

# METODE TERENSKIH MERITEV SUSPENDIRANIH SEDIMENTOV V REKAH

## METHODS OF FIELD MEASUREMENTS OF SUSPENDED SEDIMENTS IN RIVERS

prof. dr. Matjaž Mikoš, univ. dipl. inž. grad.,

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,  
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 626/627

**Povzetek** | Naravna motnost (kalnost) v vodotokih je posledica različnih erozijskih pojavov v povirnih delih rek in erozijskega delovanja rek z rušenjem brežin in poglobljanjem rečnega dna. Rečno kalnost običajno ocenjujemo s terenskimi meritvami količine (koncentracije) in zrnivosti suspendiranih sedimentov v rečni vodi. V članku predstavljamo moderne terenske neposredne metode (odvzem vzorcev oziroma vzorčenje) ter posredne metode določanja zrnivosti in koncentracije suspendiranih sedimentov v rekah, opisujemo njihovo fizikalno ozadje ter poudarimo njihove prednosti in pomanjkljivosti. Poudarek je na metodah meritev motnosti, laserske difrakcije in zvočnega odbojnega sevanja. Prav merilniki ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) se vse pogosteje in uspešno uporabljajo za določanje pretoka suspendiranih snovi (zrnivosti in koncentracij). Predloženi pregled je teoretična osnova za načrtovanje monitoringa kalnosti na rekah, kjer je nujno terenske metode vzorčenja uskladiti z gostoto vzorčevalnih mest in pogostostjo vzorčenja.

Ključne besede: hidrologija, hidrometrija, kalnost, merilna tehnika, motnost, rečni sedimenti, zrnavost

**Summary** | Natural turbidity in watercourses is a consequence of different erosion processes in the upper parts of rivers and fluvial bank and riverbed erosion. Suspended loads are usually estimated by field measurements of the quantity (concentration) and granulometric composition of suspended sediment in the river water. In the paper, modern field direct sampling methods and surrogate sampling methods of fluvial suspended sediments' granulometric composition and concentrations are presented, their physical principles are described, and their advantages and disadvantages are stressed. The stress is given to measurement methods of turbidity, laser diffraction, and acoustic backscattering. It is Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) that is more and more frequently and successfully used for the determination of suspended loads (granulometric composition and concentration). The given overview is a theoretical basis for planning of hydrologic monitoring in rivers, where it is of great importance to harmonize field sampling methods and density of measuring sites and sampling frequency.

Key words: fluvial sediments, grain size distribution, hydrology, hydrometry, measuring techniques, suspended loads, turbidity

### 1 • UVOD

V članku v Gradbenem vestniku (Mikoš, 2012) smo podrobneje spoznali problematiko rečne kalnosti kot dela erozijsko-sedi-

mentacijskega kroga. Podrobneje so bile obravnavane enačbe za oceno hitrosti posedanja suspendiranih delcev za primer

prostega posedanja s poudarkom na prehodnem režimu med laminarnim tokom (linearni ali viskozni upor sredstva) in turbulentnim tokom (kvadratni ali dinamični upor sredstva). Obravnavo smo končali s prikazom odvisnosti vertikalne porazdelitve koncentracije suspendiranih snovi v reki od

Rousovega parametra, torej od hidravličnih razmer (strižne hitrosti) ter lastnosti tekočine in sedimentih delcev v posedanju (hitrost posedanja). S tem smo pridobili teoretične osnove, da za analizo letne kalnosti v izbranem hidrološkem prerezu na reki nujno potrebujemo meritve kalnosti, pri čemer moramo upoštevati zakonitosti dinamike rečne kalnosti, to je prostorske in časovne spreminljivosti koncentracij in zrnivosti suspendiranih snovi v reki (Walling, 2000).

Zato v tem prispevku prikazujemo načine terenskih meritev koncentracij in zrnivosti rečne kalnosti s poudarkom na različnih

metodah (tehnikah) ter njihovih prednostih in pomanjkljivostih. Pri tem namerno izpuščamo laboratorijske metode, kot so npr. ADV (Acoustic Doppler Velocimeter ((Nikora, 2002), (Hosseini, 2006))), FIT (Fiber optic In-stream Transmissometer (Campbell, 2005)) ali analiza digitalnih posnetkov gibanja delcev (Partical Imaging (Lee, 2009)). Gre za metode, ki so zaradi prednosti dela v laboratorijskih nadzorovanih razmerah drugačne od terenskih metod, predstavljenih v tem prispevku. Izpustili smo tudi nekatere druge metode, ki jih navaja literatura (IAEA, 2005), a se v praksi uporabljajo manj pogosto kot

npr. diferenčne tlačne sonde. Prav tako dajemo pri obravnavi rečne kalnosti poudarek količinski analizi in geomorfološkim procesom, čeprav vemo, da ima rečna kalnost velik vpliv tudi na kakovost rečne vode in na rečno bioto (Bilotta, 2008). Prispevek zaključujemo s prikazom nekaterih terenskih meritev v Sloveniji, opravljenih z raziskovalnim in razvojnim namenom in uporabo različnih metod, prikazana v tem prispevku, daje dobro izhodišče za načrtovanje monitoringa rečne kalnosti v izbranih terenskih razmerah in z znanim namenom.

## 2 • TERENSKÉ METODE ZA ZAJEM PODATKOV O SUSPENDIRANIH REČNIH SEDIMENTIH

Metoda	princip delovanja	prednosti	pomanjkljivosti
Stekleničenje	Merilno stekleno posodo potopimo v vodo (ročni odvzem) ali se med poplavnim valom napolni sama (samodejni odvzem) oziroma merilno plastično/teflonsko vrečko v hidrodinamično oblikovanem vzorčevalniku spustimo v vodni tok (izokinetični odvzem), analiza sledi ločeno	Preverjena metoda, omogoča določitev zrnivosti in koncentracije, možna točkovna meritev ali integrirana po vertikali, mnoge druge metode se umerjajo s to metodo	Slaba časovna ločljivost, invazivna metoda, brez laboratorijskega dela ni rezultatov, zahteva izurjeno terensko osebje, zajem vzorca ni nujno izokinetičen
Črpalno vzorčenje	Vzorec vode in sedimenta črpamo iz toka in kasneje analiziramo, uporabljamo različne sesalne črpalke (peristaltične, membranske)	Preverjena metoda, omogoča določitev zrnivosti in koncentracije, omogoča samodejno vzorčenje	Slaba časovna ločljivost, invazivna metoda, brez laboratorijskega dela ni rezultatov, pogosto zajem vzorca ni izokinetičen, omejena praktična sesalna višina
Akustična	Odboj zvoka od sedimenta se uporabi za določanje zrnivosti in koncentracije	Neinvazivna metoda, dobra prostorska in časovna ločljivost, tudi za večje globine	Slabo prevajanje odbitega zvočnega signala, slabljenje signala ob visokih koncentracijah delcev
Optična	Merimo odbojno sipanje pod različnimi koti ali prevajanje vidne ali infrardeče svetlobe skozi vzorec vode in sedimenta	Preprosta metoda, dobra časovna ločljivost, omogoča uporabo in zajemanje podatkov na daljavo, relativno poceni	Močno odvisna od zrnovostne sestave, invazivna metoda, samo točkovne meritve, pogosto onesaženje instrumenta
Odbojnost koncentriranega žarka	Merimo čas odboja laserskega žarka od površine delcev sedimenta	Ni odvisna od zrnovostne sestave, pokriva širok interval zrnivosti in koncentracij	Draga in invazivna metoda, samo točkovne meritve
Laserska difrakcija	Merimo odbojni kot laserskega žarka od površine delcev sedimenta	Ni odvisna od zrnovostne sestave	Nezanesljiva in draga, invazivna metoda, samo točkovne meritve, omejen interval zrnivosti
Jedrska	Merimo odbojno sipanje ali prevajanje žarkov gama ali rentgenskih žarkov skozi vzorec vode in sedimenta	Nizkoenergijska metoda, pokriva širok interval zrnivosti in koncentracij	Nizka občutljivost, razpadanje jedrskega vira sevanja, okoljski predpisi, invazivna metoda, samo točkovne meritve
Daljinski spektralni odboj	Daljinsko zaznavanje odboja in sipanja svetlobe od vodnih teles	Uporabna za večja območja	Slaba ločljivost, slaba uporabnost v rečnem okolju, odvisnost od zrnovostne sestave

Preglednica 1 • Terenske merilne metode za suspendirani rečni sediment (prirejeno po (Wren, 2000))

V preteklih letih se je razvila vrsta metod za terensko zajemanje podatkov o suspendiranem sedimentu v rečnem okolju, z različnimi principi delovanja ter zato tudi različnimi prednostmi in slabostmi, ki izhajajo iz principov njihovega delovanja (preglednica 1). Metode lahko delimo na neposredne metode, kjer suspendirani sediment na različne načine vzorčimo (fizično zajemamo v rečni vodi: stekleničenje, črpalno vzorčenje), in na posredne metode ali nadomestne (surogatne)

metode, kjer sedimenta ne vzorčimo, ampak njegovo zrnavost in koncentracijo ocenjujemo posredno z merilniki, ki oddajajo in sprejemajo mehansko (zvok, ultrazvok) ali elektromagnetno valovanje (infrardeča svetloba, vidna svetloba, laserska svetloba, rentgenski žarki in žarki gama). Prikazani pregled s svojimi prednostmi in slabostmi metod nakazuje možnost, da metode med seboj kombiniramo, in sicer zaradi njihove odvisnosti od zrnavostne sestave suspendiranih sedimentov, velike po-

rabe časa ali zahtevnosti uporabe. Optimalni terenski zajem podatkov o suspendiranih sedimentih kot del sistematičnega monitoringa bi lahko bila kombinacija izbranih metod, kjer vsakič izkoristimo prednosti posamezne metode in minimiziramo njene slabosti. Ker so v zadnjem času najbolj napredovale prav nadomestne metode (surogatne metode), za uvod povzemimo najpomembnejše fizikalne osnove valovanja v tekočini (rečni vodi) in trdni snovi (suspendiranih delcih).

### 3 • LASTNOSTI MEHANSKEGA IN ELEKTROMAGNETNEGA VALOVANJA V REČNI VODI

Lastnosti mehanskega in elektromagnetnega valovanja uvrščamo med temeljna znanja osnov fizike. Za dobro razumevanje delovanja merilnih instrumentov za hidrometrične meritve v rečni vodi si najprej oglejmo osnovne lastnosti mehanskega valovanja oziroma posebno zanimivega področja akustike. Zvok ali zvočno valovanje je longitudinalno valovanje s frekvenco med 16 in 20.000 Hz; pri višjih frekvencah (do več milijonov Hz) govorimo o ultrazvoku (Kladnik, 1979). Zvočna emisija se v gradbeništvu uporablja za neporušne raziskave in testiranje materialov (jeklo, beton, skala ...) in konstrukcij (mostovi, stavbe, pregrade, tuneli ...) (Bajt, 2005). Merilnik, ki oddaja zvok z določeno frekvenco in določeno zvočno energijo, širi v prostor okoli sebe določen zvočni energijski tok, za katerega je značilna določena hitrost širjenja valov in pri čemer se zvočna energija v snovi, skozi katero se širi, v določeni meri absorbira. Za zvočno valovanje je tudi značilno, da se na meji sredstev z različnimi optičnimi lastnostmi

to valovanje delno odbija (reflektira). Delež odbitega valovanja je odvisen od razlike hitrosti širjenja valovanja pred mejo med sredstvom in za njo. Le redko se zgodi zrcalni odboj, saj je površina meje lahko zelo hrapava (nehomogenost je primerljivega velikostnega reda, kot je valovna dolžina valovanja) in nastopi difuzni odboj. Zvočno valovanje se na meji med sredstvom tudi lomi in nastane lom valovanja (refrakcija). Posebnosti valovanja so še totalni odboj, interferenca valovanja in uklon valovanja (Kladnik, 1979). Zdaj pa si podrobneje oglejmo še nekatere osnovne lastnosti elektromagnetnega valovanja (v nadaljevanju EM (Kladnik, 1977)) v rečni vodi. Vrsta hidrometričnih merilnih instrumentov oddaja (emitira) EM-valovanje različne valovne dolžine, pogosto v obliki infrardeče svetlobe (valovne dolžine med 8000 nm in 1 mm) ali laserske svetlobe (valovna frekvenca odvisna od laserskega vira te koherentne svetlobe, a običajno v območju vidne svetlobe: med 4000–8000 nm). Pri

širjenju EM-valovanja v rečni vodi (emisija) se del EM-valovanja absorbira v vodi, ob stiku z mineralno snovjo pa se zgodi interakcija EM-valovanja s to snovjo (delci kalnosti oziroma suspendiranimi delci – lebdeče plavine) in prav njihove lastnosti (velikost, gostota, oblika pa tudi količina – koncentracija) nas zanimajo. Posledice interakcije EM-valovanja z mineralno snovjo je delni odboj EM-valovanja (refleksija) na površini mineralne snovi, ki je pogosto hrapava, zato nastane difuzni odboj v različne smeri (in le redko zrcalni odboj), preostali del EM-valovanja se lomi in potuje skozi mineralno snov (transmisija). Pri bilanci vpadnega EM-valovanja se del valovanja izgubi (razlika med odbojnostjo in prepustnostjo) zaradi absorpcije EM-valovanja v mineralni snovi (sipanje EM-valovanja, odvisno od valovne dolžine EM-valovanja in lastnosti mineralne snovi). V nadaljevanju po vrsti obravnavamo tri najbolj uporabne nadomestne metode (prirejeno po (Gray, 2009)), ki smo jih prikazali že v preglednici 1. Nekatere druge nadomestne metode, ki jih ne obravnavamo, kot je daljinski spektralni odboj, se še razvijajo (za uporabo multisppektralnih satelitskih posnetkov v ta namen glej npr. (Onderka, 2011)).

### 4 • NADOMESTNE TERENSKÉ METODE

#### 4.1 Meritve motnosti

Motnost (turbidnost) je optična (snovna) lastnost vode (ali vzorca), da svetlobni žarki ne potujejo v ravni črti in neovirano, temveč se sipajo in pojemajo (atenuacija). Količinsko izmerjeno motnost izražamo z ustreznimi enotami motnosti (TU – turbidity units), in sicer glede na uporabljeni merilnik (povzeto po US Geological Survey National Field Manual v delu o motnosti (Anderson, 2000)):

a) formazinske nefelometrične enote (FNU) uporabimo skladno s standardom ISO 7027:1999 (Water quality – Determination of turbidity), kadar je kot sprejemnika glede na vpadni svetlobni žarek  $90^\circ \pm 2,5^\circ$  (merimo sipanje – scattering) in uporabimo merilnik z LED-diodo kot virom svetlobe z valovno dolžino  $860 \pm 60$  nm (monokromatska svetloba blizu infrardeče svetlobe). Kadar je omenjeni kot le  $30^\circ \pm 15^\circ$

(merimo odbojno sipanje proti smeri valovanja), uporabimo enoto FBU (Formazin Backscatter Unit), in kadar je omenjeni kot  $180^\circ$  (merimo pojemanje oziroma atenuacijo žarka), uporabimo enoto FAU (Formazin Attenuation Unit).  
b) nefelometrične enote motnosti (NTU) uporabimo skladno z EPA metodo (Environmental Protection Agency) 180.1, kadar je kot sprejemnika glede na vpadni svetlobni žarek  $90^\circ \pm 30^\circ$  (merimo sipanje – scattering) in uporabimo merilnik z volframovo lučjo kot virom svetlobe z barvno temperaturo svetlobe med 2200 K in 3000 K in

z vrhom valovnih dolžin v intervalu med 400 nm in 680 nm (bela oziroma nemonokromatska svetloba). Kadar je omenjeni kot le  $30^\circ \pm 15^\circ$  (merimo odbojno sipanje proti smeri valovanja), uporabimo enoto BU (Backscatter Unit), in kadar je omenjeni kot  $180^\circ$  (merimo pojemanje oziroma atenuacijo žarka), uporabimo enoto AU (Attenuation Unit).

V zadnjih dveh desetletjih je bilo razvitih več optičnih merilnikov, ki delujejo na enem od dveh optičnih principov:

- a) **transmisivnost** – merilnik izmeri del vidne svetlobe, ki se prepusti skozi vodo v ravni smeri (kot  $180^\circ$ ) med virom svetlobe in sprejemnikom, ter s tem oceni pojemanje valovanja (atenuacija) zaradi koncentracije suspendiranih snovi. Merilniki se najpogosteje uporabljajo pri nižjih vrednostih motnosti in so predvsem primerni za pitno vodo. Znani proizvajalec in model je npr. Partechov monitor model 7200 s senzorjem motnosti, ki meri absorpcijo svetlobe valovne dolžine 960 nm, in sicer v različnih izvedbah: IR100 (0–200 mg/l), IR40 (0–1500 mg/l), IR15 (0–10 g/l) in IR8 (0–30 g/l) ali pa senzor motnosti Turbi-Tech 2000LA, ki meri absorpcijo infrardeče svetlobe valovne dolžine 860 nm (0–20 g/l) ([www.parotech.co.uk](http://www.parotech.co.uk)).
- b) **nefelometričnost** – merilnik izmeri del vidne ali infrardeče svetlobe, ki se odbojno sipa pod kotom (običajno  $90^\circ$  glede na vir svetlobe) do sprejemnika odbite svetlobe. Merilniki se lahko uporabljajo tudi pri višjih vrednostih motnosti (tudi do 500 g/l), vendar takrat odziv merilnikov ni več linearen. Znani proizvajalci in modeli so:
- YSI – multiparameterska sonda, npr. model 6600V2 s senzorjem model YSI 6136 (0–1000 NTU) ([www.ysi.com](http://www.ysi.com));

- Forest Technology Systems – samočistilni digitalni senzor motnosti, model DTS-12 (0–1600 NTU) ([www.ftshydrology.com](http://www.ftshydrology.com));
- Campbell Scientific Inc. (prej D&A Instrument Company) – samočistilni senzorji, modeli OBS-3+ in OBS300 (do med 5 g/l in 10 g/l za glino in melj ter do med 50 g/l in 100 g/l za pesek) ter OBS-5+ (0,4–1000 NTU; do 50 g/l za glino in melj ter do 200 g/l za pesek) ([www.campbellsci.co.uk](http://www.campbellsci.co.uk));
- Hydrolabova multiparameterska sonda s štirižarčnim senzorjem motnosti (0–1000 NTU) ali samočistilnim senzorjem motnosti (0–3000 NTU) ([www.hachhydromet.com](http://www.hachhydromet.com));
- HACH – samočistilni senzor, model Soliflex highline sc (od 0,001 mg/l do 500 g/l; od 0,001 do 4000 NTU), ali pa merilnik motnosti, model Surface Scatter 7 (0–9999 NTU) ([www.hach-lange.com](http://www.hach-lange.com)).

Merilniki motnosti se uporabljajo na terenu točkovno (meritev se opravi v zelo omejen delu tekočine tik ob merilniku), nimajo premičnih delov (razen morebitnega dodatnega brisalca pred lečo – virom in sprejemnikom svetlobe), enostavno so uporabni za neprekinjene meritve (vir napajanja običajno ni problematičen, prav tako zapis izmerjenih podatkov, problem predstavlja rast organizmov/alg na merilniku in zato sčasoma nastane dvig motnosti), vendar ne merijo zrnastostne sestave in dajejo dobre rezultate tam, kjer je zrnastostna sestava suspendiranih sedimentov relativno stabilna. Merilnike umerjamo na vzorce z znano masno koncentracijo suspendiranih snovi, pogosto se kot material uporablja formazin (vrsta polimera s predpisano zrnastostno sestavo), ki je kot standard nadomestil kaolinsko glino.

## 4.2 Laserska difrakcija

Tovrstni merilniki uporabljajo princip sipanja valovanja pod ostrim kotom v smeri gibanja valovanja in tako omogočijo oceno zrnastostne sestave suspendiranih delcev in na tej osnovi tudi oceno prostorninske gostote (če poznamo ali ocenimo gostoto delcev, pa lahko tudi ocenimo masne koncentracije). Način določanja je neodvisen od barve delcev in zrnastostne sestave, je pa občutljiv na obliko delcev, ki so privzeti v sferični obliki. Trenutno je na svetu le en proizvajalec tovrstnih merilnikov, Sequoia Scientific Inc. ([www.sequoiasci.com](http://www.sequoiasci.com)), ki ponuja različne izvedenke teh merilnikov, najbolj zanimiv je potopni model LISST-SL v hidrodinamični obliki torpeda za spuščanje v vodni tok. Merilnik oceni zrnastostno sestavo suspendiranih sedimentov v 32 razredih, izbiramo lahko med intervalom 1,25–250  $\mu\text{m}$  in 2,5–500  $\mu\text{m}$ . Zanimiva je tudi prenosna terenska izvedenka LISST-Portable, ki deluje po enakem principu, vendar moramo vzorec za analizo odvzeti ročno ali samodejno, saj ta izvedenka ni potopna.

## 4.3 Zvočno odbojno sipanje

Pri obravnavi metod terenskega določanja zrnastosti in koncentracije suspendiranih snovi si najprej podrobneje oglejmo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Merilnik, ki se je začel razvijati pred 20 leti, se danes rutinsko uporablja v številnih državah za meritve hitrosti in pretokov v velikih rekah (npr. (Muste, 2004a), (Muste, 2004b)). Kmalu se je ta merilnik pokazal kot uporaben tudi za meritve suspendiranih snovi (Reichel, 1994) in različne raziskave so v zadnjih 20 letih pokazale (za pregled glej preglednico 2), da je mogoče s to tehnologijo oceniti tudi kalnost (dejanski pretok kalnih delcev in lebdečih plavin). Enako velja za prodonosnost (dejan-

Model merilnika	Frekvenca ADCP	Širina, kot, št. žarkov	Maksimalni doseg	Mesto uporabe
Teledyne RD Instruments Workhorse H-ADCP	300 kHz 600 kHz	< $1^\circ$ , $20^\circ$ , 3 < $1^\circ$ , $20^\circ$ , 3	širine do 250 m širina do 85 m	reka Saône, Francija (Le Coz, 2007) reka Isere, Francija (Moore, 2011)
Teledyne RD Instruments Workhorse Rio Grande ADCP	1200 kHz	?, $20^\circ$ , 3	globina do 21 m	Banatske reke, Romunija (Rotaru, 2006) reka Paraná, Argentina (Guerrero, 2011)
Teledyne RD Instruments ChannelMaster H-ADCP	1200 kHz	$1,5^\circ$ , $20^\circ$ , 2	širina do 20 m	reka Isere, Francija ((Moore, 2011), (Moore, 2012))
SonTek ADCP	500 kHz 1000 kHz 1500 kHz	$1,5^\circ$ , $25^\circ$ , 3 $1,5^\circ$ , $25^\circ$ , 3 $1,5^\circ$ , $25^\circ$ , 3	globina do 100 m globina do 30 m globina do 20 m	ustje reke Fraser, Kanada (Kostaschuk, 2005) reka Paraná, Argentina (Guerrero, 2011) laboratorij (Guerrero, 2012)

Preglednica 2 • Osnovne tehnične lastnosti izbranih ADCP (večina merilnikov omogoča meritve do 128 odsekov vzdolž posameznega žarka; podatki s spletnih strani: [www.rdinstruments.com](http://www.rdinstruments.com), [www.sontek.com](http://www.sontek.com))

ski pretok rinjenih plavin), kar pa ni predmet obravnave v tem članku. Osnovna lastnost ADCP-instrumentov je sposobnost meriti odboj (moč nazaj odbitega zvočnega signala; angl. back scattering) od mineralnih delcev v suspendiranem stanju. Pri tem velja pravilo, da je magnituda odbitega valovanja od suspendiranih sedimentov v rečni vodi odvisna od frekvence valovanja, ki jo oddaja ADCP, ter koncentracije in velikosti suspendiranega sedimenta. V preglednici 3 je prikazana omenjena odvisnost za ADCP-instrumente priznanega proizvajalca SonTek (www.sontek.com, letos praznuje 20. obletnico delovanja), in sicer v obliki absorpcije zvoka v odvisnosti od frekvence ADCP.

Instrumente ADCP lahko uporabimo za meritve hitrosti in pretoka v rekah in obenem ocenimo koncentracijo suspendiranih sedimentov in

Frekvenca ADCP (kHz)	Absorpcijski faktor $\alpha$ (dB/m)	Velikost delcev ob največji občutljivosti instrumenta ( $\mu\text{m}$ )	Najmanjši premer delcev, ki ga še zazna instrument ( $\mu\text{m}$ )
3000	2,4	160	8
1500	0,6	320	16
750	0,15	640	30
500	0,067	960	50
250	0,017	1920	100

Preglednica 3 • Odvisnost absorpcije zvoka od uporabljene frekvence ADCP in pripadajoča optimalni premer in minimalni premer mineralnih delcev, ki jih instrument zazna (SonTek, 1997)

kalnost (pretok suspendiranih sedimentov); meritve lahko opravimo s fiksno postavljenimi (vodoravnimi) ADCP-merilniki na bregovih vo-

dotokov ali pa s premičnimi (navpično uporabljenimi) ADCP-merilniki z različnih premičnih platform (npr. čolnov).

## 5 • KALIBRACIJA NEPREKINJENIH MERITEV SUSPENDIRANIH SNOVI

Pri vseh nadomestnih (surogatnih) metodah za meritve suspendiranih snovi v rečni vodi se pojavi problem kalibracije merilnikov. Merilnike motnosti vode moramo, kot smo že omenili, stalno umerjati na suspenzije znanih koncentracij s standardiziranimi snovmi (običajno formazin). Tudi za merilnike, ki delujejo na osnovi laserske difrakcije, priporočamo občasne primerjave s klasično odvzetimi vzorci za kontrolo zrnastostne sestave in koncentracij suspendiranih snovi, čeprav merilnika ni treba umerjati.

Podrobneje si pogledajmo nujnost kalibracije pri ADCP-profilnih meritvah odbitega zvočnega valovanja (velja enako za horizontalne in vertikalne ADCP). Kalibracijo ADCP-meritev lahko opravimo na osnovi ene frekvence zvočnega valovanja ali več (uporabimo ADCP-merilnike različnih frekvenc), v veliki meri je to odvisno od zrnastostne sestave suspendiranih snovi. Ocena koncentracij suspendiranih snovi na osnovi odboja zvočnega valovanja, ki ga emitira ADCP-merilnik določene frekvence, je odvisna od kakovosti kalibracijske krivulje. V

rekah, kjer je stalno prisotna običajna kalnost, ne le poplavna kalnost, imamo torej opraviti z bimodalno kalnostjo (glinenomejasta frakcija in peščena frakcija). Zato moramo ločiti ti dve koncentraciji med seboj in opraviti dve kalibraciji. Izkušnje so pokazale, da je kalibracija ADCP-podatkov o odbojih EM-valovanja boljša za peščene frakcije kot za glinenomejaste. Tako nam ostane možnost, da naravno kalnost, če je prisotna in je običajno glinenomejaste sestave, ocenjujemo drugače in ne z merilniki ADCP. Metoda z analizo signala, ki ga nudi ADCP, je prav tako omejena na tisti del pretočnega prereza, ki ni čisto ob dnu, saj so odboji ob dnu reke problematični in ADCP daje slabe podatke o hitrosti in s tem tudi o koncentracijah lebdečih plavin blizu dna. Ker iz vertikalne porazdelitve koncentracij lebdečih plavin vemo, da je ta koncentracija za peščene frakcije največja prav ob dnu reke (npr. (Mikoš, 2012)), lahko zaključimo, da je ocena koncentracij kalnosti iz meritev ADCP podcenjena in da je dejanska kalnost večja od tako ocenjene vrednosti.

Za kalibracijo ADCP-meritev moramo ročno ali samodejno odvzeti (fizične) vzorce rečne vode skupaj s suspendiranimi sedimenti in nato v laboratoriju analizirati koncentracijo in zrnastost suspendiranih sedimentov. Ob tem je nujno zagotoviti izokinetični zajem, to je pogoj, da je vtok rečne vode v zajemni instrument enak hitrosti vode v neposredni bližini vtoka (torej da rečne vode niti ne srkamo v instrument niti je ne odpravimo stran od vtoka v instrument). Možno je uporabljati potopne vzorčevalnike, ki so hidrodinamično oblikovani tako, da nudijo v hitro tekoči vodi čim manjši upor (na hitro gledano, imajo obliko torpeda). Kot vidimo, je nujno terenske meritve suspendiranih sedimentov v rečnem okolju opravljati z različnimi merilniki, kjer eno vrsto merilnikov uporabimo za neprekinjene meritve (predvsem v času poplavnih valov), drugo vrsto merilnikov pa uporabimo občasno z namenom kalibriranja neprekinjenih meritev. Po uspešno rešenem kalibriranju merilnikov nas za konkretne terenske razmere čaka še preračun meritev pretokov vode in meritev motnosti v časovne serije koncentracij suspendiranih snovi in končno kalnosti (npr. (Rasmussen, 2009)), kar presega okvir tega prispevka.

## 6 • SLOVENSKE IZKUŠNJE Z RAZISKOVALNIMI MERITVAMI SUSPENDIRANEGA SEDIMENTA V REKAH

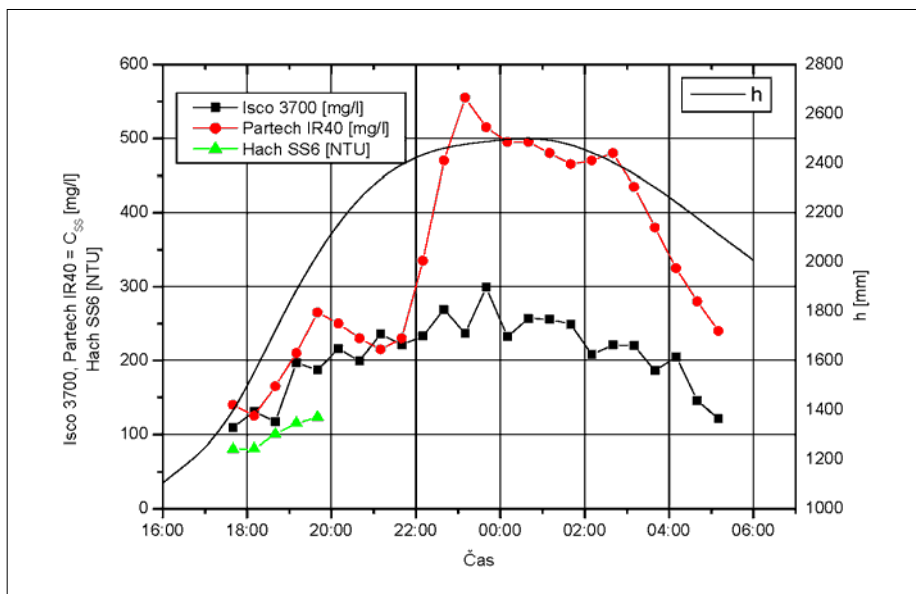
Namen tega kratkega prikaza ni podati pregleda rezultatov ali izkušenj uradnega

državnega monitoringa suspendiranih snovi, ki ga izvaja Agencija Republike Slovenije za

okolje (ARSO). V preteklosti se je namreč ta monitoring opravljal in se še danes opravlja le na nekaj izbranih merilnih mestih s klasičnimi metodami vzorčenja. Bolj je namen tega prikaza povedati, da tudi v Sloveniji preizkušamo novejšo, nadomestno metodo, ki so v središču pozornosti tega prispevka.

### 6.1 Meritve KSH na reki Reki (HACH SS-6)

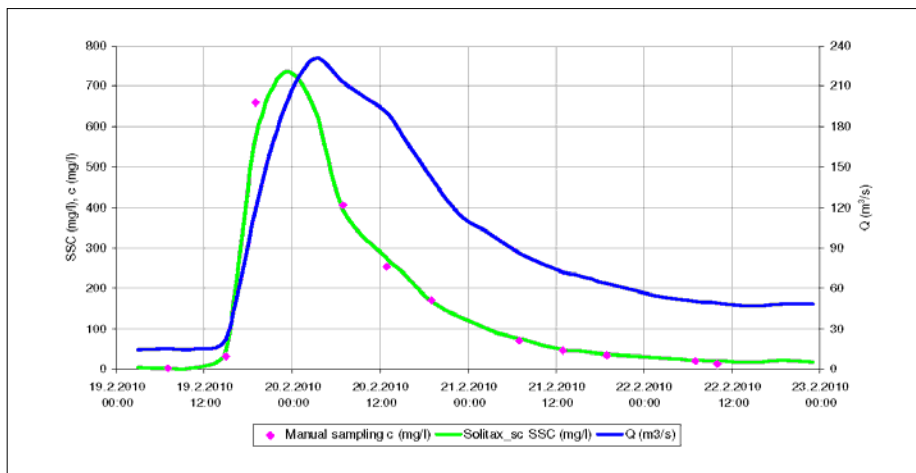
Za meritve kalnosti (vsebnosti suspendiranih snovi) smo v preteklosti na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani že uporabili turbidimeter Hach Surface Scatter Turbidimeter 6 (nujen odzvem in dovod rečne vode), infrardeči merilnik suspendiranih snovi Partech IR40 (ročna uporaba ali pritrjen na brežini vodotoka) in prenosni vzorčevalnik vode ISCO 3700 (samodejni zajem vzorcev rečne vode). Pri meritvah kalnosti na reki Reki leta 2000 smo opazili precejšnje razlike med merilniki (slika 1). Korelacija med merjenimi vrednostmi NTU in koncentracijo suspendiranih snovi (mg/l) kot tudi korelacija med neposredno metodo (vzorčenje z ISCO 3700) in metodo z infrardečo svetlobo (Partech IR40) je bila le zadovoljiva ( $R \sim 0.85$  oziroma  $R^2 \sim 0.70$ ). Izkušnje z meritvami blatnih tokov v strugi potoka Grajšček v Lokavcu pri Ajdovščini, ki so ob močnih nalivih tekli s plazjo Slano blato, pa so bili prekoncentrirani (visoka vsebnost suspendiranih snovi) in merilnik Partech IR40 ni več deloval. Sicer so se merilniki Partech uspešno uporabljali drugje, recimo v Veliki Britaniji (IR40; (Wass, 1997)).



Slika 1 • Meritve rečne kalnosti na notranjski Reki 29. in 30. marca 2000 – vodostaj v mm (črna) in koncentracija suspendiranih snovi v mg/l, merjena s pomočjo Partech IR40 (rdeča) in Hach Surface Scatter Turbidimeter 6 (zeleni) ter preverjena z vzorčenjem s pomočjo vzorčevalnika ISCO 3700 (črna) (Brilly, 2005)

### 6.2 Meritve v VP Suha na Sori (OBS-3a in Solitax\_sc)

Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) je v okviru lastnega razvoja v letu 2006 na vodomerni postaji Suha na reki Sori testirala merilnik OBS-3+ (Ulaga, 2009), saj je ugotovila, da je za monitoring suspendiranega materiala, ki ga ARSO izvaja v Sloveniji, predvsem primeren prenosni merilnik motnosti. Meritve so primerjali z rezultati laboratorijskih analiz vzorcev, odvzetih s samodejnim vzorčevalnikom. Na isti vodomerni postaji so nadaljevali meritve z merilnikom HACH SOLITAX sc, od junija do decembra 2007 še testno (Ravnik, 2010), v letu 2010 že tudi operativno (slika 2). Glede na lastne izkušnje daje ARSO modelu HACH Solitax-sx prednost pred OBS-3+. Merilniki HACH serije Solitax so se uspešno uporabili v različnih okoljih: na rekah v majhnih območjih ( $< 50 \text{ km}^2$ ) v Baskiji, Španija (Zabaleta, 2007), na reki Isere v Franciji (Moore, 2011) in v zaledju (do  $25.000 \text{ km}^2$ ) velikih rečnih akumulacij v Kansasu, ZDA ((Lee, 2008), (Juracek, 2011)).



Slika 2 • Meritve na VP Suha na reki Sori februarja 2010 – hidrogram v  $\text{m}^3/\text{s}$  (modra barva) in koncentracija suspendiranih snovi v mg/l, merjena s pomočjo SOLITAX\_sc (zeleni barva) ter primerjena z ročnim vzorčenjem rečne kalnosti (Ulaga, 2010)

## 7 • SKLEP

V prispevku smo prikazali prednosti in pomanjkljivosti izbranih terenskih metod

za zajem podatkov o suspendiranih rečnih sedimentih, gre za podatke o prostorninskih

(masnih) koncentracijah in njihovi zrnastosti sestavi. Obravnavo smo nadaljevali s prikazom osnovnih (fizikalnih) zakonitosti mehanskega in elektromagnetnega valovanja v tekočini (rečni vodi). Predvsem so nas zanimala tiste nadomestne (surogatne) me-

tode, ki temeljijo na naslednjih treh principih: motnosti (transmisivnost in nefelometričnost rečne vode), laserske difrakcije in zvočnega odbojnega sipanja. Za te tri metode smo prikazali osnovne zakonitosti delovanja in

predstavili nekatere izvedbe merilnikov. Nadalje smo poudarili nujnost stalne/občasne kalibracije merilnikov in kalibracije izmerjenih podatkov o suspendiranih sedimentih z drugimi merilniki ali drugimi metodami,

predvsem če opravljamo neprekinjene meritve z le eno vrsto merilnikov. Prispevke smo končali s kratkim prikazom uporabe nekaterih v tem prispevku prikazanih merilnikov v Sloveniji v preteklosti.

## 8 • ZAHVALA

Raziskave rečnih sedimentov potekajo v okviru dela v raziskovalnem programu P2-0180 Hid-

rotehnika, hidravlika in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost

Republike Slovenije. Avtor se zahvaljuje HSE Investu, d. o. o., iz Maribora za sofinanciranje.

## 9 • LITERATURA

- Anderson, C. W., Turbidity (Version 2.1, 9/2005), Section 6.7, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 9, Handbooks for Water-Resources Investigations, Chapter A6 Field Measurements, str. 55, 2005. Povzeto po: [http://water.usgs.gov/owq/FieldManual/Chapter6/Section6.7\\_v2.1.pdf](http://water.usgs.gov/owq/FieldManual/Chapter6/Section6.7_v2.1.pdf).
- Bajt, Ž., Legat, A., Šelih, J., Spremljanje napredovanja poškodb upogibno obremenjenih armiranobetonskih elementov z analizo akustične emisije, Gradbeni vestnik, letnik 54, št. 4, 95–102, 2005.
- Bilotta, G. S., Brazier, R. E., Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota, Water Research, letnik 42, št. 12, 2849–2861, 2008.
- Brilly, M., Globevnik, L., Štravs, L., Rusjan, S., Eksperimentalna porečja v Sloveniji, Zbornik Raziskave s področja geodezije in geofizike 2004, 47–59, 2005. Povzeto po: [http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2005/SZGG\\_05\\_Brilly\\_et\\_al.pdf](http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2005/SZGG_05_Brilly_et_al.pdf).
- Campbell, C. G., Laycak, D. T., Hoppes, W., Tran, N. T., Shi, F. G., High concentration suspended sediment measurements using a continuous fiber optic in-stream transmissometer, Journal of Hydrology, letnik 311, št. 1–4, 244–253, 2005.
- Gray, J. R., Gartner, J. W., Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring, Water Resources Research, letnik 45, WOOD29, 2009.
- Guerrero, M., Szupiany, R. N., Amsler, M., Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation, Flow Measurement and Instrumentation, letnik 22, št. 5, 392–401, 2011.
- Guerrero, M., Rütger, N., Szupiany, R., Laboratory validation of acoustic current profiler (ADCP) techniques for suspended sediment investigations, Flow Measurement and Instrumentation, letnik 23, št. 1, 40–48, 2012.
- Hosseini, S., Shamsai, A., Ataie-Ashtiani, B., Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter, Flow Measurement and Instrumentation, letnik 17, št. 1, 59–68, 2006.
- IAEA, Fluvial sediment transport, Analytical techniques for measuring sediment load. IAEA-TECDOC-1461, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, str. 61, 2005.
- Juracek, K. E., Suspended-sediment loads, reservoir sediment trap efficiency, and upstream and downstream channel stability for Kanopolis and Turtle Creek Lakes, Kansas, 2008-10, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011–5187, str. 35, povzeto po: <http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5187/pdf/sir2011-5187.pdf>, 2011.
- Kladnik, R., Osnove fizike, I. del, 3. izdaja, Državna založba Slovenije, str. 285, 1979.
- Kladnik, R., Osnove fizike, II. del, 2. izdaja, Državna založba Slovenije, str. 343, 1977.
- Kostaschuk, R., Best, J., Villard, P., Peakall, J., Franklin, M., Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler, Geomorphology, letnik 68, št. 1–2, 25–37, 2005.
- Le Coz, J., Pierrefeu, G., Brochot, J. F., Paquier, A., Chastan, B., Lagouy, M., Suspended-load dynamics during floods in the river Saône, France, V: 10th International Symposium on River Sedimentation, Moscow, Russia, 1–4 August 2007, str. 11, povzeto po: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/92/47/PDF/LY2007-PUB00023167.pdf>, 2007.
- Lee, C. J., Rasmusen, P. P., Ziegler, A. C., Characterization of suspended-sediment loading to and from John Redmond Reservoir, east-central Kansas, 2007–2008, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5123, str. 25, povzeto po: [http://pubs.usgs.gov/sir/2008/5123/pdf/sir2008\\_5123.pdf](http://pubs.usgs.gov/sir/2008/5123/pdf/sir2008_5123.pdf), 2008.

- Lee, C., Wu, C. H., Hoopes, J. A., Simultaneous particle size and concentration measurements using a back-lighted particle imaging system, *Flow Measurement and Instrumentation*, letnik 20, št. 4–5, 189–199, 2009.
- Mikoš, M., Kalnost v rekah kot del erozijsko-sedimentacijskega kroga, *Gradbeni vestnik*, letnik 61, št. 6, 129–136, 2012.
- Moore, S. A., Le Coz, J., Hurther, D., Paquier, A., On the Use of Horizontal-ADCPs for Sediment Flux Measurements, *Proceedings of the 34<sup>th</sup> IAHR World Congress*, Brisbane, Australia, 3659–3666, 2011.
- Moore, S. A., Le Coz, J., Hurther, D., Paquier, A., On the application of horizontal ADCPs to suspended sediment transport surveys in rivers, *Continental Shelf Research*, 2012.
- Muste, M., Yu, K., Spasojevic, M., Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements, *Flow Measurement and Instrumentation*, letnik 15, št. 1, 1–16, 2004a.
- Muste, M., Yu, K., Pratt, T., Abraham, D., Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part II: fixed-vessel measurements, *Flow Measurement and Instrumentation*, letnik 15, št. 1, 17–28, 2004b.
- Nikora, V. I., Goring, D. G., Fluctuation of suspended sediment concentration and turbulent sediment fluxes an open channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, letnik 128, 214–224, 2002.
- Onderka, M., Rodný, M., Velísková, Y., Suspended particulate matter concentrations retrieved from self-calibrated multispectral satellite imagery, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, letnik 59, št. 4, 251–261, 2011.
- Rasmusen, P. P., Fray, J. R., Glysson, G. D., Ziegler, A. C., Guidelines and procedures for computing time-series suspended-sediment concentrations and loads from in-stream turbidity-sensor and streamflow data, *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, Book 3, Ch.C4, str. 52, povzeto po: <http://pubs.usgs.gov/tm/tm3c4/pdf/TM3C4.pdf>, 2011.
- Ravnik, L., Ulaga, F., Vrednotenje vsebnosti suspendiranega materiala s pomočjo merilnika SOLITAX sc, *Hidrološki letopis Slovenije 2007*, I. del: Razvoj na področju hidrološkega monitoringa, ARSO MOP, Ljubljana, 32–38, 2010.
- Reichel, G., Nachtnebel, H. P., Suspended sediment monitoring in a fluvial environment: advantages and limitations applying an acoustic Doppler current profiler, *Water Research*, letnik 28, št. 4, 751–761, 1994.
- Rotaru, E., Le Coz, J., Drobot, R., Adler, M. J., Dramais, G., ADcp Measurements of Suspended Sediment Fluxes in Banat Rivers, Romania, *Conference Proceedings Balwois 2006*, str. 13, povzeto po: [http://balwois.com/balwois/administration/full\\_paper/ffp-545.pdf](http://balwois.com/balwois/administration/full_paper/ffp-545.pdf), 2006.
- SonTek, SonTek Doppler current meters – using signal strength to monitor suspended sediment concentration, *SonTek Application Notes*, San Diego, str. 7, 1997.
- Ulaga, F., Ravnik, L., Meritve suspendiranega materiala z avtomatskim merilnikom OBS-3+ (D&A Instrument Company), *Hidrološki letopis Slovenije 2006*, ARSO MOP, Ljubljana, 22–26, 2009.
- Ulaga, F., Ravnik, L., Testing of Automatic Turbidity Sensor Solitax\_sc and Evaluation of Suspended Sediment in Rivers, *Proceedings BALWOIS 2010 – Ohrid, Republic of Macedonia*, str. 8, 2010.
- Walling, D. E., Owens, P. N., Waterfall, B. D., Leeks, G. J. L., Wass, P. D., The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK, *Science of The Total Environment*, letnik 251–252, 205–222, 2000.
- Wass, P. D., Marks, S. D., Finch, J. W., Leeks, G. J. L., Ingram, J. K., Monitoring and preliminary interpretation of in-river turbidity and remote sensed imagery for suspended sediment transport studies in the Humber catchment, *The Science of the Total Environment*, letnik 194/195, 263–283, 1997.
- Wren, D. G., Barkdoll, B. D., Kuhnle, R. A., Derrow, R. W., Field techniques for suspended-sediment measurement, *Journal of Hydraulic Engineering*, letnik 126, št. 2, 97–104, 2000.
- Zabaleta, A., Martínez, M., Uriarte, J. A., Antigüedad, I., Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country, *CATENA*, letnik 71, št.1, 179–190, 2007.