

Vpliv različnih vrst substrata na strukturo hitrosti vodnega toka na primeru potoka Glinščica

Maja Koprivšek*

Povzetek

Prispevek obravnava 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.

Uvod

Vodni tok je najpomembnejši abiotični 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 vertikalni prečnega profila nam namreč ne pove 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 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.

V prispevku primerjamo vertikalne profile hitrosti, ki so bile izmerjene nad različnimi vrstami substrata ob različnih vodostajih na potoku Glinščica (Koprivšek, 2011). Na vsakem merilnem mestu smo izbrali več prečnih prereзов, na vsakem od njih pa več karakterističnih merilnih točk, na katerih 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 tudi pretoke in ovrednotili vpliv obrasti na pretočno

*UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

krivuljo. Rezultate smo nato primerjali z rezultati predhodno izvedenih študij združb makroinvertebratov in perifitona na istem potoku.

Metodologija

Najprej smo izvedli dve preliminarni meritvi hitrosti vodnega toka, s katerima smo primerjali rezultate, pridobljene s hidrometričnim krilom Valeport model 104, in rezultate, pridobljene z Dopplerjevim merilnikom hitrosti vodnega toka FlowTracker Handheld ADV proizvajalca SonTek. 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. 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.

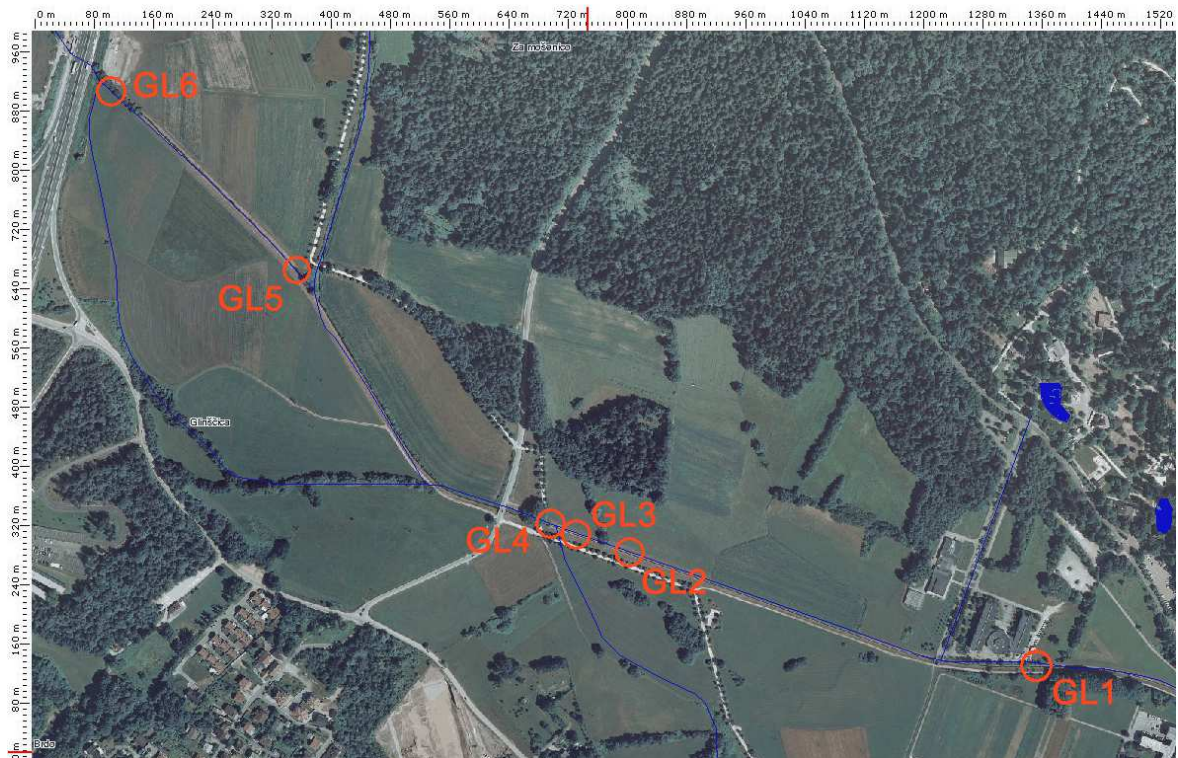
Meritve hitrosti so potekale na merilnih mestih, sestavljenih iz različnega števila prečnih prerezov, odvisno od karakteristik posameznega merilnega mesta. Na vsakem prečnem prerezu smo zbrali vsaj tri karakteristične točke (npr. ob robu struge, pred kamnom, za kamnom, na zaraščenem delu, na golem delu 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.

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.

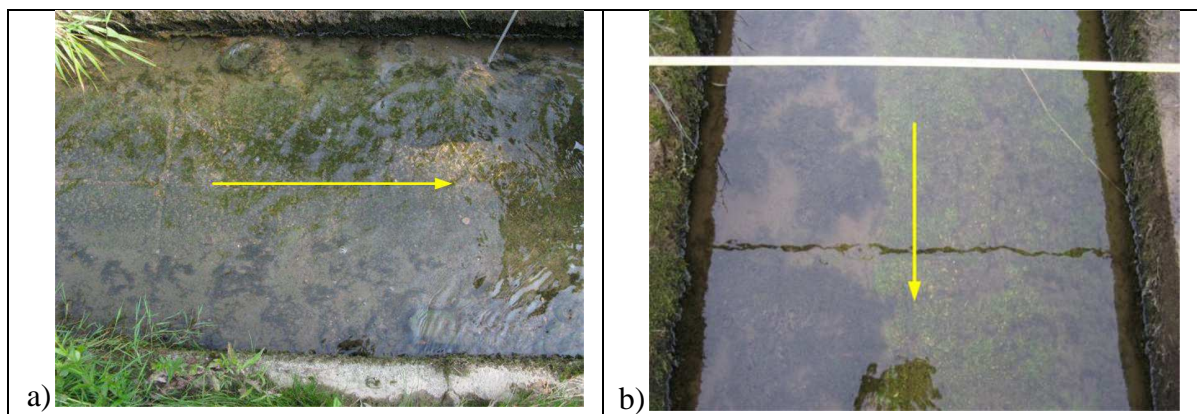
Merilna mesta

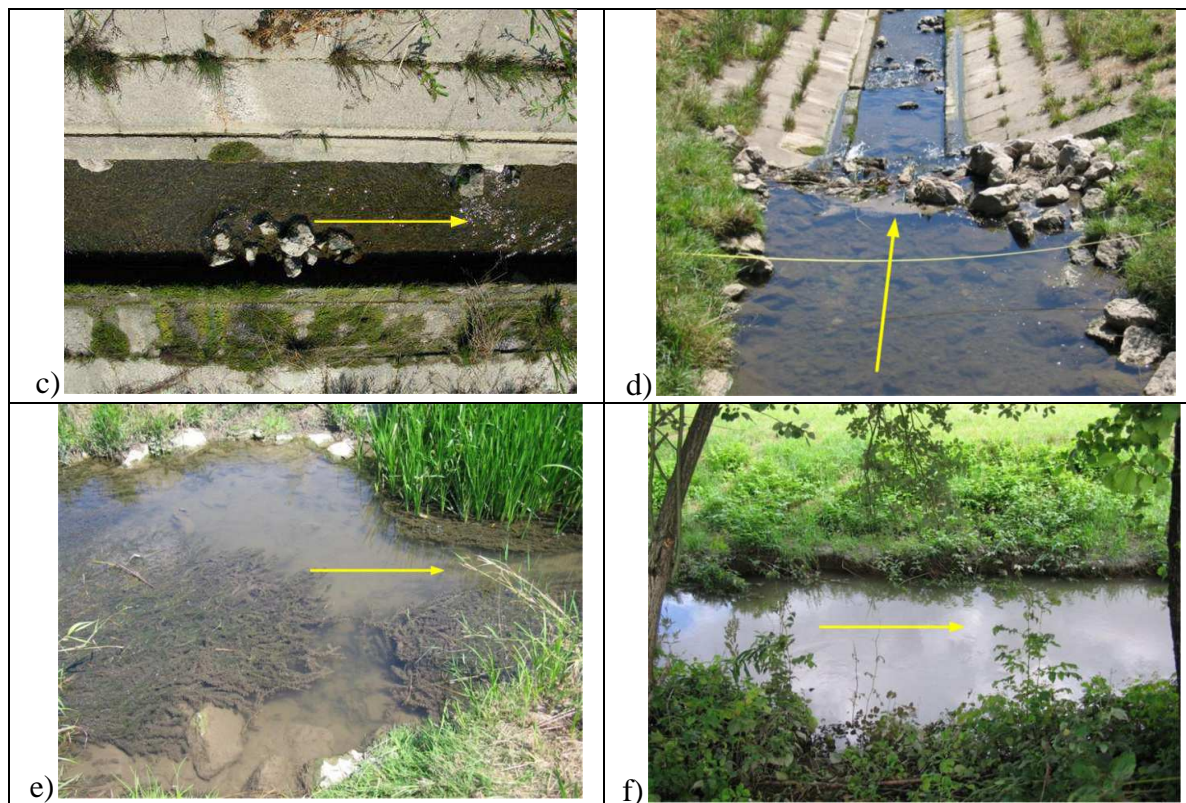
Meritve so potekale na vodotoku Glinščica v Ljubljani. Vodotok je primeren zaradi različnih stopenj reguliranosti na različnih odsekih in raznolikega substrata, kot tudi zaradi velikosti, ki omogoča merjenje z ročnim merilnikom ADV SonTek ter ne nazadnje bližine, ki omogoča merjenje ob pravem času glede na potek poplavnega vala. Za raziskavo smo si izbrali 6 merilnih mest na odseku med Biološkim središčem in ljubljansko obvoznico (slika 1). 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. 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, 2003).



Slika 1 - Položaj merilnih mest na potoku Glinščica (Vir: ARSO)



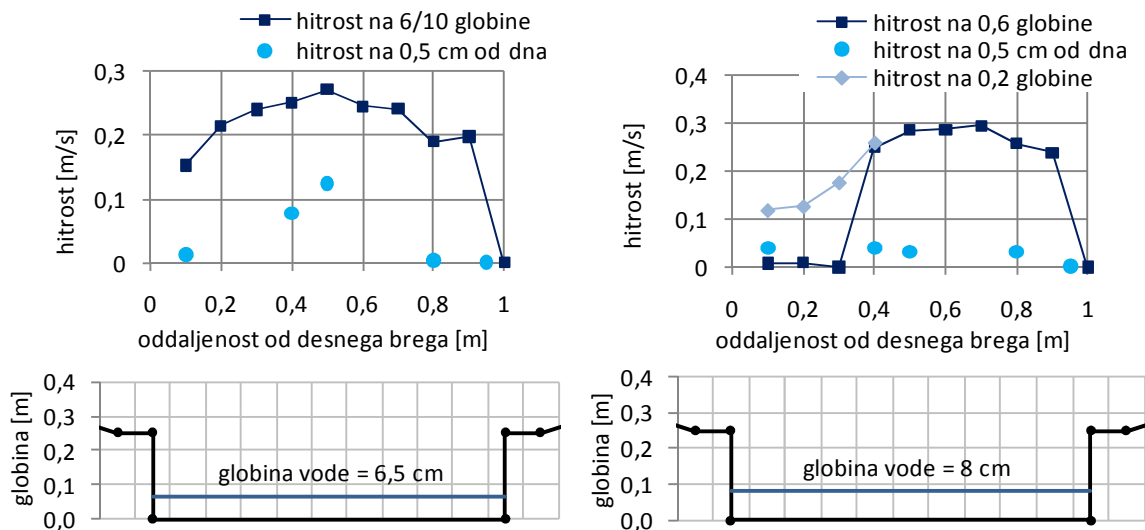


Slika 2 - Merilna mesta: a) GL1; b) GL2; c) GL3; d) GL4; e) GL5; f) GL6

Rezultati

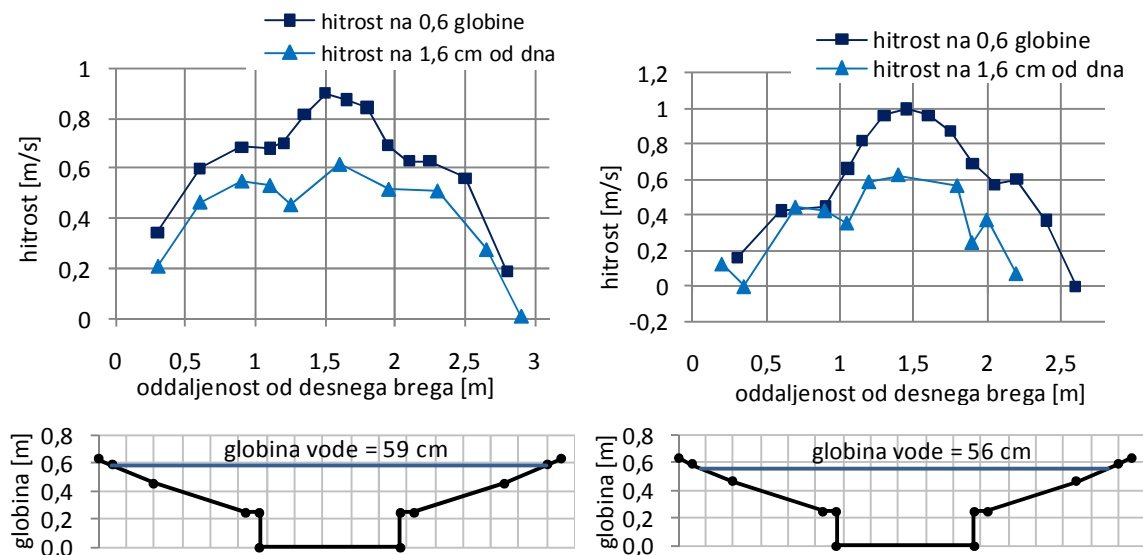
Večina merilnih mest je bila sestavljena iz več prečnih prerezov. Primerjali smo hitrosti vzdolž različnih prečnih prerezov na različnih globinah in ob različnih vodostajih. Zaradi velike količine podatkov prikazujemo v prispevku le primerjave ob najnižjem in najvišjem vodostaju, in sicer le na najzanimivejših merilnih mestih: GL2, GL4 in GL6.

Na merilnem mestu GL2 smo primerjali povprečne hitrosti in hitrosti pri dnu med prečnima prerezoma na zaraščenem in nezaraščenem betonskem koritu (sliki 3 in 4). Povprečna hitrost celotnega prečnega prereza je bila seveda večja na nezaraščenem delu betonskega korita, saj je bil koeficient hrapavosti struge tam manjši. Zanimivo pa je, da je bila največja hitrost na 6/10 globine izmerjena na zaraščenem delu struge. 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 2b). 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.



Slika 3 - Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri nizkem vodostaju (GL2)

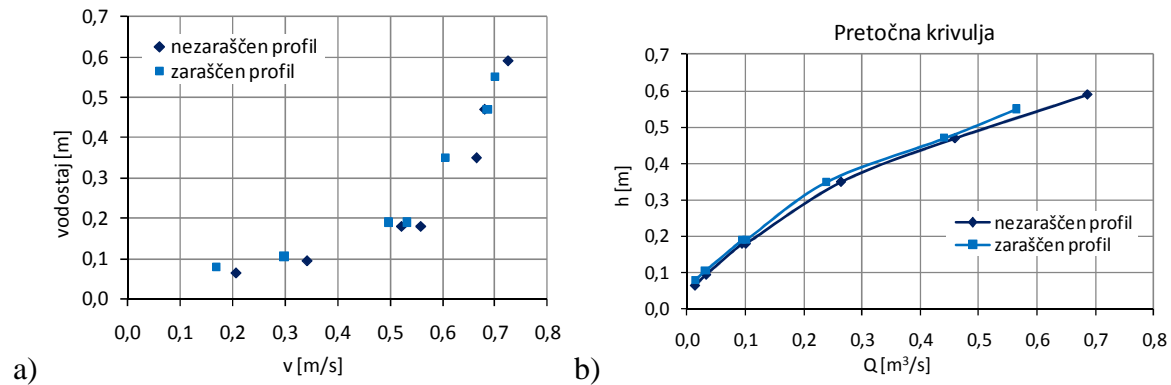
Z večanjem pretoka se je zaradi odtrganja obrasti zmanjšala obraščenost zaraščenege dela betonskega korita, zato so se razlike v hitrostih v glavni strugi med zaraščenim in nezaraščenim delom zmanjšale (slika 4). Obraščenost z mahovi v glavni, poglobljeni, strugi ni več imela bistvenega vpliva, velik vpliv pa so imele trave, ki rastejo iz špranj na zunanjem delu betonskega korita. Zaradi tega so bile hitrosti v matici struge na 6/10 globine še vedno opazno večje kot na nezaraščenem delu struge. Hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna so bile zaradi manjše zaraščenosti z mahovi v glavni strugi precej podobne na obeh prečnih prerezih, do velikih razlik pa je prišlo na zunanjem delu betonskega korita, kjer so se na zaraščenem prečnem prerezu pojavljale tudi protitočne hitrosti.



Slika 4 - Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri visokem vodostaju (GL2)

Slika 5a prikazuje primerjavo povprečne hitrosti zaraščenege in nezaraščenege prečnega prereza. Pri zelo nizkih vodostajih, pod 10 cm, ko je bila gostota obrasti največja, so bile

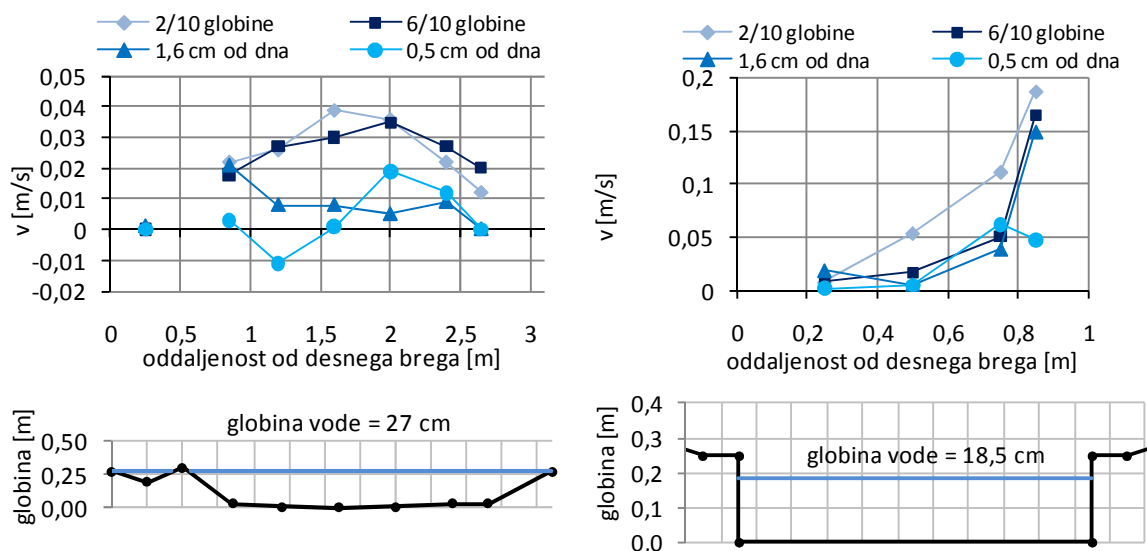
povprečne hitrosti okrog 20% manjše od tistih na nezaraščenem delu struge. Pri višjih vodostajih se ta odstotek sicer nekoliko zniža in znaša od globine 20 cm dalje približno 12%, saj je bila takrat tudi gostota obrasti manjša. Pri vodostajih od 50 cm dalje vrednosti niso več primerljive, saj sta se vodostaja pri merjenju na enem in drugem prerezu že precej razlikovala zaradi hitrega upada visokovodnega vala med izvajanjem meritev.



Slika 5 - a) Povprečna hitrost v v odvisnosti od vodostaja; b) Pretočna krivulja nad zaraščenim in nezaraščenim betonskim koritom

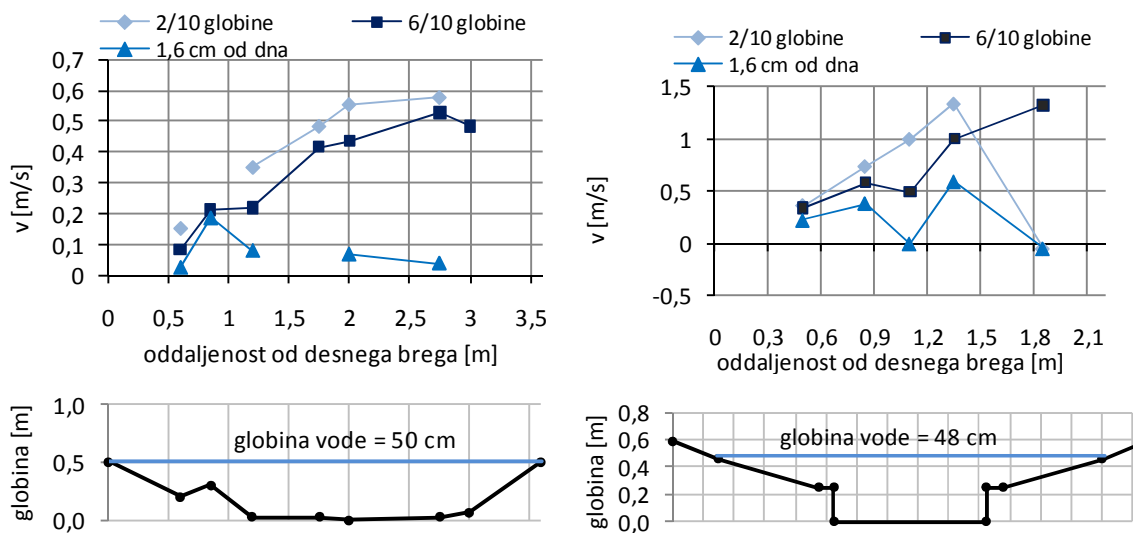
Na merilnem mestu GL2, sestavljenem iz nezaraščenega in zaraščenega prečnega prereza, smo merili tudi pretoke in primerjali pretočni krivulji na obeh prerezih (slika 5b). Pri enakem vodostaju se pretoki seveda zmanjšajo za enak odstotek kakor hitrosti vode. Naše meritve pretokov so potekale neposredno ena za drugo, in sicer smo vedno najprej merili na nezaraščenem in nato na zaraščenem prerezu, zato sta bila ob stabilnih pretočnih razmerah pretoka na obeh mestih enaka, zaradi zmanjšane povprečne hitrosti pa se je na zaraščenem prerezu povišal vodostaj. Pri višjih vodostajih se je pretok pri merjenju na zaraščenem prerezu že znižal glede na meritve na nezaraščenem prerezu in smo tako pri približno enakem vodostaju izmerili nižje hitrosti in manjši pretok.

Merilno mesto GL4 smo si izbrali na prehodu iz struge s seminaravnim substratom in betonskim koritom, in sicer tako, da je bil en prečni prerez postavljen na seminaravnem substratu 2,5 m gorvodno od začetka betonskega korita, drugi pa 1,8 m dolvodno od začetka betonskega korita. Vmes je nizek prag iz večjih kamnov, zato prihaja na seminaravnem prerezu do zaježitve. Pri nizkem vodostaju so zato hitrosti na tem delu bistveno manjše, struga pa je širša in globlja kakor na dolvodnem odseku z betonskim koritom (slika 6). Na prerezu z betonskim koritom (slika 6, desno) se lepo vidi vpliv kamnov v strugi dolvodno od prečnega prereza. Ob desnem bregu so bili ti kamni višji, zato so hitrosti vodnega toka bistveno večje ob levem bregu. Zanimivo je tudi to, da so bile na prerezu s seminaravnim substratom bistvene razlike med hitrostmi na različni oddaljenosti od dna struge, medtem ko so bile hitrosti nad betonskim koritom po vertikali praktično konstantne, kar pomeni, da so bile na betonskem koritu že hitrosti na oddaljenosti 0,5 cm od dna precej velike. 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.



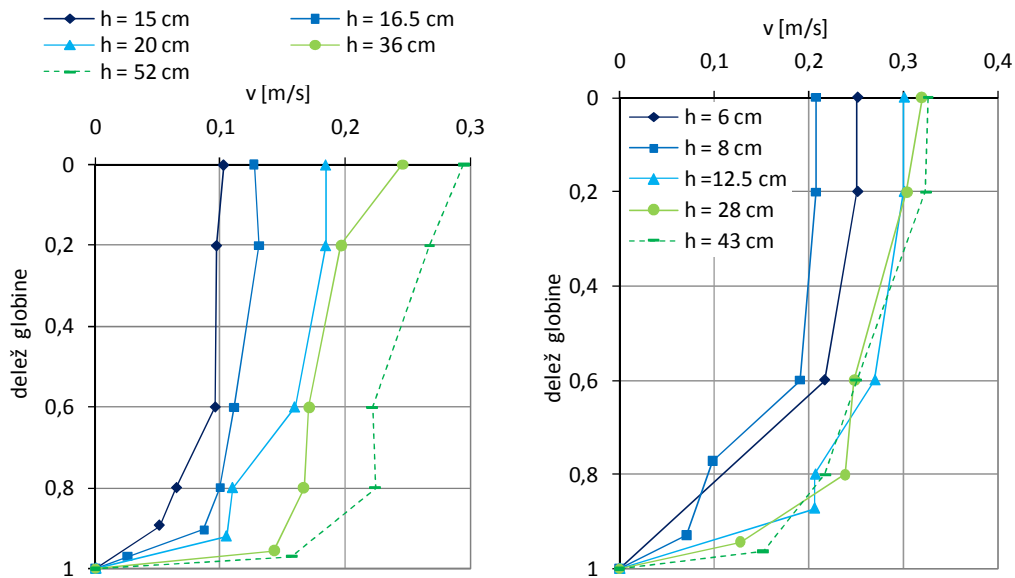
Slika 6 - Primerjava hitrosti nad seminaravnim substratom (levo) in umetnim substratom (desno) pri nizkem vodostaju (GL4)

Pri najvišjem vodostaju, pri katerem smo merili, sta se vodostaja na prerezu s seminaravnim substratom in na prerezu z betonskim koritom 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 7). 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.



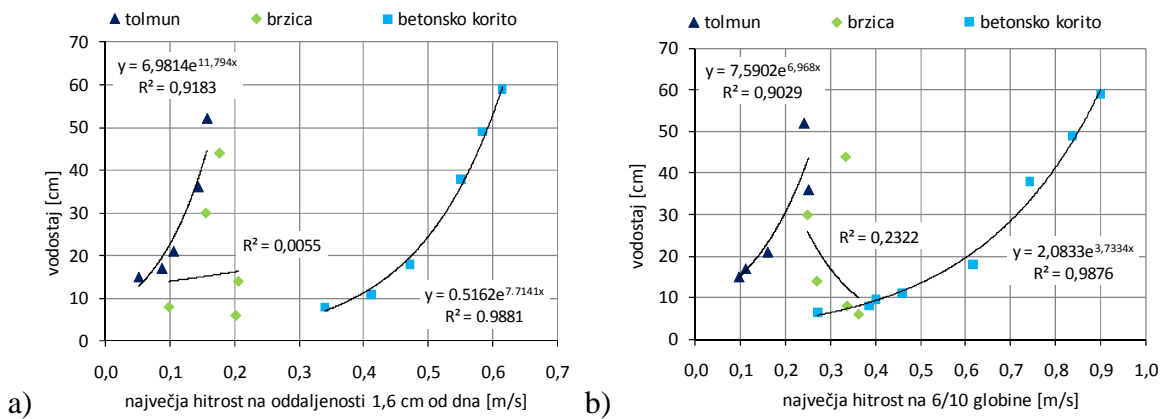
Slika 7 - Primerjava hitrosti nad seminaravnim substratom (levo) in umetnim substratom (desno) pri visokem vodostaju (GL4)

Na merilnem mestu GL6 smo primerjali seminaravno brzico in tolmun. Na vsakem od prerezov smo merili v treh točkah, enakomerno porazdeljenih po prečnem prerezu. Struga je bila na območju tolmana nekoliko širša kot na območju brzice, posebno ob nižjih vodostajih. Na sliki 8 prikazujemo vertikalne profile hitrosti na sredini struge ob različnih vodostajih. Razlike v hitrosti vode kakor tudi v vodostaju se med brzico in tolmunom manjšajo z naraščanjem vodostaja oz. povečevanjem pretoka. Posebej v tolmunu (slika 8, levo), kjer so hitrosti ob nizkem vodostaju majhne, se lepo vidi naraščanje hitrosti ob naraščanju vodostaja, in to po celotni vertikali. Na brzici (slika 8, desno) je že hitrost pri najnižjem vodostaju nekoliko večja, od vodostaja 13 cm naprej pa se ne povečuje več bistveno, zato se krivulje hitrosti ob zadnjih treh vodostajih prepletajo.



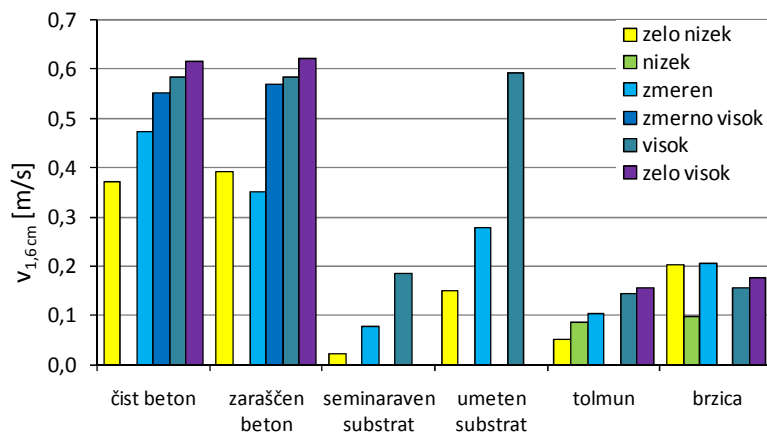
Slika 8 - Primerjava vertikalnih profilov hitrosti na sredini struge v odvisnosti od vodostaja v tolmunu (levo) in na brzici (desno) (GL6)

Primerjali smo še hitrosti pri dnu in hitrosti na 6/10 globine v odvisnosti od vodostaja na seminaravni brzici in tolmunu ter dodali še primerjavo z betonskim koritom. Iz slike 9a vidimo, da 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. Razlog za to je predvsem neravno dno na območju brzice, pri čemer smo lahko največje vrednosti hitrosti ob dnu izgubili na območjih med izbranimi vertikalami, saj je matica toka med posameznimi vodostaji vidno spreminjala položaj. Seveda najlepšo eksponentno soodvisnost med hitrostmi pri dnu in vodostajem izkazujejo hitrosti nad betonskim koritom, kjer je hidravlična hrapavost dna najmanjša. Iz slike 9a vidimo tudi, 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 9 - Hitrost v odvisnosti od vodostaja nad različnimi vrstami substrata: a) hitrost pri dnu; b) hitrost na 6/10 globine

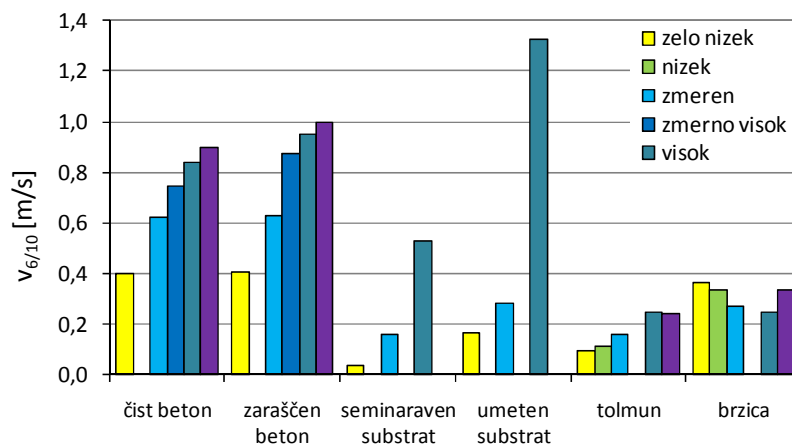
Slika 9b prikazuje hitrosti na 6/10 globine v odvisnosti od vodostaja. Tudi v tem primeru dobimo najlepšo eksponentno korelacijo na odseku z betonskim koritom, zelo velika soodvisnost se kaže tudi na prerezu preko tolmunu, na prerezu preko brzice pa tudi hitrosti na 6/10 struge ne kažejo statistične 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.



Slika 10 - Primerjava največjih hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih

Hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna in na 6/10 globine na prej analiziranih merilnih mestih smo primerjali še na skupnih grafih (slike 11 – 14) in tako ovrednotili vpliv različnih morfoloških oblik ter vpliv vodostaj. Prečna prereza »čist beton« in »zaraščen beton« sestavljata merilno mesto GL2, prečna prereza »seminaraven substrat« in »umeten substrat« merilno mesto GL4, prečna prereza »tolmun« in »brzica« pa merilno mesto GL6. Najbolj verodostojne so seveda primerjave prečnih prerezov 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 prerezih enak.

Kot je razvidno z grafov na slikah 10 in 11 se tako hitrosti na 6/10 globine kakor hitrosti pri dnu z naraščanjem pretoka povečujejo, in sicer na vseh prečnih 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. Vpliv pretoka in morfoloških oblik na hitrosti vode smo ovrednotili z analizo variance (ANOVA). Zaradi zagotavljanja enakosti varianc znotraj posameznih skupin, nismo mogli hkrati primerjati vseh prečnih prerezov pri vseh pretokih, zato smo med sabo primerjali le prečne prereze »čist beton«, »zaraščen beton« in »seminaraven substrat« ter pri hitrostih pri dnu še »umeten substrat«, nato pa naredili še analizo znotraj posameznih parov prečnih prerezov na istem merilnem mestu. Tako pri analizi hitrosti pri dnu kakor tudi hitrosti na 6/10 globine smo ugotovili, da nanje statistično značilno vplivata oba parametra, pretok in morfologija struge. Zanimivo je, da pri primerjavi »čistega« in »zaraščenege betona« na hitrosti pri dnu bolj vpliva pretok kakor substrat (signifikanten vpliv imata sicer oba), medtem ko na povprečno hitrost bolj vpliva substrat. Na hitrosti pri dnu na mestih »seminaraven substrat« – »umeten substrat« glede na rezultate ANOVE niti pretok niti morfologija nimata signifikantnega vpliva, kljub temu pa iz grafa (slika 10) vidimo, da se hitrosti ob dnu s pretokom povečujejo, prav tako pa so ob vseh pretokih večje na »umetnem« kot na »seminaravnem substratu«. Na povprečne hitrosti vertikale imata približno enak, statistično značilen, vpliv morfologija in pretok. Na paru »brzica« – »tolmun« ima signifikanten vpliv na povprečne hitrosti morfologija, pretok pa ne, medtem ko imata na hitrosti pri dnu signifikanten vpliv oba parametra, pri čemer je vpliv pretoka nekoliko večji kot vpliv morfologije. Tako povprečne hitrosti kakor hitrosti pri dnu so statistično značilno različne med mesti nad betonskim substratom v primerjavi z mesti nad seminaravnim substratom, med tem ko med vsemi tremi mesti nad betonskim koritom ni signifikantnih razlik.

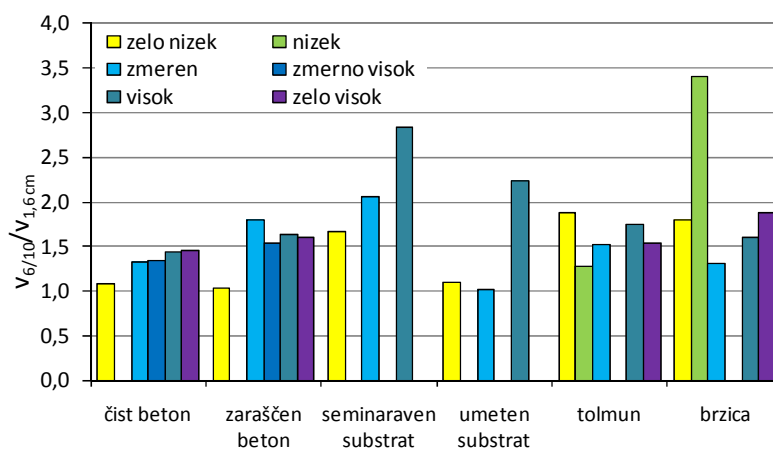


Slika 11 - Primerjava največjih hitrosti na 6/10 globine na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih

Primerjane hitrosti so v obeh primerih (povprečje vertikale in pri dnu) največje hitrosti prečnega prereza, torej v matici toka. Kot je razvidno s slik 10 in 11 sta razporeda hitrosti na 6/10 globine in 1,6 cm od dna zelo 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.

Izračunali smo še razmerje med povprečnimi hitrostmi vodnega stolpca in hitrostmi vode pri dnu (slika 12) 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 12 - Razmerje med hitrostmi na 6/10 globine in hitrostmi na oddaljenosti 1,6 cm od dna na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih

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 12, 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/m²],

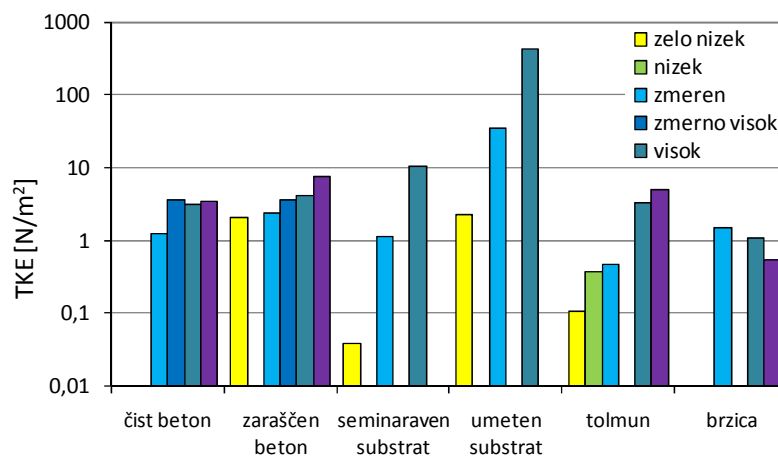
ρ ...gostota vode [kg/m³] (privzeta vrednost 1000 kg/m³),

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 13, 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 in vsemi mesti na betonskem substratu 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 tolmunu, 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 13 - Primerjava turbulentne kinetične energije na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih

Vpliv hitrosti na združbi perifitona in makroinvertebratov

Na približno istih merilnih mestih so se v letih 2005 in 2006 izvajale raziskave makroinvertebratske (Kereži, 2007) in perifitonske združbe (Štendler, 2007), hkrati pa so bili merjeni tudi hidrološki, fizikalni in kemijski parametri (Koprivšek, 2006).

Vrednost Shannon – Wienerjevega diverzitetnega indeksa, izračunanega na podlagi diatomejske združbe (Štendler, 2007) je bila ob največjem pretoku v primerjavi z ostalimi vzorčnimi mesti bistveno nižja na obeh vzorčnih mestih z betonsko strugo. 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 hitrost vodnega toka zelo velik vpliv na diverzitetno diatomejske združbe. Povprečne hitrosti vodnega stolpca so na teh dveh mestih v času vzorčenja dosegale vrednosti 0,9 m/s. V času ostalih merjenj, ko je bil vodostaj nižji, so se hitrosti na mestih z betonskim prerezom manj razlikovale od ostalih vzorčnih mest – dosegale so vrednosti okrog 0,4 m/s, kar je verjetno glavni razlog, da takrat 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 pritrjanja, kar poveča tudi diverzitetno 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 togo reguliranim odsekom struge.

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 meritvah ob največjem pretoku 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. Shannon-Wienerjev diverzitetni indeks na splošno sicer upade na mestih z betonskim koritom, vendar ob povečani hitrosti ob največjem pretoku 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 habitati, 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 diverzitetno, 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 makroinvertebratske združbe 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.

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.

Zaključki

V sklopu raziskave 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 hitrostih 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.

Literatura

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- De Doncker, L., Troch, P., Verhoeven, R. 2008. Accuracy of discharge measurements in a vegetated river. *Flow measurement and instrumentation* 19: 29-40.
- 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.
- Kereži, V. 2007. Makroinvertebratska združba potoka Glinščica. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo: 84 str.
- Koprivšek, M. 2011. Vpliv različnih vrst substrata na strukturo hitrosti vodnega toka in njen vpliv na biocenozo na primeru potoka Glinščica. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerzitetni podiplomski študij varstvo okolja: 108 str.
- 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.
- Rusjan, S. 2003a. Sonaravno urejanje vodotokov – primer ureditve odseka Glinščice na območju Viča. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 89 str.
- Štendler, E. 2007. Perifitonska združba v potoku Glinščica. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo: 102 str.
- Wilcox, A. C., Wohl, E. E. 2007. Field measurements of three-dimensional hydraulics in a step-pool channel. *Geomorphology* 83: 215-231.
- Atlas okolja: http://gis.arso.gov.si/gis/profile.aspx?id=UPR_VODAMI_AXL@Arso (23.3.2010)