

PREDLOG OBRATOVALNEGA HIDROLOŠKEGA MONITORINGA KALNOSTI NA SPODNJI SAVI

A PROPOSAL OF OPERATIONAL HYDROLOGIC MONITORING OF SUSPENDED-SEDIMENT LOADS IN THE LOWER SAVA RIVER

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

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

Znanstveni članek

UDK: 556.01/.08:621.311.21(282.243.743)

Povzetek | Obstoječi in načrtovani državni hidrološki monitoring površinskih voda, ki ga izvaja Agencija Republike Slovenije, ne ustreza zahtevam, ki se postavljajo pred upravljavca obstoječih in načrtovanih vodnih elektrarn na spodnji Savi. V članku podajamo praktična izhodišča za moderni monitoring kalnosti v vodotokih, s poudarkom na modernih merilnih instrumentih. Na osnovi lastnih izkušenj in izkušenj, ki ga ima pri izvajanju državnega hidrološkega monitoringa Agencija Republike Slovenije za okolje, predlagamo zasnovo obratovalnega hidrološkega monitoringa kalnosti na spodnji Savi, ki naj bo v sozvočju z načrtovanim razvojem državnega monitoringa okolja.

Ključne besede: hidrološki monitoring, hidrometrija, kalnost, merilna tehnika, raba voda, rečni sedimenti, vodne elektrarne

Summary | The existing and planned state hydrologic monitoring of surface waters executed by the Environmental Agency of the Republic of Slovenia does not correspond to the demands that are posed to the operator of the existing and planning hydro power plants on the Lower Sava River. In the paper, practical bases for a modern monitoring of suspended-sediment loads in watercourses are introduced, with the emphasis on modern measuring instruments. Finally, on the basis of our own experiences and the experiences gained by the Environmental Agency of the Republic of Slovenia when executing the state hydrologic monitoring, a scheme of the operational hydrologic monitoring of suspended-sediment loads on the Lower Sava River is proposed that should be in unison with the planned development of the state hydrologic monitoring.

Keywords: fluvial sediments, hydro power plants, hydrometry, hydrologic monitoring, measuring techniques, suspended loads, water usage

1 • UVOD

Ideje za gradnjo vodnih elektrarn na spodnji Savi segajo v čas stare Jugoslavije, ko se je načrtovala gradnja vodnih elektrarn na odseku med Brestanico (Rajhenburg) in Brežicami za potrebe preskrbe mesta Za-

greb (TL, 1925). Do uresničitve prve vodne elektrarne na spodnji Savi je prišlo šele leta 1993, ko je bila dokončana HE Vrhovo (moč na pragu 34 MW) kot prva elektrarna na spodnji Savi. Nato se je gradnja drugih ele-

ktarn v nizu ustavila in nadaljevala šele v 21. stoletju, ko so se po vrsti dogradile HE Boštanj (največja moč 32,5 MW), HE Blanca (največja moč 42,5 MW; o gradnji je poročal v Gradbenem vestniku Širca, 2010) in HE Krško (v gradnji, največja moč 39,5 MW). Načrtovani sta še HE Brežice (državni prostorski načrt razgrnjen, največja moč 41,5 MW) in HE Mokrice (državni prostorski načrt v pripravi, največja

moč 30,5 MW) (www.hse.si). Vse navedene elektrarne naj bi delovale v verigi.

Načrtovana je tudi energetska izraba srednje Save (10 HE od HE Tacen do HE Suhadol, skupaj instalirane moči 338 MW), ki naj bi se zaključila do leta 2030. Tako je bila 25. novembra 2011 podpisana družbena pogodba o skupnem nastopu pri projektu izgradnje HE na srednji Savi med Holdingom Slovenske elektrarne (HSE), d. o. o., GEN energijo, d. o. o., in Savskimi elektrarnami Ljubljana (SEL), d. o. o. Ko bodo dograjene še HE na srednji Savi, bo akumulacija HE Vrhovo prevzela vlogo izravnalnega bazena za celotno verigo elektrarn na srednji in spodnji Savi. Delovanje celotne verige bo optimizirano za potrebe proizvodnje električne energije, bo pa celotna veriga delovala tudi kot objekt protipoplavnega varstva za naseljena območja ob srednji in spodnji Savi, tako da bo delovanje elektrarn ob izrednih hidroloških razmerah (poplavni valovi

Save in Savinje ter pritokov) podrejeno varstvu pred poplavami. Vodne elektrarne na srednji in spodnji Savi bodo pomemben obnovljivi vir energije v Sloveniji (Kryžanowski, 2011).

Pri zasnovi, umeščanju v prostor, načrtovanju, dimenzioniranju in obratovanju (optimizaciji) verige vodnih elektrarn predstavljajo rečni sedimenti pomemben element, kadar je reka, na kateri gradimo verigo elektrarn, prodonosna. O naravnem prodnem režimu ter bilanci prodonosnosti in kalnosti reke Save pred nadaljevanjem gradnje elektrarn na spodnji Savi smo v tej reviji že poročali in povzeli takratna znanja in vedenje o problematiki zasipavanja in zamuljevanja akumulacij vodnih elektrarn (Mikoš, 2000a, 2000b). V času do danes so investitorji vodnih elektrarn na spodnji Savi (Holding Slovenske elektrarne – HSE, Savske elektrarne Ljubljana – SEL, Hidroelektrarne na spodnji Savi – HESS) naročili številne študije in raziskave, tudi o problematiki rečnih

sedimentov (GEATEH, 2011). V tem času so se razreševali različni problemi, povezani z rečnimi sedimenti, kot na primer ta, da suspendirane plavine povzročajo tudi druge probleme, kot je denimo abrazijska obraba betonskih površin na vodnih elektrarnah, problem, ki se ga stroka zaveda in ga je raziskovala na pretočnem polju HE Vrhovo (Kryžanowski, 2012), ali problematika plavin pri vtoku in iztoku hladilne vode v Nuklearno elektrarno Krško (IBE, 2011). Odprto vprašanje pa je vseeno ostal monitoring rečnih sedimentov, predvsem prodonosnosti (rinjenih plavin) in kalnosti (lebdečih plavin oziroma suspendiranih snovi). V tem prispevku obravnavamo le suspendirane snovi (kalnost), povzemamo značilnosti hidrološkega monitoringa, ki ga v Republiki Sloveniji izvaja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), ta od začetka leta 2012 deluje v okviru novega ministrstva za kmetijstvo in okolje.

2 • HIDROLOŠKI MONITORING POVRŠINSKIH VODA V SLOVENIJI

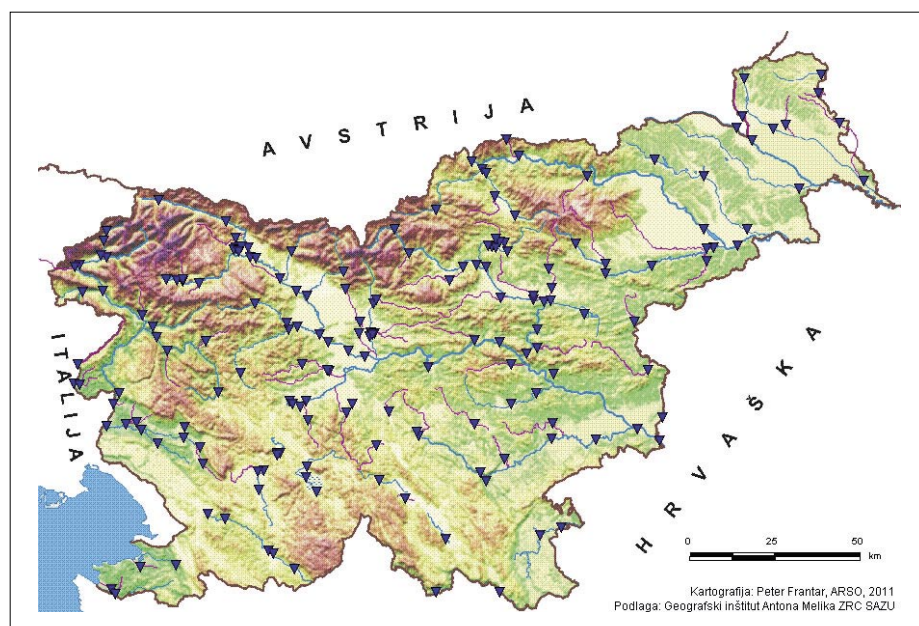
Državni hidrološki monitoring površinskih voda v Republiki Sloveniji služi ugotavljanju količinskega stanja voda in hidroloških značilnosti vodnih teles, vodni bilanci ter ocenjevanju kemijskega in ekološkega stanja voda, kot zahteva okvirna vodna direktiva (Vodna direktiva 60/2000/ES). Poleg tega služi spremljanju, napovedovanju in obveščanju o hidroloških razmerah. Hidrološki monitoring površinskih voda zajema meritve višin vodne gladine, hitrosti vode, pretokov, geometrijo merskih prerezov ter meritve temperature vode in vsebnosti suspendiranega materiala v vodi. Zakonodajne podlage za program hidrološkega monitoringa in državne hidrološke dejavnosti izhajajo iz Zakona o varstvu okolja (Ur. l. RS, 41/04), Zakona o vodah (Ur. l. RS, 67/02), Zakona o varstvu pred naravnimi in drugimi nesrečami (Ur. l. RS, 64/94) in Uredbe o stanju površinskih voda (Ur. l. RS, 14/09).

Obseg državnega hidrološkega monitoringa površinskih voda je opredeljen s programom monitoringa, ki ga je pripravil ARSO (ARSO, 2011). V programu so opredeljeni merjeni parametri, postopki in pogostost meritev. V letu 2012 poteka hidrološki monitoring na 180 merilnih mestih na vodotokih (slika 1). Rezultate hidrološkega monitoringa ARSO objavlja v obliki letnih hidroloških letopisov (<http://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20>

[in%20porocila%20in%20letopisi.html](http://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20porocila%20in%20letopisi.html)), ob izrednih hidroloških razmerah pa so opravljene dodatne hidrološke analize, ki so objavljene v obliki poročil (<http://www.arso.gov.si/vode/publikacije/>).

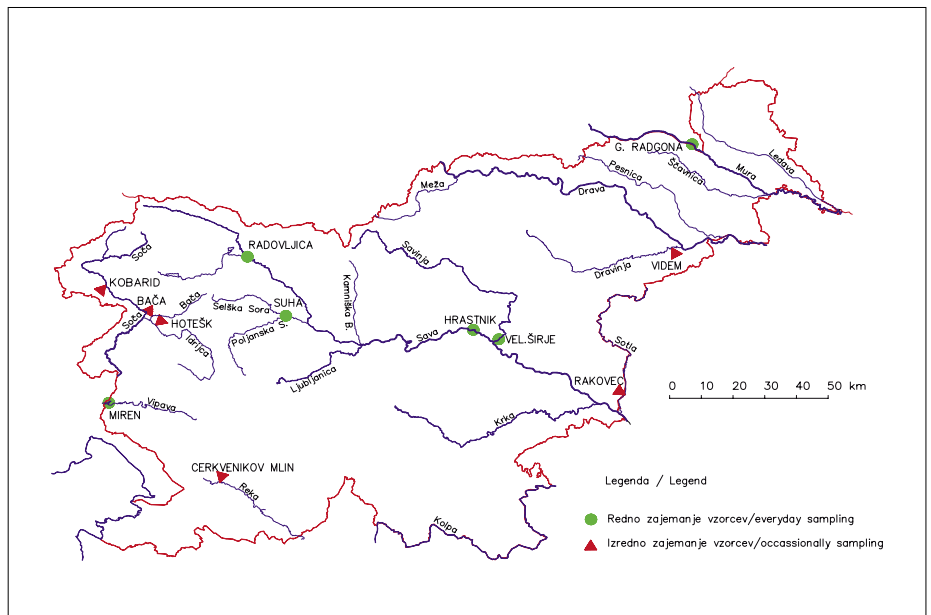
Med parametre državnega hidrološkega monitoringa površinskih voda sodita tudi vsebnost in transport suspendiranih snovi. Začetek

monitoringa vsebnosti suspendiranih snovi sega, glede na arhivske podatke ARSO, v leto 1955, ko so se začela vzorčenja v Radečah in v Šentjakobu na Savi ter v Velikem Širju na Savinji. V naslednjih letih se je monitoring vsebnosti suspendiranih snovi širil. V 55-letnem nizu je bilo v državni monitoring kalnosti skupno vključenih 44 različnih merilnih mest (Ulaga, 2010). V zadnjih letih odvzemajo vzorce vode na enajstih merilnih mestih (slika 2), vzorce odvzemajo opazovalci ročno (ARSO, 2011).



Slika 1 • Mreža merilnih mest za spremljanje hidroloških parametrov na vodotokih (ARSO, 2011)

Namen meritev vsebnosti suspendiranega materiala je izračun skupne množine suspendiranega materiala v vodi, ki se premesti skozi izbrani prerez vodotoka v enem letu. Zmnožek srednje profilne vsebnosti suspendiranih snovi s srednjo dnevno vrednostjo pretoka je transport suspendiranega materiala S (kg/s). Monitoring vsebnosti suspendiranega materiala izvaja ARSO po priporočilih Svetovne meteorološke organizacije (WMO) *Guide to hydrological practices* in v skladu s standardom ISO 4363:2002 *Measurement of liquid flow in open channels – Methods for measurement of characteristics of suspended sediment*. Odvzem vzorcev za analizo poteka ročno ali z batometrom. Vzorci so analizirani z metodo tehtanja suhe snovi po filtraciji. Ob izrednih hidroloških stanjih se hkrati z izvajanjem meritev pretoka odvzame tudi vzorec vode za potrebe monitoringa suspendiranega materiala. V izjemno povišanem vodnem stanju se hidrometrično delo z izrednim načrtom meritev lahko razširi tudi zunaj redne mreže vodomernih postaj. Število vzorcev je za vsako merilno mesto (Gornja Radgona na reki Muri, Hrastnik na Savi, Suha na Sori, Veliko Širje na Savinji, Miren na Vipavi, Kobarid na Soči, Hotešk na Idrijci, Bača pri Modreju na reki Bači, Cerkevnikov mlin na Reki, Kubed na Rižani, Podkaštel na Dragoniji) opredeljeno v programu hidrološkega monitoringa površinskih voda (ARSO, 2011). Ob visokih vodah se odvzame vzorce tudi še



Slika 2 • Merilna mesta z rednim zajemom (enkrat na dan) in izrednim zajemom (ob izrednih hidroloških razmerah) v Sloveniji v letu 2005 (Ulaga, 2005)

na drugih vodomernih postajah, kjer se je v preteklosti izvajal monitoring suspendiranega materiala, predvsem sta za primer srednje in spodnje Save zanimivi postaji Radeče (opazovanja od 1955. do 1993.) in Šentjakob (opazovanja od 1955. do 1994.) kakor tudi postaje na pritokih Gabrje na reki Mirni (opazovanja od 1977. do 1982.) in Rakovec na Sotli

(opazovanja od 1978. do 2006.). Razširitev in posodobitev merilne mreže hidrološkega monitoringa površinskih voda v Sloveniji (ARSO, 2007) ne obetata bistvenega preskoka na tem področju, ki bi lahko omogočilo izhodišče za načrtovanje obratovalnega hidrološkega monitoringa kalnosti za območje spodnje Save za potrebe verige vodnih elektrarn.

3 • METODE MERJENJA VSEBNOSTI SUSPENDIRANIH SNOVI

V posebnem prispevku v tej reviji smo pred kratkim povzeli teoretične osnove dinamike suspendiranih snovi (Mikoš, 2012a). To znanje o hidravličnih razmerah, pri katerih se rečni sedimenti premeščajo v suspendiranem (lebdečem) stanju, smo nadgradili z obravnavo o porazdelitvi koncentracije suspendiranih sedimentov v vertikalni v rečni strugi. Nadaljevali smo pregled zelo različnih metod za opravljanje sistematičnih terenskih meritev za določanje zrnivosti in masnih koncentracij suspendiranih sedimentov v rečni vodi (Mikoš, 2012b). Tako je povsem jasno, da je zajem vzorca lebdečih sedimentov z ročnim vzorčenjem z brega danes neustrezna metoda in jo moramo uporabiti v zelo omejen obsegu in za prvi grobi približek dejanskega dogajanja v reki. Danes imamo na voljo zelo različne in relativno uspešne metode za določanje zrnivosti in koncentracij suspendiranih sedimentov v rečni vodi, kadar jih

uporabimo glede na prevladujoče terenske razmere. Ker smo nekatere metode že podrobneje predstavili (Mikoš, 2012b), tukaj prikazujemo še metodo daljinskega zaznavanja. Metode daljinskega zaznavanja uporabljamo pri analizah rečnih procesov, predvsem njihove časovne in prostorske spremenljivosti (Marcus, 2010). Med omenjene procese lahko uvrstimo tudi koncentracijo suspendiranih snovi v vodnih telesih, torej v morju, jezerih in rekah. Glede na fizikalne (optične) lastnosti je mogoče z metodami daljinskega zaznavanja ocenjevati predvsem spremembe koncentracij suspendiranih snovi v površinskem sloju, in to dovolj velikih vodnih teles; razvoj se je začel že pred desetletji, podrobnejši pregled podaja Kilham s sodelavci (Kilham, 2012). Problem za bolj široko uporabo je v številnih parametrih optičnih lastnosti rečne vode, ki določajo odboj svetlobe od vodne površine: raztopljeni

organske snovi (ali raztopljeni organski ogljik), zrnavostna sestava in mineraloška sestava suspendiranih snovi (barva, oblika in velikost delcev). Kadar imamo na voljo terenske meritve površinskih koncentracij suspendiranih snovi, lahko oceno s satelitskih posnetkov ustrezno kalibriramo. Pomembno je tudi upoštevati pretočne razmere, ko koncentracija suspendiranih snovi ni vedno enakomerno razporejena po globini. Dodatni problem so tudi meteorološke razmere med snemanjem, ki vplivajo na kakovost satelitskega posnetka in njegovo interpretacijo.

Za določanje koncentracij suspendiranih snovi se uporabljajo različni satelitski posnetki, navajamo nekaj primerov uporabe:

a) Multispektralni posnetki Landsat TM (Thematic Mapper, kanal 3) so bili uporabljeni za analizo koncentracij suspendiranih snovi v rekah Ganges in Bramaputra (Islam, 2001), kjer koncentracije dosežajo ravni preko 1000 mg/l, za analizo suspendiranih sedimentov v zgornjem Bopalskem jezeru v Indiji (TM kanal 2, (Durga Rao, 2009))

kakor tudi (TM kanala 3 in 4) za analizo dotekajočih in odtekajočih suspendiranih sedimentov reke Ind v akumulacijo za pregrado Tarbela v Pakistanu (gre za 148 m visoko in po prostornini materiala največjo nasuto pregrado na svetu, ki ima vodozbirno območje 169.650 km² in površino akumulacije ~250 km² (Bhatti, 2007) – dodatno so uporabili pri analizi tudi posnetke SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre).

- b) Posnetki ameriškega satelita NOAA/AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmospheric Administration, kanal 1) so bili uporabljeni za analizo koncentracij suspendiranih snovi v rekah Ganges in Bramaputra (Islam, 2001).
- c) Posnetke indijskega satelita IRS-1C (Indian Remote-Sensing Satellite, WiFS – Wide Field Sensor) so uporabili za analizo koncentracij suspendiranih sedimentov v estu-

ariju Mahanadi v Bengalskem zalivu, Indija (Mishra, 2004).

Čeprav gre pri navedenih primerih za večja vodna telesa, se uporaba satelitskih posnetkov v zadnjih letih širi in tudi uporaba v Sloveniji je vse pogostejša: na primer uporaba satelitskih posnetkov SPOT za analizo hudourniških poplav (Lamovec, 2011) ali za analizo pobočnih masnih premikov (Jemec, 2008).

4 • PREDLOG HIDROLOŠKEGA MONITORINGA KALNOSTI ZA SPODNJO SAVO

Obstoječi hidrološki monitoring Agencije Republike Slovenije je na območju spodnje Save lahko le osnova za obratovalni monitoring verige vodnih elektrarn, predvsem je uporaben historiat teh meritev. Obratovanje verige elektrarn lahko temelji le na lastnem kakovostnem hidrološkem monitoringu vodostajev in pretokov reke Save. Tako IBE (IBE, 2012) v svoji študiji o obratovanju verige HE na spodnji Savi pri visokih vodah Save predlaga, da se poleg obstoječih vodomerov zgornje in spodnje vode posamezne HE vzpostavijo dodatno po trije vodomeri za vsako HE (HE Vrhovo, HE Boštanj in HE Blanca).

4.1 Raziskovalni hidrološki monitoring kalnosti na spodnji Savi

V nadaljevanju najprej podajamo opis raziskovalnega hidrološkega monitoringa kalnosti, ki naj se opravi kot pripravljalna faza za obratovalni hidrološki monitoring kalnosti. Raziskovalni hidrološki monitoring kalnosti na spodnji Savi naj obsega naslednje korake:

1. Določitev prostorske in časovne variabilnosti (spremenljivosti) suspendiranih sedimentov s terenskim vzorčenjem v obliki polne profilne hidrometrične meritve in z določitvijo značilnih zrnastostnih krivulj suspendiranih sedimentov (v različnih letnih časih in ob različnih poplavnih dogodkih). Zaradi stranskih hudourniških pritokov bi bilo smiselno analizo opraviti v treh prerezih na območju spodnje Save. Razjasniti si moramo, ali imamo opraviti z bimodalno sestavo (glina/melj = mulj in pesek) in kdaj ta bimodalnost nastopi. Obenem morajo te terenske meritve odgovoriti na vprašanje, kakšne maksimalne (prostorninske in masne) koncentracije suspendiranih snovi (v g/l) lahko pričakujemo

v določenih hidroloških prerezih, zato moramo določiti gostoto suspendiranih sedimentov. Odvzete vzorce naj se uporabi tudi za analizo mineraloške in kemijske sestave suspendiranih sedimentov.

Na vtoku in iztoku iz akumulacijskega jezera HE Boštanj med suspendiranimi sedimenti prevladujejo karbonati, muskovit/ilit in kremen, pojavlja pa se tudi klorit in v manjši meri plagioklazi in organski detritus, mineraloška sestava je bila določena z odvzemom 24 vzorcev med 1. septembrom 2006 in 5. junijem 2007 (Dolinar, 2008a, 2008b). Koncentracije suspendiranih sedimentov v teh odvzetih vzorcih so bile manjše od 0,1 g/l. Maksimalne koncentracije suspendiranih snovi, izmerjene kot dnevne vrednosti v vodomerni postaji Radeče, so bile v preteklosti do 0,8 g/l. Leta 2005 je bila izmerjena koncentracija na merilnem mestu Hrastnik na reki Savi nekaj čez 3 g/l. V času obsežnih poplav v Sloveniji septembra 2007 je bila najvišja izmerjena koncentracija suspendiranih sedimentov izmerjena 19. septembra 2007 na merilnem mestu Hrastnik na reki Savi, in sicer 6405 g/m³. Vrednost je podobna najvišji izmerjeni vrednosti za vsa merilna mesta v Sloveniji za obdobje 1985–2005, ki znaša 6026 g/m³ in je bila izmerjena 7. novembra 2000 na merilnem mestu Veliko Širje na reki Savinji (vir podatkov ARSO).

2. Na osnovi tega koraka se načrtuje ustrezna merilna oprema za obratovalni hidrološki monitoring, ki mora zagotoviti robustno obratovanje v času poplavnih valov in posebno poplavnih konic (da je oprema potopljena in ne preveč blizu vodne gladine ali dna struge reke Save zaradi interference z dnom in gladino) ter obratovanje tudi ob

visokih koncentracijah suspendiranih sedimentov. Več o merilni opremi podajamo pri opisu obratovalnega hidrološkega monitoringa.

3. Obenem naj se z opredelitvijo zasnove obratovalnega hidrološkega monitoringa (merilna oprema, optimalne lokacije) pristopi k razvoju dvodimenzijskega frakcijskega modela premeščanja sedimentov skozi vse akumulacije na odseku celotne verige na spodnji Savi. Osnovni namen takega modela je optimizacija premeščanja suspendiranih sedimentov v času povišanih pretokov reke Save (in njenih pritokov) z namenom čim manjšega odlaganja suspendiranih sedimentov v posameznih akumulacijah. Nujna je povezava tega dvodimenzijskega modela z modelom za obratovanje posameznih elektrarn, predvsem njihove hidromehanske opreme, ki je sedaj optimirana na eni strani na maksimalno proizvodnjo električne energije in na drugi strani na varstvo pred poplavami. K tema dvema robnima pogojema želimo dodati še tretjega, in sicer optimizacijo premeščanja suspendiranih snovi z osnovnim namenom, da se dolgoročno v akumulacijah useda čim manjši del dotekajočih suspendiranih sedimentov iz zaledja (porečje srednje Save in Savinje) in iz hudourniških zaledij neposrednih hudourniških pritokov v akumulacije na območju spodnje Save.
4. Opravi naj se študija uporabnosti metod daljinskega zaznavanja za oceno koncentracij suspendiranih sedimentov v akumulacijah na spodnji Savi. Uporaba digitalnih satelitskih posnetkov za te namene se je v svetu že preverila (Marcus, 2010) in bi jo bilo smiselno izvesti tudi za slovenske razmere. Če bi se metoda izkazala za dovolj zanesljivo, bi se lahko zmanjšalo število merilnih mest za potrebe obratovalnega hidrološkega monitoringa, čeprav je težko pričakovati, da bi metode daljinskega zaznavanja lahko uporabile on-line

v času poplavnega dogajanja z namenom optimizacije obratovanja glede na pretok suspendiranih sedimentov. Mnogo bolj so te metode obetavne pri izračunih letnega dogajanja (letne bilance dotoka, pretoka in odlaganja suspendiranih rečnih sedimentov), kjer omogočajo interpolacijo med posameznimi hidrološkimi prerezi, kjer opravljamo nadomestne (surogatne) meritve zrnivosti in koncentracij suspendiranih snovi v okviru terenskega obratovalnega hidrološkega monitoringa (Kilham, 2012): nujno umerjanje s terenskimi meritvami (površinske) koncentracije suspendiranih sedimentov za kalibracijo z daljinskim zaznavanjem (satelitskimi posnetki). Smiselno bi bilo tako študijo opraviti na reki Dravi, ki ima večje število akumulacijskih jezer, in seveda na reki Savi (predvsem spodnji Savi). Poseben problem predstavlja mineralogija delcev suspendiranih sedimentov, ki vpliva na odbojnost ter na korelacijo satelitskih podatkov in terenskih meritev. Zato smo tudi predlagali, da se ob vzorčenju suspendiranih sedimentov nujno opravi tudi analiza mineraloške in kemijske sestave (alineja a tega odstavka). Možno je, da bo treba razviti več korelacijskih enačb zaradi sezonskosti pojava.

4.2 Obratovalni hidrološki monitoring kalnosti na spodnji Savi

Obratovalni hidrološki monitoring kalnosti na spodnji Savi naj obsega naslednje korake:

1. Za vsako vodno elektrarno v verigi naj se predvidita dve merilni mesti (hidrološka profila) za izvedbo neprekinjenih meritev suspendiranih sedimentov, in sicer usklajeno s predlaganimi merilnimi mesti (vodomerni), ki so namenjeni usklajenemu obratovanju elektrarn v verigi na osnovi spremljanja gladin v času povišanih in poplavnih pretokov. Takšna postavitev merilnikov za spremljanje suspendiranih sedimentov je namreč smiselna tam, kjer imamo na voljo osnovne hidrološke podatke (prečni prerez, pretočna krivulja). Tako lahko z množenjem pretočnih količin vode (pretoka, m^3/s) s povprečno profilno koncentracijo suspendiranih sedimentov (g/l oz. kg/m^3) ocenimo specifični masni pretok lebdečih plavin (kalnosti; kg/s ali t/s) in z integracijo v času tudi skupno količino premeščenih suspendiranih snovi med poplavnim valom ali v koledarskem letu.

Za neprekinjene nadomestne (surogatne) terenske meritve koncentracije suspendiranih

sedimentov predlagamo naslednjo merilno opremo:

- Merilnik na principu akustičnega odboja, in sicer vodoravni ADCP, recimo model Teledyne RD h-ADCP z ustreznim dometom glede na širino izbranega hidrološkega prereza (večinoma model s 300 kHz in dometom do preko 200 m širine hidrološkega prereza, model s 600 kHz ima domet le okoli 85 m in bi prišel v poštev v ožjih prerezih, prednostno recimo na srednji Savi). Zaradi širjenja žarka je seveda bolje opravljati tovrstne meritve v zoženih prerezih, kjer je tudi, hidravlično gledano, mogoče pričakovati nekoliko višje pretočne hitrosti, bolj grobo zrnavost suspendiranih snovi in manjše odlaganje rečnih sedimentov – stabilnejši prerez. S to tehnologijo ima dobre izkušnje tudi ARSO, kjer so uporabili ADCP-proizvajalca Teledyne RD Instruments Workhorse Rio Grande 1200 kHz (Trček, 2006) in model h-ADCP Channel Master 600 kHz istega proizvajalca (Trček, 2005, 2010). Tako recimo ARSO v letu 2007 ni več opravil niti ene hidrometrične meritve za potrebe določanja pretokov vode s hidrometričnim krilom in večino meritev v tem letu od preko 1000 je že opravil z merilniki ADCP.
 - Merilnik motnosti SOLITAX highline sc, ki ga je ARSO preizkušal na vodomerni postaji Suha na reki Sori in imel s tem merilnikom dobre izkušnje (Ulaga, 2010). Izkušnje drugih kažejo na to, da ima ta model višjo zgornjo mejo koncentracij suspendiranih snovi, ki jih lahko meri (do 4000 NTU oz. do 500 g/l), v primerjavi z modelom YSI 6136 (le do 1000 NTU). Pri izbiri merilnika je treba upoštevati maksimalne pričakovane koncentracije, ker tovrstni merilniki pri višjih koncentracijah ne delujejo več v linearnem območju (odnos med izmerjeno motnostjo in koncentracijo suspendiranih snovi).
2. Idealno bi bilo občasne meritve za potrebe kalibracije opravljati v istih hidroloških prerezih, kjer bo postavljena oprema za neprekinjene meritve, vendar je občasne meritve bistveno lažje opravljati s premostitvijo, saj je nujno občasne meritve opraviti kot polno profilno meritev (v več pretočnih vertikalah, če je mogoče, po vsej njeni višini). Lokacije možnih hidroloških prečnih prerezov za izvedbo (polnih) hidrometričnih meritev z izbranimi merilniki so za akumulacije vodnih elektrarn naslednje: HE Vrhovo: most v Zidanem mostu, most v Radečah in most

v Rečici; HE Boštanj: ni premostitev; HE Blanca: most v Sevnici (2-krat); HE Krško: most v Brestanici; HE Brežice, HE Mokrice: most v Krškem (2-krat), most v Gornjem Lenartu, most v Čatežu ob Savi.

Seveda pa je možno tovrstne polne profilne meritve opraviti tudi v profilu s polno žično premostitvijo, če je mogoče, z avtomatskim delovanjem in ne le ročnim. Glede na vpliv, ki ga most predstavlja za rečni tok, bi morali dati prednost žičnim premostitvam pred cestnimi ali železniškimi mostovi – navsezadnje je za izvedbo meritev z mostu nujno predhodno pridobiti soglasje za promet pristojnega lokalnega organa (na mostu moramo namreč postaviti žerjavno napravo za dvigovanje in spuščanje merilnikov v posamezni vertikali).

Za občasne terenske meritve koncentracije suspendiranih sedimentov, ki so namenjene kalibraciji prej opisanih neprekinjenih meritev, predlagamo naslednjo merilno opremo:

- Vzorčevalnik vode in suspendiranih sedimentov US D-96 je izokinetični vzorčevalnik z vrečko (bag sampler), namenjen vzorčenju suspendiranih snovi v večjih vodotokih in za vzorčenje njihove kakovosti. Uporablja se skupaj z manjšo žerjavno napravo in vitlom. Vzorčevalnik izpolnjuje ameriške (USGS) zahteve za »čistim« vzorčenjem, takrat uporabimo teflonsko vrečko (na primer vzorčenje za potrebe analize vsebnosti težkih kovin, kot je denimo živo srebro). Naprava je težka 60 kg, telo je izdelano iz medenine in aluminija s plastičnim repom in zajema do 3 litre vzorca v posebno polietilensko vrečko. Maksimalna globina, do katere lahko vzorčimo, je odvisna od odprtine (premera) vtočnega nosu na vzorčevalniku in znaša od 11,9 m do 33,5 m. Vzorčevalna vrečka se skupaj z okvirjem vstavi v telo vzorčevalnika. Okvir se preprosto izvleče iz vzorčevalnika in vrečka tako zlahka odstrani. Vzorčevalna vrečka se lahko izprazni, kadar odvezemo kompozitni vzorec (večkrat po 3 l za vsako merilno vertikalo v prečnem prerezu), ali pa se zapečati in odnese v laboratorij za kasnejše analiziranje vzorca. Analiza lahko poteka po predpisanih postopkih filtriranja in sušenja vzorca za določitev sušenega ostanka, lahko pa odvzete vzorce tudi analiziramo s prenosnim merilnikom zrnivosti suspendiranih snovi LISST-Portable, ki deluje na principu laserske difrakcije. Omenjeni vzorčevalnik

US D-96 in manjšo žerjavno napravo kakor tudi LISST-Portable ima v lasti tudi Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

- Merilnik zrnivosti LISST-SL deluje na principu laserske difrakcije in je bil v zadnjih letih predmet terenskega testiranja in dodatnega razvoja. Prototip tega merilnika (brez zagotovljenega preprostega izokinetičnega zajema) in manjšo žerjavno napravo ima v lasti Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.
- Smiselno pa bi bilo tudi izvajati ročni odvzem (stekleničenje) zaradi navezave na stare podatke, kjer je bil odvzem

vzorcev za določanje koncentracij suspendiranega materiala opravljen s takim načinom odvzema. Pri spremembi tehnologije je nujno imeti vsaj določen delež meritev z novo tehnologijo, opravljen tudi na stari način, zaradi ocene vpliva nove tehnologije na rezultate meritev.

4.3 Izvedba predlaganega hidrološkega monitoringa kalnosti na spodnji Savi

Raziskovalni hidrološki monitoring kalnosti bi lahko izvajali tri leta in ga je nujno začeti čim prej, saj bi ga morali izvesti že v preteklih letih, vzporedno z gradnjo HE Boštanj in HE Blanca. Obratovalni hidrološki monitoring kalnosti pa bi bilo smiselno postaviti vzporedno z gradnjo

posameznih elektrarn. Ker je to na spodnji Savi že seveda nekoliko pozno, naj se čim prej izvede v še nedokončanih stopnjah. Lahko pa seveda upamo, da bosta umeščanje in gradnja vseh elektrarn do meje s Hrvaško prehitela izvedbo raziskovalnega hidrološkega monitoringa kalnosti in omogočila vzporedno izvedbo obratovalnega hidrološkega monitoringa kalnosti. Za namestitve opreme je celo bolje, da elektrarna ni pod polno zaježitvijo, za normalno obratovanje pa je seveda nujno, da je oprema pod vodno gladino (kako normalne zaježitve). Mora pa za postavitve merilne opreme biti dokončana izvedba protiplovnih nasipov oziroma kamnite obloge brežin akumulacijskega jezera posamezne vodne elektrarne.

5 • SKLEP

Na podlagi teoretičnega poznavanja zakonitosti dinamike suspendiranih rečnih sedimentov (Mikoš, 2012a) in na osnovi temeljitega pregleda različnih metod terenskih meritev kalnosti v rekah (Mikoš, 2012b) smo ob pregledu državnega hidrološkega monitoringa v Republiki Sloveniji na področju suspendiranega materiala prišli do predloga najprej raziskovalnega in nato še obratovalnega monitoringa

suspendiranih sedimentov na spodnji Savi. Predlagani način monitoringa suspendiranih sedimentov, ki je v tem prispevku predstavljen za spodnjo Savo, se lahko v prilagojeni obliki razširi tudi na območje vodnih elektrarn na srednji Savi. Predvsem je nujno, da se na območju predvidene gradnje na srednji Savi med HE Tacen in HE Vrhovo (sotočje s Savinjo) še pred gradnjo posameznih vodnih

elektrarn vzpostavi hidrološki monitoring z namenom določitve »naravnega« ozadja, to je izhodiščnega stanja pred gradnjo verige. Obratovalni hidrološki monitoring suspendiranih snovi po koncu gradnje verige na srednji Savi pa bo moral biti seveda enakovreden tistemu na spodnji Savi in z njim tudi sinhroniziran, saj bo veriga delovala kot enota. Na območju srednje Save sta danes delujoči merilni postaji Šentjakob in Hrastnik, ki bi se lahko nadgradili v smislu obratovalnega hidrološkega monitoringa z neprekinjenimi meritvami suspendiranih snovi.

6 • ZAHVALA

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

Hidrotehnika, hidravlika in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno de-

javnost Republike Slovenije. Avtor se zahvaljuje tudi za sofinanciranje s strani HSE Invest d. o. o. iz Maribora.

7 • LITERATURA

- ARSO, Strokovna izhodišča za razširitev in posodobitev merilne mreže hidrološkega monitoringa površinskih voda, Agencija Republike Slovenije za okolje, str. 68, 2007.
- ARSO, Program hidrološkega monitoringa površinskih voda za leto 2012, Agencija Republike Slovenije za okolje, str. 22, povzeto po: <http://www.arso.gov.si/vode/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/Program%20hidrolo%c5%a1kega%20monitoringa%20povr%c5%a1inskih%20voda%20za%202012.pdf>, 2011.
- Bhatti, A. M., Nasu, S., Takagi, M., Application of remotely sensed data for quantification of suspended sediment in turbid river water, Proceedings of 3rd Int. Symposium on Geo-Information for Disaster Management", Toronto, Canada, 22-25 May 2007, str. 8, povzeto po: http://management.kochi-tech.ac.jp/PDF/COERreport_2008/2.4/11%20Paper-Asif-Canada-2007.pdf, 2007.
- Dolinar, B., Kovačič, B., Kramer, J., Kamnik, R., Meritve vsebnosti suspendiranega materiala v akumulacijskem bazenu HE Boštanj, Zbornik 19. Mišičev vodarski dan, 211–218, 2008a.
- Dolinar, B., Vrecl-Kojc, H., Trauner, L., Analysis of concentration and sedimentation of suspended load in the reservoirs, Acta geotechnica Slovenica, letnik, št. 2, 31–39, 2008b.

- Durga Rao, K. H. V., Singh, A. K., Roy, P. S., Study of Morphology and Suspended Sediment of Bhopal Upper Lake using Spatial Simulation Technique and Remote Sensing Data, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, letnik 37, št. 3, 433–441, 2009.
- GEATEH, Plavine v zajezitvah verige hidroelektrarn na reki Savi – študijsko raziskovalna naloga, vodilni partner konzorcija in odgovorni vodja projekta GEATEH, d. o. o., Ljubljana, str. 238, 2011.
- IBE, Hidrodinamični in transportni model detajla vtoka in iztoka NEK – 3D-računi transporta plavin in dodatni scenariji obratovanja NEK – študija, Inženirski biro Elektroprojekt, Ljubljana, str. 53, 2011.
- IBE, Obratovanje verige HE na spodnji Savi pri visokih vodah Save, Inženirski Biro Elektroprojekt, d. d., Ljubljana, 2012.
- Islam, M. R., Yamaguchi, Y., Ogawa, K., Suspended sediment in the Ganges and Brahmaputra Rivers in Bangladesh: observation from TM and AVHRR data, *Hydrological Processes*, letnik 15, št. 3, 493–509, 2011.
- Jemec, P., Mikoš, M., Pobočni masni premiki na satelitskih posnetkih SPOT: Primer območja Železnikov po vodni ujmi septembra 2007 = Slope mass movements on SPOT satellite images: A case of the Železniki area (W Slovenia) after flash floods in September 2007, *Geologija*, letnik 51, št. 2, 235–243, 2008.
- Kilham, N. E., Roberts, D., Singer, M. B., Remote sensing of suspended sediment concentration during turbid flood conditions on the Feather River, California – A modeling approach, *Water Resources Research*, letnik 48, W01521, str. 18, 2012.
- Kryžanowski, A., Mikoš, M., Brilly, M., Dragocen obnovljivi vir energije nam teče skozi prste?: hidroelektrarne na srednji Savi. Delo, 7. julij 2011, letnik 53, št. 155, 18 (*Znanost*), 2011.
- Kryžanowski, A., Mikoš, M., Šušteršič, J., Ukrainczyk, V., Planinc, I., Testing of Concrete Abrasion Resistance on Hydraulic Structures on the Lower Sava River, *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, letnik 58, št. 4, 245–254, 2012.
- Lamovec, P., Mikoš, M., Analiza poplav v uporabo satelitskih posnetkov – primer hudourniške poplave v Selški dolini leta 2007 = Analysis of floods using satellite images – case study of the 2007 torrential flood in the Selška valley, *Geodetski vestnik*, letnik 55, št. 3, 483–494, 2011.
- Marcus, A. W., Fonstad, M. A., Remote sensing of rivers: The emergence of a subdiscipline in the river sciences, *Earth Surface Processes and Landforms*, letnik 35, št. 15, 1867–1872, 2010.
- Mikoš, M., Prodna bilanca reke Save od Jesenic do Mokric = Sediment budget of the Sava river from Jesenice to Mokrice, *Gradbeni vestnik*, letnik 49, št. 9, 208–219, 2000a.
- Mikoš, M., Zasipavanje akumulacijskih jezer na reki Savi = Sedimentation of retention basins on the Sava River, *Gradbeni vestnik*, letnik 49, št. 10, 224–230, 2000b.
- Mikoš, M., Kalnost v rekah kot del erozijsko-sedimentacijskega kroga = Suspended loads in rivers as a part of the erosion and sedimentation cycle, *Gradbeni vestnik*, letnik 61, št. 6, 129–136, 2012a.
- Mikoš, M., Metode terenskih meritev suspendiranih sedimentov v rekah = Methods of field measurements of suspended sediments in rivers, *Gradbeni vestnik*, letnik 61, št. 7, 151–158, 2012b.
- Mishra, A. K., Retrieval of suspended sediment concentration in the estuarine waters using IRS-1C WIFS data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, letnik 6, št. 2, 83–95, 2004.
- Širca, A., Hidroelektrarne na Spodnji Savi – He Blanca. *Gradbeni vestnik*, letnik 59, št. 1, 19–20, 2010.
- TL, Osnova hidroelektrične centrale grada Zagreba na rijeci Savi između Rajhenburga i Čateža, *Tehnički list – organ udruženja Jugoslovenskih inženjera i arhitekta*, letnik 7, št. 11, 169–174, št. 13&14, 211–215, povzeto po: <http://www.he-ss.si/pdf/tehnichni-list.pdf>, 1925.
- Trček, R., Uporaba horizontalnega merilnika hitrosti (h-ADCP) za določitev pretoka rek, Agencija Republike Slovenije za okolje, datum objave 26. 1. 2005, str. 8, povzeto po: http://www.arso.gov.si/vode/reke/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/H_ADCP_ARSO.pdf, 2005.
- Trček, R., Določitev pretokov rek z uporabo horizontalnih merilnikov hitrosti (h-ADCP) = Determination of river discharges by using horizontal velocimeters (h-ADCP), *Hidrološki letopis Slovenije 2007 = The 2007 Hydrological Yearbook of Slovenia*, I. del Razvoj na področju hidrološkega monitoringa = Part I: Developments in the field of hydrological monitoring, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, letnik 18, 24–31, povzeto po: <http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/I.%20Razvoj%20na%20podro%C4%8Dju%20hidrolo%C5%A1kega%20monitoringa.pdf>, 2010.
- Trček, R., Cankar, B., Meritve visokovodnih pretokov slovenskih rek z ultrazvočnimi merilniki = High discharge measurements of Slovene rivers using acoustic profilers, *UJMA*, letnik 20, 182–187, 2006.
- Uлага, F., Vsebnost in premeščanje suspendiranega materiala v slovenskih rekah, Agencija Republike Slovenije za okolje, datum objave 10. 10. 2005, str. 7, povzeto po: <http://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/meritveSM.pdf>, 2005.
- Uлага, F., Vsebnost in premeščanje suspendiranega materiala v rekah = Concentration and transport of suspended material in rivers, *Hidrološki letopis Slovenije 2008 = The 2008 Hydrological Yearbook of Slovenia*, II. del: Pregled hidroloških razmer v letu 2008 = Part II: Review of hydrological conditions in the year 2008, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, letnik 19, 56–60, povzeto po: http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/II.Pregled_Review.pdf, 2010.
- Uлага, F., Ravnik, L., Testing of Automatic Turbidity Sensor Solitax_sc and Evaluation of Suspended Sediment in Rivers, *Proceedings of BALWOIS 2010*, str. 9, 2010.