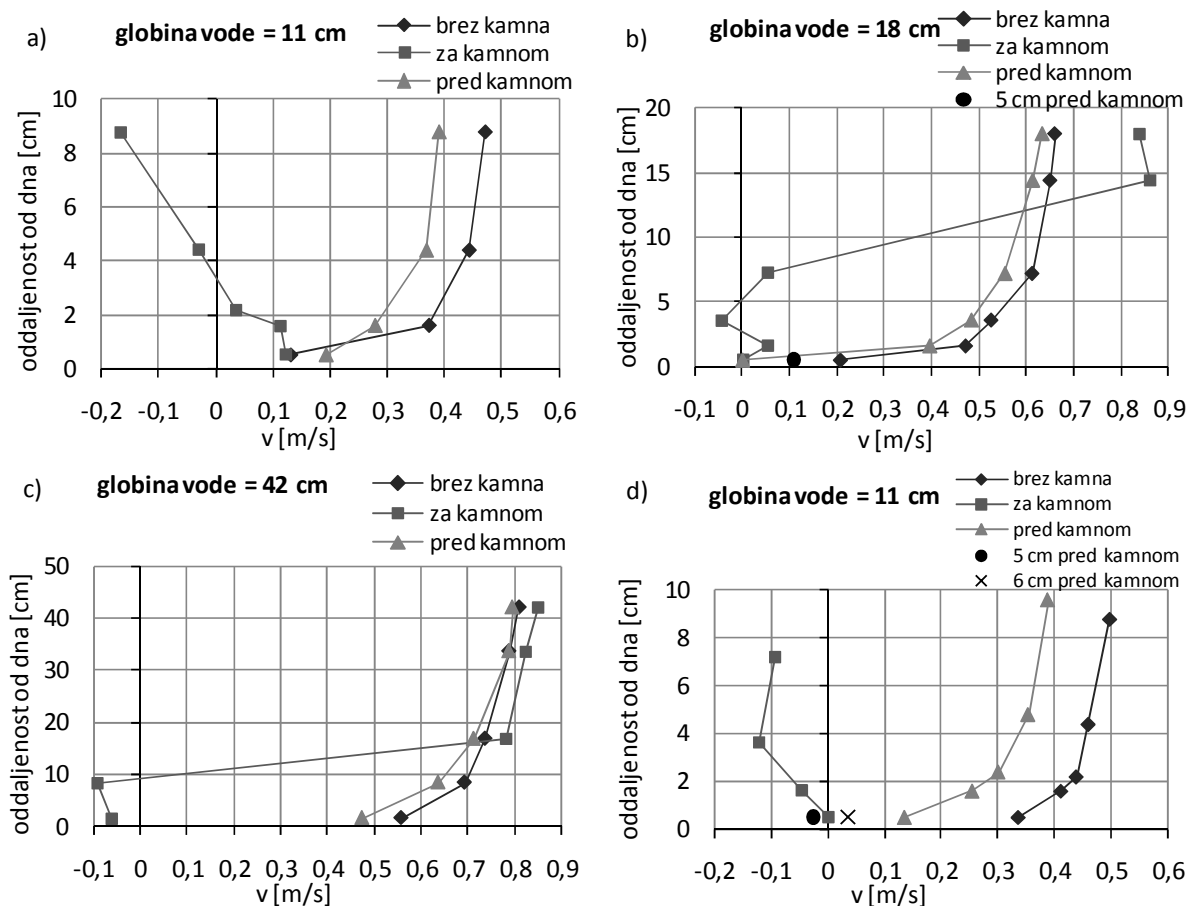
Figure 5.10: Comparison of vertical velocity profiles upstream of the stone in dependence of water level



Slika 5.11: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v matici toka v odvisnosti od vodostaja za kamnom

Figure 5.11: Comparison of vertical velocity profiles downstream of the stone in dependence of water level

Zaradi boljše preglednosti situacije pred in za oviro ob posameznem vodostaju smo narisali še grafe hitrostnih profilov brez ovire ter pred in za njo za vsak vodostaj posebej (slika 5.12). Višji kot je vodostaj, manjša je razlika med hitrostmi pred kamnom in hitrostmi, kadar v strugi ni kamna.



Slika 5.12: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v matici toka brez ovire ter pred in za njo ob različnih vodostajih (višina kamna je v prvih treh primerih 10 cm, v zadnjem pa 14 cm)

Figure 5.12: Comparison of thalweg vertical velocity profiles without an underwater obstacle, upstream of obstacle and downstream of obstacle at different water levels (height of the stone is 10 cm in first three cases and 14 cm in the last case)

Za kamnom pri vseh vodostajih prihaja do vrtnčenja, zato se do višine kamna pojavljajo negativne hitrosti. Nad višino kamna pa hitrosti za njim presežejo hitrosti pred njim in tudi hitrosti v prosti strugi, kar je še posebej očitno pri nizkih vodostajih, kjer je višina ovire relativno velika v primerjavi z vodostajem. Pri višjih vodostajih, kjer je višina ovire relativno manjša, se ta razlika precej zmanjša, saj pride do relativno manjšega zmanjšanja ploščine prečnega prereza vodnega toka. Pri globini 18 cm (slika 5.12b) smo meritev na oddaljenosti 0,5 cm od dna pred kamnom ponovili še na oddaljenosti 5 cm pred kamnom, saj smo se mu brez stojala lahko bolj približali. Izmerjena hitrost je za polovico manjša kot pri merjenju brez kamna, in sicer znaša 0,1 m/s. Predvidevamo, da se še bližje kamnu hitrost še bolj zmanjša, vendar bližje žal nismo mogli meriti. Pri višjih vodostajih smo lahko merili šele 1,6 cm nad dnom, kjer so bile hitrosti že večje, in temu primerno tudi razlike med hitrostmi pred

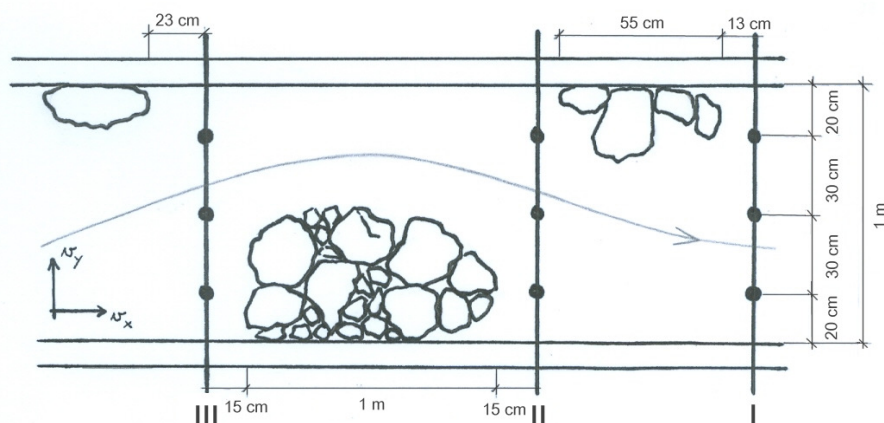
oviro in za njo. Poleg tega smo zaradi stojala lahko merili najmanj 13 cm pred oviro, saj se pri višjih vodostajih brez stojala ne da meriti.

V zadnjem primeru (slika 5.12d) smo uporabili večji kamen, in sicer naslednjih dimenzij: dolžine 32 cm, širine 20 cm in višine 14 cm. V prvem primeru (slika 5.12a) je namreč voda ravno še polzela preko kamna, tokrat pa je z obeh strani tekla mimo njega. V primerjavi z manjšim kamnom se je v tem primeru hitrost pred kamnom nekoliko bolj zmanjšala glede na hitrost brez kamna. Zanimive so tudi vrednosti 0,5 cm od dna bližje kamnu. Na oddaljenosti 5 cm od kamna gorvodno smo dobili celo negativne vrednosti, medtem ko je bila 6 cm gorvodno od kamna hitrost vodnega toka približno 3 cm/s. Poudariti moramo, da kamen ni bil kvadraste oblike, pač pa je bil nepravilnih oblik, zato je prišlo še do dodatnega vrtinčenja predvsem na območju stika kamna z betonsko podlago. Naš namen namreč ni bil kvantificirati vpliva ovire določene oblike na turbulentna gibanja vode, pač pa le kvalitativno ugotoviti, kako naravna ovira nepravilnih oblik vpliva na hitrost in smer vode ter s tem nudi zatočišča vodnim nevretenčarjem ali drugim organizmom v tekoči vodi. Vrednosti hitrosti za kamnom so bile ves čas negativne.

Prikazana je le vzdolžna komponenta hitrosti, vendar sta zaradi obtoka okoli ovire in vrtinčenja za njo pomembni tudi prečna in še posebej navpična komponenta. Pri dnu smo pred in za oviro dobili velike vrednosti navpične komponente hitrosti, usmerjene od dna proti vodni gladini, pred oviro zaradi nastajajočega vrtinca, za njo pa zaradi povratnega kroženja. Vrednosti navpične komponente hitrosti so ob meritvah pri dnu pred oviro primerljive z vzdolžno komponento v isti točki, vrednosti okoli 0,1 m/s pa dosegajo tudi na nekoliko večji oddaljenosti od dna (približno višine ovire) za oviro. Navpične komponente hitrosti pri gladini, pri zelo nizkih vodostajih pa tudi na 6/10 globine, nismo mogli izmeriti, ker je eden izmed sprejemnikov že gledal iz vode.

5.4 Tok vode okrog dveh gruč kamenja na merilnem mestu GL3

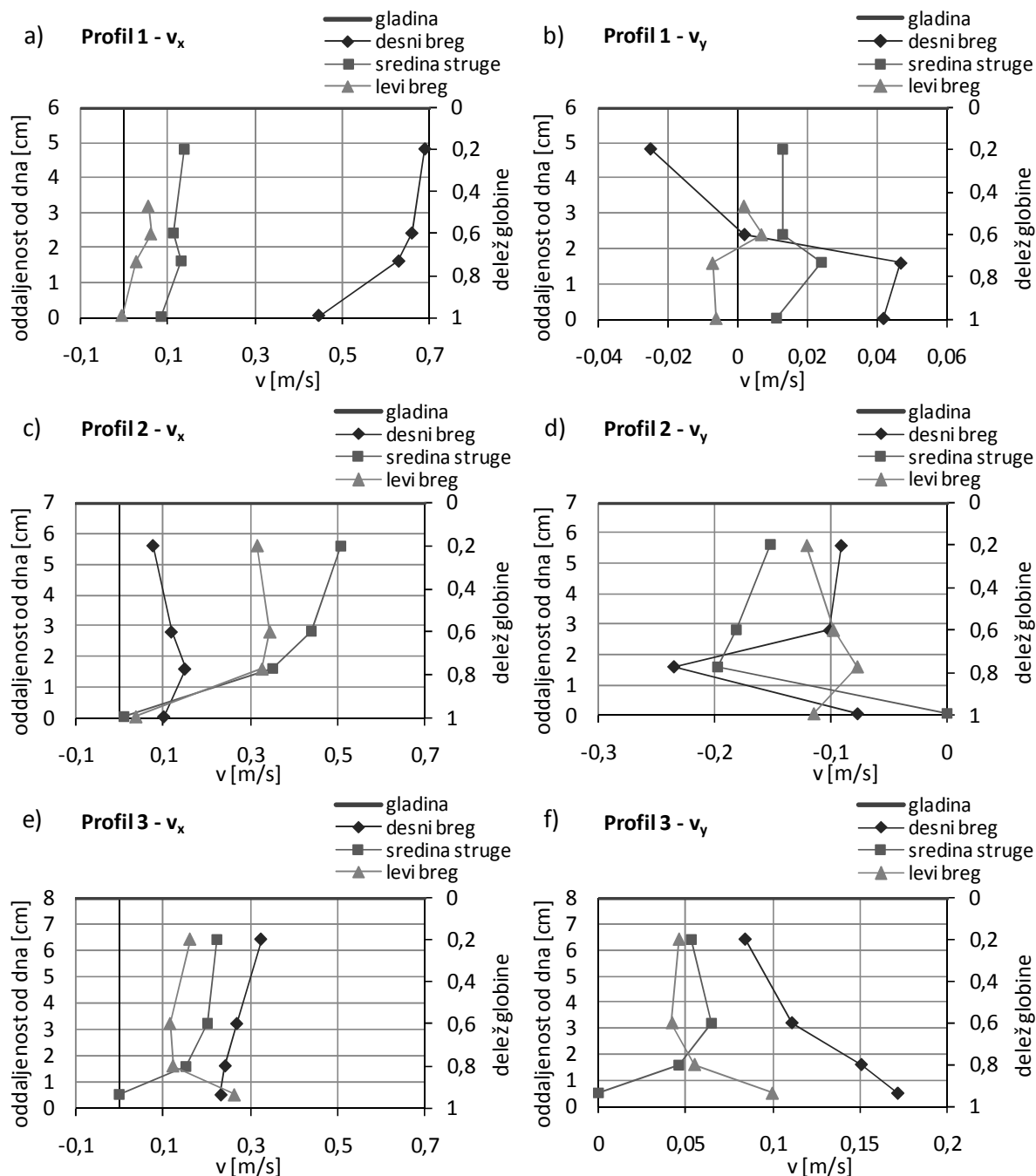
Na merilnem mestu GL3, ki se prav tako nahaja na betonskem delu struge, smo si izbrali tri prečne prereze okrog dveh gruč kamenja (slika 5.13), na katerih smo merili ob treh različnih vodostajih. Zaradi vpliva zaježitve zaradi kamnov globina med posameznimi profili in točkami na njih niha za približno 2 centimetra. Kamenje sega 10 do 15 cm visoko in posebno ob nizkem vodostaju, ko ni prelito, ustvarja izrazito vijuganje tokovnic. Merski profili si sledijo od dolvodnega proti gorvodnemu. Rezultati prikazujejo hitrosti vzdolž struge (v_x) in prečno na strugo (v_y). Vertikali označeni kot »levi breg« in »desni breg« sta od roba glavne kinete oddaljeni 20 cm.



Slika 5.13: Skica prečnih prereзов in merilnih točk na merilnem mestu GL3

Figure 5.13: Drawing of cross-sections and measuring points at the measuring site GL3

Ob vodostaju 6 cm do 8 cm smo merili dne 21.7.2010 (slika 5.14). Kamni so takrat gledali iz vode, zato je matica toka izrazito vijugala okrog njih. Na sliki 5.14a se izrazito vidi pomik matice toka na prečnem prerezu 1 k desnemu bregu, saj so bile hitrosti ob desnem bregu bistveno višje od tistih na sredini struge ter ob levem bregu. Za kamenjem ob levem bregu je prihajalo do vrtinčenja, zato so se pojavljale tudi protitočne hitrosti. Hitrosti v prečni smeri so bile za velikostni razred manjše od hitrosti v vzdolžni smeri. Tudi te hitrosti so bile največje ob desnem bregu, zanimivo pa je, da so bile pri dnu pozitivne, kar pomeni, da je bil tok usmerjen od desnega proti levemu bregu. Na 6/10 globine je tok v prečni smeri praktično miroval, ob površini pa so bile vrednosti negativne, kar pomeni, da je bil vodni tok usmerjen od levega proti desnemu bregu. Iz tega lahko sklepamo, da je prihajalo do vrtinčenja prečno na strugo potoka. Prečne hitrosti v sredini struge so bile usmerjene od desnega proti levemu bregu, prečne hitrosti ob levem bregu pa so bile zanemarljive. Na prerezu 2 so bile največje vzdolžne hitrosti na sredini struge, ki pa so bile nekoliko manjše od tistih ob desnem bregu prereza 1. Hitrosti ob levem bregu so bile nekoliko manjše od tistih na sredini struge, najmanjše pa so bile seveda ob desnem bregu za gručo kamenja. Hitrosti v prečni smeri so bile na celotnem prerezu 2 negativne, kar pomeni, da so bile usmerjene od levega proti desnemu bregu, kar se tudi ujema z vizualnim izgledom tokovnic. Njihove vrednosti so bile bistveno višje kot na prerezu 1 in so dosegale celo vrednosti do 0,2 m/s (slika 5.14d), kar tudi utemeljuje nižje vrednosti vzdolžnih hitrosti. Po profilu 1 so bile vzdolžne hitrosti bolj enakomerno razporejene in zaradi zaježitvenega učinka gruče kamnov ob desnem bregu manjše kakor na prerezu 2 (slika 5.14e). Hitrosti v prečni smeri so bile na prerezu 1 usmerjene od desnega proti levemu bregu in so bile največje ob desnem bregu, saj so tokovnice tam zavijale okrog gruče kamenja ob desnem bregu (slika 5.14f).



Slika 5.14: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) smeri na treh točkah (ob desnem bregu struge, v matici toka ter ob levem bregu) in na treh prečnih prerezih ob vodostaju 7 cm

Figure 5.14: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components (at right riverbank, in thalweg and at left riverbank) at three cross-sections at water level 7 cm

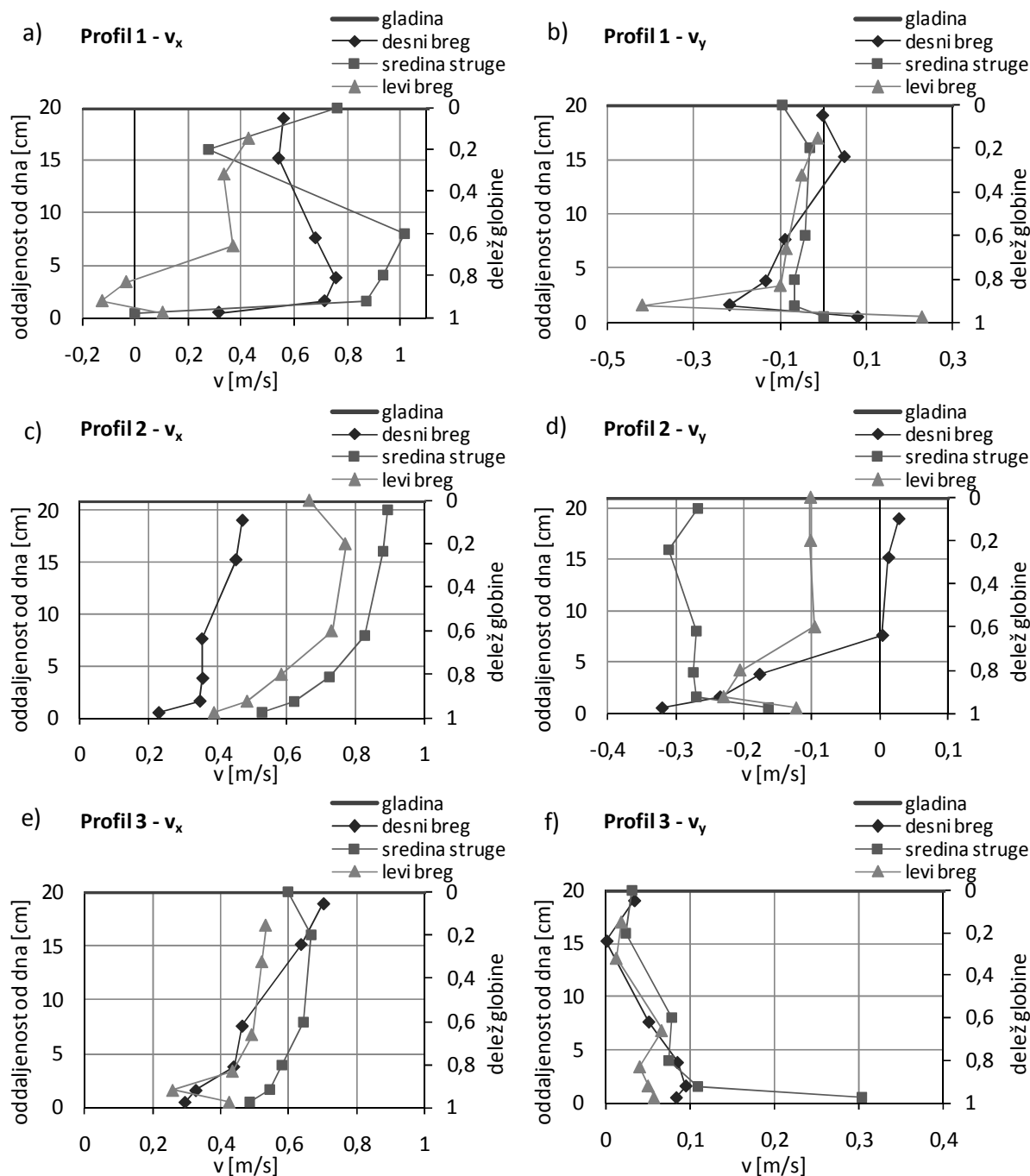
Naslednji vodostaj, pri katerem smo merili, je bil 17 cm do 21 cm, dne 31.7.2010. Hitrosti so se glede na prejšnji vodostaj povečale, spremenila pa se je tudi njihova razporeditev in smer, saj se je tokrat voda prelivala preko kamnov. Hitrost v vzdolžni smeri je bila tokrat na vseh treh profilih največja na sredini struge (slika 5.15). Največja razlika med hitrostjo na sredini struge in ob straneh je bila ravno na profilu 1 in se je zmanjševala po profilih gorvodno, hkrati pa se je tudi zmanjševala največja hitrost

na profilu. Zaradi zelo turbulentnega toka preko kamenja in posledičnega nihanja vodne gladine je prihajalo do napak pri merjenju hitrosti tik pod vodno gladino (slika 5.15a – sredina struge). Vpliv gruče kamenja je bil še vedno opazen, posebej pri hitrostih v bližini dna. Tako so hitrosti ob levem bregu na prerezu 1 za kamni nihale okrog 0 m/s zaradi vrtnčenja za kamni (slika 5.15a), na prerezu 2 pa so bile bistveno manjše hitrosti ob desnem bregu, za gručo kamenja, kakor na preostalih dveh točkah tega prečnega prereza (slika 5.15b). Zaradi zelo turbulentnega toka so se povečale tudi hitrosti v prečni smeri. Na profilu 1 (slika 5.15b) so prevladovalle negativne hitrosti, torej hitrosti v smeri od levega proti desnemu bregu, medtem ko pri nižjem vodostaju na istem profilu prevladujejo hitrosti v obratni smeri (slika 5.14b). Pri višji hitrosti, in s tem višjem Reynoldsovem številu, se tokovnice namreč prej odlepijo od gruče kamenja (Vogel, 1994). Pri vodostaju $h_1 = 6$ cm je bila hitrost vode ob levem bregu, torej okoli gruče kamnov, $v_1 = 0,062$ m/s, temperatura vode pa $T_1 = 18,5$ °C. Pri vodostaju $h_2 = 20$ cm pa je bila hitrost vode na levem bregu $v_2 = 0,368$ m/s in temperatura $T_2 = 15$ °C. Gruča kamenja je v dolžino merila približno 55 cm. Iz teh podatkov lahko določimo približni Reynoldsovi števili pri vsakem od opisanih pogojev:

$$Re_1 = \frac{l_1 v_1}{\nu_1} = \frac{0,55m \cdot 0,062m/s}{1,04 \cdot 10^{-6} m/s^2} = 32800 \text{ in}$$

$$Re_2 = \frac{l_2 v_2}{\nu_2} = \frac{0,55m \cdot 0,368m/s}{1,14 \cdot 10^{-6} m/s^2} = 177500$$

Podatke o kinematični viskoznosti vode pri različnih temperaturah smo vzeli iz tabele v prilogi B - »Fizikalne lastnosti vode«. Kot vidimo, se je Reynoldsovo število med tema dvema vodostajema bistveno povečalo, posledica česar je bila, da so se pri višji hitrosti tokovnice prej odlepile od gruče kamnov ob levem bregu. Ker je bil prečni prerez 1 postavljen neposredno za gručo kamenja, se je posledično spremenila smer hitrosti prečno na strugo. Ob najnižjem vodostaju so namreč tokovnice takoj za gručo kamenja zavile proti bregu, medtem ko so se pri višjih vodostajih bregu približale na večji oddaljenosti od nje.

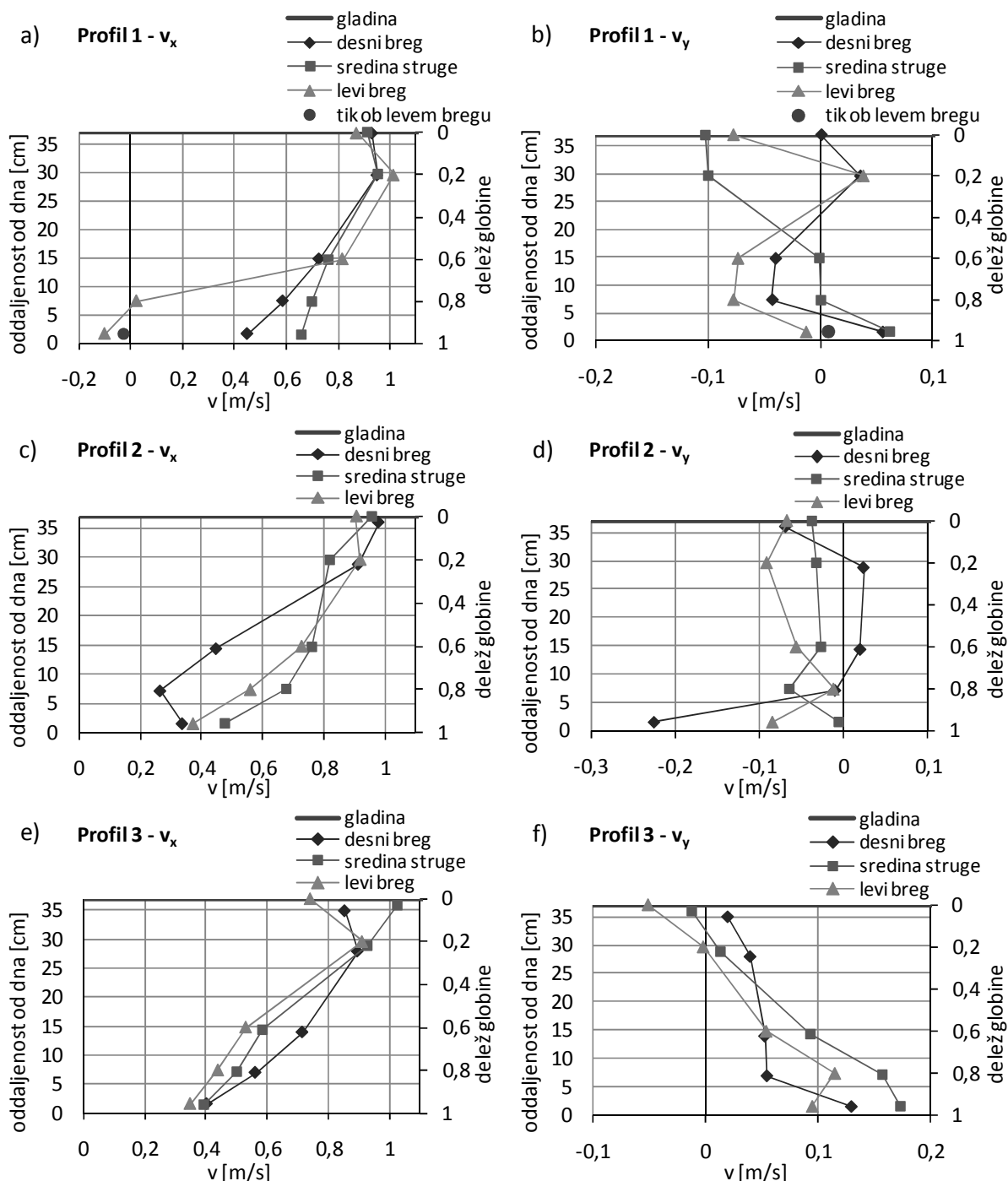


Slika 5.15: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) smeri na treh točkah (ob desnem bregu struge, v matici toka ter ob levem bregu) in na treh prečnih prerezih ob vodostaju 20 cm

Figure 5.15: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components (at right riverbank, in thalweg and at left riverbank) at three cross-sections at water level 20 cm

Na prečnem prerezu 2 so bile prečne hitrosti tudi pri tem vodostaju izrazito negativne, torej usmerjene od levega proti desnemu bregu, še posebej na sredini struge, kjer so dosegle vrednosti do -0,3 m/s (slika 5.15d). Tudi situacija na profilu 3 je bila podobna kot pri najnižjem vodostaju. Prečne hitrosti so bile na tem mestu pozitivne, torej usmerjene od desnega proti levemu bregu (slika 5.15f), vendar so bile na vertikali ob desnem bregu nekoliko manjše kakor pri najnižjem vodostaju, saj je bilo vijuganje

okoli gruč kamenja zaradi prelivanja čeznje manj izrazito. Večje hitrosti v prečni smeri so bile izmerjene v bližini dna, ob vodni gladini pa so bile z izjemo sredinske vertikale na prerezu 2 zanemarljive.



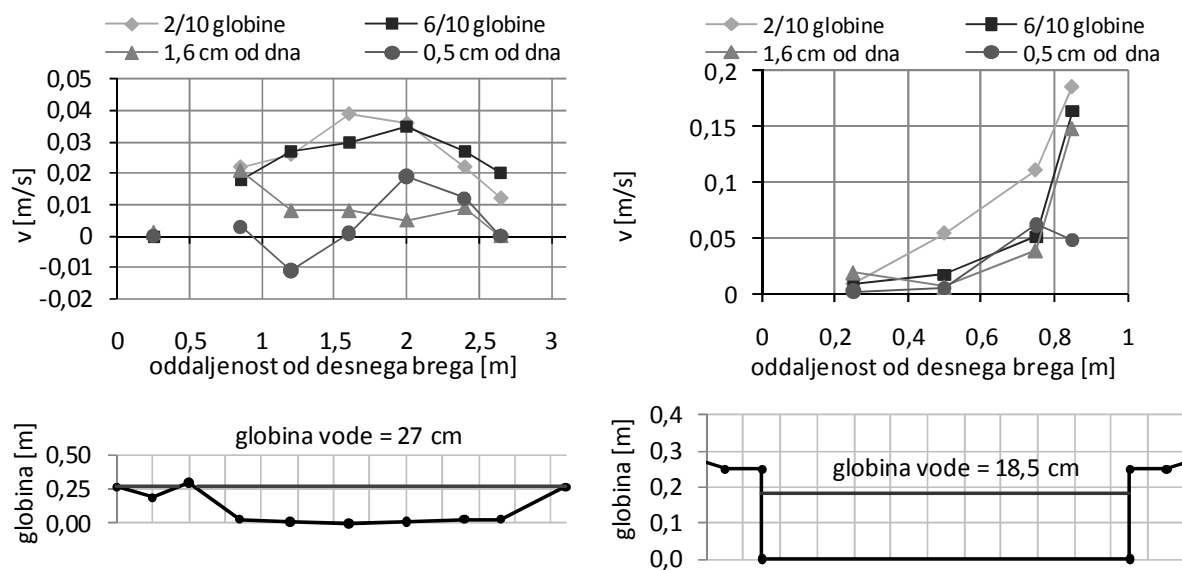
Slika 5.16: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) smeri na treh točkah (ob desnem bregu struge, v matici toka ter ob levem bregu) in na treh prečnih prerezih ob vodostaju 37 cm

Figure 5.16: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components (at right riverbank, in thalweg and at left riverbank) at three cross-sections at water level 37 cm

Na tem merilnem mestu smo merili še pri vodostaju 37 cm, dne 7.8.2010. Hitrosti v vzdolžni smeri se niso več bistveno povečale od največjih hitrosti pri srednjem vodostaju, vendar so se bolj poenotile po posameznem prečnem prerezu (slika 5.16). Še vedno pa se je opazil vpliv gruč kamenja v hitrostih pri dnu, še posebej na prečnem prerezu 1 ob levem bregu (za kamenjem) ter na prečnem prerezu 2 ob desnem bregu (za kamenjem). Tudi na prečnem prerezu 3 (pred kamenjem) je bil viden vpliv zaježitve – hitrosti so se po vertikali povečevale bolj linearno kot eksponentno, saj so bile hitrosti za kamenjem manjše kakor bi bile pri neoviranem toku na enaki oddaljenosti od dna (slika 5.16e). Na prečnem prerezu 1 so ravno tako kot pri srednjem vodostaju prevladovali negativne prečne hitrosti, torej usmerjene od levega proti desnemu bregu, le da so bile njihove absolutne vrednosti nekoliko nižje (slika 5.16b). Prav tako so bile negativne vrednosti prečnih hitrosti po večini prečnega prereza 2 (slika 5.16d), ki pa so bile prav tako precej manjše od tisti pri srednjem vodostaju kot tudi od tistih pri najnižjem vodostaju. Na prečnem prerezu 3 so se v bližini dna pojavljale precej velike vrednosti prečnih hitrosti, v smeri od desnega proti levemu bregu, ki pa so se proti površini manjšale in tik pod vodno gladino dosegle celo obrnejo smer toka od levega proti desnemu bregu (slika 5.16f), kar je posledica intenzivnega turbulentnega vrtinčenja.

5.5 Primerjava vertikalnih profilov hitrosti nad naravnim substratom in nad betonskim koritom na merilnem mestu GL4

Merilno mesto GL4 se nahaja na prehodu iz struge s seminaravnim substratom v betonsko korito in je sestavljeno iz dveh prečnih prerezov: prvi se nahaja 2,5 m pred koncem naravnega substrata, drugi pa 1,8 m dolvodno od začetka betonskega korita. Med obema prerezoma, torej na stiku naravnega substrata z betonskim koritom, je prag iz velikih kamnov, ki povzroča zaježbo na gorvodnem prerezu. Tudi na začetku samega betonskega korita je v strugi nekaj večjih kamnov, 20 cm dolvodno od drugega prereza pa je kamenje preko celotne glavne kinete in sestavlja prag, ki je ob levem bregu nižji (okrog 10 cm), ob desnem pa višji (okrog 20 cm). Na prečnem prerezu s seminaravnim substratom je bila širina struge bistveno večja kot na prečnem prerezu z betonsko strugo; prav tako je bila opazno večja globina vode, hitrost vode pa manjša. Vse te razlike med prerezoma so bile večje ob nižjih vodostajih, ko je bila omočena le poglobljena kineta betonskega korita, z višanjem vodostaja pa so se razlike zmanjševale. Primerjali smo hitrosti na 2/10 globine, 6/10 globine, 1,6 cm od dna ter pri nižjih vodostajih tudi 0,5 cm od dna. Hitrosti na površini zaradi interakcije z gladino in nihanja gladine pri višjih vodostajih niso dajale zanesljivih rezultatov.

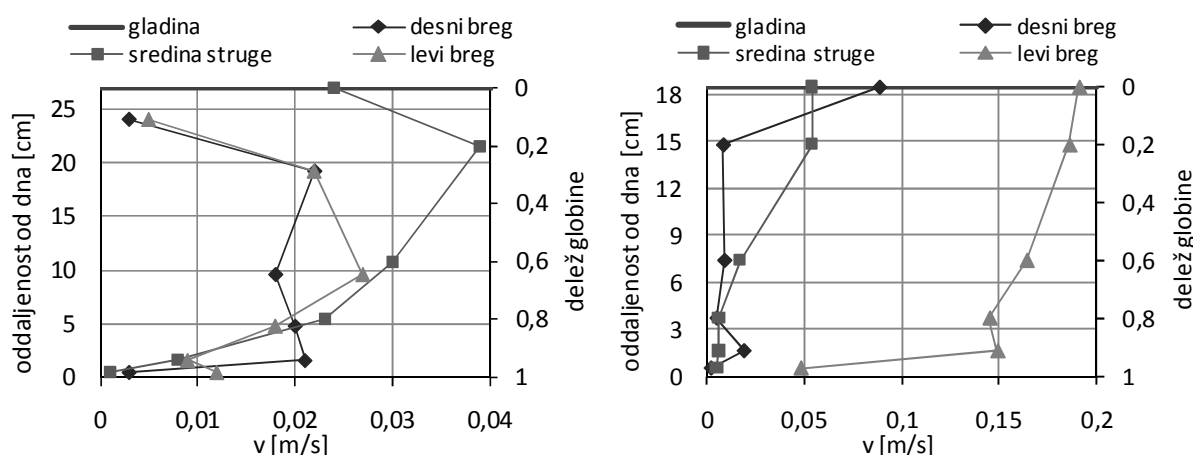


Slika 5.17: Primerjava hitrosti na prečnem prerezu preko seminaravnega substrata (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 27 cm nad naravnim substratom in 18,5 cm nad betonskim koritom

Figure 5.17: Comparison between water velocities above the “semi-natural substrate” (left) and the “artificial substrate” (right) at water level 27 cm (“semi-natural substrate”) and 18.5 cm (“artificial substrate”)

Najnižji vodostaj na prerezu s seminaravnim substratom je znašal 27 cm, dne 27.7.2010. Ob istem času je bil vodostaj na prerezu z betonskim dnom 18,5 cm. Ta vodostaj ustreza vodostaju približno 10 cm na betonskem koritu, kjer ni več vpliva zaježitve. Širina struge na prvem prerezu je bila kar trikrat širša kot na drugem prerezu, globina vode pa za tretjino višja (slika 5.17). Hitrosti vode so bile na prvem prerezu bistveno manjše; najvišja izmerjena hitrost je bila kar štirikrat manjša kot na drugem prerezu in je znašala manj kot 4 cm/s. Tudi na videz je voda na tem odseku mirovala, na površini pa je bila plast umazanije (plast maščobe in rjave pene). Tudi hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna so bile na prvem prerezu precej manjše, meritve na oddaljenosti 0,5 cm od dna pa so na tem prerezu zelo nezanesljive. Dno je namreč zelo razgibano, sestavljeno iz kamnov in prodnikov različnih velikosti, od katerih so večji tudi obraščeni z mahovi, zato prihaja do vrtinčenja vode med njimi, poleg tega pa je velika verjetnost, da pride do odboja ultrazvoka od delcev substrata namesto od gibajočih se delcev v vodi. Zaradi tega so v 60-sekundnih intervalih merjenja hitrosti večkrat močno nihale v dolvodno in gorvodno smer. Na drugem prečnem prerezu se močno pozna vpliv zaježitve z dolvodnimi kamni, ki so ob desnem bregu višji od trenutnega vodostaja, zato so bile tam hitrosti zelo nizke, povsem primerljive s tistimi nad seminaravnim substratom, ob levem bregu pa bile so bistveno višje. Medtem ko so bile na prerezu s seminaravnim substratom bistvene razlike med hitrostmi na različni oddaljenosti od dna struge, so bile hitrosti nad betonskim koritom po vertikali praktično konstantne, kar vidimo tudi s slike 5.18, ki predstavlja vertikalne profile hitrosti na izbranih točkah prečnih prerezov. Po drugi strani pa so bile na betonskem koritu bistveno večje razlike med posameznimi točkami na prečnem prerezu, medtem ko so bile na seminaravnem substratu hitrosti precej izenačene po celotnem prečnem prerezu. Na delu s seminaravnim substratom je bil opazen tudi velik upad

hitrosti na površini, očitno zaradi plasti umazanije. Vertikali, imenovani kot levi in desni breg, sta na naravnem substratu od brega oddaljeni 70 cm do 80 cm, na betonskem koritu pa je točka »desni breg« 25 cm oddaljena od desnega roba poglobljene kinete, točka »levi breg« pa 15 cm od levega roba poglobljene kinete. Hitrosti v prečni smeri so bile na prvem prerezu praktično 0 m/s, predvsem pa zelo konstantne, tako po globini kot tudi po prečnem prerezu, zato grafi niso prikazani. Na drugem prerezu smo izmerili nekoliko večje vrednosti prečnih hitrosti ob desnem bregu, kjer tokovnice zavijajo okrog večjih kamnov, vendar tudi tu niso presegle vrednosti 4 cm/s.

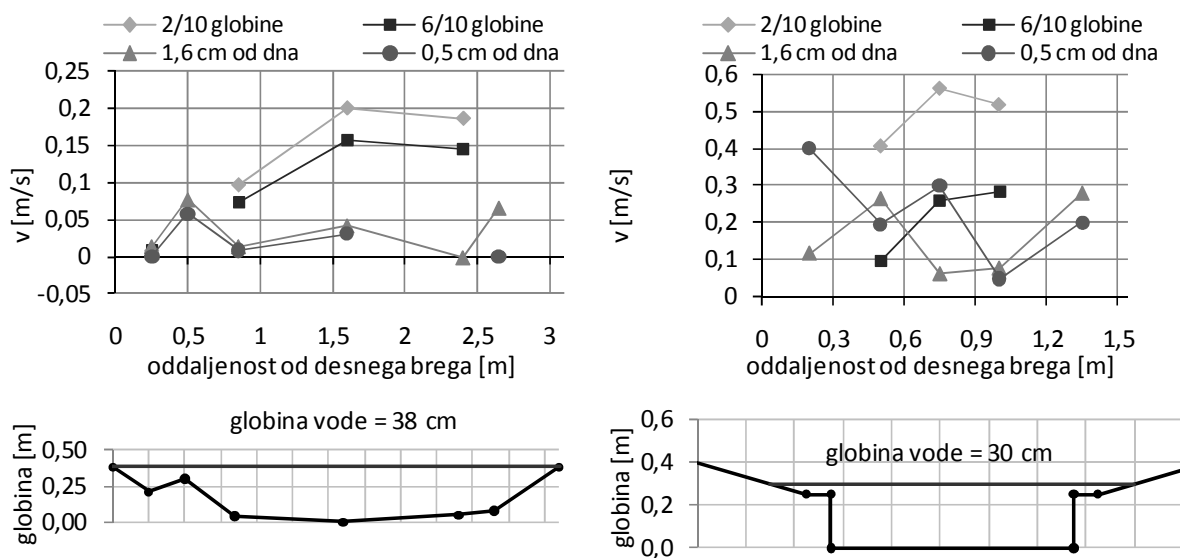


Slika 5.18: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti nad seminaravnim substratom (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 27 cm nad naravnim substratom in 18,5 cm nad betonskim koritom

Figure 5.18: Comparison of vertical velocity profiles on the "semi-natural substrate" and on the "artificial substrate" at water level 27 cm ("semi-natural substrate") and 18.5 cm ("artificial substrate")

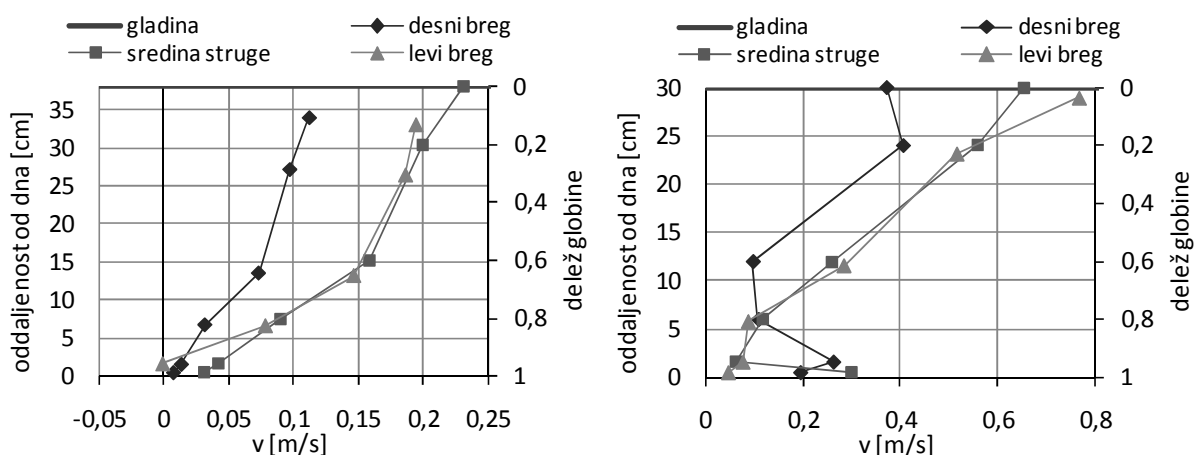
Naslednji vodostaj, pri katerem smo merili, je bil 38 cm nad seminaravnim substratom in 30 cm nad betonskim koritom, dne 31.7.2010. Kot vidimo, se je razlika med vodostajema že bistveno zmanjšala glede na predhodni vodostaj (slika 5.19). Pri tem je širina omočenega prečnega prereza na naravnem substratu ostala enaka, na betonskem koritu pa se je povečala na 1,54 m, saj se je voda prelila iz glavne kinete. Tudi razlike v hitrosti so se zmanjšale; največje so ostale na 2/10 globine, kjer so bile na prerezu preko betonskega korita približno trikrat večje kot na prerezu preko seminaravnega substrata, medtem ko so bile hitrosti na 6/10 globine na »betonskem prerezu« le še dvakrat večje kot na »seminaravnem prerezu«. Hitrosti pri dnu so tako na oddaljenosti 0,5 cm od dna kot tudi pri oddaljenosti 1,6 cm od dna na prerezu z betonskim dnom zelo nihale, zato so podatki nezanesljivi, vendar lahko rečemo, da so bile te hitrosti večje kot na prerezu preko seminaravnega substrata. Poglejmo si še primerjavo vertikalnih profilov hitrosti na značilnih točkah obeh prerezov (slika 5.20). Vidimo, da je bila tokrat struktura toka glede na prečni prerez na obeh prerezih zelo podobna – najmanjše hitrosti so bile ob desnem bregu, kjer so tudi na zgornjem pragu (med obema prečnima prerezoma) večji kamni, ki zajezujejo tok vode na seminaravnem substratu. Na sredini ter ob levem bregu struge pa so bile hitrosti skoraj enake. Vertikala »levi breg« je bila nad betonskim koritom ob

tem vodostaju postavljena 25 cm od levega roba glavne kinete, zato je bil blizu dna viden vpliv večjih kamnov. Hitrosti ob dnu na prerezu z betonskim dnom niso bile lepo razporejene, kar kaže na veliko stopnjo turbulence pred in za kamni v strugi, ki so večji ob desnem bregu, njihov večji vpliv pa se vidi v bolj »nepravilni« obliki vertikalne ob desnem bregu.



Slika 5.19: Primerjava hitrosti na prečnem prerezu preko naravnega substrata (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 38 cm nad naravnim substratom in 30 cm nad betonskim koritom

Figure 5.19: Comparison between water velocities above the “semi-natural substrate” (left) and the “artificial substrate” (right) at water level 38 cm (“semi-natural substrate”) and 30 cm (“artificial substrate”)

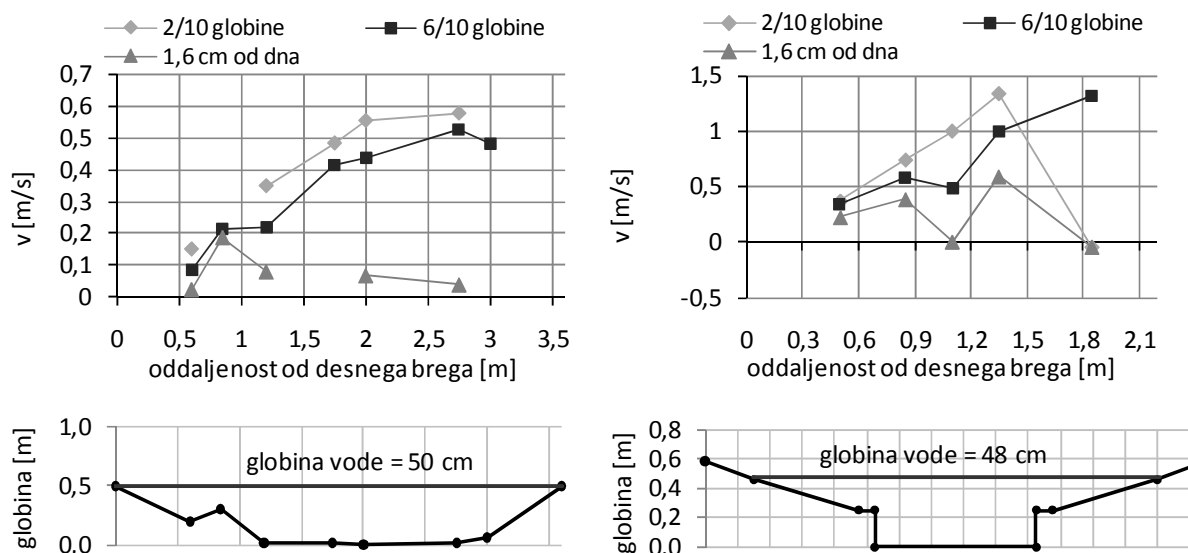


Slika 5.20: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti nad naravnim substratom (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 38 cm nad naravnim substratom in 30 cm nad betonskim koritom

Figure 5.20: Comparison of vertical velocity profiles on the “semi-natural substrate” and on the “artificial substrate” at water level 38 cm (“semi-natural substrate”) and 30 cm (“artificial substrate”)

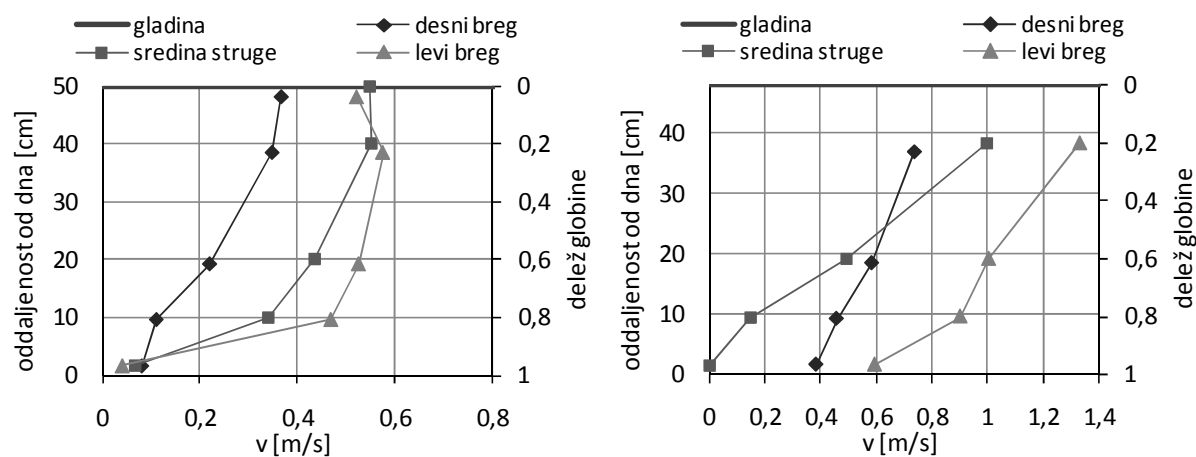
Najvišji vodostaj, pri katerem smo merili na tem merilnem mestu, je bil 50 cm na prerezu s seminaravnim substratom in 48 cm na odseku z betonskim koritom, dne 7.8.2010. Vidimo, da sta se

vodostaja že popolnoma izenačila, širina struge pa je bila še vedno za dobro polovico večja na prerezu s seminaravnim substratom. Hitrosti na vseh globinah so bile na prerezu z betonskim dnom približno dvakrat večje (slika 5.21). Razlika v hitrosti vodnega toka med obema prerezoma se torej manjša z naraščanjem vodostaja, še vedno pa ostaja tudi pri izenačenem vodostaju še kar velika zaradi zaježitve s kamnitim pragom, ki omogoča širši omočen prerez struge na gorvodnem prerezu.



Slika 5.21: Primerjava hitrosti na prečnem prerezu preko naravnega substrata (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 50 cm nad naravnim substratom in 48 cm nad betonskim koritom

Figure 5.21: Comparison between water velocities above the “semi-natural substrate” (left) and the “artificial substrate” (right) at water level 50 cm (“semi-natural substrate”) and 48 cm (“artificial substrate”)



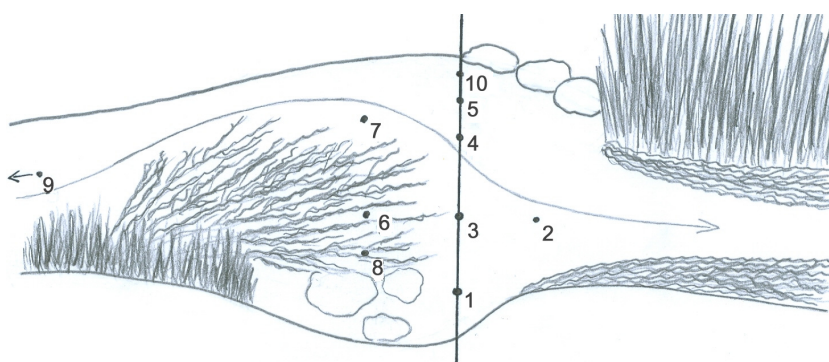
Slika 5.22: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti nad naravnim substratom (levo) in nad betonskim koritom (desno) pri vodostaju 50 cm nad naravnim substratom in 48 cm nad betonskim koritom

Figure 5.22: Comparison of vertical velocity profiles on the “semi-natural substrate” and on the “artificial substrate” at water level 50 cm (“semi-natural substrate”) and 48 cm (“artificial substrate”)

Iz primerjave vertikalnih profilov (slika 5.22) vidimo, da so bile najmanjše hitrosti na obeh prerezih še vedno ob desnem bregu, na prerezu preko betonskega korita pa se je matica toka pomaknila proti levemu bregu, saj so se hitrosti na sredinski vertikali zmanjšale. Hitrosti na vodni gladini nad betonskim koritom nismo merili zaradi prevelikega valovanja. Prečne hitrosti nad seminaravnim substratom tudi pri višjih vodostajih niso kazale bistvenega gibanja vode v prečni smeri, medtem ko so nad betonskim koritom prečne hitrosti kazale usmerjenost od obeh bregov proti sredini struge zaradi zožitve. Pri največjem merjenem vodostaju se je ta vpliv zmanjšal.

5.6 Vertikalni profili hitrosti na vzorčnem mestu GL5, zaraščenem z rmancem

Merilno mesto GL5 se nahaja tik nad sotočjem s potokom Pržanec in predstavlja tolmun, zelo zaraščen s potopljenim makrofitom rmancem, ki je segal do vodne gladine po skoraj celotni širini struge. Ob bregovih je bilo tudi zelo veliko emergentnih makrofitov (vodne trave). Dno je zelo zamuljeno, predvsem ob bregovih pa je tudi veliko večjih kamnov, obraščenih z mahovi. Ob meritvah se je voda zelo kalila. Namen tega merilnega mesta je bil ugotoviti vpliv makrofitov na vodni tok, zato točke merjenja niso bile razvrščene le po prečnem prerezu, pač pa smo jih izbrali tudi ob rmancu, med rmancem ter dolvodno in gorvodno od njega. Gorvodno smo merili le ob najvišjem vodostaju, saj je bilo ob predhodnih vodostajih preveč zaraščeno. Ker bi se ob prikazu vseh merjenih vertikalnih profilov hitrosti zelo zmanjšala preglednost grafikonov, smo ob vsakem vodostaju izbrali le vertikale na najznačilnejših merilnih točkah. Položaj posameznih točk je prikazan na sliki 5.23. Meritev na oddaljenosti 0,5 cm od dna nismo izvajali pri nobenem vodostaju, saj je bila tudi pri najnižjem voda pregloboka.

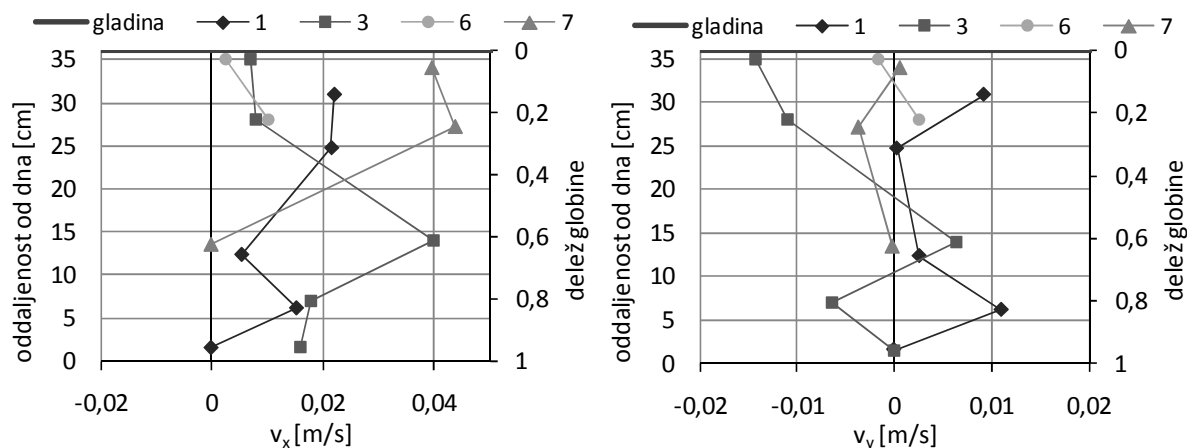


Slika 5.23: Skica položaja merilnih točk na merilnem mestu GL5

Figure 5.23: Drawing of measuring points on measuring site GL5

Prve meritve na tem merilnem mestu so potekale dne 27.7.2010 ob vodostaju 36 cm, širina struge oz. omočenega prečnega prereza pa je znašala 4,2 m. Rmanec je tedaj preraščal skoraj celotno širino struge, predvsem dolvodno od izbranega prečnega prereza je bilo tudi zelo veliko emergentnih

makrofitov (trav). Voda je navidezno skoraj mirovala, rahlo vidna matica toka pa je potekala okrog rmanca ob levem bregu ter je dolvodno od njega zavila proti sredini struge. Potopljeni makrofiti, še posebej v takšnih razsežnostih kot so se pojavljali na tem merilnem mestu, imajo seveda velik vpliv na strukturo vodnega toka, zato so vertikalni profili hitrosti zelo nepravilnih oblik, v odvisnosti od tega, na kateri globini je bilo rastlinje bolj razraščeno (slika 5.24). Točka 1 je bila postavljena med desnim bregom in rmancem (75 cm od brega), na bolj kamnitem in nekoliko plitvejšem delu struge glede na ostale točke merjenja. Na videz je voda na tej točki mirovala. Kot vidimo, je najvišja hitrost na tej točki dosegla dobra 2 cm/s, vertikalni profil hitrosti pa je zelo podoben tistemu v odprtem vodotoku pri nezaraščeni strugi. Motnja nastopi le na 6/10 globine, in sicer najverjetneje zaradi odboja ultrazvoka od manjših makrofitov pod vodno gladino. Točka 3 je postavljena tik za rmancem. Vertikalni profil hitrosti izkazuje, da je bila razraščенost rmanca večja tik pod vodno gladino, v globinah pa manjša, zato so bile le-tam hitrosti večje. Upoštevati je treba tudi hitrost prečno na strugo, saj je bila ob vodni gladini skoraj dvakrat večja od hitrosti v vzdolžni smeri, usmerjena pa je bila od levega proti desnemu bregu, torej skladno z vidnim potekom tokovnic okrog rmanca. Položaj točke 2 je pol metra dolvodno od rmanca, zato bi pričakovali, da bo vpliv rmanca tam že nekoliko manjši, vendar so bili rezultati zelo podobni pravkar opisanim na točki 3 in jih zaradi preglednosti nismo vključili v graf. Zmanjšanje hitrosti dolvodno od makrofitov, primerljivo z zmanjšano hitrostjo med makrofiti, ugotavlja tudi Schulz s sodelavci (2003). Točka 6 je bila postavljena sredi rmanca, zato so bile tam hitrosti najmanjše. Vertikalni profil hitrosti se je na površini ponovno približal vrednosti 0 m/s zaradi zelo goste zaraščенosti tik pod vodno gladino. Globlje so se pojavljale tudi protitočne hitrosti zaradi vrtinčenja. Seveda pa je potrebno poudariti, da uporabljen instrument ni namenjen merjenju med rastlinjem in vsaj 10 cm od senzorja ne sme biti nobenega objekta, sicer se ultrazvok odbije od objekta, namesto od delcev v vodi in dobimo napačne rezultate. Pričakovano smo največje vrednosti hitrosti izmerili na točki 7, kjer je bilo najmanj rmanca na tem prečnem prerezu, do vodne gladine pa ni segal, zato je tu potekala matica toka. Na površini oz. malo pod njo so bile hitrosti največje in so dosegle vrednosti 5 cm/s.

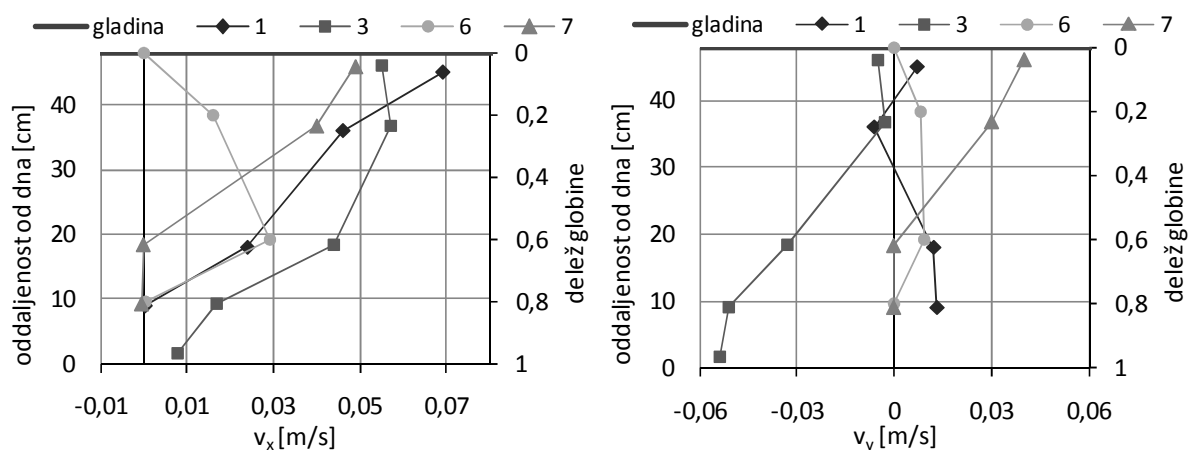


Slika 5.24: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) na različnih točkah okrog rmanca ob vodostaju 36 cm (1 - med desnim bregom in rmancem, 3 - tik za rmancem dolvodno, 6 - med rmancem, 7 - matica toka ob rmancu)

Figure 5.24: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components on different measuring sites around macrophytes at water level 36 cm (1 - between right riverbank and macrophytes, 3 - just downstream of macrophytes, 6 - between macrophytes, 7 - thalweg beside macrophytes)

Naslednji vodostaj, pri katerem smo merili hitrosti, je bil 48 cm dne 31.7.2010. Rezultati prikazujejo meritve na istih merilnih točkah kot pri predhodnem vodostaju. Omočeni prerez struge se je povečal na 4,8 m, rmanec pa je bil še nekoliko bolj razraščan kot ob predhodnem merjenju in je segal do vodne gladine praktično po celotni širini struge. Glavne na oko opazne tokovnice so tokrat potekale v treh krakih kar preko glavnega »grma« rmanca in ne več okrog njega. Na videz opazne spremembe v strukturi toka potrjujejo tudi izmerjene hitrosti na izbranih vertikalah (slika 5.25). Največja hitrost, vsaj na površini, je bila tokrat izmerjena na točki 1, saj so tokovnice tokrat potekale preko rmanca. Znašala je 7 cm/s in presegla najvišjo vrednost predhodnega vodostaja, kljub temu, da je bilo rmanca tokrat še nekoliko več. Kljub temu je hitrost na tej točki pod vodno gladino hitro upadla, saj se rmanec gorvodno razrašča prav od desnega brega proti sredini struge in predstavlja nekakšno pregrado vodnemu toku. Največja hitrost je znašala 7 cm/s in presegla najvišjo vrednost predhodnega vodostaja, kljub temu, da je bilo rmanca tokrat še nekoliko več. Druga največja hitrost je bila dosežena tik za rmancem (na točki 3), na večjih globinah pa so bile hitrosti na tem mestu celo večje od tistih na točki 1. Na tej točki so bile zanimive tudi hitrosti v prečni smeri, saj so bile blizu dna precej velike (skoraj 6 cm/s), usmerjene pa so bile od levega proti desnemu bregu. Torej so bile tokovnice pod vodno gladino verjetno še vedno podobne kot pri najnižjem vodostaju. Rmanca je bilo namreč kljub vsemu ob levem bregu nekoliko manj in zato je del vodnega toka obtekel rmanec po levi ter takoj za njim zavil proti sredini struge. Na točki 6, sredi rmanca, so bile hitrosti podobne kot pri najnižjem vodostaju: pri dnu in na gladini je voda praktično mirovala, na 6/10 globine pa so bile hitrosti za malenkost večje kot pri prvem merjenju. Hitrosti na točki 7, med rmancem in levim bregom, so bile na površini prav tako podobne tistim pri predhodnem vodostaju, medtem ko so bile od 6/10 globine navzdol izmerjene vrednosti 0 m/s zaradi zelo goste zarasti z rmancem, ki ni segal do vodne gladine. Na površini so bile

tudi precej velike prečne hitrosti, in sicer v smeri od desnega proti levemu bregu, zaradi toka vode okrog rmanca.

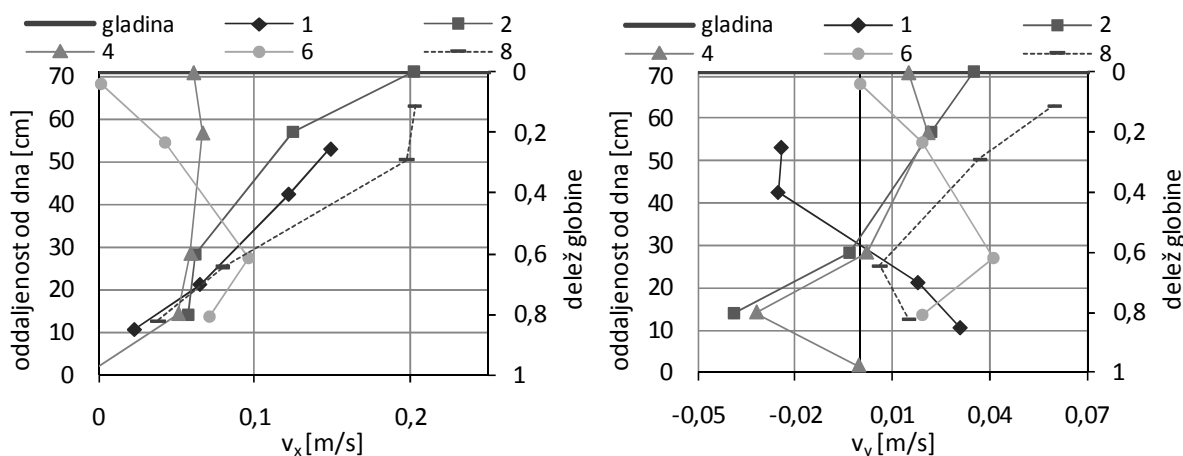


Slika 5.25: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) na različnih točkah okrog rmanca ob vodostaju 48 cm (1 - med desnim bregom in rmancem, 3 - tik za rmancem dolvodno, 6 - med rmancem, 7 - matica toka ob rmancu)

Figure 5.25: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components on different measuring sites around macrophytes at water level 48 cm (1 - between right riverbank and macrophytes, 3 - just downstream of macrophytes, 6 - between macrophytes, 7 - thalweg beside macrophytes)

Tretjič smo merili pri vodostaju 71 cm, dne 7.8.2010. Širina omočenega prereza struga je bila tedaj 6 m, rmanec pa je zavzemal le dobro tretjino prereza. Večina ga je bilo še vedno razraščena povsem do vodne gladine, nekaj pa ga je bilo potopljenega (ob desnem bregu). Tudi nekaj trave ob desnem bregu je bilo »poležane«. Matica toka je rmanec nekoliko »odrinila« levo in desno ter si tako utrla pot naravnost preko njega, hitrosti pa so bile trikrat večje kot pri nižjih dveh vodostajih, in sicer do 0,2 m/s (slika 5.26). Največje hitrosti so bile dosežene na točki 8, to je v matici toka preko rmanca, kjer je bil le-ta vsaj na površini nekoliko odrinjen levo in desno, tako da je nastal prost kanal. Od globine 6/10 navzdol se je hitrost občutno zmanjšala, saj je bilo ob dnu še vedno veliko razrasti. Na površini enake, v globinah pa že opazno manjše, so bile hitrosti na točki 2, približno 0,5 m dolvodno od rmanca. Tok preko rmanca je bil namreč dokaj nemoten, saj je voda tekla preko njega, pod površino pa je bil precej oviran. Približno take hitrosti kot na točkah 2 in 8 so bile dosežene tudi na točki 1, med desnim bregom in rmancem, le da so bile na površini nekoliko manjše, saj se od matice toka proti bregovom hitrosti zmanjšujejo. Med rmancem, na točki 6, smo zopet dobili enako sliko kot pri predhodnih dveh merjenjih: ob dnu in na gladini je tok miroval, na 6/10 pa je bil največji in je tokrat dosegel skoraj 1 m/s. Na točki 4, med levim bregom in rmancem, kjer gorvodno ni rmanca, pa so bile po celotni vertikali hitrosti presenetljivo majhne, le okrog 7 cm/s. Vzrok temu je verjetno ravno to, da se je matica toka s tega dela preselila bolj proti desnemu bregu. Prečne hitrosti v primerjavi z vzdolžnimi niso dosegale pomembno visokih vrednosti; še največje, okrog 6 cm/s, so bile na točki 8, na matici

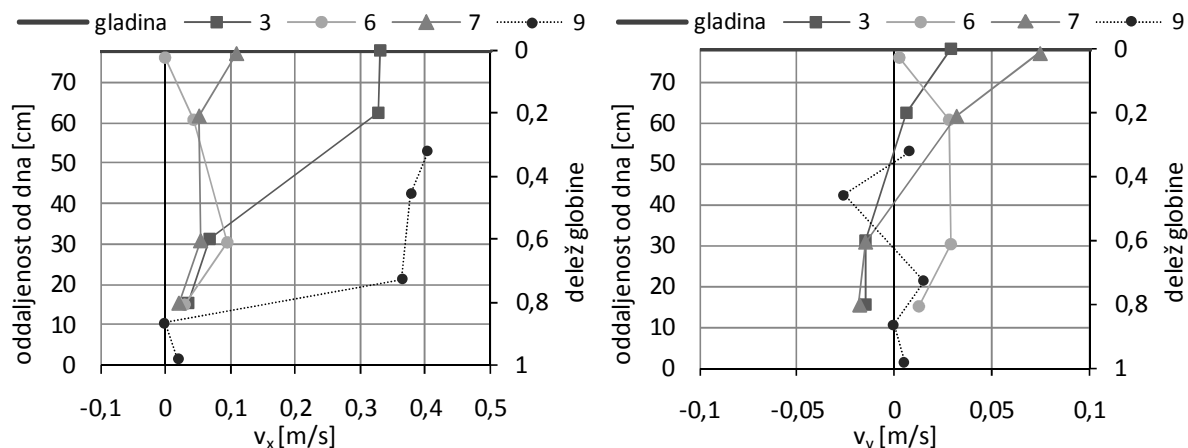
toka preko rmanca, na gladini, usmerjene pa so bile od desnega proti levemu bregu. S tem se je tok usmeril bolj proti sredini struge, saj pride z desne strani dolvodno od rmanca do zoženja struge.



Slika 5.26: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) na različnih točkah okrog rmanca ob vodostaju 71 cm (1 - med desnim bregom in rmancem, 2 - dolvodno od rmanca, 4 - gorvodno ni rmanca, 6 - med rmancem, 8 - matica toka preko rmanca)

Figure 5.26: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components on different measuring sites around macrophytes at water level 71 cm (1 - between right riverbank and macrophytes, 2 - downstream of macrophytes, 4 - no macrophytes upstream, 6 - between macrophytes, 8 - thalweg through the macrophytes)

Najvišji vodostaj, pri katerem je bilo še možno merjenje na merilnem mestu GL5, je bil 78 cm; ta meritev pa je potekala dne 15.8.2010. Širina omočenega prereza in zaraščenost sta bili podobni prejšnjemu merjenju. Tudi razporeditve hitrosti so bile zelo podobne prejšnjim, le da so bile najvišje vrednosti še večje, dodali pa smo še eno točko 5 m gorvodno od rmanca na ožjem delu struge (slika 5.27). Ta del je bil ob vseh prejšnjih merjenjih popolnoma zaraščen s travo, zato merjenje ni bilo možno, tokrat pa je bilo na sredini struge približno 70 do 80 cm nezaraščenega prereza. Na območju rmanca so bile največje hitrosti dosežene na točki 3, tik za rmancem, in so se glede na predhodni, le 7 cm nižji vodostaj, povečale kar za dobrih 50%, na dobre 0,3 m/s. Enake so ostale še na 2/10 globine, nato pa so se proti dnu hitro zmanjšale. Hitrosti med levim bregom in rmancem se, razen na gladini, niso povečale glede na predhodni vodostaj, prav nobene spremembe pa ni bilo tudi na točki 6, med rmancem. Hitrosti na novi točki, 5 m gorvodno od rmanca, so po pričakovanju dosegle največje vrednosti na tem merilnem mestu, in sicer dobrih 0,4 m/s. Globina je bila na tem mestu precej nižja, 53 cm. Če torej primerjamo to hitrost z največjo hitrostjo med rmancem, lahko ugotovimo, da se je hitrost nad rmancem zmanjšala za približno štirikrat. Ker pa sta se pri tem spremenili tudi globina vode in širina struge, primerjava ni relevantna, zato je morda boljše primerjati hitrosti na površini tik za rmancem in ob njem. Hitrosti ob rmancu so v tem primeru več kot trikrat večje od tistih tik za njim. To razmerje velja tudi pri predhodnih vodostajih, razen pri drugem, ko sta bili hitrosti izenačeni.

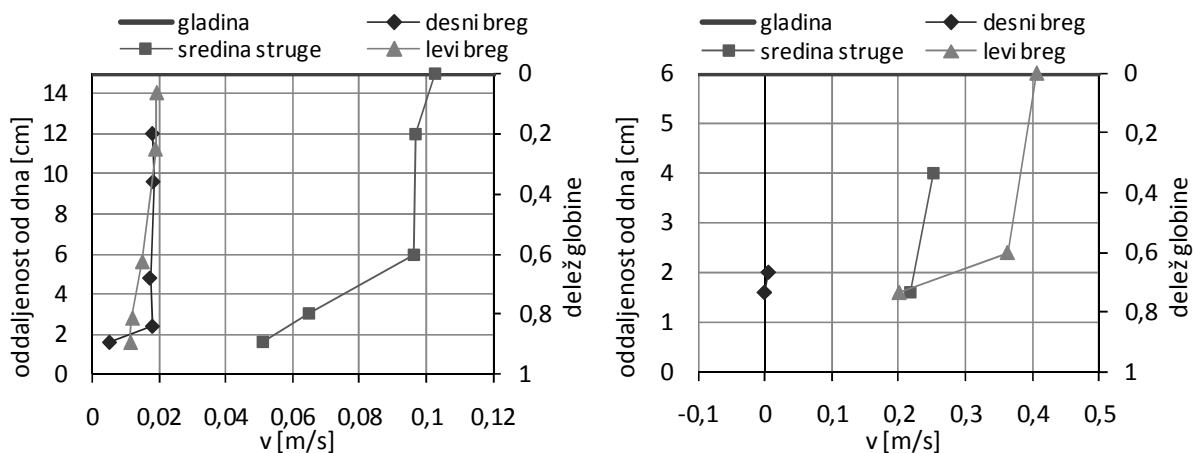


Slika 5.27: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti v vzdolžni (x) in prečni (y) na različnih točkah okrog rmanca ob vodostaju 78 cm (3 - tik za rmancem dolvodno, 6 - med rmancem, 7 - ob rmancu, 9 - gorvodno od rmanca)

Figure 5.27: Comparison of vertical profiles of stream-wise (x) and cross-stream (y) velocity components on different measuring sites around macrophytes at water level 78 cm (3 - just downstream of macrophytes, 6 - between macrophytes, 7 - beside macrophytes, 9 - upstream of macrophytes)

5.7 Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom in brzico na merilnem mestu GL6

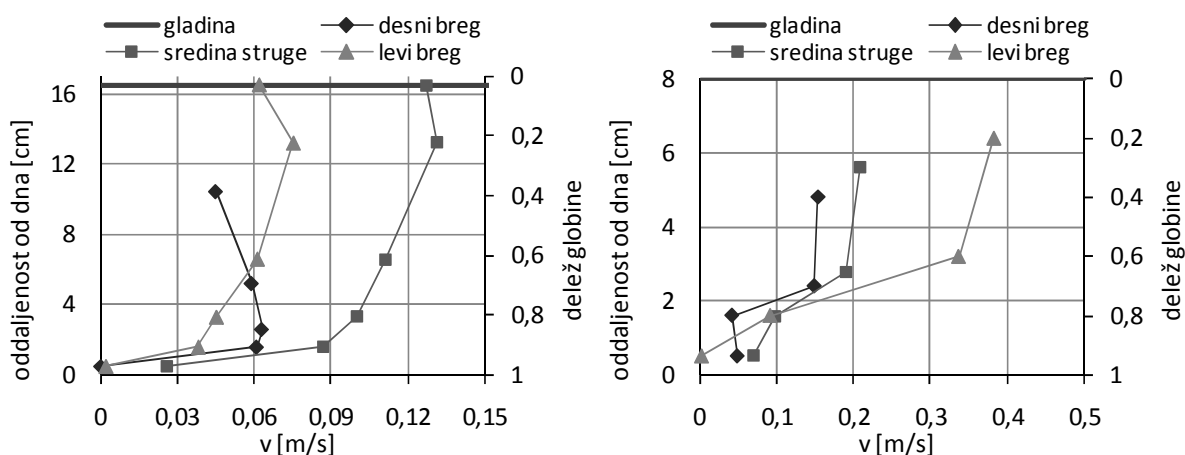
Na merilnem mestu GL6, tik pred križanjem potoka Glinščica z ljubljansko obvoznico, smo merili hitrosti na dveh prečnih prerezih, od katerih je imel gorvodni značilnosti tolmana, dolvodni pa značilnosti brzice, kljub temu da se mesto nahaja na umetno izravnanim odseku struge. Razdalja med prerezoma je bila približno 20 m. Substrat je v tolmunu predstavljal pretežno psamal, to je po AQEM klasifikaciji (Urbanič, Toman, 2003) pesek in blato premera od 0,06 do 2 mm; nekaj pa je bilo tudi akala, ki ga predstavljajo drobni prodniki, premera od 2 mm do 2 cm. Na brzici je prevladoval akal. Na vsakem od prerezov smo merili v treh točkah, enakomerno porazdeljenih po prečnem prerezu. Prečni prerez preko tolmana je bil nekoliko širši, od 2,8 m do 3,5 m, odvisno od vodostaja, prerez preko brzice pa je meril v širino med 2,4 in 3,3 m. Razen pri najvišjem vodostaju smo v tolmunu merili na oddaljenostih 0,7 m, 1,3 m in 2 m od desnega roba struge, na brzici pa na oddaljenostih 0,7 m, 1,4 m in 2 m od desnega roba struge. Pri najvišjem vodostaju so bile zaradi širšega omočenega prereza oddaljenosti od desnega brega (roba omočenega prereza) večje, zato da so bile meritve izvedene dejansko v istih točkah kot ob nižjih vodostajih. Pri najvišjem vodostaju smo nekaj točk še dodali. Meritve smo vedno izvajali najprej na tolmunu, neposredno za tem pa še na brzici, zato privzemamo, da je bil pretok v času merjenja na obeh prerezih enak. Prikazali smo le rezultate hitrosti v vzdolžni smeri, saj zaradi enakomernega substrata ni prihajalo do vrtnčenja v prečni smeri in so bile vrednosti prečnih hitrosti po celotnih vertikalah praktično 0 m/s.



Slika 5.28: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom (levo) in brzico (desno) pri vodostaju 14 cm v tolmunu in 6 cm na brzici

Figure 5.28: Comparison of vertical velocity profiles on the “pool” (left) and on the “riffle” (right) at water level 14 cm (“pool”) and 6 cm (“riffle”)

Prva meritev je potekala pri najnižjem vodostaju: 14 cm na območju tolmana in 6 cm na območju brzice, dne 27.7.2010. Iz grafikonov (slika 5.28) je lepo vidno, da je bila hitrost vodnega toka v tolmunu kar štirikrat manjša kot na brzici, globina pa je bila v tolmunu skoraj trikrat večja kakor na brzici. Globina seveda ni bila enaka po celotnem prerezu, v tolmunu je znašala od 12 cm ob desnem bregu do 15 cm na sredini struge, na brzici pa od 2 cm na desnem bregu do 6 cm ob levem bregu. Kot je prav tako razvidno iz slike 5.28, je matica toka preko tolmana potekala po sredini struge, preko brzice pa bližje levemu bregu.



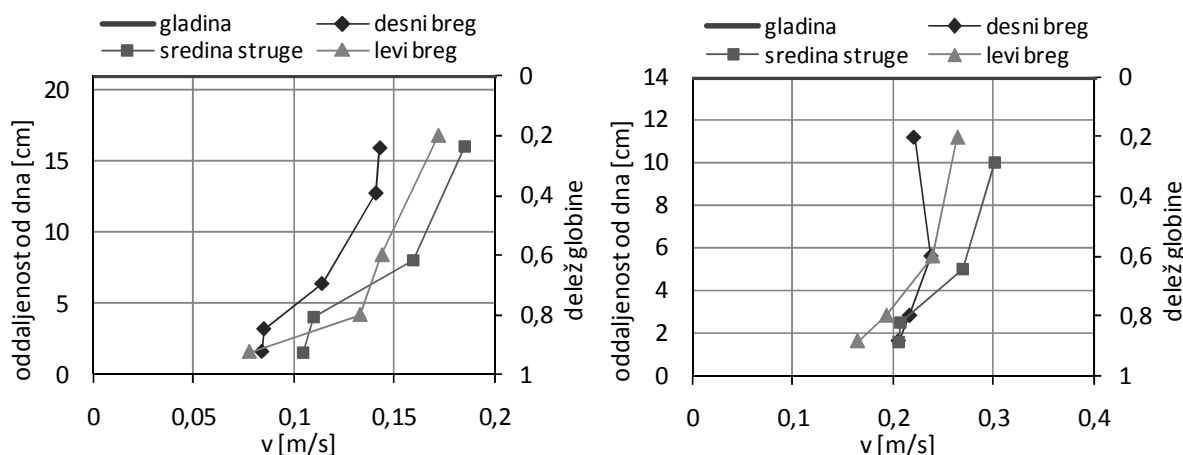
Slika 5.29: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom (levo) in brzico (desno) pri vodostaju 17 cm v tolmunu in 8 cm na brzici

Figure 5.29: Comparison of vertical velocity profiles on the “pool” (left) and on the “riffle” (right) at water level 17 cm (“pool”) and 8 cm (“riffle”)

Naslednji vodostaj, pri katerem smo merili, je bil 17 cm v tolmunu in 8 cm na brzici, dne 11.8.2010. Še vedno je bila hitrost vodnega toka v tolmunu bistveno manjša (približno trikrat) kakor na brzici

(slika 5.29), globina vode pa približno dvakrat večja. Matica toka je v tolmunu ostala na sredini struge, na brzici pa ob levem bregu. Največji hitrosti prečnih prereзов se glede na najnižji vodostaj nista povečali, nekoliko pa so se povečale hitrosti ob bregovih.

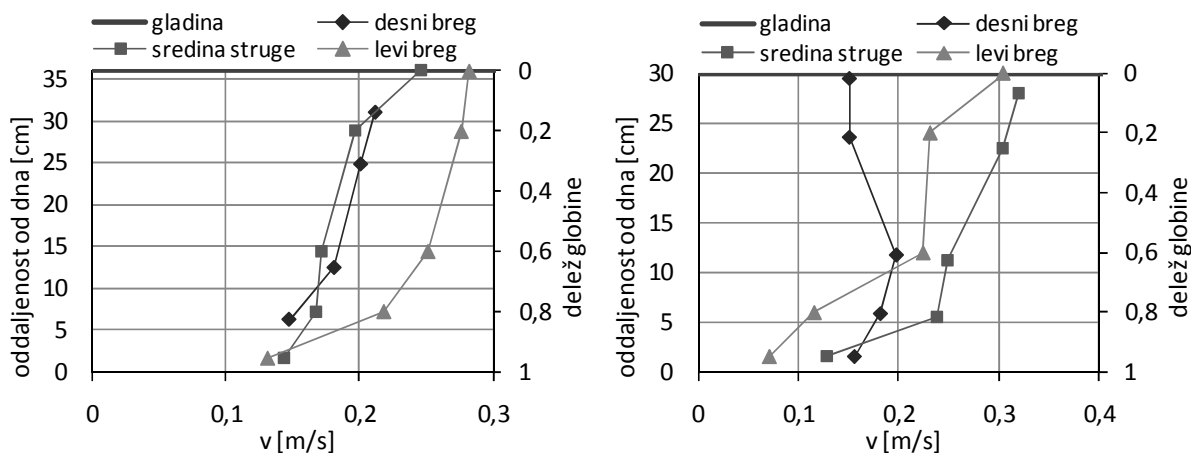
Dne 31.7.2010 smo merili pri vodostaju 21 cm v tolmunu in 14 cm na brzici. Razlika med največjima hitrostma v tolmunu in na brzici se je že občutno zmanjšala; največja izmerjena hitrost v tolmunu je dosegla že skoraj 2/3 najvišje hitrosti na brzici (slika 5.30). Ravno tako je tudi vodostaj na brzici že dosegel 2/3 vodostaja v tolmunu. Zanimivo pa je, da se je največja hitrost na brzici nekoliko zmanjšala glede na predhodni vodostaj; hitrosti po celotnem prečnem prerezu so se namreč precej izenačile, matica toka pa se je pomaknila na sredino struge. Tudi hitrosti v tolmunu so postale bolj enakomerne po prečnem prerezu, nekoliko nižje so bile le ob desnem bregu, matica toka pa je bila še vedno na sredini struge.



Slika 5.30: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom (levo) in brzico (desno) pri vodostaju 21 cm v tolmunu in 14 cm na brzici

Figure 5.30: Comparison of vertical velocity profiles on the "pool" (left) and on the "riffle" (right) at water level 21 cm ("pool") and 14 cm ("riffle")

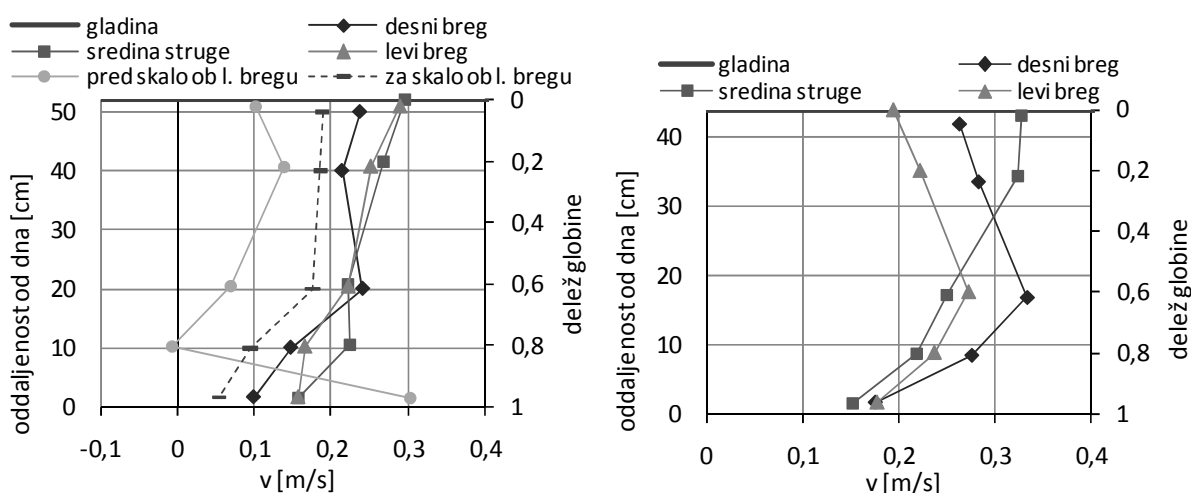
Dne 7.8. smo merili pri vodostaju 36 cm v tolmunu in 30 cm na brzici. Vodostaj na brzici je bil torej le še za 1/6 nižji od tistega v tolmunu. Prav tako sta se izenačili širini omočenih prečnih prereзов, razlike je bilo le še 10 cm v korist tolmunu. Tudi največja hitrost v tolmunu je bila le še dobrih 10 % manjša od največje hitrosti na brzici (slika 5.31). Matica toka se je pri tem vodostaju na območju tolmunu pomaknila proti levemu bregu, medtem ko je na območju brzice ostala na sredini struge.



Slika 5.31: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom (levo) in brzico (desno) pri vodostaju 36 cm v tolmunu in 30 cm na brzici

Figure 5.31: Comparison of vertical velocity profiles on the “pool” (left) and on the “riffle” (right) at water level 36 cm (“pool”) and 30 cm (“riffle”)

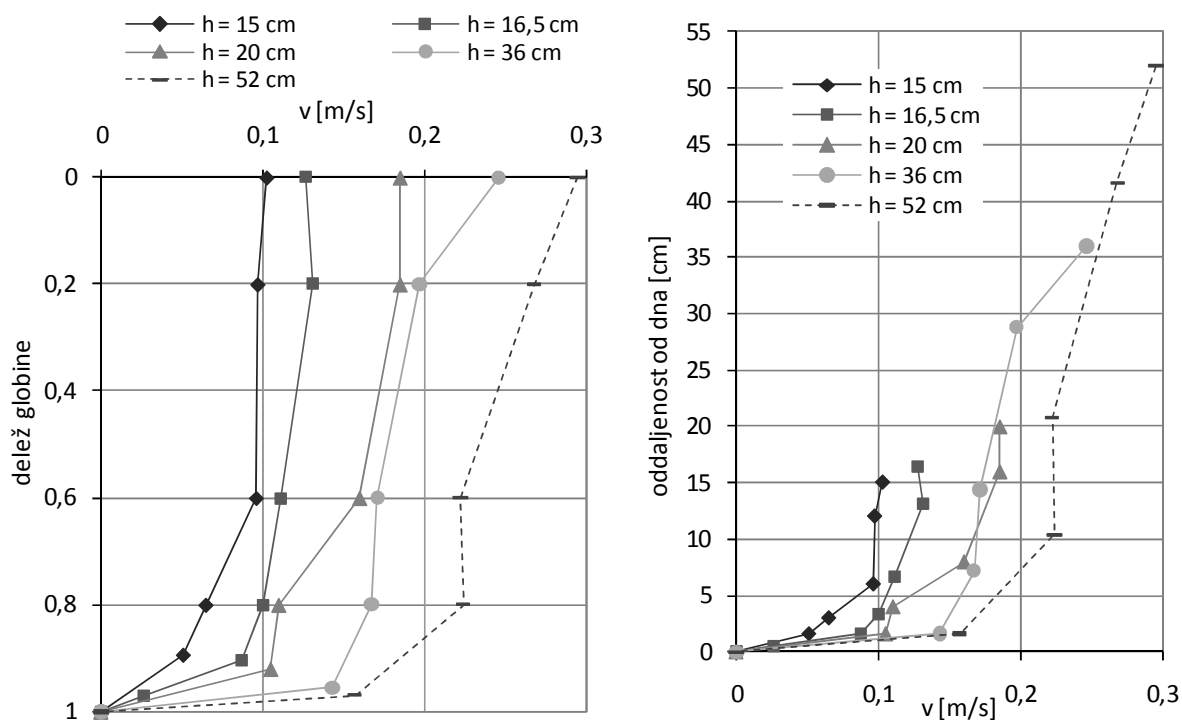
Najvišji vodostaji, pri katerem smo merili na merilnem mestu GL6, je bil 52 cm v tolmunu in 44 cm na brzici, dne 15.8.2010. Ob tem merjenju smo si v tolmunu izbrali še dve dodatni točki: pred in za večjo skalo ob levem bregu struge, ki ob nižjih vodostajih ni bila (povsem) potopljena (slika 5.32). Tako kot pri predhodnem vodostaju je bila tudi ob tem največja izmerjena hitrost v tolmunu dobrih 10 % nižja od največje izmerjene hitrosti na brzici. Pri tem je bil vodostaj v tolmunu za 15% višji od tistega na brzici. Širina omočenega prereza se je na obeh prerezih še nekoliko povečala in je znašala v tolmunu 3,5 m, na brzici pa 3,3 m. Po širini struge so se hitrosti še bolj poenotile glede na predhodni vodostaj.



Slika 5.32: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti med tolmunom (levo) in brzico (desno) pri vodostaju 52 cm v tolmunu in 44 cm na brzici

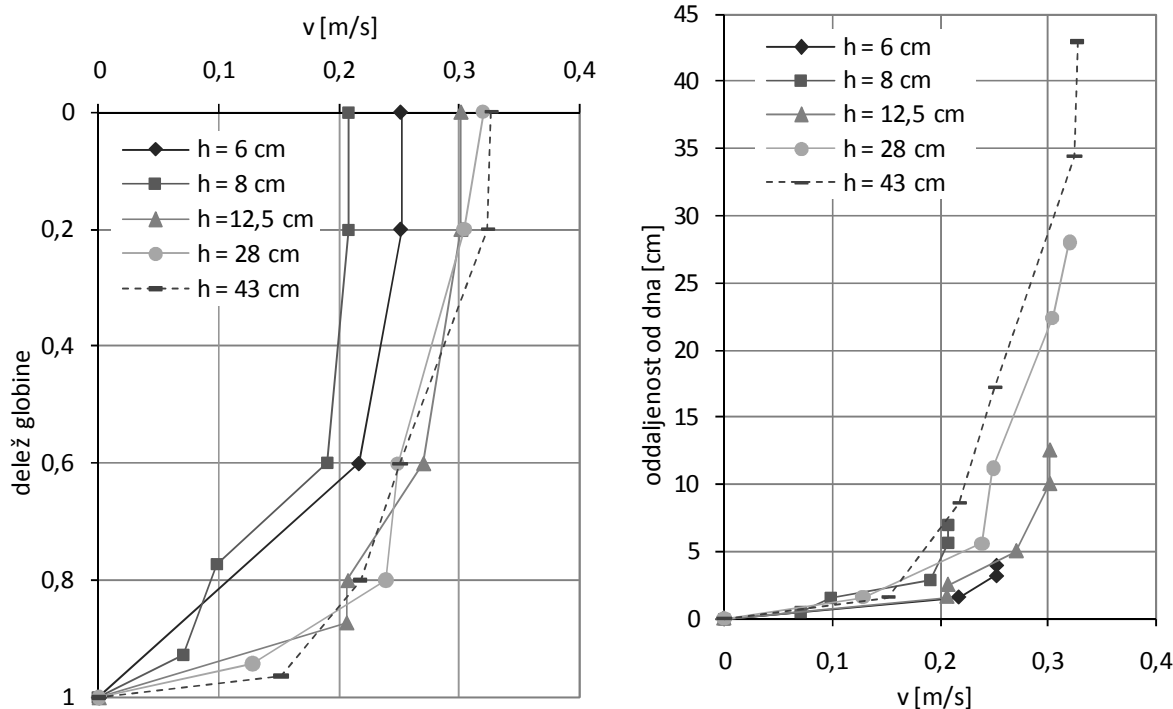
Figure 5.32: Comparison of vertical velocity profiles on the “pool” (left) and on the “riffle” (right) at water level 52 cm (“pool”) and 44 cm (“riffle”)

Kot vidimo iz opisanih zgornjih grafov ter grafov na slikah 5.33 in 5.34, se razlike v hitrosti vode kakor tudi v vodostaju med brzico in tolmunom manjšajo z naraščanjem vodostaja oz. povečevanjem pretoka. Hkrati se manjšajo tudi razlike v hitrostih po posameznem prečnem prerezu. Posebej v tolmunu (slika 5.33), kjer so hitrosti ob nizkem vodostaju majhne, se lepo vidi naraščanje hitrosti ob naraščanju vodostaja, in to po celotni vertikali. Na desni sliki, kjer so oddaljenosti od dna vzete absolutno, tudi vidimo, da so hitrosti na enaki oddaljenosti od dna večje pri višjem vodostaju. Na brzici (slika 5.34) je že hitrost pri najnižjem vodostaju nekoliko višja, od vodostaja 13 cm naprej pa se ne povečuje več bistveno, zato se krivulje hitrosti ob zadnjih treh vodostajih prepletajo. Če te vertikalne profile primerjamo s tistimi nad betonsko strugo na merilnem mestu GL2 (slika 5.9), vidimo, da so tam hitrosti bistveno večje in dosegajo pri enakem vodostaju več kot dvakrat višje vrednosti, in sicer kar 0,8 m/s. Ravno tako je tudi s hitrostmi ob dnu, saj so nad betonsko strugo že hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna večje od najvišjih hitrosti na brzici z naravnim substratom.



Slika 5.33: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti na sredini prereza v tolmunu v odvisnosti od vodostaja

Figure 5.33: Comparison of thalweg vertical velocity profiles in the "pool" in dependence of water level

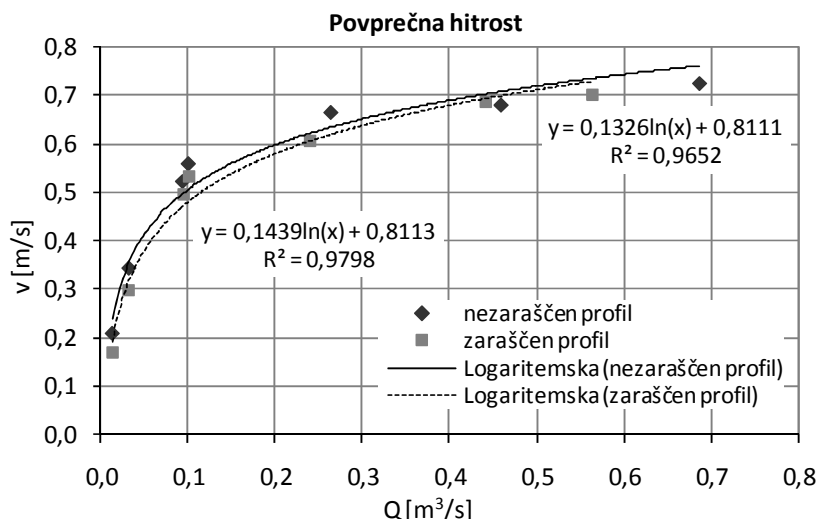


Slika 5.34: Primerjava vertikalnih profilov hitrosti na sredini prereza na brzici v odvisnosti od vodostaja

Figure 5.34: Comparison of thalweg vertical velocity profiles on the "riffle" in dependence of water level

5.8 Spreminjanje hitrosti v odvisnosti od pretoka

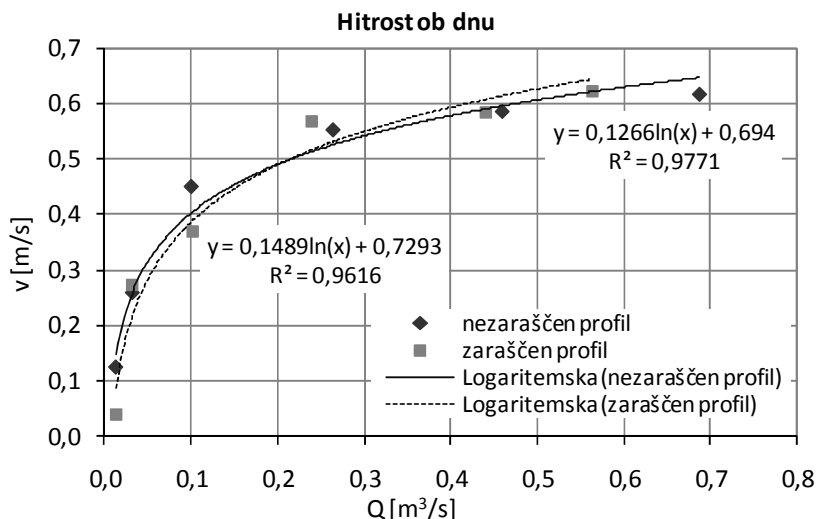
Ob poznavanju Manningove enačbe vemo, da se pri desetkratnem povečanju pretoka povprečna hitrost vode v strugi poveča za približno dvakrat, odvisno od oblike korita, kar navaja tudi Vogel (1994) glede na grafe Duryja (1969) ter Leopolda in Madocka (1953) in predvideva, da se zaradi trenja hitrosti ob dnu struge povečajo še manj. V naši raziskavi smo pretoke merili le na betonskem delu struge (GL2) ter ugotovili, da je razmerje med pretokom in hitrostjo odvisno tudi od oblike struge. Glavno korito, globine 25 cm, je namreč pravokotne oblike, nato pa se razširi v trapezno obliko (slika 4.3). Pri razlitju iz glavne struge, pravokotne oblike, v trapezni del struge, se tipično spremeni tako pretočna krivulja kot tudi krivulja hitrosti v odvisnosti od pretoka. Zaradi širšega omočenega oboda struge se trenje zelo poveča in se zato tik po razlitju povprečna hitrost vode celo nekoliko zmanjša, kar so pokazali podatki instrumenta StarFlow, ki je bil nameščen na merilnem mestu GL1 pri Biološkem središču v letih 2003 in 2004. Najvišji vodostaj, pri katerem smo merili pretoke z instrumentom FlowTracker, pa je bil 59 cm, kar je ravno na robu betonskega dela struge. Nad betonskim delom je travnat breg, zaradi česar se koeficient hrapavosti in z njim tudi pretočna krivulja bistveno spremeni, vendar pri višjih vodostajih meritve na tak način niso bile več mogoče. Na ostalih vzorčnih mestih nismo merili pretoka, temveč le globine in hitrosti vode, zato smo naredili primerjavo hitrosti pri dnu v odvisnosti od globine vode.



Slika 5.35: Povprečna hitrost v odvisnosti od pretoka na delu struge z betonskim koritom

Figure 5.35: Mean velocity in dependence of discharge on the river reach with concrete channel

Pri merjenju povprečnih hitrosti in pretokov na očiščenem delu betonske struge smo ugotovili, da se hitrost v primerjavi s pretokom povečuje vedno počasneje. Pri zelo nizkih vodostajih, do približno 20 cm, povprečna hitrost vodnega toka narašča nekoliko hitreje kot navaja Vogel (1994), in sicer se pri desetkratnem povečanju pretoka poveča za 2,5-krat. Pri vodostajih, višjih od 20 cm, pa se hitrost povečuje počasneje; pri desetkratnem povečanju pretoka, se poveča približno 1,4-krat (slika 5.35). Primerjali smo še, kako se v odvisnosti od povečevanja pretoka povečujejo hitrosti ob dnu struge. Vogel (1994) namreč predvideva, da naj bi se hitrosti ob dnu povečale še manj kot povprečne hitrosti, kar morda velja le za laminarno mejno plast, pri oddaljenostih, večjih od debeline laminarne mejne plasti, pa se to ne zdi logično, saj se ob povečanju Reynoldsovega števila, do katerega pride zaradi povečanja hitrosti, debelina mejne plasti tanjša, zato se bližje dna pojavljajo večje hitrosti. Ugotovili smo, da se v našem primeru nad očiščenim betonskim koritom hitrost na oddaljenosti 0,5 cm od dna, kar je seveda precej več od debeline laminarne mejne plasti, dejansko povečuje hitreje kakor povprečna hitrost prečnega prereza, in sicer se pri desetkratnem povečanju pretoka hitrost na oddaljenosti 0,5 cm od dna poveča za približno trikrat. To velja za vodostaje do 20 cm, pri višjih vodostajih pa tako blizu dna nismo mogli meriti. Pri vodostajih, višjih od 20 cm, smo merili na oddaljenosti 1,6 cm od dna in ugotovili, da se tu hitrosti povečujejo približno enako kot povprečne hitrosti, in sicer za 1,3-krat pri desetkratnem povečanju pretoka. Pri vodostajih, nižjih od 20 cm, se na enaki oddaljenosti od dna hitrosti povečujejo nekoliko hitreje, vendar počasneje kot na oddaljenosti 0,5 cm od dna (slika 5.36).



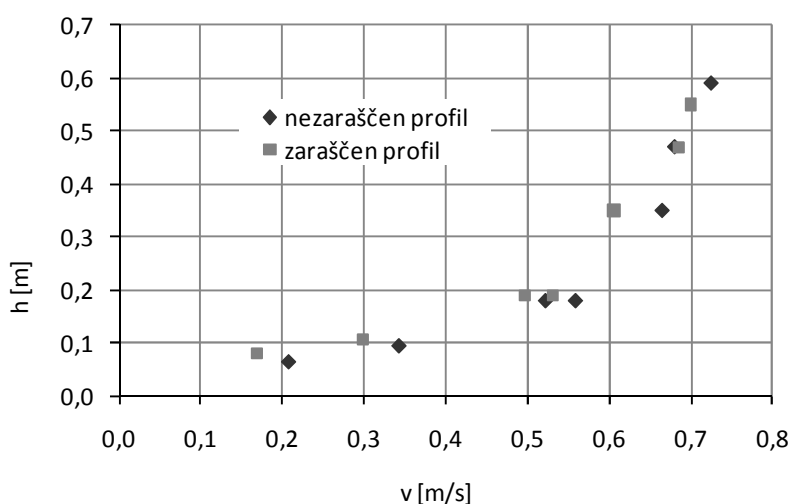
Slika 5.36: Hitrost ob dnu v odvisnosti od pretoka na delu struge z betonskim koritom (Hitrosti pri manjših treh pretokih so merjene na oddaljenosti 0,5 cm od dna, hitrosti pri večjih treh pretokih pa na oddaljenosti 1,6 cm od dna.)

Figure 5.36: Near-bottom velocity in dependence of discharge (Velocities are measured 0.5 cm above riverbed at lower three discharges and 1.6 cm above riverbed at higher three discharges.)

Odvisnost povprečne hitrosti in hitrosti pri dnu od pretoka smo ugotavljali tudi na prerezu z zaraščenim betonskim koritom, pri čemer sta primerjana prereza dovolj blizu, da so razlike v ostalih hidravličnih pogoji zanemarljive. Izmerjena povprečna hitrost na prečnem prerezu je bila na zaraščenem prerezu nekoliko manjša, saj se je povečala hrapavost ostenja struge. Na ta račun se je seveda nekoliko povišal vodostaj, kot je razvidno iz pretočne krivulje (slika 5.38). Iz slike 5.35 vidimo, da se razlika med povprečno hitrostjo na nezaraščenem in zaraščenem delu struge zmanjšuje in sta pri največjih izmerjenih pretokih hitrosti praktično izenačeni. Razlog je v tem, da je prišlo pri velikih pretokih do odtrganja makrofitov in njihovega odnašanja dolvodno, zaradi česar je bilo korito pri velikih pretokih veliko manj obraščeno kakor pri majhnih, pa tudi sicer ima obrast na dnu struge pri večji površini prečnega prereza manjši vpliv. Pri primerjavi hitrosti pri dnu ne dobimo tako lepe slike (slika 5.36). Graf je namreč sestavljen iz največjih hitrostih pri dnu na prečnem prerezu. Zaraščenost betonskega korita pa ni bila enakomerna, pač pa je bilo 40 % širine struge gosto zaraščene (južni, zasenčen del), ostalih 60 % širine prečnega prereza pa je bilo skoraj nezaraščenega, oz. je bila obrast zelo redka in nizka (severni, nezasenčen del). Največje hitrosti ob dnu so bile tako vedno na nezaraščenem delu prečnega prereza, medtem ko so bile na zaraščenem delu še posebno ob veliki zaraščenosti (pri manjših pretokih) blizu nič, pojavljale pa so se tudi negativne vrednosti zaradi vrtinčenja vode okoli obrasti. Največje hitrosti ob dnu so zato med zaraščenim in nezaraščenim profilom zelo podobne, razlika pa je v razporeditvi teh hitrosti po prečnem prerezu. Na nezaraščenem betonskem prerezu hitrosti pri dnu namreč le počasi upadajo proti bregovoma in se približajo vrednosti nič šele tik ob stenah poglobljenega dela struge, medtem ko so hitrosti na zaraščenem delu zelo

odvisne od gostote in razporeditve obrasti, zato na zaraščeni polovici prečnega prereza zelo nihajo, zelo spremenljiva pa je tudi smer vodnega toka.

Povprečne hitrosti na nezaraščnem in zaraščnem delu betonskega korita smo primerjali še glede na vodostaj (slika 5.37). Pri zelo nizkih vodostajih, pod 10 cm, ko je bila gostota obrasti največja, so bile povprečne hitrosti okrog 20% nižje od tistih na nezaraščnem delu struge. Pri višjih vodostajih se ta odstotek sicer nekoliko zniža in znaša od globine 20 cm dalje približno 12%, saj je bila takrat tudi gostota obrasti manjša. Pri vodostajih od 50 cm dalje vrednosti niso več primerljive, saj sta se vodostaja pri merjenju na enem in drugem prerezu že precej razlikovala zaradi hitrega upada visokovodnega vala med izvajanjem meritev.

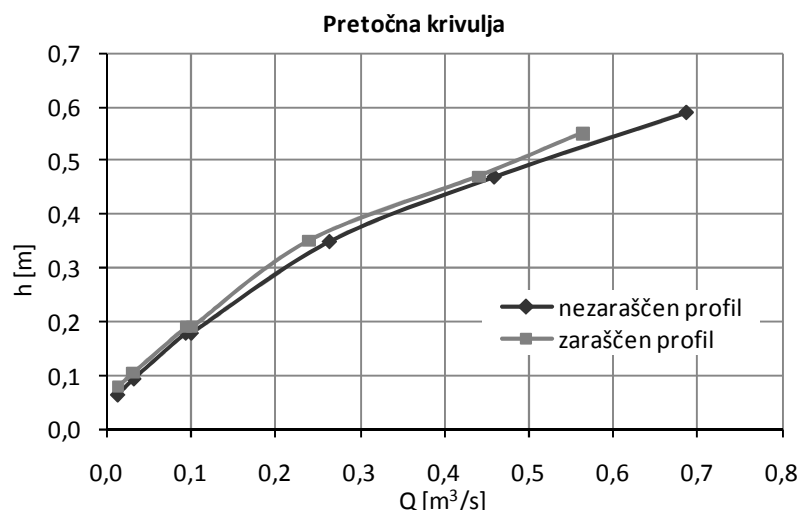


Slika 5.37: Primerjava povprečnih hitrosti v odvisnosti od vodostaja na nezaraščnem in zaraščnem delu betonskega korita

Figure 5.37: Comparison of mean profile velocities in dependence of water level above pure and overgrown concrete channel

5.9 Primerjava pretočne krivulje med nezaraščnim in zaraščnim prerezom nad betonsko strugo

Glavni namen meritev pretoka na nezaraščnem in zaraščnem prerezu betonskega korita na merilnem mestu GL2 je bil ugotoviti vpliv zaraščnosti na pretočno krivuljo. Pri enakem vodostaju se pretoki seveda zmanjšajo za enak odstotek kakor hitrosti vode. Naše meritve pretokov so potekale neposredno ena za drugo, in sicer smo vedno najprej merili na nezaraščnem in nato na zaraščnem prerezu, zato sta bila ob stabilnih pretočnih razmerah pretoka na obeh mestih enaka, zaradi zmanjšane povprečne hitrosti pa se je na zaraščnem prerezu povišal vodostaj. Pri višjih vodostajih se je pretok pri merjenju na zaraščnem prerezu že znižal glede na meritve na nezaraščnem prerezu in smo tako pri približno enakem vodostaju izmerili nižje hitrosti in manjši pretok (slika 5.38).



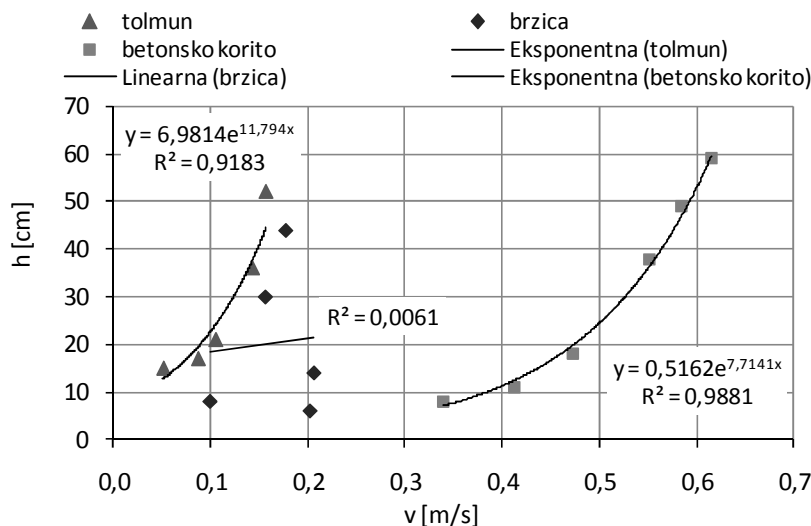
Slika 5.38: Primerjava pretočnih krivulj med prerezoma nad golo in zaraščeno betonsko strugo

Figure 5.38: Comparison of stage-discharge curves above pure and overgrown concrete channel

Ob vsakokratnem merjenju pretoka smo na zaraščenem prerezu zajeli tudi vzorec perifitona s površine $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ter ga osušili in tehtali. Žal se je zaradi odnašanja perifitona pri velikih pretokih hkrati s spreminjanjem vodostaja spreminjala tudi masa perifitona, zato nismo mogli kvantificirati vpliva mase perifitona na hitrost vode in vodostaj. Edini vodostaj, pri katerem nam je uspela meritev pri dveh različnih masah perifitona, je bil 19 cm. Ob prvem merjenju pri tem vodostaju je bila masa suhe snovi zajetega vzorca perifitona 2,4 g, pri drugem merjenju pa se je zmanjšala na 1,1 g. V skladu s pričakovanji se je pretok pri drugem merjenju, torej ob manjši masi perifitona, povečal, in sicer z 94 l/s na 101 l/s, hitrost pa se je povečala z 0,50 m/s na 0,53 m/s. Še bolj pa se je povečala hitrost na višini 0,5 cm od dna struge, in sicer z 0,22 m/s na 0,37 m/s, kar pomeni, da obraščenost s perifitonom bolj kot na povprečno hitrost določenega prereza vpliva na hitrosti tik ob dnu in s tem zagotavlja zavetje bentičnim organizmom.

Seveda je potrebno pri vrednotenju pretočne krivulje upoštevati tudi spremembo prečnega prereza in hrapavosti struge. Prvi »prelom« pretočne krivulje se pojavi pri vodostaju 25 cm, ko se voda razlije iz glavne pravokotne kinete struge, kar je razvidno tudi iz naših meritev. Za nezaraščen prerez smo dobili linearno aproksimacijo $Q = 0,888 h - 0,053$ za vodostaje do 25 cm in $Q = 0,566 h + 0,204$ za vodostaje nad 25 cm. Dobljene enačbe so le približne, saj imamo premalo podatkov za bolj zanesljivo enačbo. Pri vodostajih, kjer se je voda prelivala povsem izven betonskega korita na travnate brežine, z našo aparaturo nismo mogli meriti, medtem ko je Padežnik (2007) s potopljenim stacionarnim merilnikom hitrosti pri tem vodostaju zaznal še en »prelom« pretočne krivulje.

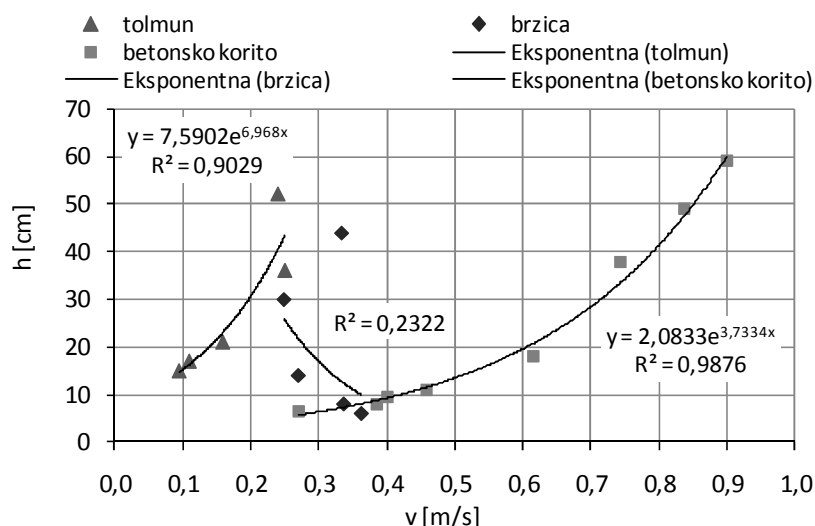
5.10 Primerjava hitrosti ob dnu in debeline laminarne mejne podplasti med naravnim in umetnim substratom



Slika 5.39: Primerjava največje hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna pri različnih vodostajih

Figure 5.39: Comparison of maximal velocities 1.6 cm above the bottom at different water levels

Podrobneje si še pogledjmo, kaj se dogaja s hitrostmi pri dnu. Primerjali smo hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna. Kot vidimo na sliki 5.39, hitrosti ob dnu v tolmunu kažejo lepo eksponentno korelacijo z vodostajem, medtem ko meritve na brzici sploh ne kažejo statistične soodvisnosti med hitrostjo pri dnu in vodostajem. Kot smo namreč že videli na slikah od 5.28 do 5.34, so bile hitrosti pri majhnih vodostajih na brzici opazno večje kot v tolmunu, z višanjem vodostaja pa se je ta razlika zmanjševala, tako da so bile hitrosti v brzici dejansko precej izenačene pri različnih vodostajih in je k večjemu pretoku prispevalo predvsem zvišanje vodostaja. K dobljenemu rezultatu, ki ne kaže statistične soodvisnosti med vodostajem in hitrostjo, verjetno pripomore tudi neravno dno na območju brzice; največje vrednosti hitrosti ob dnu smo namreč lahko izgubili na območjih med našimi izbranimi vertikalami, saj je tudi matica toka med posameznimi vodostaji vidno spreminjala položaj. Za primerjavo smo dodali še krivuljo soodvisnosti hitrosti pri dnu od vodostaja na betonskem delu struge, ki seveda tudi kaže lepo eksponentno soodvisnost med hitrostmi pri dnu in vodostajem s še večjim koeficientom korelacije kakor nad tolmunom. Z gotovostjo lahko trdimo, da so hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna najmanjše v tolmunu. Nekoliko večje, vendar ne več kot dvakrat, so vrednosti hitrosti ob dnu na brzici, bistveno večje pa so hitrosti pri dnu nad betonskim koritom, ki so kar dva- do trikrat večje od hitrosti na brzici, in tri- do štirikrat večje kot v tolmunu.



Slika 5.40: Primerjava največje hitrosti na 6/10 globine pri različnih vodostajih

Figure 5.40: Comparison of maximal velocities on 6/10 of water depth at different water stages

Primerjajmo še največje hitrosti na 6/10 globine na prečnih prerezih preko tolmunu, brzice in betonskega korita (slika 5.40). Tudi v tem primeru dobimo najlepšo eksponentno korelacijo na odseku z betonskim koritom, zelo velika soodvisnost se kaže tudi na prerezu preko tolmunu, na prerezu preko brzice pa tudi hitrosti na 6/10 struge ne kažejo statistične soodvisnosti z vodostajem. Opazimo še, da so razlike v hitrostih med posameznimi odseki na tej globini nekoliko manjše kot pri dnu, še posebej pri nižjih vodostajih, kjer so hitrosti na brzici povsem primerljive s hitrostmi nad betonsko strugo.

Ocenili smo debelino laminarne mejne podplasti na odseku z gladkim betonskim koritom in na odseku s seminaravnim substratom v tolmunu. Pred izračunom je potrebno ugotoviti, ali substrat na izbranih odsekih lahko obravnavamo kot hidravlično gladko dno, saj je le v tem primeru možen izračun debeline laminarne mejne podplasti. Dno oz. ostenje struge lahko obravnavamo kot hidravlično gladko, kadar je Reynoldsovo število mejne hrapavosti Re_* manjše od približno 5 (Yalin, 1992). Reynoldsovo število mejne hrapavosti izračunamo po naslednji formuli:

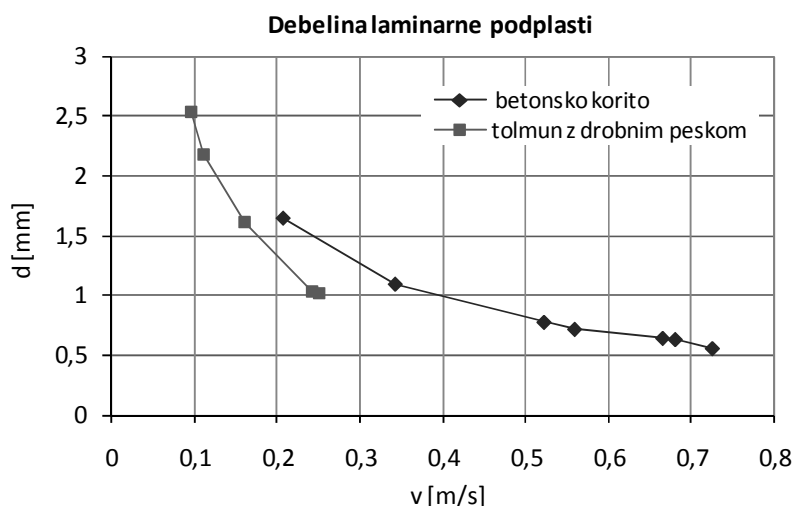
$$Re_* = \frac{\rho k_s v_*}{\mu} \text{ (Vogel, 1994), kjer je:}$$

ρ ...gostota vode [kg/m^3]

k_s ...velikost hrap [m]

v_* ...strižna hitrost [m/s] in

μ ...dinamična viskoznost vode [$\text{kg/m} \cdot \text{s}$].



Slika 5.41: Ocena debeline laminarne mejne podplasti

Figure 5.41: Assessment of laminar boundary sub layer thickness

Privzeli smo, da je velikost hrap na odseku z betonskim koritom okrog 0,5 mm, za strižno hitrost pa smo vzeli 3 % povprečne hitrosti, kar je po navedbah Vogla (1994, cit. po Ippen, 1966), dovolj dober približek na hidravlično gladki podlagi. Z uporabo teh dveh podatkov smo dobili vrednosti Re_* med 3,5 pri najnižjem vodostaju in s tem tudi najnižji hitrosti in 10 pri najvišjem vodostaju in posledično tudi hitrosti. Kot hidravlično gladek režim bi lahko obravnavali le razmere pri najnižjih dveh vodostajih, saj je bila že pi tretjem vodostaju presežena vrednost $Re_* \approx 5$; in še to je vprašljivo, saj je bila globina vode takrat le 7 cm oz. 10 cm, vrednost v_* pa je predpostavljena pri globini vode 10 m (Vogel, 1994). Vseeno smo z uporabo naslednje formule:

$$\delta_L = \frac{11,6\mu}{\rho v_*}$$

približno ocenili debelino laminarne mejne plasti δ_L [mm] in dobili vrednosti od 0,5 mm pri največji izmerjeni hitrosti do 1,6 mm pri najmanjši izmerjeni hitrosti (slika 5.41).

Za odsek na tolmunu smo predpostavili velikost hrap oz. delcev substrata 2 mm, za vrednost v_* pa smo vzeli 5 % povprečne hitrosti. Vogel (1994) namreč navaja, da je pri nekoliko bolj grobem dnu ta vrednost med 5 % in 15 %, pri čemer se sklicuje na Dennyja in Shibata (1989). Iz teh podatkov izračunano Reynoldsovo število mejne hrapavosti nam da vrednosti od 9 pri najmanjši hitrosti do 22 pri največji hitrosti, kar pomeni, da v tolmunu veljajo razmere prehodnega režima in mejne plasti po zgornji enačbi ne moremo izračunati, saj je ta zelo spremenljiva. Mi smo kljub temu tudi tu izračunali debelino laminarne podplasti in dobili vrednosti med 1 mm pri največji izmerjeni hitrosti in 2,5 mm pri najmanjši izmerjeni hitrosti.

Iz te grobe ocene lahko zaključimo, da je na seminaravnem substratu zaradi manjše povprečne hitrosti vode debelina laminarne mejne plasti debelejša, zato je območje na dnu bolj primerno za življenje vodnih nevretenčarjev. Seveda pa je dno naravnih vodotokov razen v tolmunih, kjer prevladuje substrat iz zelo drobnih delcev, zelo heterogeno, zato tam prevladujeta prehodni in hidravlično grob režim in o splošni viskozni podplasti ne moremo govoriti. Določimo lahko kvečjemu laminarno podplast na posameznemu kamnu ali skali, organizmi pa si zavetje iščejo med posameznimi delci substrata.

5.11 Vpliv različnih morfoloških oblik na povprečne hitrosti vertikale ter na hitrosti pri dnu

Vpliv morfoloških oblik vodotoka smo primerjali na šestih morfološko različnih prečnih prerezi, in sicer na nezaraščenem in zaraščenem betonskem koritu merilnega mesta GL2, na seminaravnem substratu tik pred začetkom betonskega korita in umetnem substratu na začetku betonskega korita na merilnem mestu GL4 ter v tolmunu in na brzici vzorčnega mesta GL6. Najbolj verodostojne so seveda primerjave prečnih prereзов po parih na istem merilnem mestu, saj sta ta dva prereza zelo blizu en drugemu, meritve pa so se izvajale neposredno ena za drugo, zato lahko privzamemo, da je bil pretok na obeh prerezi enak. Prečne prereze smo pri tej analizi poimenovali z imeni v preglednici 5.1, za grafe primerjav posameznih nizov pa uporabili ustrezne oznake.

Preglednica 5.1: Poimenovanje prečnih prereзов pri analizi vpliva morfologije

Table 5.1: List of cross-sections for the analysis of the morphologic impact

Merilno mesto	Poimenovanje prečnega prereza	Oznaka
GL2	čist beton	ČB
	zaraščen beton	ZB
GL4	seminaraven substrat	SNS
	umeten substrat	US
GL6	tolmun	T
	brzica	B

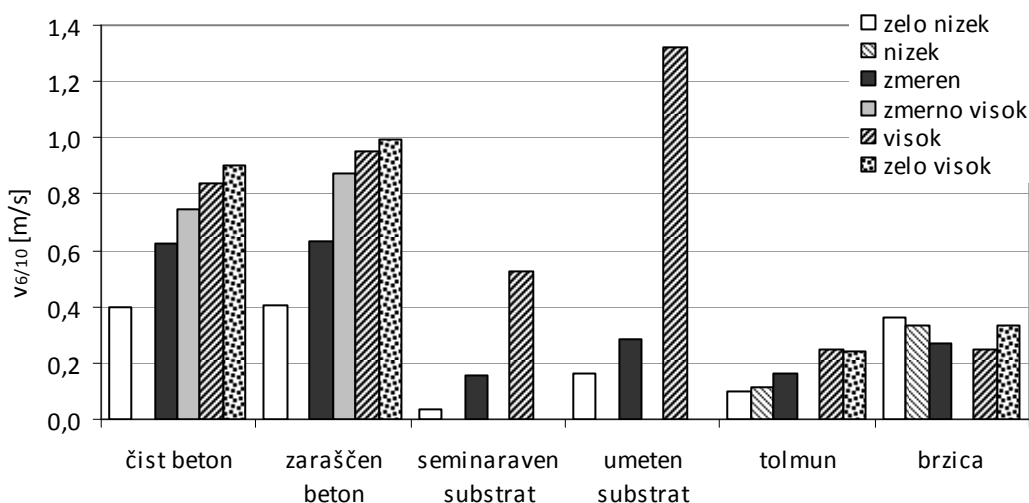
Preglednica 5.2: Velikosti pretoka ob različnih merjenjih

Table 5.2: List of flow discharges at different measurements

Poimenovanje velikosti pretoka	Oznaka	Pretok na GL2	% srednjega letnega Q
zelo nizek	1	0,033	9
nizek	2	0,05	13
zmeren	3	0,1	26
zmerno visok	4	0,264	70
visok	5	0,460	121
zelo visok	6	0,687	181

Pretok se je tudi ob istem merjenju seveda spreminjal od enega merilnega mesta do drugega, merjen pa je bil dejansko le na merilnem mestu GL2, torej na »čistem« in »zaraščenem betonu«. Zato smo glede na ta izmerjen pretok ter glede na vodostaj na posameznem mestu, čas merjenja in potek visokovodnega vala, razdelili meritve ob različnih pretokih po lestvici v preglednici 5.2 in na grafu primerjav posameznih nizov uporabili ustrezne številčne oznake.

Primerjane hitrosti so v obeh primerih (povprečje vertikale in pri dnu) največje hitrosti prečnega prereza, torej v matici toka. Kot je razvidno s slik 5.42 in 5.43 sta razporeda hitrosti na 6/10 globine in 1,6 cm od dna povsem podobna, le da so hitrosti na 6/10 globine primerno večje. To pomeni, da je oddaljenost 1,6 cm od dna že tolikšna, da ni več lokalnega vpliva substrata, saj je razpored hitrosti takšen kot v »prostem« vodnem stolpcu. Seveda to ne pomeni, da substrat na hitrosti vode ne vpliva. Vpliva namreč na hitrosti v celotnem vodnem stolpcu. To pomeni le, da je ta vpliv na oddaljenosti 1,6 cm od dna praktično enak vplivu na povprečno hitrost vodnega stolpca, medtem ko bi morali za lokalni vpliv substrata meriti bližje dnu.



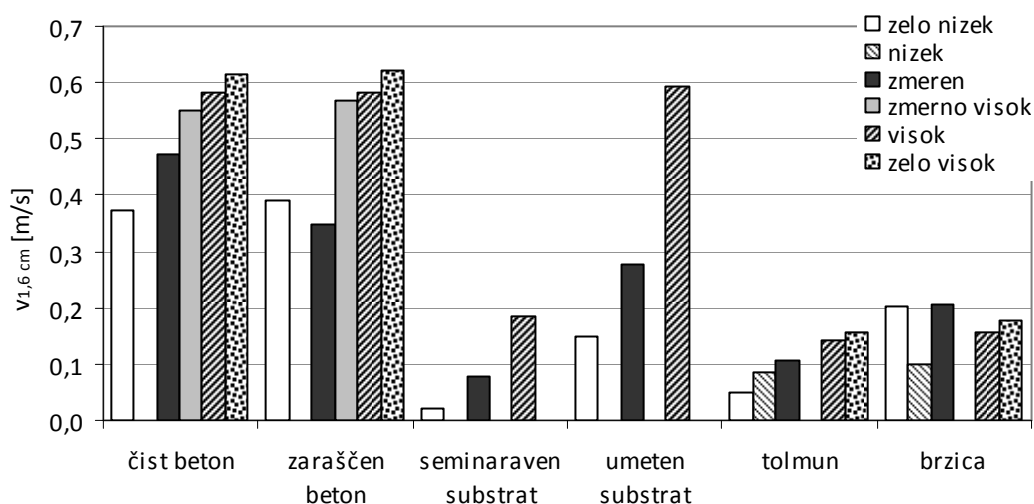
Slika 5.42: Primerjava največjih hitrosti na 6/10 globine na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih

Figure 5.42: Comparison of maximum cross-section velocities on 6/10 of water depth on morphologically different cross-sections at different discharges

Kot je razvidno z grafom na slikah 5.42 in 5.43, se tako hitrosti na 6/10 globine kakor hitrosti pri dnu z naraščanjem pretoka povečujejo, in sicer na vseh merskih prerezih. Do odstopanj pride la na brzici, kjer je bil vodostaj pri manjših pretokih zelo nizek, matica toka pa je svoj položaj spreminjala glede na vodostaj. Če primerjamo vpliv pretoka znotraj posameznih dvojic, vidimo, da je le-ta največji na vzorčnem mestu GL4 (»seminaraven substrat« – »umeten substrat«), to je na mestu, kjer se začne betonsko korito. Morfološke razlike so večje med posameznimi pari »čist beton« – »zaraščen beton«, »seminaraven substrat« – »umeten substrat« in »tolmun« – »brzica«, kakor znotraj njih, saj ležita po

dva prečna prereza zelo blizu eden drugemu. Znotraj samih parov je tudi morfološki vpliv na hitrosti največji med prerezoma »seminaraven substrat« in »umeten substrat« na merilnem mestu GL4. Ta dva prereza sta si dejansko najbolj različna, saj se tu začne betonska struga in pride do izrazitega zoženja struge ter znižanja vodostaja (posebno pri nižjih vodostajih). Na začetku betonskega korita je tudi prag iz večjih kamnov, ki povzroča gorvodno zajezitev, kar še dodatno poveča razlike med prerezoma.

Vpliv pretoka in morfoloških oblik na hitrosti vode smo ovrednotili tudi z analizo variance (ANOVA). Ker zahteva ANOVA enakost varianc znotraj posameznih skupin, nismo mogli hkrati primerjati vseh prečnih prerezov pri vseh pretokih, saj so bile razlike med variancami prevelike. Tako smo lahko hitrosti na 6/10 globine primerjali samo med prerezi »čist beton«, »zaraščen beton« in »seminaraven substrat« ter dobili vrednosti $p = 0,0005$ za vpliv pretoka in $p = 0,0006$ za vpliv morfologije, kar pomeni, da oba parametra izrazito vplivata na hitrosti. Primerjali smo še pare sosednjih prečnih prerezov med sabo. Na povprečne hitrosti nad »čistim« in »zaraščenim betonom« vplivata tako pretok kot substrat, čeprav je vpliv substrata nekoliko večji. Pri tem za zagotovitev enakosti varianc najnižjih dveh pretokov nismo upoštevali. Na hitrosti na mestih »seminaraven substrat« – »umeten substrat« približno enako vplivata morfologija in pretok, kar je razvidno tudi z grafa (slika 5.42), pri tem pa zaradi zagotavljanja enakosti varianc nismo upoštevali največjega pretoka. Na paru »brzica – tolmun« pa ima signifikanten vpliv na hitrosti morfologija, pretok pa ne. Statistično signifikantna razlika je tudi med mesti nad betonskim substratom (ČB, ZB, US) in mesti nad seminaravnim substratom (SNS, B, T), med tem ko med vsemi tremi mesti nad betonskim koritom ni signifikantnih razlik.



Slika 5.43: Primerjava največjih hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih

Figure 5.43: Comparison of maximum cross-section velocities 1.6 cm above bottom on morphologically different cross-sections at different discharges

Podobna situacija je tudi pri hitrostih pri dnu. V tem primeru je bila enakost med variancami dosežena s primerjavo prerezov »čist beton«, »zaraščen beton«, »seminaraven substrat« in »umeten substrat«.

Tudi na hitrosti pri dnu izrazito vplivata tako morfologija kot tudi pretok, pri čemer pa je vpliv morfologije nekoliko večji, in sicer je vrednost $p = 0,0026$ za vpliv morfologije, za vpliv pretoka pa $p = 0,0065$. Zanimivo je, da pri primerjavi »čistega« in »zaraščenega betona« na hitrosti pri dnu bolj vpliva pretok kakor substrat (signifikanten vpliv imata sicer oba), medtem ko na povprečno hitrost bolj vpliva substrat. Za zagotovitev enakosti varianc nismo upoštevali drugega najmanjšega in drugega največjega pretoka. Na hitrosti na mestih »seminaraven substrat« – »umeten substrat« glede na rezultate ANOVE niti pretok niti morfologija nimata signifikantnega vpliva, kljub temu pa iz grafa (slika 5.43) vidimo, da se hitrosti ob dnu s pretokom povečujejo, prav tako pa so ob vseh pretokih večje na »umetnem« kot na »seminaravnem substratu«. Na paru »brzica – tolmun« imata signifikanten vpliv tako pretok kot morfologija, pri čemer je vpliv pretoka nekoliko večji. Zelo nizek in zmeren pretok nista upoštevana. Podobno kot pri paru »čist - zaraščen beton« ima presenetljivo morfologija večji vpliv na povprečne hitrosti, pretok pa na hitrosti pri dnu. Pri betonski strugi je tak rezultat posledica neenakomerne zaraščenosti z grmičastimi makrofiti, zato so največje hitrosti izmerjene na delu prereza, ki je manj zaraščen, hidravlični pogoji na tem delu pa so zelo podobni tistim na nezaraščenem prečnem prerezu. Zaraščenost je podrobno opisana v poglavju 4 - *Merilna mesta* in podpoglavju 5.2 - *Primerjava povprečnih hitrosti in hitrosti ob dnu nad nezaraščenim in nad zaraščenim betonskim koritom na merilnem mestu GL2*. Tako kot pri največji povprečni hitrosti vodnega stolpca se tudi pri največji hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna mesta nad betonskim substratom (ČB, ZB, US) statistično značilno razlikujejo od mest nad seminaravnim substratom (SNS, B, T), medtem ko med vsemi tremi mesti nad betonskim koritom ni signifikantnih razlik.

5.12 Gostota turbulentne kinetične energije (TKE)

Intenziteta turbulence se odraža kot magnituda fluktuacij posameznih komponent hitrosti (v vzdolžni, prečni in navpični smeri) okrog njihovih povprečnih vrednosti (Wilcox in Wohl, 2007). Za nize hitrosti na 6/10 globine, katerih povprečja so prikazana na sliki 5.42, smo izračunali gostoto turbulentne kinetične energije (TKE) po naslednji enačbi (Clifford in French, 1993):

$$TKE = \frac{1}{2} \rho (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2),$$

kjer je:

TKE...gostota turbulentne kinetične energije [N/m^2],

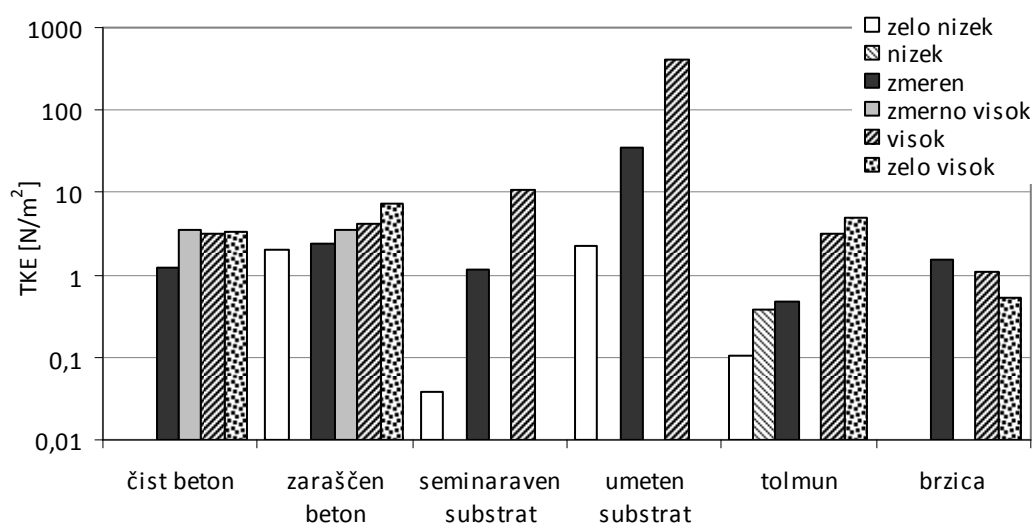
ρ ...gostota vode [kg/m^3] (privzeta vrednost $1000 kg/m^3$),

σ_x^2 ... standardna deviacija hitrosti v vzdolžni smeri,

σ_y^2 ... standardna deviacija hitrosti v prečni smeri in

σ_z^2 ... standardna deviacija hitrosti v navpični smeri.

Rezultati so prikazani na sliki 5.44, kjer so vrednosti TKE prikazane na logaritemski osi. Pri vodostajih, nižjih od približno 10 cm, ki so se pojavljali ob nizkem in zelo nizkem pretoku na betonskem koritu in na brzici, vrednosti TKE nismo mogli izračunati, saj zaradi premajhne globine vode nismo mogli izmeriti navpične komponente hitrosti. Tako že zaradi izostanka najnižjih pretokov na dveh prečnih prerezih ter tudi zaradi neenakosti med variancami posameznih nizov z ANOVO ni bilo mogoče primerjati vseh prečnih prerezov naenkrat, zato smo primerjali le posamezne pare ter vsa mesta na seminaravnem substratu v primerjavi z vsemi mesti na betonskem substratu. Med brzico in tolmunom ni bilo statistično značilnih razlik, kakor tudi ne med čistim in zaraščenim betonskim koritom, signifikantne pa so bile razlike v morfologiji med tolmunom in zaraščenim betonskim koritom. Med vsemi mesti na seminaravnem substratu (SNS, B, T) in vsemi mesti na betonskem substratu (ČB, ZB, US) prav tako ni bilo statistično značilnih razlik. Razen na brzici, kjer so se pojavljale anomalije že pri primerjavi hitrosti na 6/10 globine in pri dnu, turbulentna kinetična energija s pretokom narašča. Daleč največja vrednost je bila na prerezu z umetnim substratom merilnega mesta GL4 pri visokem pretoku, ko je bil tok tudi na videz zelo turbulenten, vodna gladina pa je bila zelo vzvalovana. Na začetku betonskega korita je namreč prag iz večjih kamnov, ki ob višjih vodostajih povzroča intenzivno vrtnčenje. Na prerezu »seminaraven substrat«, ki ima prav tako značilnosti tolmana, in prerezu »tolmun« sta bili izračunani drugi največji vrednosti TKE pri velikem pretoku. Najnižje vrednosti TKE pri velikih pretokih so bile na brzici. Tudi razlike med vrednostmi TKE pri različnih pretokih so bile največje na prerezih »seminaraven substrat«, »umeten substrat« in »tolmun«, medtem ko so se na »čistem« in »zaraščenem betonskem prerezu« ter na »brzici« vrednosti zelo malo spreminjale glede na pretok.



Slika 5.44: Primerjava turbulentne kinetične energije na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih

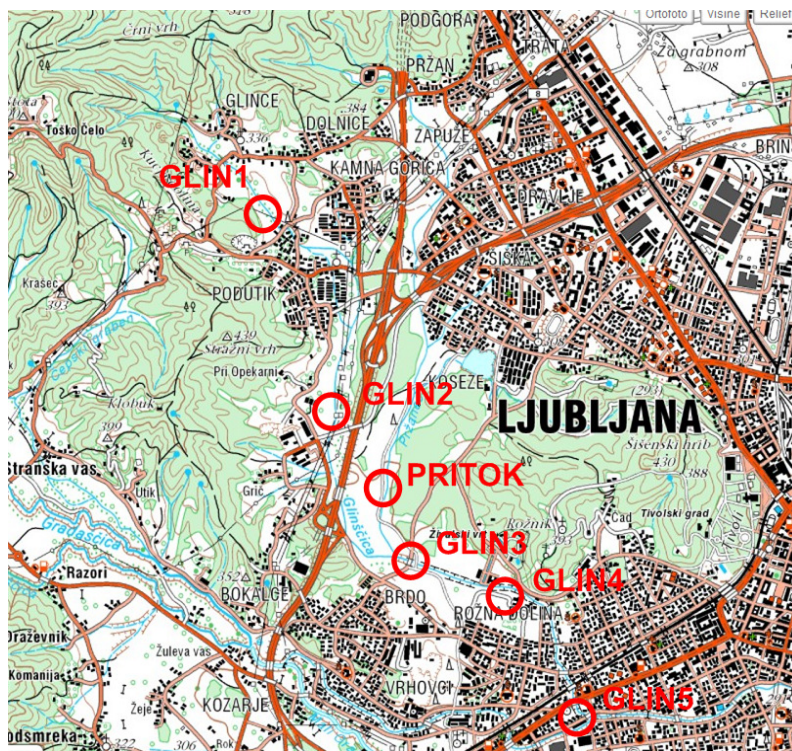
Figure 5.44: Comparison of TKE on morphologically different cross-sections at different discharges

Vrednost TKE smo izračunali tudi pred in za kamnom na »čistem betonu«, in sicer na oddaljenosti 1,6 cm od dna. Za oviro smo dobili bistveno višje vrednosti kakor pred njo. Ob nizkem vodostaju je bila vrednost TKE pred oviro okrog 3 N/m^2 , za njo pa okrog 8 N/m^2 , medtem ko je bila pri visokem vodostaju vrednost TKE pred oviro 7 N/m^2 , za njo pa 26 N/m^2 .

6 BIOLOŠKE RAZISKAVE

Biološke analize na potoku Glinščica se vzporedno z našimi hidrološkimi meritvami niso izvajale, zato povzemamo rezultate analiz makroinvertebratske združbe in perifitonske združbe, ki sta bili opravljene istočasno, in sicer med majem 2005 in marcem 2006. Hkrati pa so bile opravljene tudi hidrološke, morfološke, fizikalne in kemijske analize (Koprivšek, 2006).

Vzorčna mesta se nekoliko razlikujejo od merilnih mest pri tej raziskavi in so prikazana na sliki 6.1. Na prvem vzorčnem mestu v Podutiku, poimenovanem GLIN 1, je struga sonaravno urejena, kar pomeni, da se izmenjujejo brzice z manjšo globino in večjo hitrostjo ter tolmini z večjo globino in manjšo hitrostjo, ki omogočajo različne življenjske pogoje različnim organizmom. Drugo vzorčno mesto GLIN2 je bilo izbrano ob AC bazi. Tukaj je struga že nekoliko izravnana, vendar še ločimo brzice in tolmine, ki pa so že manj izraziti od predhodnega vzorčnega mesta. Ob majhnih pretokih se pojavljajo otočki (razvejana struga), kar omogoča nekoliko večje globine in hitrosti tudi ob majhnih pretokih. Tretje vzorčno mesto GLIN3 pred mostom na Brdnikovi cesti je izravnano, vendar ima ustvarjene umetne pragove, ki posnemajo brzice in tolmine. Hitrosti so na tem predelu zato zelo različne, kar omogoča življenjske razmere različnim vrstam. Na tem vzorčnem mestu so bile izmerjene največje globine vode. Vzorčni mesti GLIN4 pri Biološkem središču in GLIN5 pri viški cerkvi sta si morfološko zelo podobni, saj je na obeh mestih struga tlakovana z betonskimi ploščami.



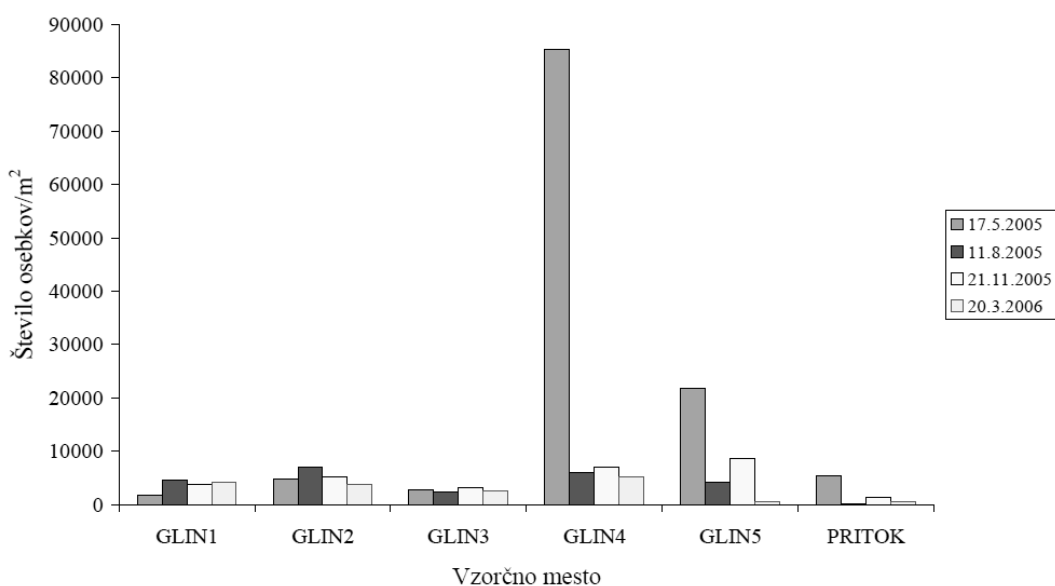
Slika 6.1: Vzorčna mesta bioloških raziskav (Geopedia)

Figure 6.1: Sampling sites of biologic investigation (Geopedia)

6.1 Makroinvertebratska združba na potoku Glinščica

Vesna Kereži (2007) je preučevala vpliv sprememb na rečnem koridorju na združbo makroinvertebratov. Vzorčila je na različno spremenjenih vzorčnih mestih od izvira do izliva Glinščice v različnih letnih časih ter ugotovila, da se bolj razlikujejo združbe na različnih odsekih potoka kakor združba na istem odseku v različnih časih. Makroinvertebrate je vzorčila s prilagojenim kvantitativnim vzorčenjem po metodi »vzorčenje z brcanjem«, nato pa je zbrane živali shranila v 70-odstotnem etanolu, jih po različnih taksonomskih ključih določila do določene taksonomske ravni ter podatke statistično analizirala (seznam taksonov, število taksonov in število osebkov).

Največje število osebkov je bilo zabeleženo maja 2005 na vzorčnem mestu pri Biološkem središču (slika 6.2), vendar je en takson predstavljal več kot polovico vzorca, zato vrstna diverziteta ni bila prav velika. Zanimivo je, da je bilo na isti dan na vzorčnem mestu pri viški cerkvi pred izlivom v Gradaščico zabeleženih veliko manj osebkov, le dobro četrtino tistih pri Biološkem središču, kljub temu, da sta si mesti morfološko zelo podobni. Zopet je zelo prevladoval en takson, vendar ne isti kakor na prejšnjem vzorčnem mestu.

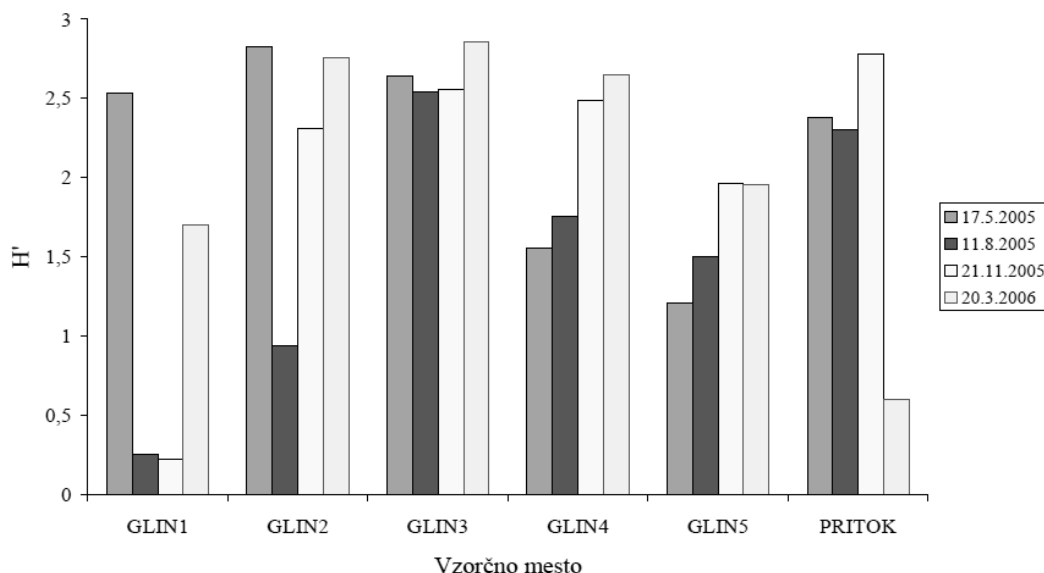


Slika 6.2: Število osebkov makroinvertebratske združbe na kvadratni meter na 6 vzorčnih mestih od maja 2005 do marca 2006 (Kereži, 2007: str 44)

Figure 6.2: Number of specimens of macroinvertebrate community per m² on 6 sampling sites from May 2005 to March 2006 (Kereži, 2007: p 44)

Po prehranjevalnih skupinah so na prvem vzorčnem mestu v Podutiku prevladovali drobilci, od drugega do četrtega vzorčnega mesta so prevladovali detritivori, na zadnjem vzorčnem mestu pa filtratorji.

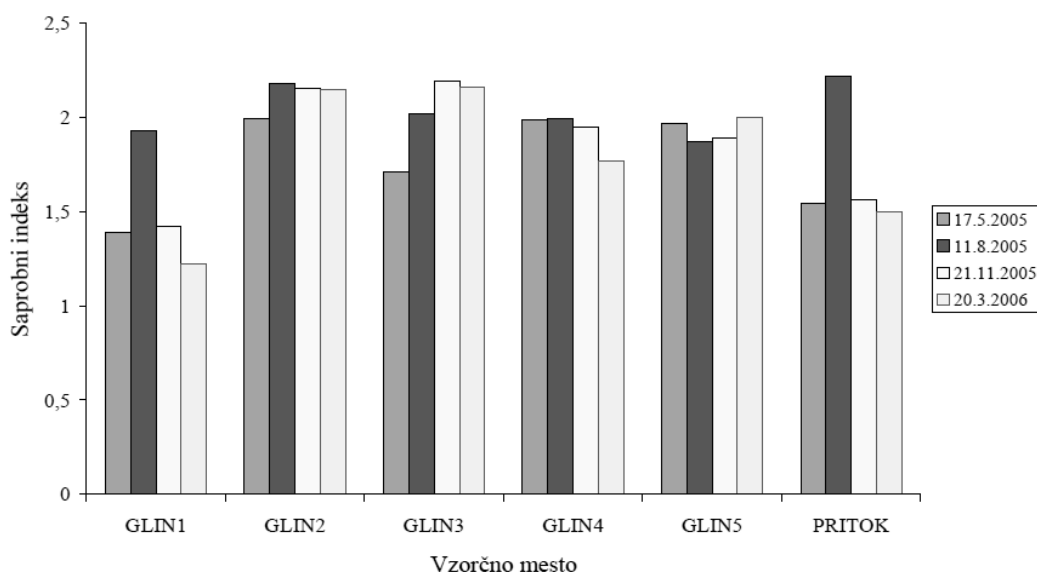
Najvišja diverziteteta je bila izračunana na vzorčnem mestu pred mostom čez Brdnikovo cesto marca 2006, najnižja pa na prvem vzorčnem mestu v Podutiku, novembra 2005 (slika 6.3).



Slika 6.3: Vrednosti Shannon – Wienerjevega diverzitetnega indeksa (H') na 6 vzorčnih mestih v obdobju od maja 2005 do marca 2006 (Kereži, 2007: str 53)

Figure 6.3: Values of the Shannon - Wiener diversity index on 6 sampling sites from May 2005 to March 2006 (Kereži, 2007: p 53)

Vrednost saprobnega indeksa pa je bila najvišja na pritoku Pržanec avgusta 2005, najnižja pa na prvem vzorčnem mestu maja 2005 (slika 6.4).



Slika 6.4: Spreminjanje vrednosti saprobnega indeksa na 6 vzorčnih mestih v obdobju od maja 2005 do marca 2006 (Kereži, 2007: str 54)

Figure 6.4: Values of saprobic index on 6 sampling sites from May 2005 to March 2006 (Kereži, 2007: p 54)

Kereži (2007) je v svoji raziskavi ugotovila, da okoljske spremenljivke pojasnijo bistveno več variabilnosti kot časovne spremenljivke, torej sprememba rečnega koridorja bistveno vpliva na združbo makroinvertebratov. Na bolj spremenjenih vzorčnih mestih se pojavljajo vrste, ki so bolj tolerantne na širok razpon večine spremenljivk. Zelo velik pomen ima temperatura vode. Spreminja se tudi delež različnih prehranjevalnih skupin, ki je seveda odvisen od vrste hrane, le-ta pa se s spreminjanjem rečnega koridorja lahko spremeni, kar ima za posledico spremembo v sestavi prehranjevalnih skupin.

Vrstna diverziteteta ni vedno odraz onesnaženosti oziroma obremenjenosti vodotoka, tako je na primer Kereži (2007) zabeležila najnižjo vrednost prav na prvem, najmanj spremenjenem in onesnaženem vzorčnem mestu pri Podutiku. Vzrok je v tem, da je na izvirnem predelu malo hranil, temperature pa so nizke in enakomerne, kar omogoča preživetje le redkim vrstam. Največjo vrednost je zabeležila na vzorčnem mestu pred Brdnikovo cesto, malo pred začetkom betonske struge, kjer je vodotok sicer reguliran, vendar so ustvarjeni umetni pragovi, ki ustvarjajo predele z različnimi hitrostmi vodnega toka, poleg tega pa je bil na tem vzorčnem mestu poleg enega vzorčnega mesta gorvodno tudi najbolj heterogen substrat.

Saprobna stopnja, ki pomeni obremenjenost vodnega okolja z organskimi snovmi, je bila najnižja na prvem vzorčnem mestu, nato pa se je na drugem vzorčnem mestu povečala, ter se na kanaliziranem odseku struge celo malo izboljšala, zato vsaj v tem primeru kanaliziranost struge ni imela vpliva na saprobno stanje oz. ga lahko s povečano hitrostjo vodnega toka celo malo izboljša.

6.2 Perifitonska združba na potoku Glinščica

Elena Štendler (2007) je v svoji diplomski nalogi preučevala perifitonsko združbo na potoku Glinščica, s poudarkom na odziv združbe na fizično spremenjen vodotok in ugotovila, da sta si bili glede na Sørensenov indeks v mesecu maju najbolj podobni vzorčni mesti GLIN4 in GLIN5, v avgustu vzorčni mesti GLIN3 in GLIN4, v novembru GLIN3 in GLIN4 ter v marcu GLIN1 in GLIN2. Shannon-Wienerjev diverzitetni indeks je bil izračunan le na podlagi diatomejske združbe, ki je predstavljala največji del združbe (53% - 90%) na vseh vzorčnih mestih v vseh letnih časih. Največjo vrednost Shannon-Wienerjevega diverzitetnega indeksa je imel marčevski vzorec pritoka Pržanec, verjetno zaradi majhnega nihanja pretoka in hitrosti. Tudi v novembru je bila največja vrednost zabeležena na pritoku Pržanec, medtem ko je bila v maju najvišja vrednost na vzorčnem mestu GLIN5, avgusta pa na mestu GLIN4. Najnižja vrednost je bila v vseh letnih časih zabeležena na sicer najmanj spremenjenem izvirnem delu, na vzorčnem mestu GLIN1. Razlog za to so nizke temperature in nizka vsebnost hranil, torej neugodni življenjski pogoji za večino vrst. Glede na saprobni indeks

spada celotna Glinščica v 2. kakovostni razred, le vzorčno mesto GLIN1 spada v 1. do 2. kakovostni razred. Klastrska analiza je pokazala večjo podobnost med vzorci z različnih vzorčnih mest ob istem času kot med vzorci z istega mesta ob različnih letnih časih, izstopalo je le vzorčno mesto GLIN1. Glede na rezultate kanonične korespondenčne analize na variabilnost kremenastih alg najbolj vplivajo naslednji dejavniki: pretok vode (26%), minimalna temperatura vode (22%), maksimalni pretok (12%) in potopljeni makrofiti (8%), na variabilnost vseh vrst alg pa najbolj vplivajo naslednji dejavniki: minimalna temperatura vode (14%), pretok (7%), sezona poletje (6%) in nitrati (6%).

Preglednica 6.1: Število vrst v vzorcih, zajetih na različnih vzorčnih mestih (Štendler, 2007)

Table 6.1: Number of species on different sampling sites (Štendler, 2007)

VZORČNA MESTA	ŠTEVILO VRST	
	KREMENASTE ALGE	VSE ALGE
GLIN1 Pržan	45	70
GLIN2 AC baza	72	91
GLIN3 Brdnikova	74	122
GLIN4 Biološko središče	73	127
GLIN5 Vič	68	133
Pritok Pržanec	67	113

Najbolj popolna in zanesljiva metoda za oceno hidrobiološke kakovosti vode je vsekakor študija, ki zajema vse vrste organizmov, tako alge, makroinvertebrate, makrofite in ribe ter istočasno tudi ustrezne fizikalne in kemijske meritve. To je v večini primerov nerealno in neizvedljivo, zato se moramo velikokrat omejiti na študijo favne ali ihtiofavne ali flore vodotoka (Štendler, 2007). Štendler (2007) je v svoji raziskavi perifitonskih alg v potoku Glinščica ugotovila, da na sezonsko dinamiko alg v kanalizirani Glinščici vplivajo predvsem spremembe v hidrologiji, ki se pojavijo v času obilnih padavin. V obdobju nizkega vodostaja pa združbo določajo predvsem temperatura vode, hranilne snovi in svetloba. Pri tem je problematično to, da se pri normalnih temperaturah za preživetje vpliv temperature težko loči od vpliva svetlobe, poleg tega pa v tej raziskavi intenziteta svetlobe ni bila merjena, zato je težje določiti dejavnik, ki v času nizkih voda v največji meri vpliva na perifitonsko združbo. Iz analiz vseh alg in kremenastih alg lahko zaključimo, da se v primeru Glinščice problem regulacije ne kaže toliko v spremembah hidroloških, abiotičnih in biotičnih dejavnikov, pač pa bolj v degradaciji celotnega okolja zaradi regulacije dela struge. V nasprotju s pričakovanji je bila združba kremenastih alg pestra tudi v delu vodotoka z betonskim dnom, veliko je bilo prisotnih tudi ostalih skupin perifitonskih alg. Spremembe skupinskega sestava vzdolž vodotoka med naravnim in reguliranim delom struge niso bile značilne, vrstni sestav se ni drastično spreminjal, prišlo pa je do sprememb v pogostosti posameznih vrst. Sezonska dinamika večjih skupin je bila v reguliranem delu

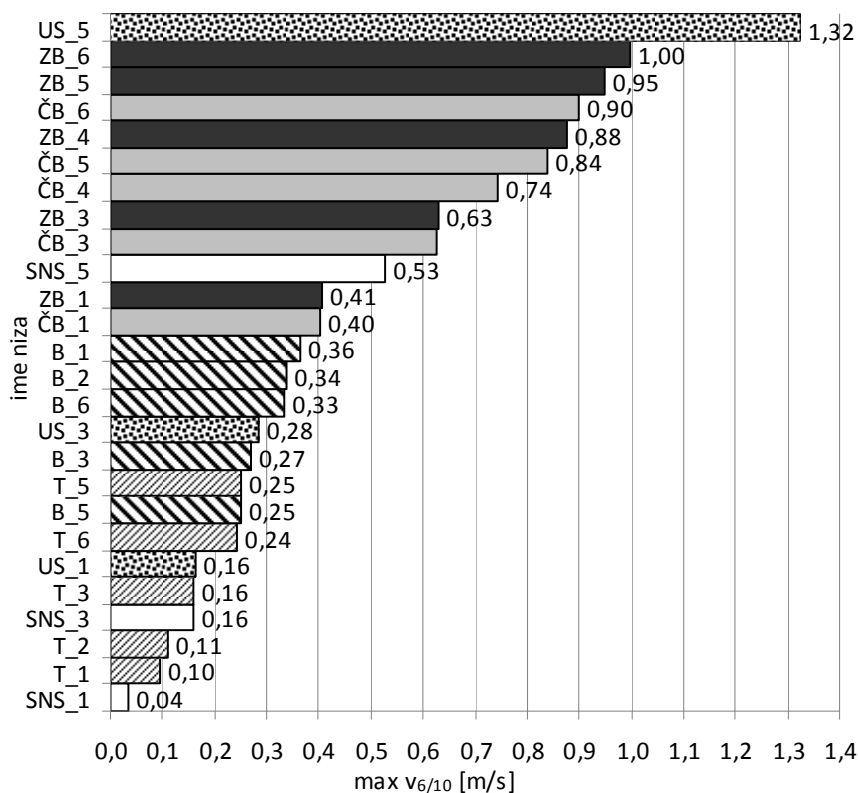
vodotoka podobna tisti v naravnem delu vodotoka, po deležu pa so na vseh vzorčnih mestih v vseh letnih časih prevladovala kremenaste alge.

Včasih je določanje kakovosti vodnega okolja temeljilo le na fizikalnih in kemijskih dejavnikih, dandanes pa so osnova za analizo kakovosti vode prav različni organizmi, fizikalni in kemijski dejavniki pa so le dopolnilo raziskavam in pomagajo pri interpretaciji rezultatov bioloških analiz. Ključni problem teh analiz pa je pomanjkanje referenčnih mest brez antropogenega vpliva ter pomanjkanje večletnih raziskav. Ker na Glinščici podobne raziskave še niso bile izvedene, ne moremo govoriti o poslabšanju ali izboljšanju stanja vodnega okolja. Iz te študije lahko zaključimo le, da so perifitonske alge boljši pokazatelj organskega onesnaženja, kakor pa fizičnih sprememb struge (Štendler, 2007).

7 DISKUSIJA

7.1 Vpliv morfološke spremenjenosti struge na hitrosti pri dnu in na 6/10 globine

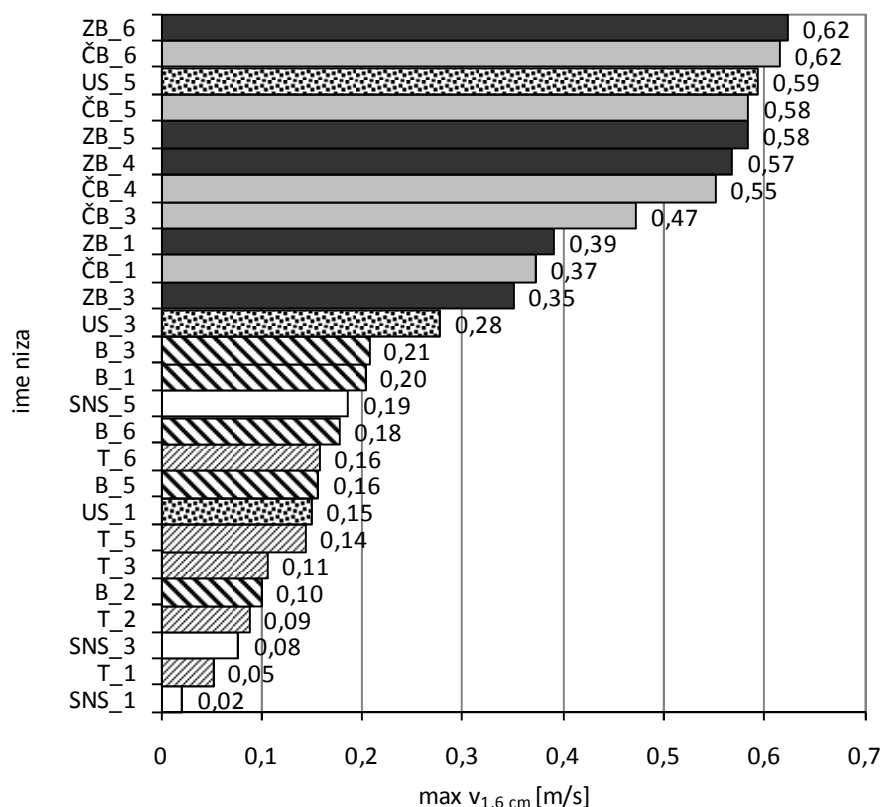
Nize hitrosti na najbolj značilnih prečnih prerezi smo primerjali še po velikosti, od največjih do najmanjših izmerjenih hitrosti. Primerjali smo tako hitrost na 6/10 globine kakor tudi hitrosti na oddaljenosti 1 cm od dna. Nizi so označeni glede na prečni prerez (preglednica 5.1) in glede na velikost pretoka (preglednica 5.2). Tako hitrosti na 6/10 globine kakor tudi hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna so bistveno večje na prerezi z betonskim substratom (US, ZB, ČB) kakor na prerezi s seminaravnim substratom (SNS, B, T). Glede na sliko 7.1 lahko nize hitrosti razvrstimo v dve skupini ne glede na velikost pretoka. Hitrosti na vseh prerezi nad betonskim koritom so namreč pri vseh pretokih, tudi pri najmanjšem, večje kakor hitrosti nad seminaravnim substratom ob največjem pretoku. Izjema sta le najvišji pretok pri »seminaravnem substratu«, pri katerem so hitrosti malenkost večje kakor na »zaraščenem« in »čistem betonu« pri najnižjem pretoku, ter »umeten substrat«, kjer so hitrosti ob nižjih dveh pretokih primerljive z »brzico« na naravnem substratu. Na tem delu je namreč na betonskem dnu veliko kamnov, ki ob nizkih pretokih povzročajo zaježbo, pri višjih pretokih pa se voda preliva čeznje, zato je razlika v hitrostih med posameznimi vodostaji tako velika.



Slika 7.1: Razpored nizov maksimalnih hitrosti prečnega prereza na 6/10 globine

Figure 7.1: The order of precedence of maximum cross-section velocities sets on 6/10 of water depth

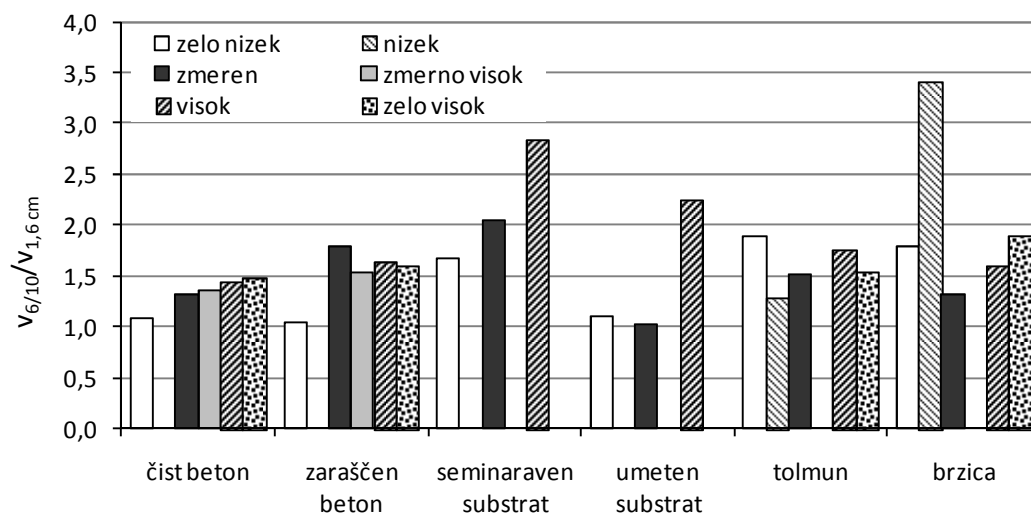
Nizi hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna so razporejeni podobno (slika 7.2). V skupino prereзов na seminaravnem substratu »pade« le niz »umetni substrat« ob najnižjem vodostaju zaradi že zgoraj opisane zaježitve. Tako korenit poseg v strugo vodotoka, kot je betoniranje, oz. polaganje betonskih plošč in s tem zmanjševanje hrapavosti ostenja, torej bistveno vpliva na hitrosti vode, in sicer na hitrosti pri dnu (1,6 cm od dna) še nekoliko bolj izrazito kakor na povprečne hitrosti vodnega stolpca.



Slika 7.2: Razpored nizov maksimalnih hitrosti prečnega prereza na oddaljenosti 1,6 cm od dna

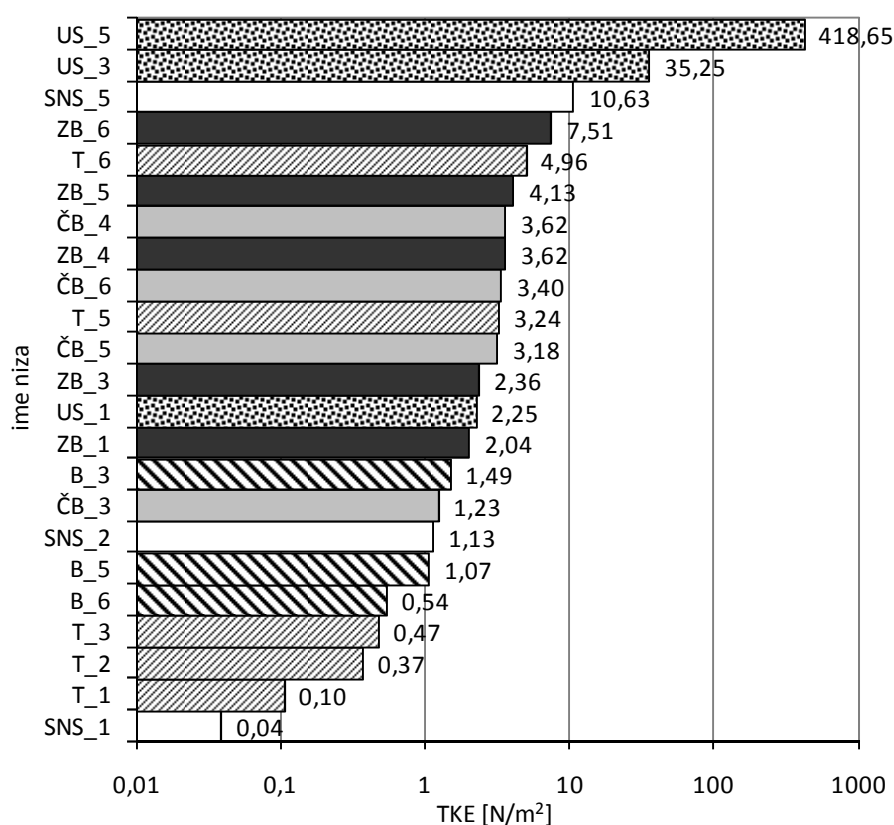
Figure 7.2: The order of precedence of maximum cross-section velocities sets 1.6 cm above river bed

Izračunali smo še razmerje med povprečnimi hitrostmi vodnega stolpca in hitrostmi vode pri dnu (slika 7.3) in ugotovili, da obstajajo statistično značilne razlike med umetnim in seminaravnim substratom. Razmerje je na odsekih z betonskim koritom manjše kot na odsekih s seminaravno strugo, kar pomeni, da so bile hitrosti pri dnu v primerjavi s povprečnimi hitrostmi večje kot na odsekih s seminaravnim substratom. Opazna je tudi razlika med hidravlično gladko in hidravlično hrapavo podlago. Pri nizkem vodostaju razlike med posameznimi substrati niso bile velike, razmerje pa se je gibalo med 1,3 in 1,8. Pri visokih vodostajih pa je na mestih s hidravlično gladko podlago (betonsko dno, tolmun) razmerje ostalo približno enako, kar pomeni, da so se enako kot povprečne hitrosti povečale tudi hitrosti pri dnu, medtem ko se je na mestih s hidravlično hrapavo podlago (seminaraven substrat, umeten substrat) to razmerje povečalo, kar pomeni, da so se hitrosti pri dnu povečale manj kot povprečne hitrosti v vodnem stolpcu.



Slika 7.3: Razmerje med povprečno hitrostjo vodnega stolpca in hitrostjo pri dnu

Figure 7.3: Ratio between mean water column velocity and near-bottom velocity



Slika 7.4: Razpored nizov merjenja hitrosti po vrednosti TKE na 6/10 globine

Figure 7.4: The order of precedence of TKE values on 6/10 of water depth

Razporeditev nizov glede na vrednost turbulentne kinetične energije je nekoliko drugačna (slika 7.4). Zmanjševanje hrapavosti ostenja namreč ne povečuje turbulence, temveč jo zmanjšuje. Drugače je

seveda na prerezu »umeten substrat«, kjer so na betonskem koritu kamni. Hitrost vode se zaradi zoženja in zmanjšanja hrapavosti struge poveča, kamni pa povzročijo intenzivno turbulentno mešanje vode, zato je bila vrednost TKE na tem mestu daleč najvišja, in to pri visokem in tudi zmernem pretoku. Sledijo »seminaraven substrat«, ki ima funkcijo tolmana, »zaraščen beton« in »tolmun«. Sledijo še preostala mesta na betonskem substratu, pri katerih se vrednost TKE ne spreminja bistveno glede na pretok, najnižje vrednosti pa imajo »brzica« in oba »tolmana« pri nizkih pretokih. Bolj kot je dno hidravlično hrapavo, večje so torej razlike v turbulentni kinetični energiji glede na pretok, pri hidravlično gladkem dnu pa so te razlike minimalne.

Največje vrednosti TKE sta tudi Wilcox in Wohl (2007) dobila v tolmunih in pod pragovi. Preučevala sta potok z izmenjujočimi se pragovi in tolmini ter strmim padcem. Naš preučevani odsek potoka Glinščica je ravninski z majhnim padcem, zato so značilnosti tolmunov tu nekoliko drugačne. Kljub temu sta bili na prerezu »seminaraven substrat«, ki ima prav tako značilnosti tolmana, in prerezu »tolmun« izračunani drugi največji vrednosti TKE pri visokem pretoku. Najnižje vrednosti TKE pri velikih pretokih so bile v skladu z študijo Wilcoxa in Wohla (2007) na brzici.

7.2 Vpliv obraščenosti struge na hitrost vodnega toka

Vpliv obraščenosti struge na hitrost vodnega toka smo obravnavali na dveh primerih: merilno mesto GL2 je bilo obraščeno s perifitonom, merilno mesto GL5 pa z makrofiti. Obe vrsti zaraščenosti vplivata na zmanjšanje hitrosti vodnega toka in s tem seveda tudi na povečanje globine vode.

Na merilnem mestu GL2 z betonskim substratom, ki ga obraščajo predvsem mahovi, smo pri enakem vodostaju zaradi večje hidravlične hrapavosti dna pri večji gostoti obrasti pričakovano izmerili manjše hitrosti vodnega toka. Podobne rezultate je prikazal tudi De Doncker (2008), čeprav so obrast v njegovi raziskavi, s katero je preučeval zanesljivost meritev pretoka v zaraščeni reki, predstavljali makrofiti. Meritve smo vsakokrat primerjali z nezaraščenim prečnim prereзом, pri čemer so bile razlike v hitrosti pričakovano večje ob nižjem vodostaju, saj je obrast takrat segala relativno višje proti gladini, pri čemer je prekrivala večji delež prečnega prereza. Hkrati pa je pri večjih pretokih prišlo tudi do odtrganja obrasti, zato je bila tudi absolutna višina mahov nižja, manjša pa je bila tudi sama gostota obrasti. Ko se je voda razlila iz poglobljenega dela struge, so se razlike v hitrostih po prečnem prerezu med zaraščenim in nezaraščenim prereзом ponovno povečale zaradi obraščenosti bregov s travo. Pri najnižjem vodostaju je bila povprečna hitrost vodnega toka na zaraščenem prerezu za okrog 20% manjša v primerjavi z nezaraščenim prereзом, pri globini vode nad 20 cm pa se je razlika zmanjšala na 12%. Primerljive rezultate je dobil Brilly s sod (2006), ki je primerjal zimske in poletne meritve na Glinščici v letih 2003 in 2004. Pri enakem vodostaju so bile povprečne hitrosti vodnega toka poleti zaradi zaraščenosti z obrastjo za 25% manjše v primerjavi z meritvami v zimskem času.

Če primerjamo največje izmerjene hitrosti po celotnem prečnem prerezu (na 6/10 ali ob dnu) dobimo na prvi pogled nenavaden rezultat: največje izmerjene hitrosti so večje na zaraščenem prečnem prerezu. Razlog je v neenakomerni zaraščenosti z obrastjo, ki je ob desnem bregu bistveno gostejša, zato glavnina vodnega toka teče ob levem bregu. Obrast še posebno pri najnižjem vodostaju in hkrati največji gostoti obrasti bistveno zmanjša efektivno površino prečnega prereza, vodostaj pa se le malo poveča glede na nezaraščen prečni prerez, zato se zaradi zakona o ohranitvi mase (kontinuitetna enačba) hitrost na nezaraščenem delu prečnega prereza poveča glede na prečni prerez brez obrasti. Vendar pa to ne velja vedno. Hitrost na nezaraščenem delu sicer zaraščenega prečnega prereza je namreč odvisna od same oblike struge in stopnje zaraščenosti. Schulz s sod. (2003) pri preučevanju vodnega toka preko odseka struge, zaraščenega z makrofiti, na primer opaza, da se hitrost vodnega toka, ki teče mimo makrofitov, ne spremeni. Ob visoki stopnji zaraščenosti pa se lahko zaradi zelo velikega koeficienta hrapavosti hitrosti na nezaraščenem delu prereza zmanjšajo v primerjavi z nezaraščenim prerezom in pride do zaježitve.

Ker so makrofiti večji in se pogosto razraščajo prav do vodne gladine, seveda še bistveno bolj vplivajo na zmanjšanje hitrosti vodnega toka kakor perifiton. Njihov vpliv na vodni tok smo preučevali na merilnem mestu GL5, kjer smo opazili petkratno zmanjšanje hitrosti vodnega toka med rmancem v primerjavi s hitrostjo vodnega toka ob njem, medtem ko je bila hitrost vodnega toka pol metra dolvodno od rmanca še vedno podobna vrednosti, izmerjeni med rmancem. Rezultati se ujemajo z ugotovitvami Schulza in sod. (2003), ki ugotavljajo, da se hitrost vodnega toka med makrofiti in dolvodno od njih bistveno zmanjša, in sicer za 2 do 18-krat glede na prosti profil, odvisno od vrste makrofitov in njihove oblike (hidrodinamičnost, razvejanost, trdnost stebel oz. listov). Ob različnih vodostajih in različni gostoti zaraščenosti z rmancem smo opazili različne vzorce toka preko makrofitov, kar opaza tudi Cotton s sodelavci (2006) ob preučevanju vodnega toka preko rastišča vodne zlatice na reki Frome v Veliki Britaniji. Tako so se ob najvišjem vodostaju in s tem največji hitrosti zaradi večje potisne sile vodnega toka stebela rmanca uklonila in je glavnina toka tekla kar preko njega, zaradi česar so bile hitrosti, izmerjene neposredno dolvodno od rmanca, v nasprotju z meritvami pri nižjih vodostajih, bistveno večje od hitrosti, merjenih med rmancem, hitrosti vode, ki je tekla okrog rmanca pa primerljive s hitrostmi, izmerjenimi med rmancem.

7.3 Tok okrog ovire

Pri primerjavi hitrosti vodnega toka pred oviro in za njo smo ugotovili, da se povprečni hitrosti vodnega toka pred in za oviro bistveno razlikujeta, medtem ko se hitrosti, merjene 5 mm od dna ne razlikujejo bistveno. Do enake ugotovitve sta prišla tudi Bouckaert in Davis (1998), ki poudarjata, da sta hitrosti pri dnu v obeh primerih bistveno manjši glede na povprečno hitrost. Na oddaljenosti 5 mm od dna smo lahko merili pri vodostajih 11 cm in 18 cm, pri višjih pa šele 1,6 cm nad dnem, kjer so bile

hitrosti že večje, in temu primerno tudi razlike med hitrostmi pred oviro in za njo. Poleg tega smo zaradi stojala lahko merili najmanj 13 cm pred, medtem ko sta Bouckaert in Davis (1998) z nekoliko drugačnim instrumentom (tudi ADV) uspela meriti 5 cm pred oviro.

Skladno z raziskavo Bouckaerta in Davisa (1998) smo pred in za oviro pri dnu dobili velike vrednosti navpične komponente hitrosti, usmerjene od dna proti vodni gladini; pred oviro zaradi nastajajočega vrtinca, za njo pa zaradi povratnega kroženja. Tudi izračun gostote turbulentne kinetične energije se ujema z raziskavo Bouckaerta in Davisa (1998), saj smo dobili za oviro bistveno večje vrednosti TKE kakor pred njo.

7.4 Težave pri meritvah

Instrument FlowTracker ni preveč primeren za merjenje blizu dna struge, brežin ali objektov v vodi. Točka vzorčenja se namreč nahaja 10 cm od oddajnika, zato bližje kot 10 cm od desnega brega ob pravilni usmeritvi senzorja ne moremo meriti. Omejitve pri merjenju v vzdolžni smeri predstavlja oddaljenost sprejemnikov od oddajnika, zaradi česar lahko merimo najbližje 5 cm pred ali za objektom v vodi. Meritve v globino so omejene z nosilno palico, in sicer je z njo možno meriti 1,6 cm od dna. Če sondo snamemo z merilne palice, se ta oddaljenost zmanjša na 0,5 cm od dna. Vendar pa moramo upoštevati, da je pri meritvah blizu dna ali objektov v vodi velika verjetnost odboja od teh objektov namesto od delcev v vodi (Wilcox in Wohl, 2007). Ta verjetnost je toliko večja pri hidravlično hrapavi posteljici dna z nehomogenim substratom, medtem ko dobimo pri meritvah nad betonom in v tolmunu, kjer je substrat predstavljal enakomeren droben pesek, dokaj zanesljive meritve tudi na oddaljenosti 0,5 cm od dna. Drug problem, ki se pojavlja pri meritvah na mikrolokacijah, je, da se vzorčevalni volumen nekoliko spreminja od instrumenta do instrumenta, poleg tega se oddaljenost od dna precej spremeni, če sonde ne držimo povsem navpično.

Pri merjenju smo se soočali še z eno težavo, in sicer z dolgim časom trajanja meritev na enem prečnem prerezu, kar je bilo posebej problematično ob večjih pretokih, ko se je pretok in z njim tudi hitrost vodnega toka od začetka do konca merjenja že občutno spremenila. Na razpolago smo žal imeli le en instrument, zato nismo mogli meriti na vseh merilnih točkah po prečnem prerezu hkrati, pač pa zapovrstjo, medtem pa so se razmere lahko že nekoliko spremenile. Meritev na enem prečnem prerezu je trajala povprečno skoraj eno uro, saj smo morali posebno pri meritvah blizu dna intervale merjenja ponavljati, kadar je instrument javljal slabe robne pogoje in majhno vrednost razmerja signal – šum. Pri največjih pretokih smo zato interval skrajšali na 40 sekund in tako zmanjšali razlike v pretoku med začetkom in koncem merjenja na enem prečnem prerezu.

7.5 Vpliv hitrosti na perifitonsko združbo

Štendler (2007) je na podlagi diatomejske združbe izračunala Shannon – Wienerjev diverzitetni indeks, čigar vrednost je bistveno nižja od ostalih na obeh vzorčnih mestih z betonsko strugo dne 20.3.2006. Ti dve mesti sta se v tem času bistveno razlikovali od drugih mest po hitrosti vodnega toka, medtem ko vsi ostali merjeni parametri niso bistveno odstopali od ostalih vzorčnih mest. Iz tega torej lahko sklepamo, da ima na diverziteti diatomejske združbe bistven vpliv hitrost vodnega toka. Povprečne hitrosti vodnega stolpca so na teh dveh mestih tega dne dosegale vrednosti 0,9 m/s. V času ostalih merjenj, ko je bil vodostaj nižji, hitrosti tudi na mestih z betonskim prerezom niso bistveno odstopale od ostalih vzorčnih mest – dosegale so vrednosti okrog 0,4 m/s in takrat tudi ni bilo bistvenih razlik v Shannon-Wienerjevem indeksu med umetnim in semi-naravnim substratom.

Na predelu Glinščice, obloženem z betonskimi ploščami, je bila kljub skoraj popolnoma homogenemu substratu vrstna diverziteta presenetljivo pestra. Prevladoval je mah vrste *Fontinalis antipyretica*, ki zaradi mrežaste razrasti filtrira različne celice in delce in s tem omogočajo visoko stopnjo usedanja in pritrdjanja, kar poveča tudi diverziteti mikroalg (Štendler, 2007). Štendler (2007) je še ugotovila, da na sezonsko dinamiko alg na potoku Glinščica vplivajo predvsem hidrološke spremembe (hitrost vodnega toka), ob nizkem vodostaju pa tudi temperatura vode, hranilne snovi in svetloba. Skupinski in vrstni sestav se med različno spremenjenimi odseki ni bistveno spreminjal, razlike so bile le v pogostosti posameznih vrst. Tudi sezonska dinamika perifitona se ni bistveno razlikovala med seminaravnim in reguliranim odsekom struge.

7.6 Vpliv hitrosti na združbo makroinvertebratov

V nasprotju z združbo perifitona na združbo makroinvertebratov bolj vplivajo vzorčna mesta kot letni časi. Zanimivo je, da se vrstna diverziteta ni bistveno zmanjšala pri marčevskih meritvah na mestih z betonskim koritom, kjer so hitrosti dosegale kar 0,9 m/s. Znatno se je zmanjšalo le število osebkov na drugem betonskem prerezu (pri viški cerkvi), medtem ko je bilo število osebkov na vzorčnem mestu pri Biološkem središču še večje od gorvodnih mest na semi-naravnem substratu. Gore s sod. (2001) je z raziskavo taksonov EPT (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera) na potoku Queens Creek v ZDA ugotovil, da je vrstna diverziteta največja pri hitrostih med 0,1 in 0,5 m/s, pri hitrostih nad 0,9 m/s pa ti taksoni niso več prisotni. Shannon-Wienerjev diverzitetni indeks na splošno sicer upade na mestih z betonskim koritom, vendar ob povečani hitrosti med marčevskimi meritvami nič bolj kot pri ostalih meritvah. Največja diverziteta makroinvertebratske združbe pa je bila na vzorčnem mestu nad Brdnikovo cesto, kjer so bile zaradi heterogenega substrata tudi hitrosti zelo heterogene. Ta odsek je sicer umetno spremenjen, vendar je urejen z nizkimi pragovi, ki ustvarjajo odseke s hitrim in počasnim tokom. Število taksonov je namreč večje v heterogenem okolju s pestrimi habitatmi, kjer več vrst najde

primerno ekološko nišo (Beisel in sod., 2000). Poleg tega je bilo na tem vzorčnem mestu tudi največ makrofitov, kar tudi vpliva na povečano diverziteto, kot so ugotovili Biffagni in sod. (2000) ter Gregg in Rose (1985), saj makrofiti predstavljajo zatočišča pred hidravličnim stresom ter hkrati povzročajo veliko heterogenost fizičnega habitata in tudi veliko površino za pritrjanje alg in vodne favne.

Sicer je bilo največ variabilnosti pojasnjene s spremenljivko temperaturni razpon vode (17,3 %), vendar je tudi maksimalna hitrost vode pojasnila več kot 13% variabilnosti (Kereži, 2007). Medtem ko diverziteta na betonskih odsekih upade, pa ne upade število osebkov – največja vrednost je bila presenetljivo izmerjena prav na vzorčnem mestu z betonskim substratom, ob Biološkem središču dne 17. 5. 2005.

8 ZAKLJUČKI

V sklopu magistrske naloge smo merili hitrosti vodnega toka na odsekih z različnimi substrati in različno morfologijo struge, pri čemer smo ugotovili, da ima tako sama morfologija struge (razširitve, zožitve) kot tudi neživ in živ substrat bistven vpliv na povprečno hitrost vodnega stolpca in na hitrosti pri dnu. Bistvene razlike v hitrosti vode smo opazili med odseki s popolnoma togo ureditvijo (betonsko korito) in odseki s seminaravnim substratom. Tako povprečne hitrosti kot hitrosti pri dnu so bile bistveno večje na prvih odsekih, s povečevanjem pretoka pa so se razlike še povečevale, saj so se hitrosti na odsekih z betonskim tlakovanjem ob višjih vodostajih povečale bolj kot na odsekih s seminaravnim substratom. Hitrosti pri dnu so bile tako na odseku z betonskim koritom 2 do 3-krat večje kot na seminaravni brzici in 3 do 4-krat večje kot v seminaravnem tolmunu. Izračunali smo še razmerje med povprečnimi hitrostmi vodnega stolpca in hitrostmi pri dnu (1,6 cm od dna), kjer smo prav tako opazili statistično značilne razlike med odseki z betonskim koritom in odseki s seminaravno strugo. Vrednosti so bile na prvih odsekih manjše, kar pomeni, da so bile hitrosti pri dnu v primerjavi s povprečnimi hitrostmi večje kot na odsekih s seminaravnim substratom. Opazne razlike so bile tudi med odseki na hidravlično gladki in odseki na hidravlično hrapavi podlagi. Razmerje na odsekih s hidravlično gladko podlago namreč ostaja približno enako, tudi ko se pretok povečuje, medtem ko se na odsekih s hidravlično hrapavo podlago to razmerje bistveno poveča, ko se poveča pretok. To pomeni, da tudi ob povečanju povprečnih hitrosti zaradi objektov v vodi hitrosti pri dnu ostajajo relativno majhne in primerne za življenje vodnih organizmov. Tak primer je tudi na prečnem prerezu »umeten substrat« na merilnem mestu GL4, tik dolvodno od začetka betonskega tlakovanja, kjer je na betonskem koritu veliko kamenja. V višini kamenja ostajajo hitrosti majhne, kljub zelo velikim hitrostim v prostem vodnem stolpcu.

Podobne rezultate smo dobili tudi pri izračunu gostote turbulentne kinetične energije: na hidravlično bolj hrapavi podlagi, z večjimi kamni v strugi, so bile vrednosti TKE bistveno večje kot na hidravlično gladki podlagi. Daleč največja vrednost je bila izmerjena na prečnem prerezu »umeten substrat« tik dolvodno od začetka betonskega korita, na zožitvi struge, dolvodno od kamnitega praga in gorvodno od večjih kamnov v strugi. Na tem in ostalih mestih z večjimi kamni v strugi so se vrednosti izrazito povečale ob povečanem pretoku, medtem ko na hidravlično gladki podlagi to povečanje ni bilo tako očitno.

Na dveh merilnih mestih smo ocenjevali vpliv živega substrata na hitrosti in strukturo vodnega toka; na merilnem mestu GL2 smo preučevali vpliv obrasti, ki so jo predstavljali predvsem mahovi, na merilnem mestu GL5 pa vpliv makrofitov (rmanec). Na betonskem koritu, obraščenim z mahovi, so se hitrosti zmanjšale za približno 20% ob največji zaraščenosti in 12% pri najmanjši zaraščenosti glede na hitrosti na nezaraščenem betonskem koritu. Mahovi so ob največji gostoti zaraščenosti segali 5 cm

v višino, ob večjih pretokih pa do 2 cm. Večji vpliv na vodni tok imajo makrofiti, ki segajo višje v vodni stolpec, običajno do vodne gladine. Rmanec na merilnem mestu GL5 je segal do vodne gladine in prekrival skoraj celotno širino struge, hitrosti pa so se med njim zmanjšale za približno 5× glede na hitrosti vodnega toka okrog njega.

Ugotavljali smo tudi vpliv hitrosti vodnega toka na biocenozo. Do bistvenega zmanjšanja gostote in velikosti mahov na vzorčnem mestu GL2 je prišlo pri hitrosti 0,9 m/s. Kdaj in pri kateri pretočni hitrosti natančno je prišlo do odtrganja mahov, žal ne vemo. Visokovodni val, ki je sledil daljšemu sušnemu obdobju, med katerim so se mahovi bujno razrasli, je namreč dosegel največjo povprečno hitrost okrog 0,9 m/s, do odtrganja pa je lahko prišlo že pri manjših hitrostih ob naraščanju visokovodnega vala. Pri enaki povprečni hitrosti se je bistveno zmanjšala tudi biodiverzitetna kremenastih alg (Štendler, 2007), pri čemer pa so bile takrat hitrosti izmerjene ob upadu visokovodnega vala in je do odtrganja lahko prišlo tudi pri večjih hitrostih. Diverzitetna makroinvertebratske združbe se zanimivo ob enako veliki hitrosti vodnega toka ni zmanjšala glede na vzorčenja pri nižjih hitrosti na istih vzorčnih mestih. Zmanjšala se je le številčnost osebkov, in še to le na dolvodnem izmed dveh vzorčnih mest na betonskem koritu (Kereži, 2007). Ne glede na čas merjenja in hitrosti vodnega toka, pa se je vrstna diverzitetna zmanjšala na obeh mestih z betonskim koritom glede na gorvodna mesta s seminaravnim substratom, kar daje slutiti, da na združbi makroinvertebratov bolj kot sama hitrost vodnega toka vpliva substrat, ki je na betonskem odseku bistveno preveč homogen, da bi nudil ugodne življenjske pogoje za vodne nevretenčarje.

Meritve smo izvajali z Dopplerjevim merilnikom hitrosti vodnega toka FlowTracker, ki za merjenje ob dnu, ob vodni gladini in v bližini podvodnih objektov ni preveč primeren. Dnu se lahko približamo na najmanj 1,6 cm, pri zelo nizkem vodostaju pa brez stojala na 5 mm, vendar so te meritve že precej nezanesljive in možne le na hidravlično gladki podlagi. Ugotovili smo, da so meritve pri dnu (1,6 cm ali 5 mm od dna) statistično povezane s povprečnimi hitrostmi vodnega stolpca, torej se hitrosti v obeh točkah spreminjajo enako glede na merilno mesto in vodostaj. To pomeni, da je oddaljenost od dna, pri kateri smo merili, že prevelika, da bi zaznali lokalni vpliv substrata. Hart s sod. (1996) namreč ugotavlja, da ni statistično signifikantnih povezav med hitrostmi 2 mm od dna in 1 cm od dna. Za natančnejši vpogled v dogajanje tik ob dnu bi morali uporabiti drugačno merilno opremo, na primer toplotni anemometer ali merilnik hitrosti, ki deluje na principu magnetne indukcije. Najbolje bi bilo imeti več takšnih merilnikov na enem stojalu, da bi lahko merili na različnih oddaljenostih od dna hkrati in bi bili nizi hitrosti, izmerjeni na eni vertikali primerljivi med sabo.

9 POVZETEK

Namen te naloge je bil izmeriti hitrosti vodnega toka, ki so jim izpostavljeni v vodi živeči organizmi, predvsem makroinvertebrati. Ker večina teh organizmov živi na dnu struge, moramo meriti hitrosti čim bližje dnu, da bi ugotovili, kakšnim hidravličnim pogojem so v svojem življenjskem ciklu dejansko izpostavljeni. Seveda pa se hitrosti ne razlikujejo samo glede na oddaljenost od dna, temveč se zaradi morfoloških oblik in raznolikosti substrata razlikujejo v vseh smereh preko dna struge. Zaradi velike časovne in prostorske heterogenosti hitrosti vodnega toka v naravnem vodotoku so meritve hitrosti pri dnu zelo zahtevne. Šele iznajdba novih tehnologij, kot so Dopplerjevi merilci hitrosti vodnega toka in toplotni anemometri, v zadnjih treh desetletjih je omogočila merjenje hitrosti blizu dna. Veliko raziskav je bilo narejenih pod kontroliranimi pogoji v laboratorijih, meritve hitrosti pri dnu na naravnih vodotokih pa se pojavljajo šele v zadnjem desetletju.

Poleti 2010 smo na potoku Glinščica v Ljubljani opravljali meritve vertikalnih profilov hitrosti nad različnimi vrstami substrata. Uporabljali smo Dopplerjev merilnik pretočnih hitrosti FlowTracker Handheld ADV proizvajalca SonTek, ki sicer ni najprimernejši za meritve tik ob dnu, vendar ima nekaj drugih prednosti: z njim lahko merimo hitrosti na različnih oddaljenostih od dna, poleg tega pa lahko z njim merimo tudi pretok. Na odsekih Glinščice z različno stopnjo reguliranosti struge smo si izbrali 6 merilnih mest, od katerih je vsako obsegalo od enega do treh prečnih prereзов, odvisno od karakteristik posameznega merilnega mesta. Na vsakem prečnem prerezu smo si izbrali vsaj tri točke, na katerih smo merili hitrosti na različnih globinah: tik pod vodno gladino, na 2/10 globine, na 6/10 globine, na 8/10 globine in ob dnu. Hitrosti ob dnu smo večinoma merili na oddaljenosti 1,6 cm od dna, kar je najbližje, kot še lahko merimo z uporabo merilnega stojala. Kadar voda ni bila pregloboka, smo meritve ponovili še brez merilne palice, tako da smo sondo ročno držali na dnu. V tem primeru je bila točka merjenja od dna oddaljena približno 5 mm. Interval merjenja je na vsaki točki znašal 60 sekund, razen v nekaterih primerih pri velikih pretokih, ko smo želeli opraviti meritve na čim več merilnih mestih pri podobnih pogojih, zaradi česar smo skrajšali interval merjenja na 40 sekund.

V rezultatih smo primerjali vertikalne profile hitrosti po širini prečnih prereзов, nad različnimi naravnimi substrati in umetnim substratom in pri različnih vodostajih, pri čemer smo ugotovili, da so hitrosti na enaki oddaljenosti od dna večje na mestih z betonskim substratom v primerjavi z mesti nad seminaravnim substratom ter da so hitrosti v isti točki večje pri večjem vodostaju. Razmerje $v_{6/10}/v_{1.6cm}$ je bilo statistično značilno večje na prečnih prerezih s seminaravnim substratom v primerjavi s prečnimi prerezi na betonskem koritu. Poleg analiz hitrosti smo primerjali tudi pretočni krivulji nad očiščenim in zaraščenim betonskim koritom, pri čemer smo ugotovili, da je pri enakem pretoku na zaraščenem prerezu povprečna hitrost vodnega toka manjša, vodostaj pa je višji glede na nezaraščen prerez. Iz standardnih deviacij vzdolžne, prečne in vertikalne komponente hitrosti smo izračunali še

gostoto turbulentne kinetične energije (TKE). Podobno kot hitrosti tudi vrednosti TKE naraščajo z naraščanjem pretoka, vendar se z razliko od hitrosti vrednosti TKE niso razlikovale med seminaravnim in umetnim substratom, pač pa med hidravlično gladkim in hidravlično hrapavim dnom. Največja vrednost TKE je bila izračunana na prečnem prerezu »umetni substrat«, ki se nahaja tik dolvodno od kamnitega pragu, pri visokem vodostaju, ko je bil vodni tok tudi na videz zelo turbulenten.

Ocenili smo tudi vpliv življenjskih združb na hitrosti vodnega toka: perifitonska združba na betonskem koritu je ob svoji največji gostoti obraščenosti zmanjšala povprečno hitrost vode za 20 %, makrofitska združba na merilnem mestu GL5 pa je zmanjšala hitrost vodnega toka za petkrat. Po drugi strani pa se je pokazal tudi vpliv vodnega toka na organizme, ki živijo v potoku. Pri povprečni hitrosti vodnega toka 0,9 m/s je bila večina perifitona odnesena, diverziteta diatomejske združbe pa je signifikantno upadla. Diverziteta makroinvertebratske združbe pri enaki hitrosti sicer ni statistično značilno upadla, pač pa je upadlo število osebkov. Diverziteta makroinvertebratske združbe je sicer značilno upadla na betonskem odseku, neodvisno od hitrosti vodnega toka.

Za natančnejši vpogled v hitrostne razmere na življenjskem prostoru vodnih nevretenčarjev bi potrebovali merilne inštrumente z večjo časovno in prostorsko ločljivostjo.

10 SUMMARY

The aim of the study was to measure stream velocities in the places where the most of water organisms, especially macroinvertebrates, actually live. As the majority of these organisms lives on the bed surface, we have to measure velocities as close to the bottom as possible to investigate the circumstances they are actually exposed to in their life cycle. Of course, velocities are not heterogeneous only in their vertical extension, but in all directions over the bed surface, due to the morphology of the riverbed and especially due to the substrate. The large spatial and temporal heterogeneity of the velocities makes the measurement of near-bottom velocities highly difficult. Only the invention of new technologies for velocity measurements, such as laser Doppler anemometry and hot-film velocimetry, in the last three decades, has enabled velocity measurements near the bed surface. In the last few decades, many measurements were done under controlled conditions in laboratories, while it is only in the last decade that field measurements have been underway.

The measurements of the velocity profiles above different substrates were done on the Glinščica stream in the summer 2010. The instrument used for the velocity measurements was acoustic Doppler velocimeter, which is admittedly not the most appropriate for near-bottom measurements, but it has some advantages: you can measure velocities on different heights above the bed surface and you can also measure discharge. Six measuring sites were chosen on differently regulated reaches of the Glinščica stream and each of them was composed of a different number of profiles, depending on the characteristics of each site. On each cross-section, we selected at least three points in which we were measuring velocities on different depths. We were measuring velocities just under the water surface, on 2/10 of water depth, on 6/10 of water depth, on 8/10 of water depth, and near the bed-surface. Velocity near the bed surface was measured 1.6 cm above the bed surface, which is the closest to the bed surface if measured using the wading rod. If the water was not too deep, we repeated the near-bottom measurement without the wading rod, by holding the probe by hand on the bed surface. In this case the sampling volume was approximately 0.5 cm above the bed surface. The measuring interval on each measuring point and each depth was 60 seconds, except in some cases during high discharges, when we were in a hurry to measure on different profiles or even different measuring sites under the same conditions, and we shortened the record length to 40 seconds.

We compared vertical velocity profiles across the river cross-section, the velocity profiles above different natural substrates or above concrete channel and the velocity profiles at the same point at different water stages. We found out that the velocities at the same height above the bed surface are higher above the concrete channel in comparison to semi-natural substrate, and that they are higher at higher water stage. Ratio $v_{6/10}/v_{1.6\text{cm}}$ was significantly higher on the cross-sections on semi-natural substrate in comparison to cross-sections on artificial substrate. Beside the velocity analyses, we have

also made a comparison between the stage-discharge curves above the pure concrete channel and above the concrete channel, overgrown with periphyton. We have found out that at the same discharge the water level is higher and the mean stream velocity is lower at the cross-section with overgrown concrete channel in comparison to the pure concrete channel. We have also calculated turbulent kinetic energy density (TKE) from standard deviations of streamwise, cross-stream and vertical velocity components. Like the velocities, the TKE values increased with increasing water flow, but unlike the velocities, the TKE value did not differ between the measuring sites with semi-natural substrate and measuring sites on the concrete channel, but it differed between the hydraulically smooth and hydraulically rough measuring sites. The greatest TKE value was calculated for the cross-section “artificial substrate”, which was situated just downstream of the step base, at high flow, when the flow was apparently very turbulent.

We have also estimated the interaction between biocenosis and water velocities: the periphyton community on the concrete channel (GL2) at its maximal density lowered the mean stream velocity by 20% and the macrophyte community at the measuring site GL5 lowered the mean stream velocity 5-fold. On the other side, velocity also has an affect on the organisms. At mean stream velocity 0.9 m/s the most of periphyton was washed out and the diversity of the diatom community decreased significantly. At the same velocity, the diversity of the macroinvertebrate community did not decrease significantly, but the number of the specimens did. Namely, the macroinvertebrate diversity decreased on the concrete river reach independently of water velocity.

For a closer look into the velocity conditions in the macroinvertebrate biotope, instruments of higher spatial and temporal resolution would be needed.

VIRI

Uporabljeni viri

Beisel, J. N., Usseglio-Polatera, P., Moreteau, J. C. 2000. The spatial heterogeneity of a river bottom: a key factor determining macroinvertebrate communities. *Hydrobiologia* 422/423: 163-171.

[doi:10.1023/A:1017094606335](https://doi.org/10.1023/A:1017094606335)

Biffagni, A., Crisa, G. A., Harper, D. M., Kemp, J. L. 2000. Using macroinvertebrate species assemblages to identify river channel habitat units: an application of the functional habitats concept to a large, unpolluted Italian river (River Ticino, northern Italy). *Hydrobiologia* 435: 213-225.

[doi:10.1023/A:1004124717508](https://doi.org/10.1023/A:1004124717508)

Bouckaert, F. W., Davis, J. 1998. Microflow regimes and the distribution of macroinvertebrates around stream boulders. *Freshwater Biology* 40:77-86.

[doi:10.1046/j.1365-2427.1998.00329.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1998.00329.x)

Buffin-Bélanger, T., Roy, A. G. 2005. 1 min in a life of a river: selecting the optimal record length for the measurement of turbulence in fluvial boundary layers. *Geomorphology* 68: 77-94.

[doi:10.1016/j.geomorph.2004.09.032](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.032)

Brilly, M., Šraj, M. 2000. Osnove hidrologije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 234 str.

Brilly, M., Štravs, L., Petkovšek, G., Toman, M. J. 2003. Ekohidrološki procesi na zajemnem objektu za hidroelektrarno Plave, Slovenija. *Acta hydrotechnica* 21/35: 77-85.

Brilly, M., Rusjan, S., Vidmar A. 2006. Monitoring the impact of urbanisation on the Glinščica stream. *Physics and chemistry of the earth* 31: 1089-1096.

[doi:10.1016/j.pce.2006.07.005](https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.07.005)

Chambers, P. A., Prepas, E. E., Hamilton, H. R., Bothwell, M. L. 1991. Current velocity and its effect on aquatic macrophytes in flowing waters. *Ecol. Appl.* 1: 249-257.

Clifford, N. J., French, J. R. 1993. Monitoring and modelling turbulent flow: historical and contemporary perspectives. V: Clifford, N. J., French, J. R. in Hardisty, J. (ur.). *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*. Wiley, Chichester idr.: 1-34.

Cotton, J. A., Wharton, G., Bass, J. A. B., Heppell, C. M., Wotton, R. S. 2006. The effects of seasonal changes to in-stream vegetation cover on patterns of flow and accumulation of sediment. *Geomorphology* 77: 320-334.

[doi:10.1016/j.geomorph.2006.01.010](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.010)

De Doncker, L., Troch, P., Verhoeven, R. 2008. Accuracy of discharge measurements in a vegetated river. *Flow measurement and instrumentation* 19: 29-40.

[doi:10.1016/j.flowmeasinst.2007.08.007](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2007.08.007)

Franklin, P., Dunbar, M., Whitehead, P. 2008. Flow controls on lowland river macrophytes: A review. *Science of the total environment* 400: 369-378.

[doi:10.1016/j.scitotenv.2008.06.018](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.018)

Gaberščik, A., Kuhar, U. 2007. Naravoslovje v šoli – Vodne rastline. *Proteus* 69/9: 437-443.

Giller, P. S., Malmqvist, B., 1998. The biology of streams and rivers. Biology of habitats. New York, Oxford University press Inc.: 296.

Gore, J. A., Layzer, J. B., Mead, J. 2001. Macroinvertebrate instream flow studies after 20 years: a role in stream management and restoration. *Regulated Rivers: Research & Management*. 17: 527-542.
[doi:10.1002/rrr.650](https://doi.org/10.1002/rrr.650)

Gregg, W. W., Rose, F. L. 1985. Influences of aquatic macrophytes and invertebrate community structure, field structure and microdistribution in streams. *Hydrobiologia* 128: 45-56.

Hart, D. D., Clark, B. D., Jasentuliyana, A. 1996. Fine-scale field measurement of benthic flow environments inhabited by stream invertebrates. *Limnol. Oceanogr.* 41: 297- 308.

Hart, D. D., Finelli C. M. 1999. Physical – biological coupling in streams: The Pervasive effects of Flow on Benthic organisms. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 30: 363 – 395.
[doi:10.1146/annurev.ecolsys.30.1.363](https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.30.1.363)

Hart, D. D., Fonseca, D. M. 1997. Seeking shelter from the storm: behavioral responses of stream invertebrates to natural and experimental floods. *Bull. North Am. Benthol. Soc.* 14:102.

Hart, D. D, Merz, R. A. 1998. Predator-prey interactions in a benthic stream community: a field test of flow-mediated refuges. *Oecologia* 114: 263-73.

Holmes, N. T. H. 1999. Recovery of headwater stream flora following the 1989-1992 groundwater drought. *Hydrological processes* 13: 341-354.

Hynes, H. B. N. 1979. The Ecology of running waters. Liverpool, Liverpool University Press: 555 str..

Heymann, Y., 1993. CORINE land cover: Technical guide. Environment, Nuclear Safety and Civil Protection Series. Luxembourg, Commission of the European Communities, Office for Official Publication of the European Communities: 144 str.

Janauer, G. A., Schmidt-Mumm, U., Schmidt, B. 2010. Aquatic macrophytes and water current velocity in the Danube River. *Ecological Engineering* 36: 1138-1145.
[doi:10.1016/j.ecoleng.2010.05.002](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.05.002)

Kereži, V. 2007. Makroinvertebratska združba potoka Glinščica. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo: 84 str.

Kirkbride, A. 1993. Observations of the Influence of Bed Roughness on Turbulence Structure in Depth limited Flows over Gravel Beds. V: Clifford, N. J., French, J.R., Hardisty J.: Turbulence. Perspectives on Flow and Sediment Transport. Yohn Wiley and Sons: 360 str.

Klaven, A. B. 1966. Investigation of structure in turbulent streams. Tech. Report of the State Hydro-Geological Inst. (GGI): 136 str.

Kondratiev, N., Popov, I., Snishchenko, B. 1982. Foundations of hydromorphological theory of fluvial processes. Leningrad, Hidrometeoizdat.

Koprivšek, M. 2006. Ekohidrološke raziskave na potoku Glinščica. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 100 str.

Landau, L. D., Lifshitz, E. M. 1986. Fluid Mechanics. Oxford idr., Pergamon Press: 539 str.

Mikoš, M. 2000. Urejanje vodotokov (skripta). Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 182 str.

Nakagawa, H., Nezu, I. 1981. Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open-channel flow. *J. Fluid Mech.* 104: 1-43.

[doi:10.1017/S0022112081002796](https://doi.org/10.1017/S0022112081002796)

Nychas, S. G., Hershey, H. C., Brodkey, R.S. 1973. A visual study of turbulent shear flow. *J. Fluid Mech.* 61.

[doi:10.1017/S0022112073000844](https://doi.org/10.1017/S0022112073000844)

Offen, G. R., Kline, S. J. 1975. A proposed model of the bursting process in turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* 7.

[doi:10.1017/S002211207500198X](https://doi.org/10.1017/S002211207500198X)

Padežnik, M., Brilly, M., Štravs, L., Vidmar, A., Rusjan, S. 2007. Seasonal impact of algae on the velocity of the Glinščica stream. Poster na konferenci "EGU General Assembly 2007" Dunaj, Austria Vienna Center, 15. – 20. april 2007. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9, 2007.

Palmer, M. A., Bely, A.E., Berg, K.E. 1992. Responses of invertebrates to lotic disturbances: a test of the hyporheic refuge hypothesis. *Oecologia* 89:182-94.

Reynolds, C. S., Carling, P.A., Beven K. J. 1991. Flow in river channels: new insights into hydraulic retention. *Arch. Hydrobiol.* 121:171-79.

Riis, T., Biggs, B. J. F. 2003. Hydrologic and hydraulic control of macrophyte establishment and performance in streams. *Limnol. Oceanogr.* 48: 1488-1497.

[doi:10.4319/lo.2003.48.4.1488](https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.4.1488)

Rusjan, S. 2003a. Sonaravno urejanje vodotokov – primer ureditve odseka Glinščice na območju Viča. Diplomatska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 89 str.

Rusjan, S. 2003b. Urejanje rečnih koridorjev. Seminar. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 75 str.

Sand-Jensen, K., Pedersen, O. 1999. Velocity gradients and turbulence around macrophyte stands in streams. *Freshwater biology* 42 (2): 315-328.

[doi:10.1046/j.1365-2427.1999.444495.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.444495.x)

Schulz, M., Kozerski H.-P., Pluntke T., Rinke K. 2003. The influence of macrophytes on sedimentation and nutrient retention in the lower River Spree (Germany). *Water Research* 37: 569-578.

SonTek/YSI Inc. 2003a. FlowTracker Handheld ADV Operation Manual Firmware Version 2.4, San Diego: 87 str.

SonTek/YSI Inc. 2003b. FlowTracker Handheld ADV Principles of Operation, San Diego: 16 str.

Statzner, B. 2008. How Views about Flow Adaptations of Benthic Stream Invertebrates Changed over the Last Century. *Internat. Rev. Hydrobiol.* 93: 593-605.

[doi:10.1002/iroh.200711018](https://doi.org/10.1002/iroh.200711018)

Štendler, E. 2007. Perifitonska združba v potoku Glinščica. Diplomatska naloga. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo: 102 str.

Urbanič, G., Toman, M. J. 2003. Varstvo celinskih voda. Ljubljana, Študentska založba: 94 str.

Vogel, S. 1994. Life in Moving Fluids: the physical biology of flow. Princeton, Princeton University Press: 467 str.

Yalin, M. S. 1992. River mechanics. Oxford, New York, Seoul, Tokyo, Pergamon Press: 219 str.

Way, C. M., Burky, A. J., Bingham, C. R., Miller, A. C. 1995. Substrate roughness, velocity refuges and macroinvertebrate abundance on artificial substrates in the lower Mississippi River. J. N. Am. Benthol. Soc. 14(4): 510-518.

Westlake, D. F. 1967. Some effects of low-velocity currents on the metabolism of aquatic macrophytes. Journal of Experimental Botany 18: 187-205.

[doi:10.1093/jxb/18.2.187](https://doi.org/10.1093/jxb/18.2.187)

Weitzel, R. L. (ur.) 1979. Methods and Measurements of periphyton communities: A Review. Philadelphia, American society for testing and materials-ASTM: 183 str.

[doi:10.1002/iroh.19810660316](https://doi.org/10.1002/iroh.19810660316)

Wilcox, A. C., Wohl, E. E. 2007. Field measurements of three-dimensional hydraulics in a step-pool channel. Geomorphology 83: 215-231.

[doi:10.1016/j.geomorph.2006.02.017](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.02.017)

Atlas okolja: http://gis.arso.gov.si/gis/profile.aspx?id=UPR_VODAMI_AXL@Arso (23.3.2010)

Geopedia: <http://www.geopedia.si/> (7.4.2009)

Ostali viri

Acalar, M. S., Smith, C. R. 1987. A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer, part 1. Hairpin vortices generated by a hemisphere protuberance. Journal of Fluid Mechanics 175: 1-41.

Anderson, B. S., Phillips, B. M., Hunt, J. W. (et al.). 2005. Identifying primary stressors impacting macroinvertebrates in the Salinas River (California, USA): Relative effects of pesticides and suspended particles. Aquatic Botany. Environmental Pollution 141, 3: 402 – 408.

[doi:10.1016/j.envpol.2005.08.056](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.08.056)

Bonacci, O. 2003. Ekologija vodnih resursa i otvorenih vodotoka. Split: Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta, Zagreb: Institut građevinarstva Hrvatske: 487 str.

Bowden, W. B., Glime, J. M., Riis, T. 2006. Macrophytes and Bryophytes. V: Hauer, F. R. (ur.), Lamberti, G. A. (ur.). Methods in Stream Ecology. Amsterdam idr.: Academic press: str 381-406.

DeNicola, D. M., McIntire, C. D. 1990. Effects of substrate relief on the distribution of periphyton in laboratory streams, I. Hydrology. J. Phycol. 26: 624-633.

[doi:10.1111/j.0022-3646.1990.00624.x](https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1990.00624.x)

Ghosh, M., Gaur, J. P. 1998. Current velocity and the establishment of stream algal periphyton communities. Aquatic Botany 60: 1-10.

Habdija, I., Primc Habdija, B., Matoničkin, R., Kučinić, R., Radanović, I., Miliša, M., Mihaljevič, Z. 2004. Current velocity and food supply as factors affecting the composition of macroinvertebrates in bryophyte habitats in karst running water. Biologia, Bratislava. 59: 577-593.

Johansson, A. V., Alfredsson, P.H. 1988. Velocity and pressure fields associated with near-wall turbulence structures. int. Seminar on Near-Wall Turbulence. Dubrovnik, May 1988.

Jonsson, P. R. idr. 2006. Making water flow: a comparison of the hydrodynamic characteristics of 12 different benthic biological flumes. *Aquat. Ecol.* 40: 409-438.

[doi:10.1007/s10452-006-9049-z](https://doi.org/10.1007/s10452-006-9049-z)

Kuzma, V. 2003. Analiza stanja površinskih voda v urbanem okolju. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 106 str.

Lacey, R. W. J., Roy, A. G. 2008. The spatial characterization of turbulence around large roughness elements in a gravel-bed river. *Geomorphology* 102: 542-553.

[doi:10.1016/j.geomorph.2008.05.045](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.045)

Lamarre, H., Roy, A. G. 2005. Reach scale variability of turbulent flow characteristics in a gravel-bed river. *Geomorphology* 68 (2005): 95-113.

[doi:10.1016/j.geomorph.2004.09.033](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.033)

Marakkos, K., Turner, J. T. 2006. Vortex generation in the cross-flow around a cylinder attached to an end-wall. *Optics & Laser Technology* 38 (2006): 277-285.

[doi:10.1016/j.optlastec.2005.06.014](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2005.06.014)

Merten, E. C., Hintz, W. D., Lightbody, A. F., Wellnitz, T. 2010. Macroinvertebrate grazers, current velocity, and bedload transport rate influence periphytic accrual in a field-scale experimental stream. *Hydrobiologia* 652: 179-184.

[doi:10.1007/s10750-010-0329-1](https://doi.org/10.1007/s10750-010-0329-1)

Milan, D. J., Heritage, G. L., Large, A. R. G., Charlton, M. E. 2001. Stage dependent variability in tractive force distribution through a riffle-pool sequence. *Catena* 44: 85-109.

[doi:10.1016/S0341-8162\(00\)00155-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00155-7)

Murphy, J. F., Davy-Bowker, J. 2005. Spatial structure in lotic macroinvertebrate communities in England and Wales: relationship with physical, chemical and anthropogenic stress variables. *Hydrobiologia* 534: 151-164.

[doi:10.1007/s10750-004-1451-8](https://doi.org/10.1007/s10750-004-1451-8)

Righetti, M., Armanini, A. 2002. Flow resistance in open channel flows with sparsely distributed bushes. *Journal of Hydrology* 269: 55-64.

[doi:10.1016/S0022-1694\(02\)00194-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00194-4)

Sand-Jensen, K. 2008. Drag forces on common plant species in temperate streams: consequences of morphology, velocity and biomass. *Hydrobiologia* 610: 307-319.

[doi:10.1007/s10750-008-9446-5](https://doi.org/10.1007/s10750-008-9446-5)

Smolar, N. 1997. Ocena vpliva odvzema vode na perifiton v času nizkih pretokov. Magistrsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo: 120 str.

Statzner, B., Gore, J. A., Resh, V. H. 1988. Hydraulic stream ecology: observed patterns and potential applications. *Journal of the north American Benthological Society* 7: 307-60.

Vis, C., Hudon, C., Carignan, R., Gagnon P. 2007. Spatial Analysis of Production by Macrophytes, Phytoplankton and Epiphyton in a Large River System under Different Water-Level Conditions. *Ecosystems* 10: 293-310.

[doi:10.1007/s10021-007-9021-3](https://doi.org/10.1007/s10021-007-9021-3)

Yokosi, S. 1967. The structure of river turbulence. Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ. 17(2), 121: 1-29.

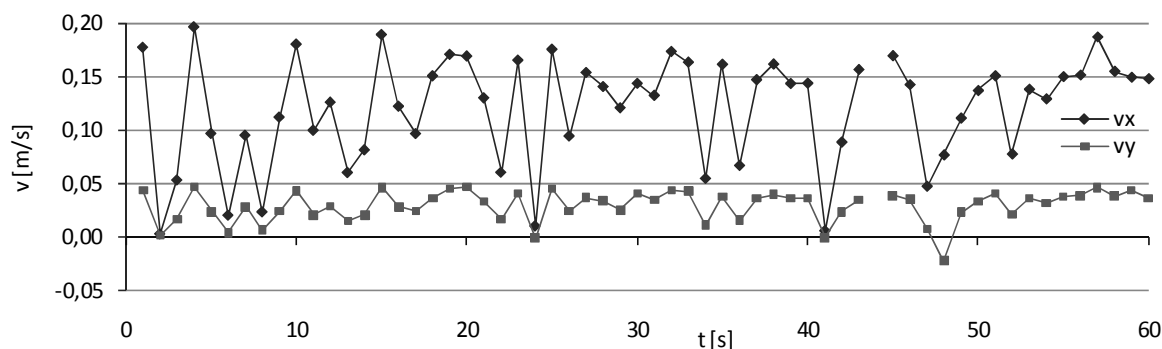
Wetzel, R. G. 2001. Limnology. 3rd ed. San Diego idr., Academic Press: 1006 str.

Zhang, Q., Shi, Y., Chen, Z., Jiang, T. 2008. ADCP measured flow current of the middle-lower Changjiang River channel. Front. Earth Sci. China 2(1): 1-9.

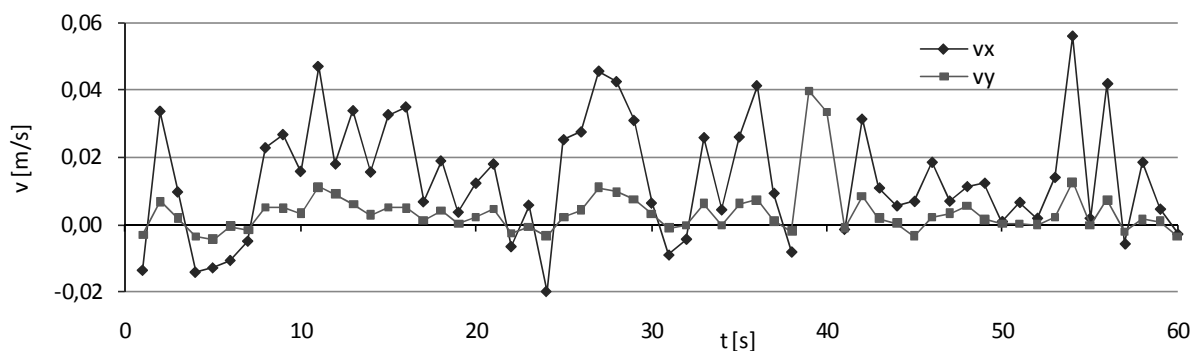
[doi:10.1007/s11707-008-0016-y](https://doi.org/10.1007/s11707-008-0016-y)

PRILOGA A: Pulziranje hitrosti v izbranih intervalih merjenja

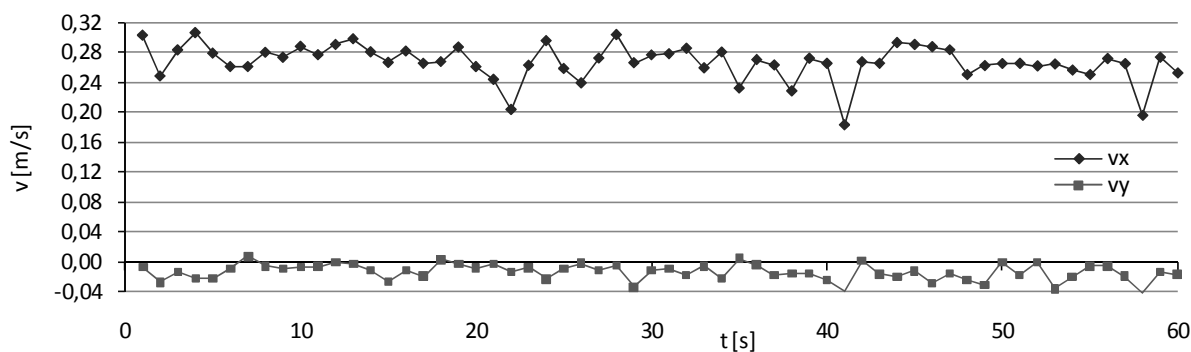
A1: Nezaraščeno betonsko korito (GL2)



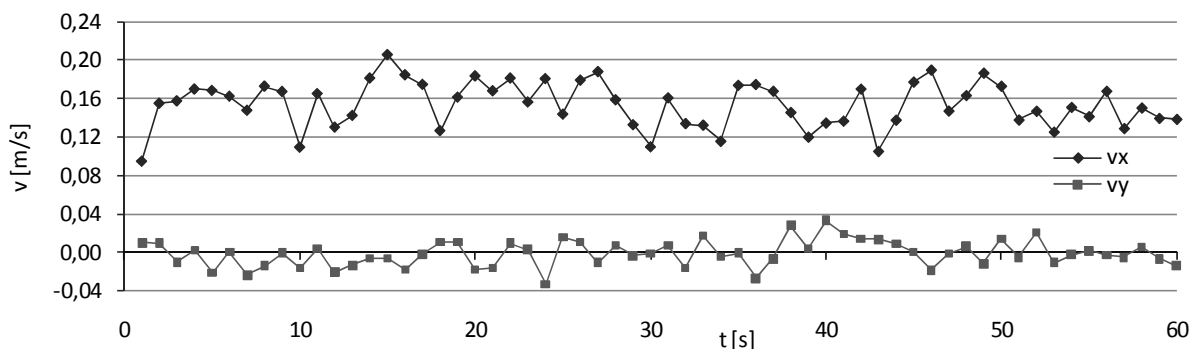
Pulziranje hitrosti na sredini nezaraščene betonskega korita (GL2) na oddaljenosti 0,5 cm od dna pri vodostaju 9,5 cm



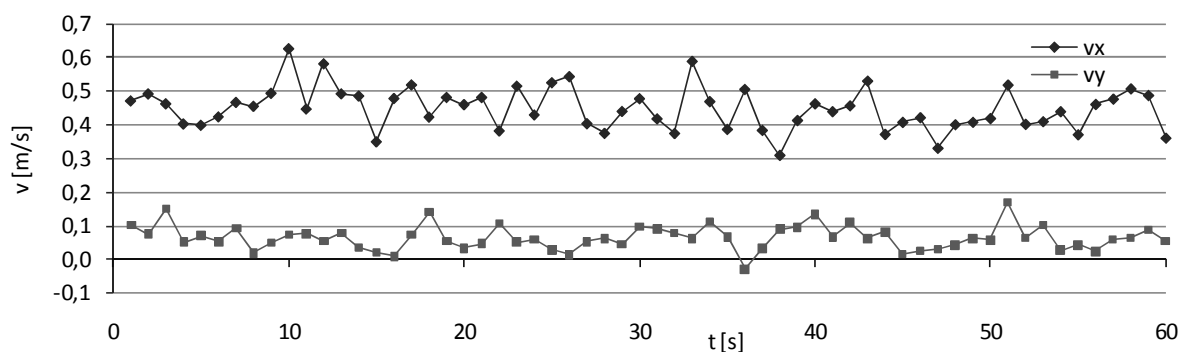
Pulziranje hitrosti ob robu nezaraščene betonskega korita (GL2) na oddaljenosti 0,5 cm od dna pri vodostaju 9,5 cm



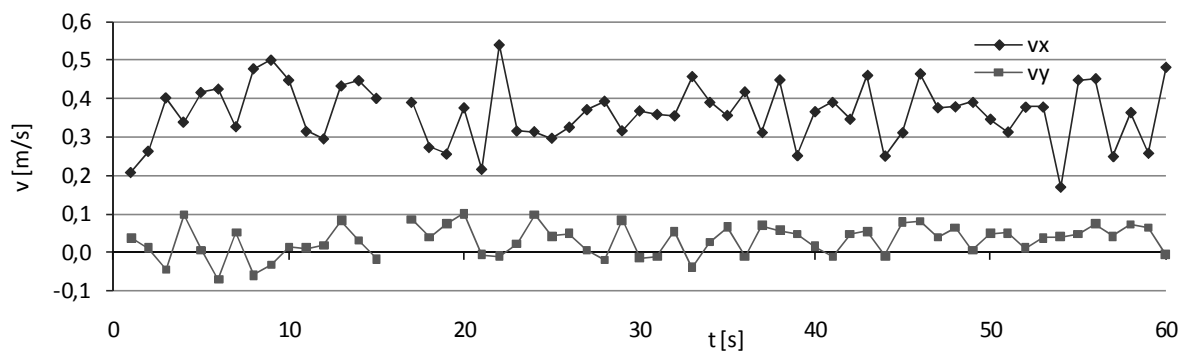
Pulziranje hitrosti na sredini nezaraščene betonskega korita (GL2) na 6/10 globine pri vodostaju 9,5 cm



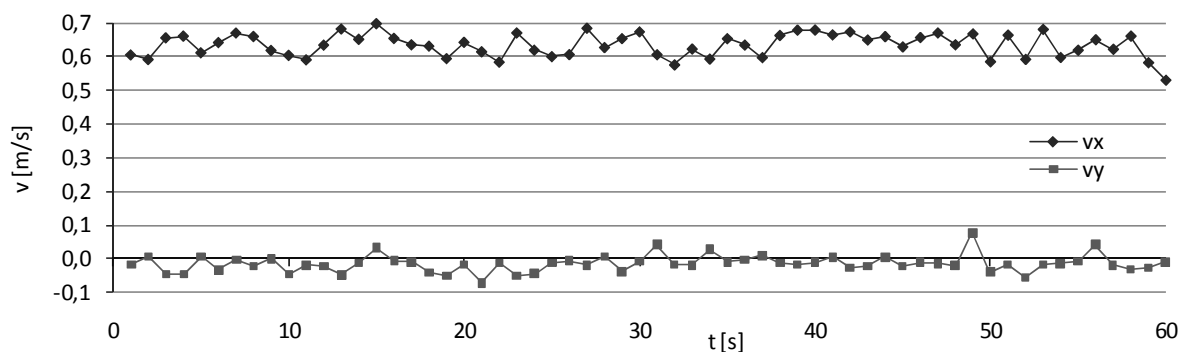
Pulziranje hitrosti ob robu nezaraščenega betonskega korita (GL2) na 6/10 globine pri vodostaju 9,5 cm



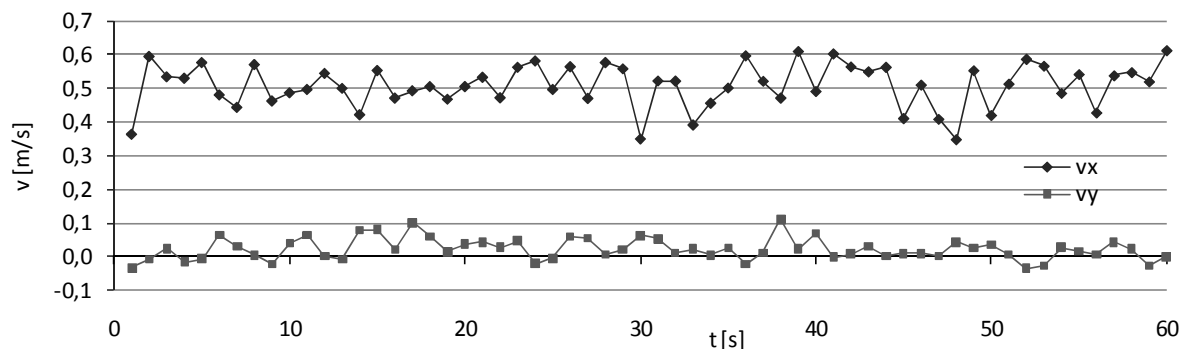
Pulziranje hitrosti na sredini nezaraščenega betonskega korita (GL2) na oddaljenosti 0,5 cm od dna pri vodostaju 18 cm



Pulziranje hitrosti ob robu nezaraščenega betonskega korita (GL2) na oddaljenosti 0,5 cm od dna pri vodostaju 18 cm

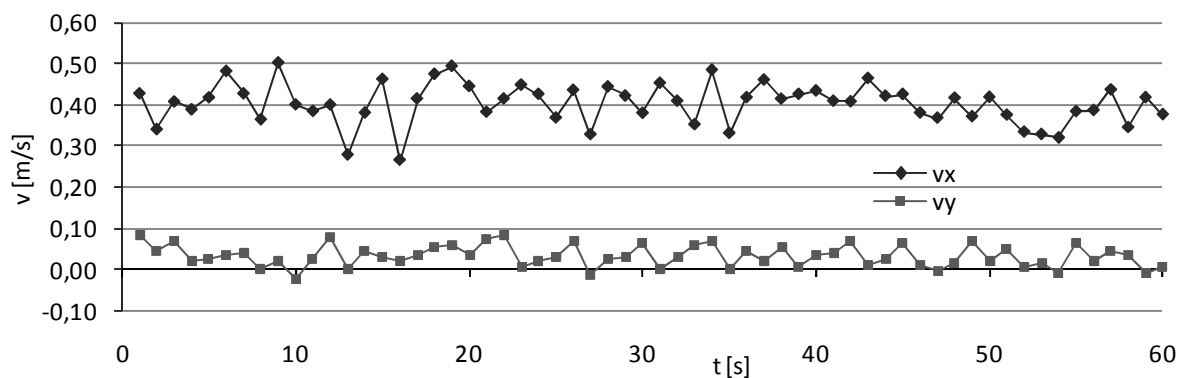


Pulziranje hitrosti na sredini nezaraščene betonskega korita (GL2) na 6/10 globine pri vodostaju 18 cm

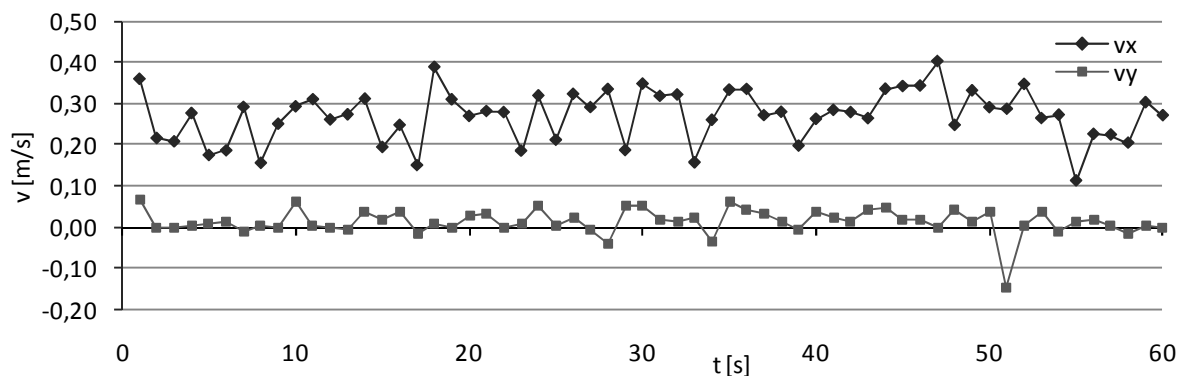


Pulziranje hitrosti ob robu nezaraščene betonskega korita (GL2) na 6/10 globine pri vodostaju 18 cm

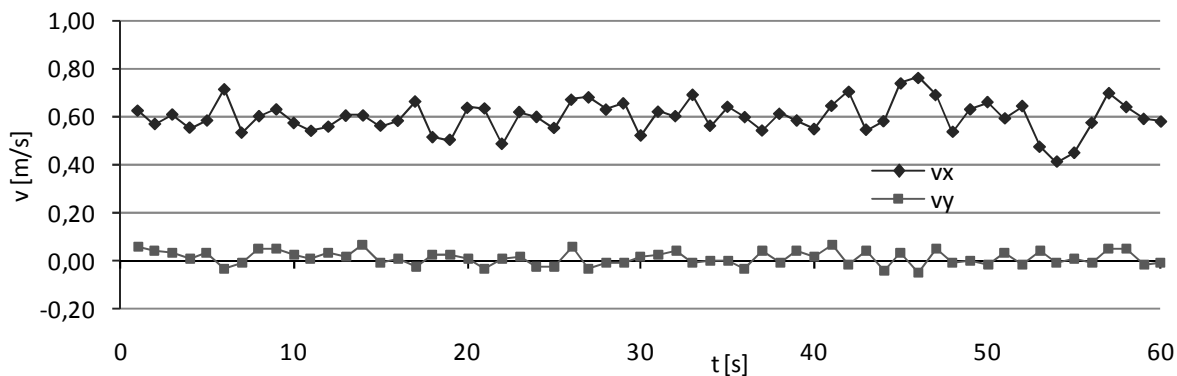
A2: Zaraščeno betonsko korito (GL2)



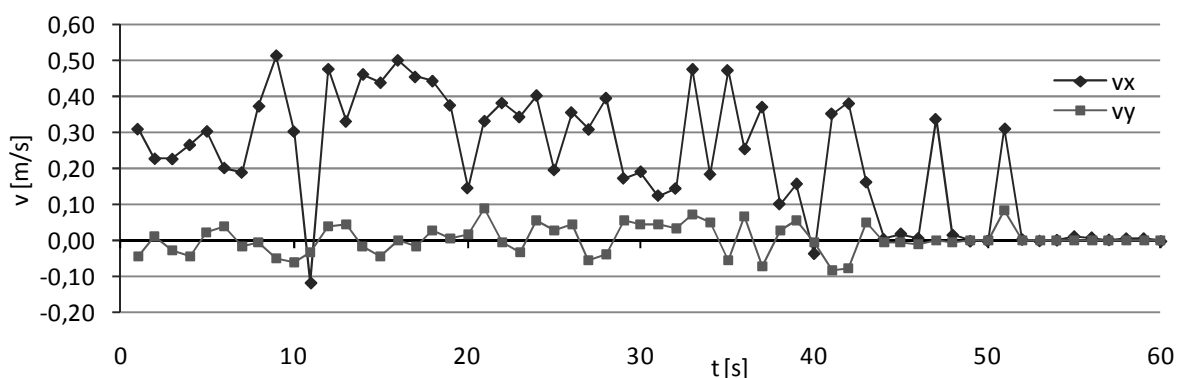
Pulziranje hitrosti na sredini zaraščene betonskega korita (GL2) na 6/10 globine pri vodostaju 10,5 cm



Pulziranje hitrosti na sredini zaraščene betonskega korita (GL2) na oddaljenosti 0,5 cm od dna pri vodostaju 10,5 cm

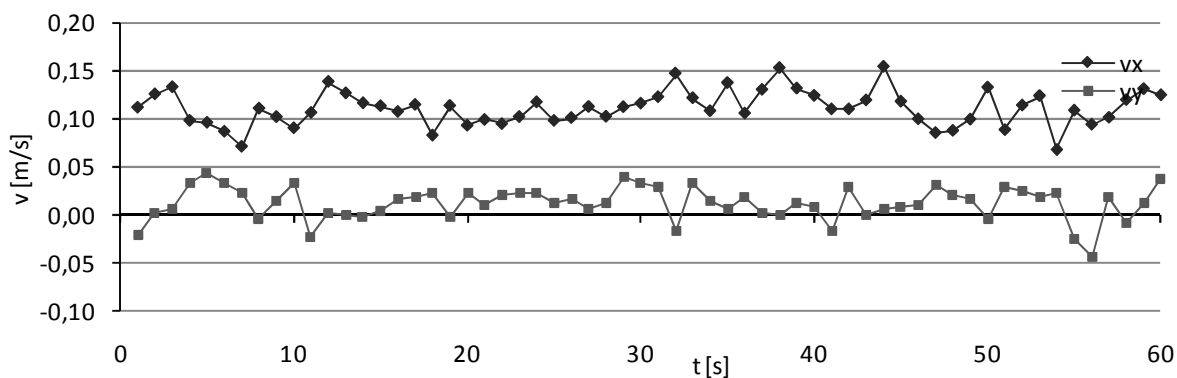


Pulziranje hitrosti na sredini zaraščenega betonskega korita (GL2) na 6/10 globine pri vodostaju 19 cm

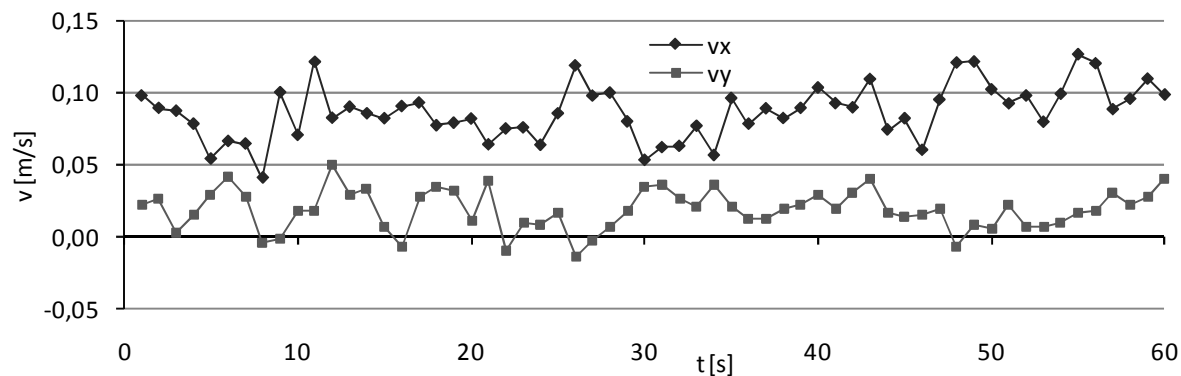


Pulziranje hitrosti na sredini zaraščenega betonskega korita (GL2) na oddaljenosti 0,5 cm od dna pri vodostaju 19 cm

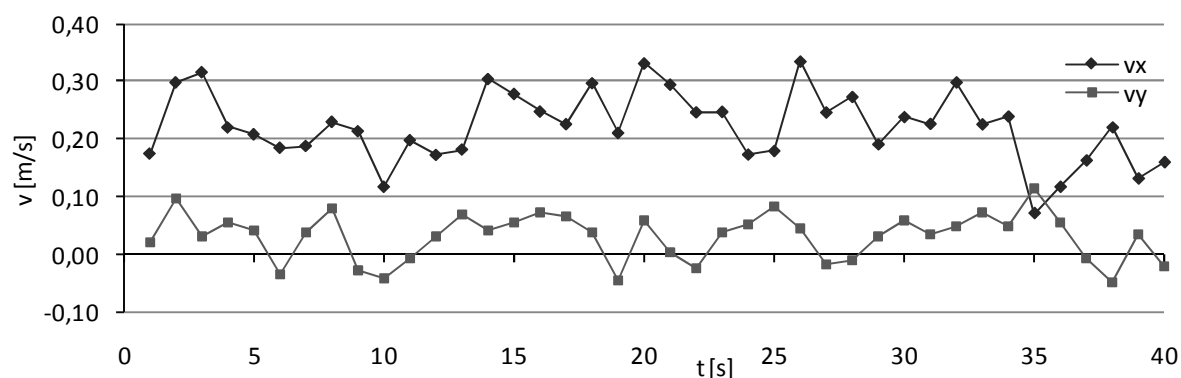
A3: Tolmun (GL6)



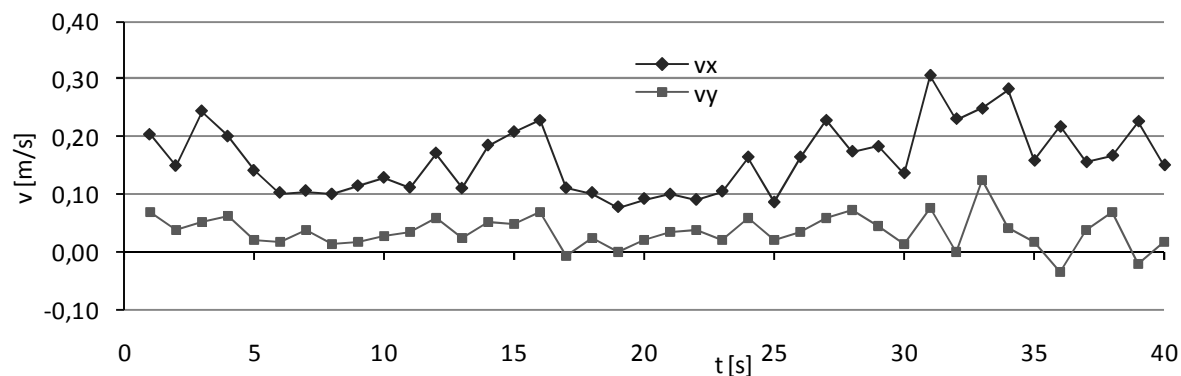
Pulziranje hitrosti na sredini tolmena (GL6) na 6/10 globine pri vodostaju 17 cm



Pulziranje hitrosti na sredini tolmana (GL6) na oddaljenosti 1,6 cm od dna pri vodostaju 17 cm

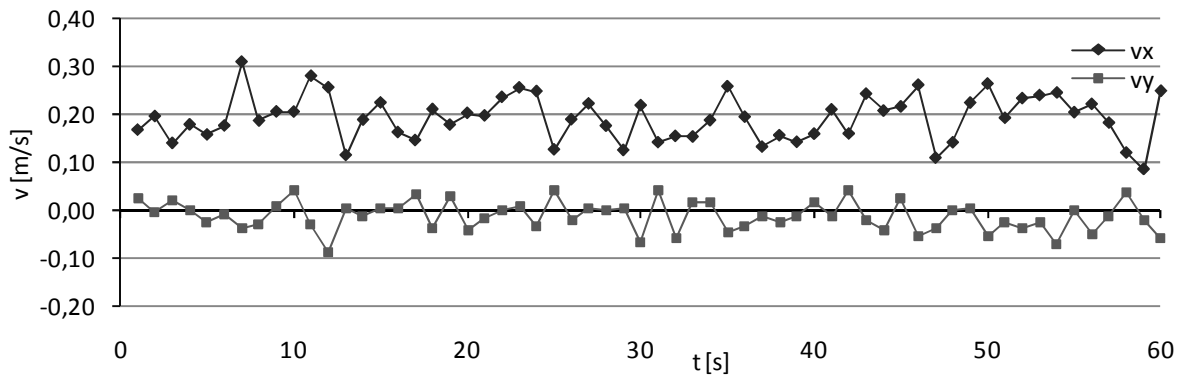


Pulziranje hitrosti na sredini tolmana (GL6) na 6/10 globine pri vodostaju 52 cm

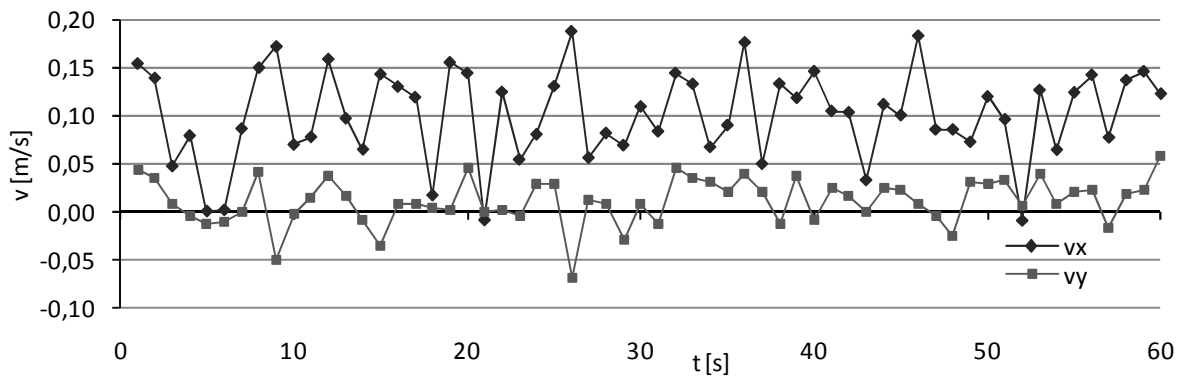


Pulziranje hitrosti na sredini tolmana (GL6) na oddaljenosti 1,6 cm od dna pri vodostaju 52 cm

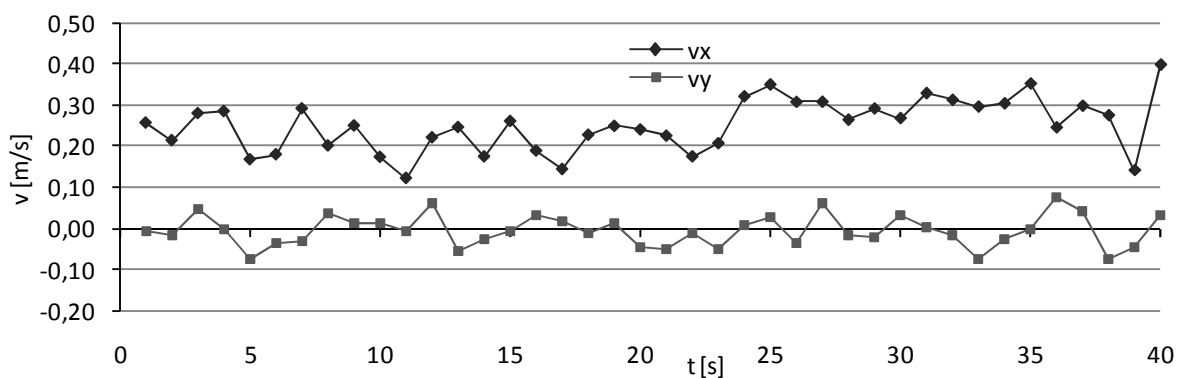
A4: Brzica (GL6)



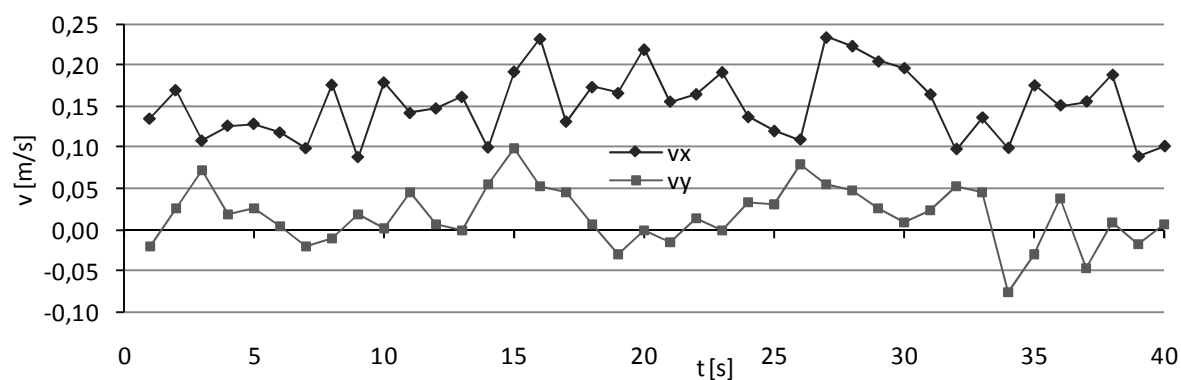
Pulziranje hitrosti na sredini brzice (GL6) na 6/10 globine pri vodostaju 7 cm



Pulziranje hitrosti na sredini brzice (GL6) na oddaljenosti 1,6 cm od dna pri vodostaju 7 cm



Pulziranje hitrosti na sredini brzice (GL6) na 6/10 globine pri vodostaju 43 cm



Pulziranje hitrosti na sredini brzice (GL6) na oddaljenosti 1,6 cm od dna pri vodostaju 43 cm

PRILOGA B: Fizikalne lastnosti vode (Vir: Brilly in Šraj, 2000)

temperatura [°C]	gostota [kg/m ³]	spec. teža [N/m ³]	dinamična viskoznost [kg/ms]	kinematična viskoznost [m ² /s]
0	999,87	9805,4	0,001787	1,787E-06
1	999,93	9805,9	0,001728	1,728E-06
2	999,97	9806,3	0,001671	1,671E-06
3	999,99	9806,6	0,001618	1,618E-06
4	1000,00	9806,6	0,001567	1,567E-06
5	999,99	9806,6	0,001518	1,518E-06
6	999,97	9806,3	0,001472	1,472E-06
7	999,93	9806,0	0,001428	1,428E-06
8	999,88	9805,4	0,001386	1,386E-06
9	999,81	9804,8	0,001346	1,346E-06
10	999,73	9804,0	0,001307	1,308E-06
15	999,13	9798,1	0,001139	1,140E-06
20	998,23	9789,3	0,001002	1,004E-06
25	997,08	9778,0	0,0008905	8,931E-07
30	995,68	9764,3	0,0007976	8,011E-07
35	994,06	9748,4	0,0007194	7,237E-07