

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Poredoš, T., 2016. Meritve kalnosti v vodotokih. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Rusjan, S., somentor Mikoš, M.): 37 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5827/>

Datum arhiviranja: 14-10-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Poredoš, T., 2016. Meritve kalnosti v vodotokih. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Rusjan, S., co-supervisor Mikoš, M.): 37 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5827/>

Archiving Date: 14-10-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
VODARSTVO IN OKOLJSKO
INŽENIRSTVO**

Kandidatka:

TEA POREDOŠ

MERITVE KALNOSTI V VODOTOKIH

Diplomska naloga št.: 62/B-VOI

MEASURING TURBIDITY IN WATER COURSES

Graduation thesis No.: 62/B-VOI

Mentor:

doc. dr. Simon Rusjan

Somentor:

prof. dr. Matjaž Mikoš

Ljubljana, 15. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVA

Spodaj podpisani/-a študent/-ka **Tea Poredoš**, vpisna številka **26300345** avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Meritve kalnosti v vodotokih**

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študenta/-ke:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 556.12:556.53(497.4)(043.2)
- Avtor:** Tea Poredoš
- Mentor:** doc. dr. Simon Rusjan
- Somentor:** prof. dr. Matjaž Mikoš
- Naslov:** Meritve kalnosti v vodotokih
- Tip dokumenta:** diplomska naloga – univerzitetni študij
- Obseg in oprema:** 37 str., 15 sl., 20 graf.
- Ključne besede:** kalnost, motnost, suspendirane snovi, merska oprema, pretok

IZVLEČEK

Namen diplomske naloge je predstaviti metode za merjenje kalnosti v vodotokih ter opraviti pregled nad ocenami količin suspendiranega materiala iz literature.

V prvem delu diplomske naloge je predstavljena teorija o nastanku suspendiranih snovi, predstavljene so metode za merjenje suspendiranih snovi v vodotokih ter osnovne enačbe za izračun suspendiranih plavin. Pripravljen je tudi kratek opis monitoringa kalnosti.

V drugem delu so analizirani podatki o pretoku in suspendiranih snoveh iz postaje Dvor na Gradaščici. S pomočjo teh podatkov se dobi vsebnost suspendiranega materiala v vodotoku v kilogramih oziroma tonah. Z izračunanimi vrednostmi se nato izrišejo grafi, ki kažejo ujemanje med velikostjo pretoka ter vsebnostjo suspendiranih snovi. Na koncu je izračunana še napaka meritev/merske opreme.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	556.12:556.53(497.4)(043.2)
Author:	Tea Poredoš
Supervisor:	Assist. Prof. Simon Rusjan, Ph.D.
Co-supervisor:	Prof. Matjaž Mikoš, Ph.D.
Title:	Measuring Turbidity in Watercourses
Document type:	Diploma thesis, University studies
Scope and tools:	37 p., 15 fig., 20 graphs
Keywords:	turbidity, opacity, suspended material, measuring equipment, discharge

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is to present the methods for measuring turbidity in watercourses and review the literature that estimates the amounts of suspended material.

The first part of the thesis begins with a theory on the origin of suspended material. In addition, methods for measuring suspended material in watercourses and basic equations for determining suspended solids are presented.

The second part analyzes the discharge and suspended material data from the Dvor gauging station on the Gradaščica river. This data can help us measure the content of suspended material in the watercourse, either in kilograms or tonnes. We can then use the calculated values to draw graphs which show the correlation between the volume of the discharge and the content of suspended material. Finally, uncertainty and equipment error are calculated.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju doc. dr. Simonu Rusjanu in somentorju prof. dr. Matjažu Mikošu za vso pomoč in vodenje pri pisanju diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi svoji družini in prijateljem za pomoč in podporo v vseh letih študija.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
KAZALO SLIK.....	IX
KAZALO GRAFIKONOV.....	XI
1 UVOD	1
2 KALNOST	2
2.1 Premeščanje suspendiranih sedimentov po pobočju	2
2.1.1 Erozija tal	3
2.1.2 Podpovršinsko premeščanje	3
2.1.3 Erozija brežin vodotoka	3
2.2 Premeščanje suspendiranih sedimentov v strugi.....	4
2.2.1 Mreža merilnih postaj	4
2.2.2 Vsebnosti suspendiranega materiala v strugi	6
3 METODE TERENSKIH MERITEV KALNOSTI	10
3.1 Terenske metode.....	10
3.1.1 Stekleničenje.....	10
3.1.2 Črpalno vzorčenje	11
3.1.3 Akustična metoda.....	11
3.1.4 Optična metoda	11
3.1.5 Odbojnost koncentriranega žarka	12
3.1.6 Laserska difrakcija	12
3.1.7 Jedrska metoda.....	13
3.1.8 Daljinski spektralni odboj.....	13
3.2 Nadomestne metode	13
3.3 Kalibracija neprekinjenih meritev suspendiranih snovi	14
4 OCENE KOLIČIN SUSPENDIRANIH SEDIMENTOV	15
4.1 Modeliranje premeščanja suspendiranih sedimentov v strugi vodotoka.....	15
5 MERITVE KALNOSTI NA GRADAŠČICI	17
5.1 Eksperimentalna porečja v Sloveniji.....	17
5.1.1 Eksperimentalno porečje Gradaščice z Glinščico	17
5.2 Lokacija meritev	19
5.3 Merilna oprema.....	20
5.4 Rezultati meritev.....	22

5.4.1 Prvo obdobje (20.9.2014 do 2.7.2015)	22
5.4.2 Drugo obdobje (4.9.2015 do 22.10.2015)	32
5.4.3 Napake pri meritvah	34
6 SKLEP	35
7 VIRI	36

KAZALO SLIK

Slika 1: Dinamika premeščanja lebdečih plavin na nivoju rečnega odseka (Rusjan, 2007)	2
Slika 2: Merilna mesta z rednim zajemom in izrednim zajemom v Sloveniji v letu 2005 (Mikoš, 2012b)	5
Slika 3: Integralni globinski vzorčevalnik suspendiranih snovi US D-96 Bag Sampler (www.ksh.fgg.uni-lj.si, 2016)	10
Slika 4: Prenosni vakuumski vzorčevalnik tekočin Manning - model VST (www.ksh.fgg.uni-lj.si, 2016)	11
Slika 5: Merilec motnosti HACH Scatter 6 (SS6) Turbidimeter (www.ksh.fgg.uni-lj.si, 2016) .	12
Slika 6: Merilec LISST Portable (http://www.sequoiasci.com, 2016).....	13
Slika 7: Senzor motnosti TurbiTech 2000LA (www.parotech.co.uk , 2016)	14
Slika 8: Lokacija porečja Gradaščice na karti Slovenije z označenimi hidro-geografskimi območji (Bezák et al., 2015).....	17
Slika 9: Prispevno območje reke Gradaščice (ARSO, 2013).....	18
Slika 10: Rečna mreža Malega Grabna, Mestne Gradaščice in Glinščice (www.geopedia.si, 2016)	19
Slika 11: Lokacija merilne postaje Dvor - Gradaščica (www.geopedia.si, www.google.si/maps, 2016)	20
Slika 12: Merilec Hydrolab MS5 (www.ott.com, 2016).....	20
Slika 13: Hydrolab MS5 na merilni postaji Dvor - Gradaščica (osebni arhiv doc. dr. Simona Rusjana, 2016)	21
Slika 14: Višina padavin od jutra 21. oktobra do zgodnjega popoldneva 22. oktobra na podlagi meritev meteoroloških postaj in radarskih meritev padavin. (ARSO, 2016).....	24
Slika 15: Poplave v Ljubljani (ARSO, 2016)	24

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO GRAFIKONOV

Graf 1: Petdesetletni niz spremljanja suspendiranega materiala v Muri in v Savinji (Ulaga, 2006)	5
Graf 2: Srednji dnevni pretok in vsebnost suspendiranega materiala zabeleženega z dnevnim vzorčenjem na Savinji v letu 2000 (Ulaga, 2005)	6
Graf 3: Vsebnost suspendiranega materiala na Dravinji ob izrednih hidroloških razmerah (Ulaga, 2005)	7
Graf 4: Največje letne konice pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala na Muri (Ulaga, 2005)	7
Graf 5: Največje letne konice pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala na Savinji (Ulaga, 2005)	8
Graf 6: Največje letne konice pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala v reki Vipavi (Ulaga, 2005)	8
Graf 7: Vsebnost suspendiranega materiala, pretok in padavine za Savinjo in Muro avgusta 2005 (Ulaga, 2006)	9
Graf 8: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala za obdobje od 20.9.2014 do 2.7.2015	22
Graf 9: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala 22.10.2014	23
Graf 10: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 4.11.2014 do 21.1.2015	25
Graf 11: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 5.11.2014 do 12.11.2014	26
Graf 12: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 12.11.2014 do 17.11.2014	27
Graf 13: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 17.11.2014 do 21.11.2014	28
Graf 14: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 30.11.2014 do 4.12.2014	28
Graf 15: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 25.3.2015 do 30.3.2015	29
Graf 16: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 6.5.2015 do 2.7.2015	30
Graf 17: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 21.6.2015 do 28.6.2015	31

Graf 18: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala za obdobje od 4.9.2015 do 22.10.2015	32
Graf 19: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala za obdobje od 4.9.2015 do 9.9.2015	32
Graf 20: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala za obdobje od 13.10.2015 do 22.10.2015	33

1 UVOD

Kalnost v vodotokih povzročajo različni erozijski pojavi, ki se pojavljajo v povirnih delih rek ali pa z rušenjem brežin in poglobljanjem rečnega dna. Transport erodiranega materiala lahko vpliva na obseg in intenziteto uničujočih učinkov voda in tako spremeni pokrajino, naredi škodo na infrastrukturnih objektih ali celo oteži naravni cikel kroženja vode.

Zaradi problemov, ki jih povzroča kalnost v vodotokih se spremlja pretok in vsebnost suspendiranega materiala v izbranem merskem profilu na več merilnih mestih po Sloveniji. Merjenja se ponekod izvajajo redno, na nekaterih merilnih mestih pa le ob izrednih hidroloških razmerah. Izvajajo se z neposrednimi ali posrednimi terenskimi metodami, ki se jih kasneje lahko analizira v laboratoriju. Podatke pridobljene z meritvami se analizira s pomočjo računalniških programov. Vsebnost suspendiranega materiala oziroma kalnost v vodotoku se določi s pomočjo izmerjenega pretoka in nitratov, vsebnostjo suspendiranih snovi v vodotoku. Grafi običajno prikazujejo ujemanje med pretokom in vsebnostjo suspendiranega materiala. Najvišje vsebnosti suspendiranega materiala v vodotoku običajno nastopijo nekoliko pred viškom visokovodnega vala.

V teoretičnem delu diplomske naloge bom opredelila pojem kalnost ter vzroke nastanka in posledice, ki jih pusti za seboj. Predstavila bom različne metode za merjenje kalnosti v vodotokih in pripravila pregled nad ocenami količin suspendiranega materiala iz literature. Na kratko bom predstavila tudi model monitoringa. V praktičnem delu naloge pa bom predstavila eksperimentalno porečje Gradašnice in terenske meritve kalnosti na njem. Analizirala bom količine suspendiranih plavin, spranih z obravnavanega prispevnega območja Gradašnice, s podatki iz merilne postaje Dvor.

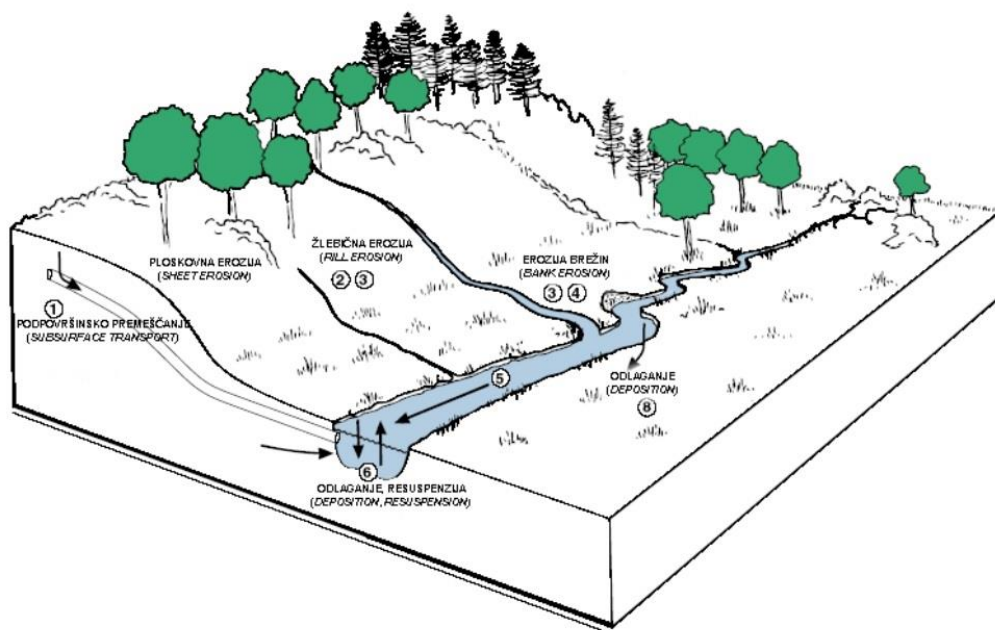
2 KALNOST

Kalnost v reki je posledica premeščanja plavin in povzroča motnost, da ne vidimo rečnega dna. Povzročajo jo kalni delci, pogosto so to sedimenti velikosti gline in melja, ki v reko pridejo s površinskim spiranjem zemljin. Lebdeče plavine so sedimenti v rečni strugi, ki se pod vplivom vodnega toka vsaj občasno premeščajo in so le redko v stiku z dnom vodotoka. Kalnost je zaradi večjih pretokov izrazita predvsem v času deževja in posledično poplav.

V vodotoku lahko pride do spremembe vsebnosti suspendiranih sedimentov zaradi spremenjene rabe prispevnih površin vodotoka. Kmetijske površine so največji vir lebdečih plavin, hkrati pa se le te odlagajo na poplavne ravnice, ki nato predstavljajo rodovitne kmetijske površine. Vir lebdečih plavin so tudi industrijska in urbana območja.

Posledica transporta materiala je spreminjanje pokrajine, škoda na infrastrukturnih objektih, povzročanje škode ob poplavah na kmetijskih zemljiščih, zapolnjevanje akumulacijskih bazenov, spremembe ob in v rečni strugi, zablatenje rečnega dna zaradi usedanja drobnih zrn in otežen naravni cikel kroženja vode, saj je oteženo dreniranje v podtalnico. (Uloga, 2006)

Glavni dejavniki premeščanja sedimentov so padavine, geomorfologija, vegetacija in pedološke značilnosti. Glavni dejavnik premeščanja po pobočju pa je vodni tok, ki je lahko spodbujen s pljuski dežnih kapljic. (Rusjan, 2007)



Slika 1: Dinamika premeščanja lebdečih plavin na nivoju rečnega odseka (Rusjan, 2007)

2.1 Premeščanje suspendiranih sedimentov po pobočju

Premeščanje suspendiranih sedimentov po pobočju imenujemo sproščanje. Le ti se po pobočju premeščajo (sproščajo) in tako prehajajo v rečno strugo s pomočjo erozije tal, podpovršinskega premeščanja ali/in erozije brežin vodotoka.

Suspendirani sedimenti se lahko sproščajo zaradi udarcev dežnih kapljic ali zaradi površinskega padavinskega odtoka. Na stopnjo sproščanja suspendiranih sedimentov vplivajo tudi značilnosti zemljine. (Rusjan, 2007)

2.1.1 Erozijska tal

Erozijska tal je površinsko spiranje in odplavljanje zemljin zaradi delovanja tekoče vode. (Laubel, 2004)

Delimo jo lahko na:

- ploskovno erozijo, ki je večinoma enakomerno razporejena po površju tal,
- žlebično erozijo, ki se pojavi, ko pride do koncentriranja površinskega odtoka vode in takrat se tvorijo žlebiči,
- medžlebično erozijo, ki nastane zaradi udarcev dežnih kapljic na površje tal in
- jarkovno erozijo, ki nastane z odtekanjem površinske vode.

Vse omenjene oblike erozije tal lahko nastopijo ločeno, a gre v večini primerov za kombinacijo različnih oblik erozije tal. (Rusjan, 2007)

2.1.2 Podpovršinsko premeščanje

Podpovršinsko premeščanje je premeščanje drobnih delcev zemljin skozi različne plasti talnih horizontov pod vplivom pronicajoče vode. (Rusjan, 2007)

2.1.3 Erozijska brežin vodotoka

Suspendirane snovi, ki se sproščajo s posedanjem brežin strug z erozijskim delovanjem vodnega toka, lahko predstavljajo tudi 50% vseh lebdečih plavin. (Rusjan, 2007)

Najpomembnejši dejavniki, ki vplivajo na intenzivnost erozijskih procesov na brežinah, so:

- lastnosti vodnega toka,
- sestava materiala v brežini,
- podnebne razmere,
- vlažnost zemljine,
- morfologija struge vodotoka,
- prisotnost vegetacije na brežini in
- antropogeni vplivi.

Prostorska spremenljivost erozijskih procesov je odvisna od velikosti prispevnega območja, razmerja med deležem glinenih in meljastih delcev, prisotnosti prodnatega sloja, razmerja med širino in globino struge, polmera rečnega zavoja, padca dna struge in višine brežin. (Rusjan, 2007)

2.2 Premeščanje suspendiranih sedimentov v strugi

Po tem, ko delci zemljine preidejo v vodotok, se prične premeščanje suspendiranih sedimentov v strugi. Večji delci se usedejo na tla, kar opisujemo s pojmom prodonosnost. Bolj fini delci pa lebdi v vodi in se prenašajo z vodnim tokom, kar imenujemo kalnost.

S povečanjem hitrosti vode prehaja material z rečnega dna v suspenz, s tem pa se povečuje količina lebdečega nanosa, ki je na ta način ob visokovodnih stanjih močno povečana.

Dinamiki gibanja plavin v vodi sledimo s spremljanjem pretoka ter z merjenjem vsebnosti suspendiranega materiala v vzorcih vode. (Ulaga, 2006)

2.2.1 Mreža merilnih postaj

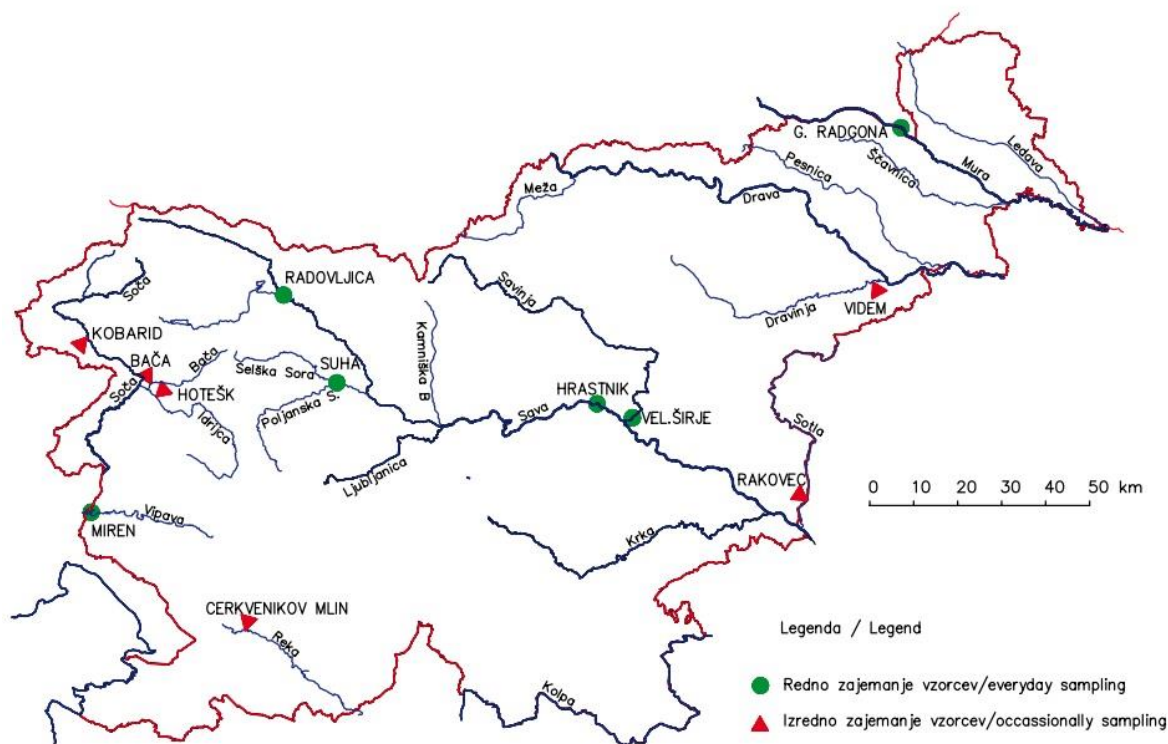
Pogostost odvzema vzorcev na posamezni postaji je odvisna od značilnosti prispevnega območja in od rečnega režima. Večina materiala se premesti v nekaj visokovodnih situacijah, zaradi česar je potrebno pogosto vzorčenje v času trajanja visokih valov.

V Sloveniji se je vzorčenje suspendiranega materiala na merilnih postajah začelo leta 1955, ko so začeli z odvzemanjem vzorcev v porečju reke Savinje (Veliko Širje) in na Savi (Radeče in Šentjakob). Od leta 1966 redno vzorčenje poteka tudi na reki Muri in v Soči, na Vipavi pa od leta 1985. (Ulaga, 2005)

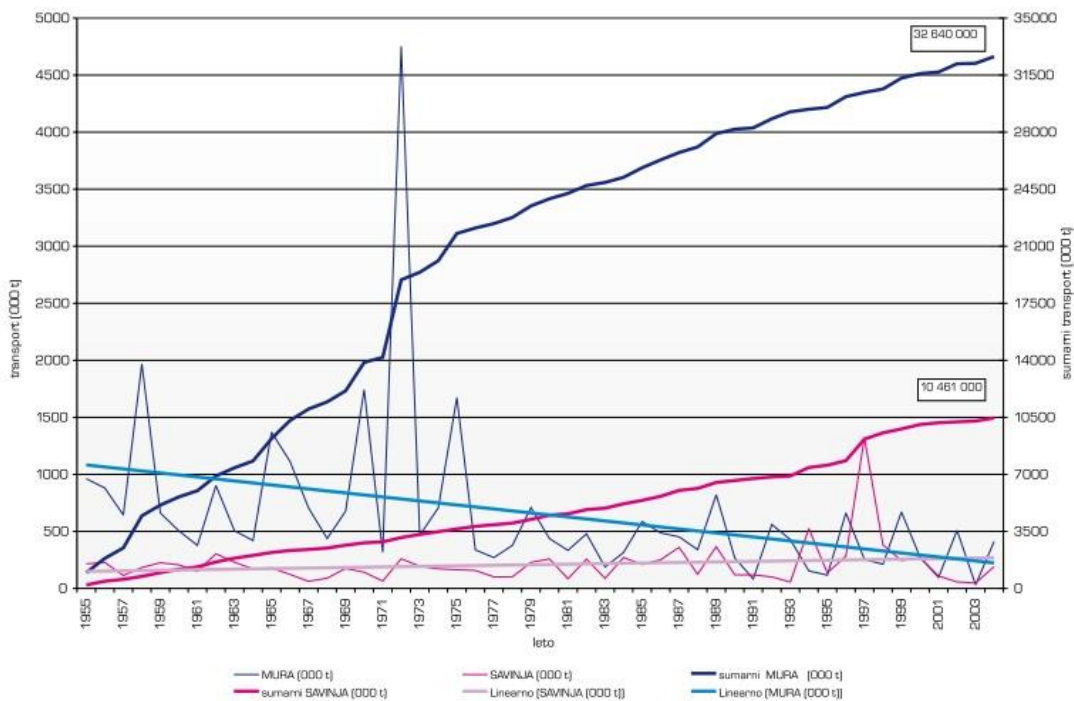
Meritve vsebnosti suspendiranega materiala so se v več kot 50 letih meritev opravljale na 44 hidroloških postajah. Meritve so bile na nekaterih postajah večkrat prekinjene. (Bezjak, Šraj, & Rusjan, 2013)

Redna merjenja suspendiranega materiala se od leta 2005 v Sloveniji izvajajo na šestih vodomernih postajah: na Muri v Gornji Radgoni, na Savi v Radovljici in v Hrastniku, na Savinji v Velikem Širju, na Sori v Suhi in na Vipavi v Mirnu.

Ob izrednih hidroloških razmerah pa odvzemanje vzorcev suspendiranega materiala poteka še na šestih dodatnih vodomernih postajah: na Dravinji v Vidmu, na Sotli v Rakovcu, na Soči v Kobaridu, na Idrijci v Hotešku, na Bači v Bači pri Modreju in na Reki v Cerkevnikovem mlinu. (Ulaga, 2005)



Slika 2: Merilna mesta z rednim zajemom in izrednim zajemom v Sloveniji v letu 2005 (Mikoš, 2012b)



Graf 1: Petdesetletni niz spremljanja suspendiranega materiala v Muri in v Savinji (Ulaga, 2006)

Na grafu 1 je viden petdesetletni niz spremljanja, odvzemanja in analiziranja suspendiranega materiala v Muri in v Savinji. V reki Savinji vsebnost suspendiranega materiala rahlo narašča in s tem tudi trend pojavnosti visokovodnih konic. Reka Mura pa je največ suspendiranega materiala prenesla v zadnjem desetletju opazovanj.

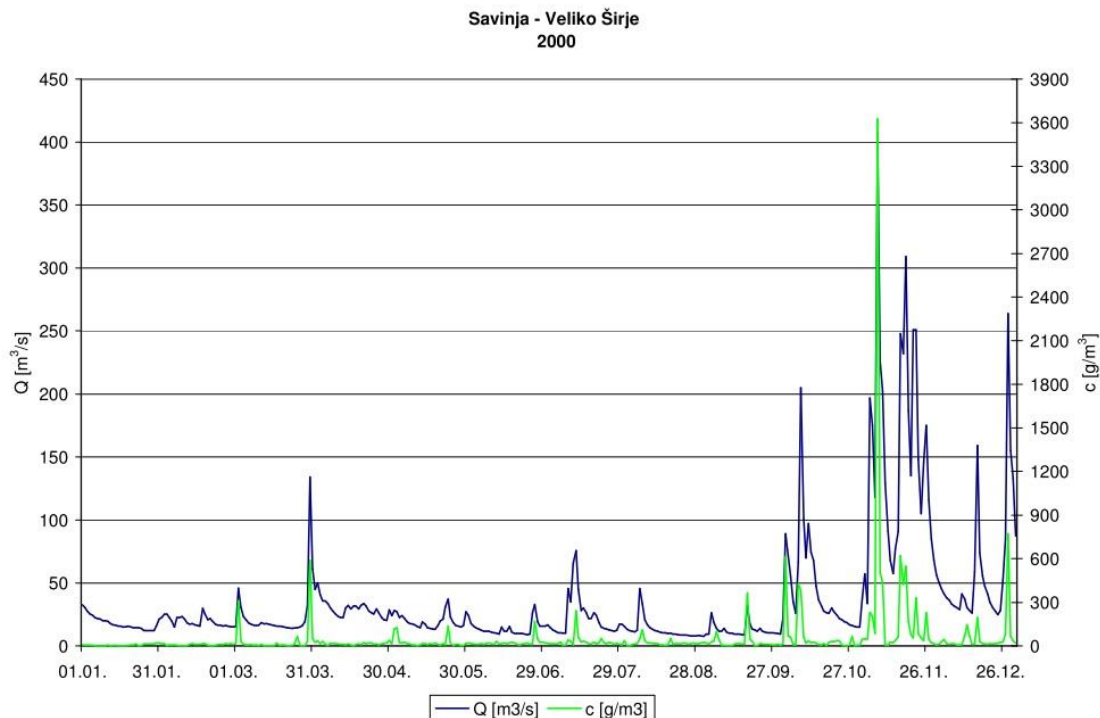
Slediti moramo tudi zakonodajnim podlagam za izvajanje hidrološkega monitoringa, ki pa so:

- Zakon o varstvu okolja (Ur. I. RS, 41/04),
- Zakon o vodah (Ur. I. RS, 67/02),
- Zakon o varstvu pred naravnimi in drugimi nesrečami (Ur. I. RS, 64/94),
- Uredba o stanju površinskih voda (Ur. I. RS, 14/09).

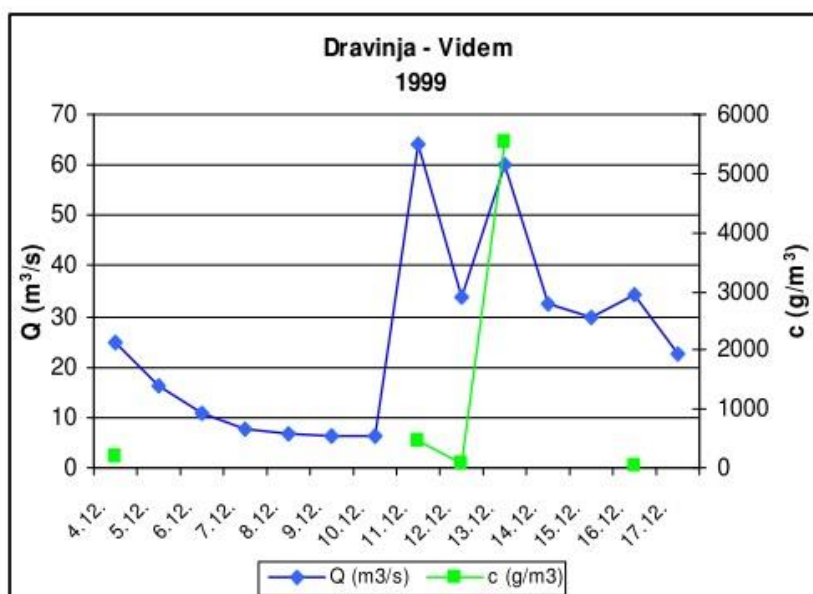
Za natančnejšo analizo vsebnosti suspendiranega materiala moramo razpolagati z zveznimi večletnimi nizi meritev ali pa v skrajnem primeru z meritvami ob ekstremnih dogodkih. (Bezak et al., 2013)

2.2.2 Vsebnosti suspendiranega materiala v strugi

Po pregledu izmerjenih vrednosti suspendiranega materiala se vidi, da čas nastopa najvišjih vrednosti suspendiranega materiala v vodi sovpada s pretočnim režimom. Torej lahko posplošimo, da padavine povzročajo povišanje pretoka, z njimi pa se povečuje tudi vsebnost suspendiranega materiala v vodotokih.

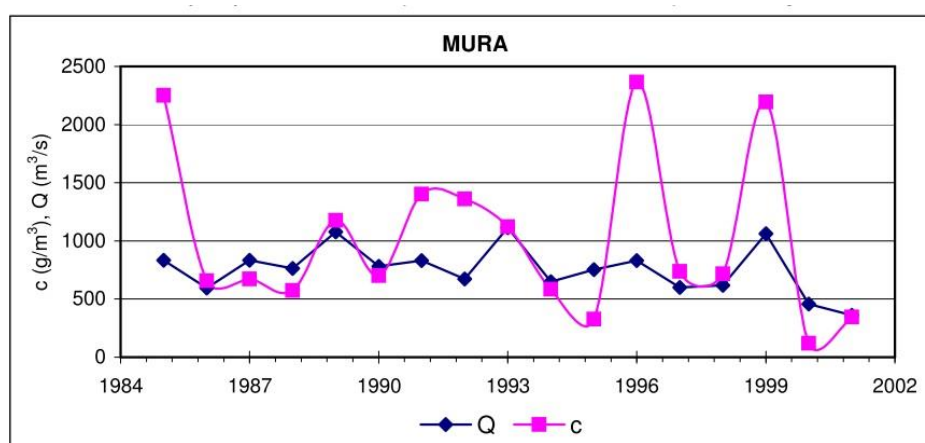


Graf 2: Srednji dnevni pretok in vsebnost suspendiranega materiala zabeleženega z dnevnim vzorčenjem na Savinji v letu 2000 (Ulaga, 2005)

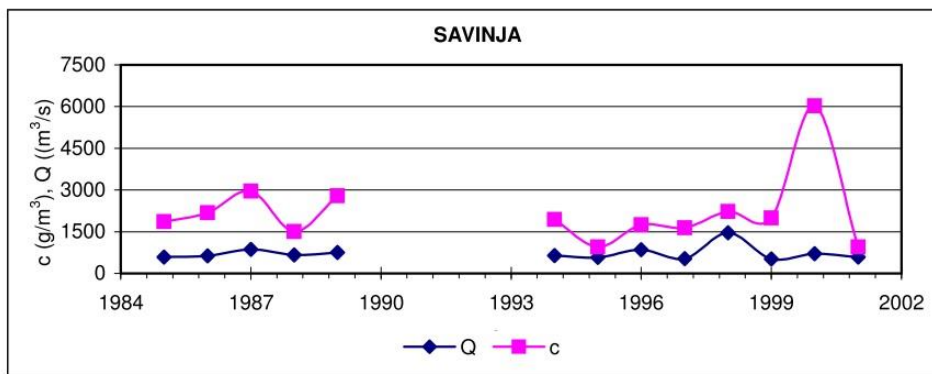


Graf 3: Vsebnost suspendiranega materiala na Dravinji ob izrednih hidroloških razmerah (Ulaga, 2005)

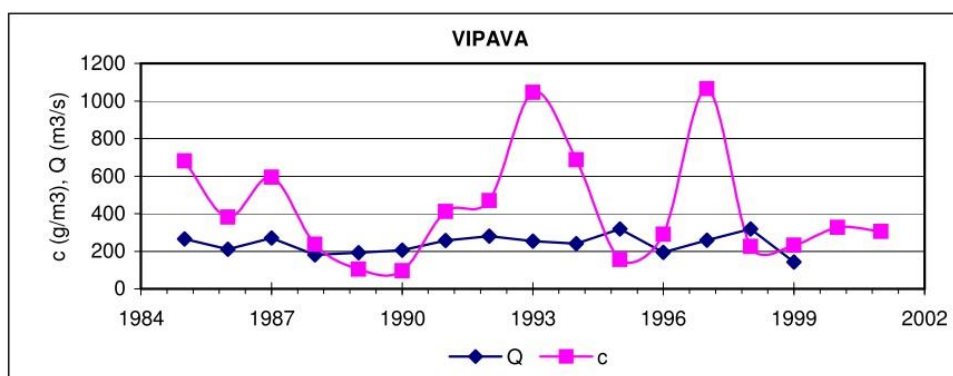
Odnos med spreminjanjem pretoka in vsebnostjo suspendiranega materiala v določenem času ni povsem linearen. Največja vrednost suspenza pogosto nastopi nekoliko pred viškom visokovodnega vala. V primeru hudourniških vodotokov, kjer je tvorba odtoka zelo hitra, je posledično nastop konic koncentracij suspendiranih plavin težko razbrati na podlagi dnevnih vzorcev. Zato je predvidevanje količin suspenza zelo težavno. Upoštevati je potrebno, v katerem delu vodozbirnega zaledja so bile padavine, kakšna je geološka sestava tal na tem območju, predhodno namočenost zemljišča pa tudi čas od zadnjega visokovodnega vala. Kljub vsemu pa se v daljšem časovnem nizu lepo izkaže ujemanje izrednih hidroloških situacij. (Ulaga, 2005)



Graf 4: Največje letne konice pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala na Muri (Ulaga, 2005)



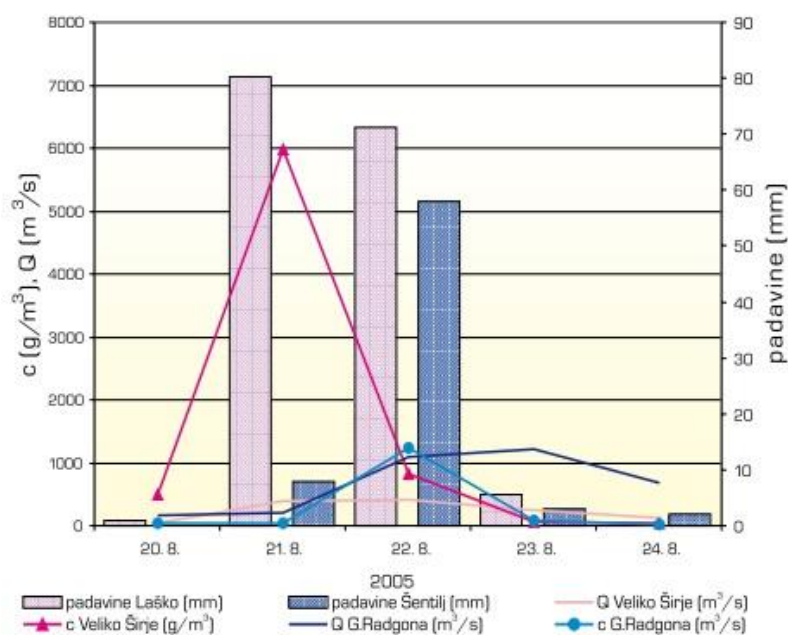
Graf 5: Največje letne konice pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala na Savinji (Ulaga, 2005)



Graf 6: Največje letne konice pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala v reki Vipavi (Ulaga, 2005)

V avgustu leta 2005 se je ob izrednih hidroloških razmerah močno povečal pretok rek in s tem tudi vsebnost suspendiranega materiala. Povečane vsebnosti suspendiranega materiala zaradi obilnega deževja so se takrat pokazale predvsem v rekah vzhodne Slovenije. (Ulaga, 2006)

Analiziranje vzorcev nam pokaže, da se lahko večino letnega transportiranega materiala v večini slovenskih vodotokov premesti le v nekaj dneh.



Graf 7: Vsebnost suspendiranega materiala, pretok in padavine za Savinjo in Muro avgusta 2005 (Ulaga, 2006)

Transport in odplavljanje hribinskega materiala povzroča odnašanje zemeljskega površja in s tem tudi njegovo nižanje. Le-ta lahko povzroči nesreče tudi z odlaganjem rečnih nanosov predvsem s škodo na kmetijskih zemljiščih, infrastrukturnih objektih in v naseljih.

3 METODE TERENSKIH MERITEV KALNOSTI

Rečno kalnost ocenjujemo s terenskimi meritvami količine (koncentracije) in zrnivosti suspendiranih elementov v vodi. Kasneje lahko vzorce iz terena analiziramo v laboratoriju.

3.1 Terenske metode

Terenske metode delimo na posredne in neposredne metode. Neposredne metode so tiste, pri katerih suspendirani sediment na različne načine vzorčimo, posredne ali nadomestne metode pa so metode, kjer sedimenta ne vzorčimo, ampak zrnavost in koncentracijo ocenjujemo posredno z merilniki, ki oddajajo in sprejemajo mehansko ali elektromagnetno valovanje.

Neposredni metodi sta stekleničenje in črpalno vzorčenje.

Posredne metode pa so akustična in optična metoda, odbojnost koncentriranega žarka, laserska difrakcija, jedrska metoda in daljinski spektralni odboj.

Vsaka metoda ima svoje prednosti in slabosti in glede na te podatke lahko več metod kombiniramo med seboj. (Mikoš, 2012a)

3.1.1 Stekleničenje

Pri stekleničenju stekleno posodo potopimo v vodo ali pa se ta med poplavnim valom napolni sama. Lahko pa merilno plastično/teflonsko vrečko v hidrodinamično oblikovanem vzorčevalniku spustimo v vodni tok. Analiza sledi ločeno.

Prednosti te metode so, da je metoda preverjena, omogoča določitev zrnivosti in koncentracije, možna je tako točkovna meritev kot tudi integrirana po vertikali. Mnoge druge meritve (predvsem posredne metode) se umerjajo s to metodo.

Pomanjkljivosti stekleničenja pa so, da pri tej metodi nastopi slaba časovna ločljivost, da je to invazivna metoda, zahteva izurjeno terensko osebje ter odvzem vzorca ni nujno izokinetičen. Pri stekleničenju rezultate dobimo šele po analiziranju vzorcev v laboratoriju. (Mikoš, 2012a)



Slika 3: Integralni globinski vzorčevalnik suspendiranih snovi US D-96 Bag Sampler
(www.ksh.fgg.uni-lj.si, 2016)

3.1.2 Črpalno vzorčenje

Črpalno vzorčenje poteka tako, da s pomočjo različnih sesalnih črpalk (peristaltične ali membranske) vzorec vode črpamo iz toka in kasneje vzorčimo.

Tudi ta metoda je preverjena, omogoča določitev zrnivosti in koncentracije in poleg tega še samodejno vzorčenje.

Pomanjkljivosti so slaba časovna ločljivost, tudi črpalno vzorčenje je invazivna metoda, pogosto zajem vzorca ni izokinetičen, praktična sesalna višina pa je omejena. Tudi pri tej metodi brez laboratorijskega dela ni rezultatov. (Mikoš, 2012a)

Poznamo tudi avtomatske vzorčevalnike, pri katerih lahko nastavimo poljuben časovni interval odvzema vzorca (Manning, Isco).



Slika 4: Prenosni vakuumski vzorčevalnik tekočin Manning - model VST (www.ksh.fgg.uni-lj.si, 2016)

3.1.3 Akustična metoda

Pri akustični metodi uporabimo zvok in njegov odboj, da določimo zrnavost in koncentracijo.

To je neinvazivna metoda, priporočljiva tudi za večje globine in ima dobro prostorsko in časovno ločljivost.

Po drugi strani pa slabo prevaja odbit zvočni signal oziroma se pojavlja slabljenje signala ob visokih koncentracijah delcev. (Mikoš, 2012a)

3.1.4 Optična metoda

Z optično metodo merimo odbojno sipanje pod različnimi koti ali pa prevajamo vidno ali infrardečo svetlobo skozi vzorec vode ali sedimenta.

Je zelo preprosta metoda z dobro časovno ločljivostjo, omogoča uporabo in zajemanje podatkov na daljavo in je relativno poceni.

Optična metoda je močno odvisna od zrnastostne sestave, je invazivna metoda, omogoča samo točkovne meritve, onesnaženje instrumenta pa je pogosto. (Mikoš, 2012a)

3.1.5 Odbojnost koncentriranega žarka

Pri tej metodi merimo čas odboja laserskega žarka od površine delcev sedimenta.

Prednosti te metode so, da ni odvisna od zrnastostne sestave ter da pokriva širok interval zrnastosti in koncentracij.

Metoda je zelo draga in je invazivna ter omogoča samo točkovne meritve. (Mikoš, 2012a)



Slika 5: Merilec motnosti HACH Scatter 6 (SS6) Turbidimeter (www.ksh.fgg.uni-lj.si, 2016)

3.1.6 Laserska difrakcija

Merimo odbojni kot laserskega žarka od površine delcev sedimenta.

Ta metoda ni odvisna od zrnastostne sestave.

Pomanjkljivosti metode so, da je nezanesljiva in draga ter tudi invazivna. Omogoča samo točkovne meritve ter ima omejen interval zrnastosti. (Mikoš, 2012a)



Slika 6: Merilec LISST Portable (<http://www.sequoiasci.com>, 2016)

3.1.7 Jedrska metoda

Pri jedrski metodi merimo odbojno sipanje ali prevajanje žarkov gama ali rentgenskih žarkov skozi vzorec vode in sedimenta. Ta metoda je nizkoenergijska metoda in pokriva širok interval zrnivosti in koncentracij.

Pomanjkljivosti metode so nizka občutljivost, razpadanje jedrskega vira sevanja, okoljski predpisi ter da je invazivna metoda in omogoča samo točkovne meritve. (Mikoš, 2012a)

3.1.8 Daljinski spektralni odboj

Tu se izvaja daljinsko zaznavanje odboja in sipanja svetlobe od vodnih teles. Metoda je uporabna za večja območja.

Daljinski spektralni odboj ima slabo ločljivost, slabo je uporaben v rečnem okolju in odvisen je od zrnavostne sestave. (Mikoš, 2012a)

3.2 Nadomestne metode

Poleg naštetih terenskih metod poznamo še nadomestne metode:

- mehansko valovanje - merilnik oddaja zvok z določeno frekvenco in določeno zvočno energijo in tako širi v prostor okoli sebe določen zvočni energijski tok,
- elektromagnetno valovanje – merilni instrumenti v obliki infrardeče ali laserske svetlobe oddajajo različne valovne dolžine, katere se ob stiku z mineralno snovjo odbijejo,
- meritve motnosti – merilniki delujejo na dveh optičnih principih, transmisivnosti in nefelometričnosti. Pri transmisivnosti merilnik izmeri del vidne svetlobe in s tem oceni pojemanje valovanja zaradi koncentracije suspendiranih snovi, pri nefelometričnosti pa merilnik izmeri del vidne ali infrardeče svetlobe, ki se odbojno sipa pod kotom do sprejemnika odbite svetlobe,
- laserska difrakcija - merilniki delujejo na principu sipanja valovanja pod ostrim kotom in tako omogočajo oceno zrnavostne sestave suspendiranih delcev in tudi oceno prostorninske gostote,

- zvočno odbojno sipanje – merilniki ADCP so poleg meritev suspendiranih snovi primerni tudi za merjenje hitrosti in pretokov. Merijo odboj od mineralnih delcev v suspendiranem stanju,
- metoda daljinskega zaznavanja – uporabljajo se satelitski posnetki in z njihovo pomočjo se oceni spremembe koncentracij suspendiranih snovi v površinskem sloju večjih vodnih teles. (Mikoš, 2012)



Slika 7: Senzor motnosti TurbiTech 2000LA (www.partech.co.uk , 2016)

3.3 Kalibracija neprekinjenih meritev suspendiranih snovi

Pri vseh nadomestnih metodah meritev suspendiranih snovi se pojavi problem kalibracije. Merilnike motnosti vode moramo stalno umerjati na suspenzije znanih koncentracij s standardiziranimi snovmi in priporočljiva je tudi občasna primerjava s klasično odvzetimi vzorci za kontrolo zrnastostne sestave in koncentracij suspendiranih snovi. Terenske meritve suspendiranih sedimentov je nujno opravljati z različnimi merilniki, kjer eno vrsto merilnikov uporabimo za neprekinjene meritve, drugo vrsto pa uporabimo občasno z namenom kalibriranja neprekinjenih meritev. Po uspešno rešenem kalibriranju merilnikov nas čaka še preračun meritev pretokov vode in meritev motnosti v časovne serije koncentracije suspendiranih snovi in končno kalnost. (Mikoš, 2012a)

4 OCENE KOLIČIN SUSPENDIRANIH SEDIMENTOV

Cilj vsakodnevnega odvzemanja vzorcev, laboratorijskih analiz in neprekinjenih spremljanj pretokov v izbranih rečnih profilih je določiti premeščanje suspendiranega materiala S (kg/s).

Premeščanje suspendiranega materiala S (kg/s) je produkt vsebnosti suspendiranega materiala (mg/l) in pretoka vode (m^3/s) skozi rečni profil.

Vsebnost suspendiranega materiala in pretok vode merimo z različnimi metodami in merilci, ki pa so že bili predstavljeni.

Na podlagi poznavanja velikosti porečja in premeščanja suspendiranega materiala lahko ocenimo zniževanje zemeljskega površja v zaledju posamezne postaje. (Ulaga, 2005)

4.1 Modeliranje premeščanja suspendiranih sedimentov v strugi vodotoka

V nadaljevanju je predstavljen princip računanja premeščanja lebdečih plavin v vodotokih, kakršen je uporabljen v modelih HEC 6, GSTARS 2.0 in STAND. V modelih so med lebdeče plavine uvrščeni drobni peski, gline in melji. Velik problem pri praktični uporabi teh modelov je njihovo ustrezno umerjanje. Običajno je podatkov, na podlagi katerih bi umerjanje lahko izvedli, na voljo zelo malo.

Transport posameznega zrnastnega delca opišemo z advekcijsko-disperzijsko enačbo:

$$\frac{\partial(ACs)}{\partial t} + \frac{\partial(QCs)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(A * E_s * \frac{\partial C_s}{\partial x} \right) - A * P_s = 0$$

C_s – koncentracija suspendiranih snovi za posamezen zrnastni razred (kg/m^3)

Q – pretok (m^3/s)

E_s – disperzijski koeficient za suspendirane snovi posameznega zrnastnega razreda (m^2/s)

P_s – izvor oziroma ponor lebdečih plavin

A – omočen obod struge (m)

$$P_s = -k_{sed} * (C_s - C_p)$$

k_{sed} – koeficient, ki opisuje stopnjo oziroma prirastek, s katerim se dejanska koncentracija lebdečih plavin približuje potencialni koncentraciji

C_p – premestitvena zmogljivost vodnega toka za posamezen zrnastni razred (ppm)

Koeficient k_{sed} se opredeli tako za odlaganje suspendiranih snovi

$$k_{sed} = k_{sedDep} \left(\frac{l * \omega}{q} \right)$$

kot tudi za sproščanje (vnos) suspendiranih snovi:

$$k_{sed} = k_{sedEnt} \left(\frac{q}{l * \omega} \right)$$

k_{sedDep} – koeficient odlaganja lebdečin plavin

k_{sedEnt} – koeficient sproščanja lebdečin plavin

q – specifični pretok vode na širinski meter struge (m^2/s)

l – značilna dolžina med dvema zaporednima prečnima prerezoma struge (m)

ω – hitrost usedanja delcev suspendirane snovi (m/s)

Potencialno premestitveno zmogljivost vodnega toka C_p za posamezen zrnastni razred lebdečin plavin se izračuna po Yangovi enačbi:

$$C_p = 5.435 - 0.286 * \log \frac{\omega * d}{\nu} + \left(1.799 - 0.409 * \log \frac{\omega * d}{\nu} - 0.314 * \log \frac{U^*}{\omega} \right) * \log \left(\frac{V * s}{\omega} - \frac{V_{cr} * s}{\omega} \right)$$

ω – hitrost usedanja delcev (m/s)

d – srednja velikost posameznega zrnastnega razreda (m)

ν – kinematična viskoznost vode (m^2/s)

U^* - strižna hitrost (m/s)

V – hitrost vodnega toka (m/s)

s – padec energijske črte

V_{cr} – kritična hitrost za začetek gibanja delcev lebdečin plavin (m/s)

Enačba je primerna za izračun premestitvenih zmogljivosti vodotokov, katerih pretežni del plavin (več kot 60%) predstavljajo lebdeče snovi. (Rusjan, 2007)

5 MERITVE KALNOSTI NA GRADAŠČICI

5.1 Eksperimentalna porečja v Sloveniji

V Sloveniji imamo tri eksperimentalna porečja, ki so eksperimentalna osnova razvoja hidrologije, tudi v mednarodnem pomenu.

Porečje reke Reke je bilo prvo eksperimentalno porečje v Sloveniji in je izbrano zaradi Škocjanskih jam, ki so bile leta 1986 uvrščene na seznam naravne dediščine UNESCO.

Porečje Dragonje je izbrano zaradi pojava razraščanja gozda na nekoč kmetijskih zemljiščih in posebnih erozijskih pojavov.

Porečje Gradaščice z Glinščico je izbrano kot hudourniško in delno urbanizirano porečje, primerno za urejanje v skladu z Direktivo EU o politiki do voda. Na porečju Gradaščice spremljamo hidrološke in erozijske procese na različnih prostorskih nivojih (od manjših hudourniških porečij Kuzlovca in Mačkovega grabna do večjega prispevnega območja Gradaščice do vodomerne postaje Dvor). (Brilly & Globevnik, 2004)

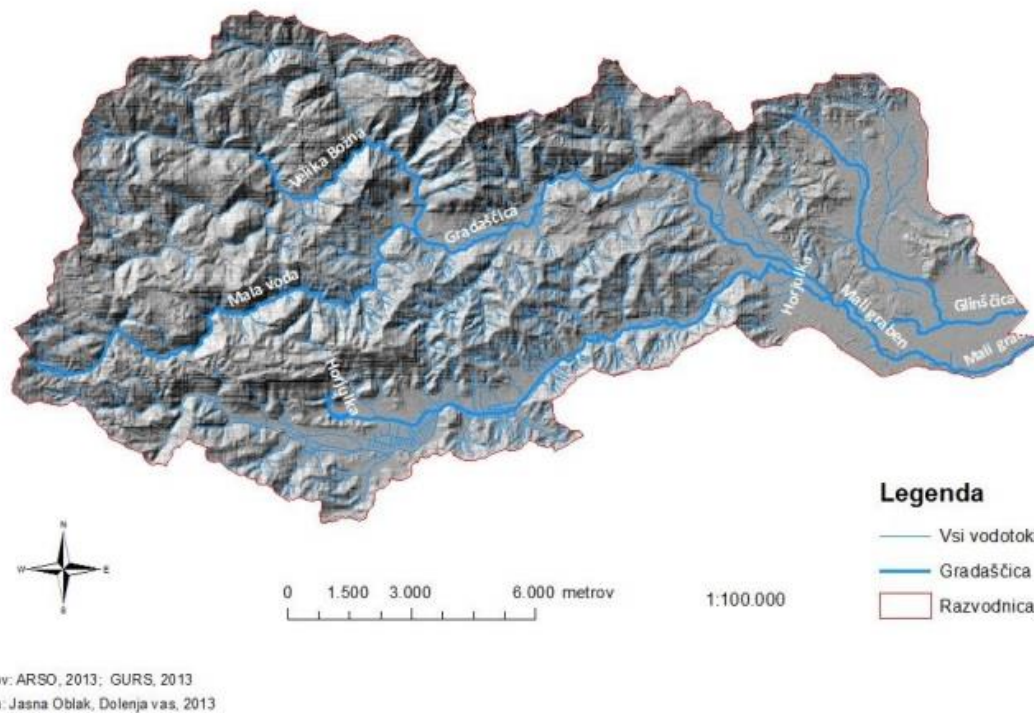
5.1.1 Eksperimentalno porečje Gradaščice z Glinščico

Porečje Gradaščice se razprostira na območju prehoda iz dinarskega v alpski svet. Zaradi specifične orografske lege so zelo pogosti izredno močni nalivi, ki povzročajo visoke vodne odtoke. (Brilly & Globevnik, 2004)



Slika 8: Lokacija porečja Gradaščice na karti Slovenije z označenimi hidro-geografskimi območji (Bezak et al., 2015)

Velikost porečja Gradaščice je 154,3 km². Njegova meja poteka na severu po osrednjem grebenu Polhograjskega hribovja, ki se vije od Ljubljane (Šentvida) prek Toškega čela, Svete Katarine, Grmade in Tošča do Pasje ravni. Tu meja zavije proti jugu in se prek grebenov Sivke, Gabrovca, Špika in Kovčka spusti na južni hrbet Polhograjskega hribovja, ki poteka med dolino Horjulščice in Ljubljanskim barjem. (Brilly & Globevnik, 2004)

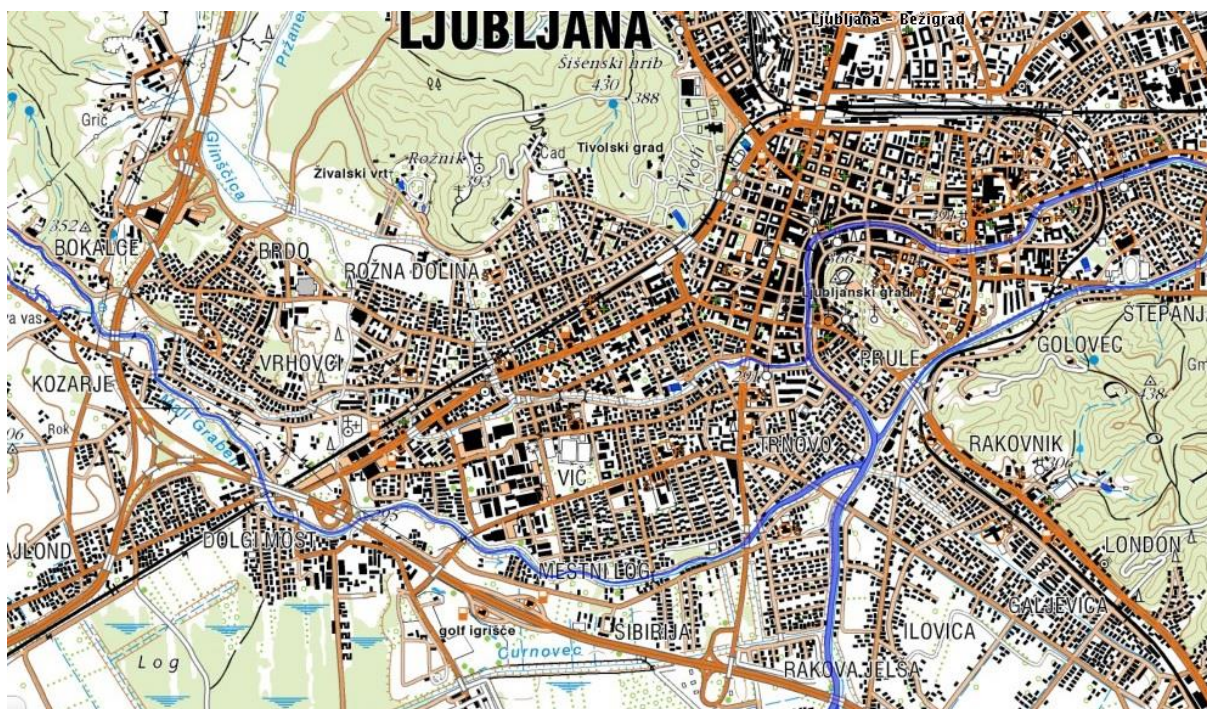


Slika 9: Prispevno območje reke Gradaščice (ARSO, 2013)

Reka Gradaščica dobi svoje ime ob združitvi dveh glavnih povirnih krakov, Božne in Male vode pri Polhovem Gradcu. Največji pritok Gradaščice je Horjulščica, ki izvira v hribovju pod Šentjoštom. V Gradaščico se izliva tik nad zahodno ljubljansko obvoznico pri Kozarjah. Celotno območje doline med Horjulščico in Gradaščico je poplavno in tvori naravni zadrževalnik visokih voda. (Brilly & Globevnik, 2004)

Na Bokalškem jezu se Gradaščica razdeli v dva vodotoka, in sicer v Mestno Gradaščico in Mali graben. V Mestno Gradaščico se kasneje izliva še Glinščica in nato skupaj tečeta do Ljubljanice.

Glinščica izvira pod severovzhodnimi obronki Toškega čela in pri Podutiku preide v ravninski del Ljubljanske kotline. Relief porečja Glinščice je precej raznolik od strmih povirnih območij do ravnin. Skupno prispevno območje Glinščice zajema 19,3 km² površine. (Brilly & Globevnik, 2004)



Slika 10: Rečna mreža Malega Grabna, Mestne Gradaščice in Glinščice (www.geopedia.si, 2016)

Eksperimentalno porečje obsega odsek Malega Grabna, Mestne Gradaščice in celotno porečje Glinščice. Tu je pretežno urbano področje s specifičnimi hidrološkimi razmerami. Vodotoki na tem območju so bili podvrženi intenzivnim regulacijskim posegom, s katerimi pa poplavna ogroženost obdajajočih urbanih površin ni bila odpravljena.

Meritve na eksperimentalnem porečju so bile izvedene s sodobno hidrološko opremo (Dopplerjevi merilci hitrosti vodnega toka v 1D, 2D/3D, sonda za terensko merjenje kvalitete vode, sonda za merjenje pretoka vode z metodo razredčenja...). (Brilly & Globevnik, 2004)

5.2 Lokacija meritev

Meritve kalnosti na reki Gradaščici smo izvajali v kraju Dvor pri Polhovem Gradcu na hidrološki postaji Dvor - Gradaščica.



Slika 11: Lokacija merilne postaje Dvor - Gradaščica (www.geopedia.si, www.google.si/maps, 2016)

Dvor pri Polhovem Gradcu je naselje v Občini Dobrova – Polhov Gradec in leži na levi strani reke Gradaščice. Od Polhovega Gradca je oddaljen okoli 2 km. Leži na nadmorski višini 350 metrov.

Meritve smo opravljali na obrobju naselja Dvor pri Polhovem Gradcu, pri mostu, kjer se nahaja merilna postaja Dvor.

5.3 Merilna oprema

Meritve smo izvajali z merilcem/mini sondo Hydrolab MS5.



Slika 12: Merilec Hydrolab MS5 (www.ott.com, 2016)

Hydrolab MS5 je multiparameterska sonda za merjenje kvalitete vode, narejena za točkovno terensko ali časovno zvezno izvajanje meritev. Premer sonde je 4,4 cm, dolžina znaša 53,3 cm (z baterijo 74,9 cm), njena teža pa je 1 kg brez baterije in 1,3 kg z baterijo. Za delovanje potrebuje 8AA baterij ali baterijski paket in ima spomin za do 120 000 meritev. Primerne temperature za delovanje sonde so med -5°C in 50°C .

Sonda ima senzorje za temperaturo, prevodnost, globino, pH, količino raztopljenega kisika, motnost, klorofil A, modrozelenih alge, amonij, nitrate, klorid, rodamin sledilno barvo, oksidacijsko-redukcijski potencial in za količino raztopljenih plinov.

Sonda je kompaktna in lahka ter ima fleksibilno obliko s štirimi univerzalnimi senzorskimi vhodi, ki omogočajo nastavitve po meri. Meri lahko do 10 parametrov hkrati.



Slika 13: Hydrolab MS5 na merilni postaji Dvor - Gradaščica (osebni arhiv doc. dr. Simona Rusjana, 2016)

5.4 Rezultati meritev

Meritve kalnosti so se izvajale samodejno na merilni postaji Dvor. Podatki o pretoku (m^3/s) so iz spletne strani Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO), ostali podatki pa so merjeni s sondo Hydrolab MS5 ter preneseni na računalnik.

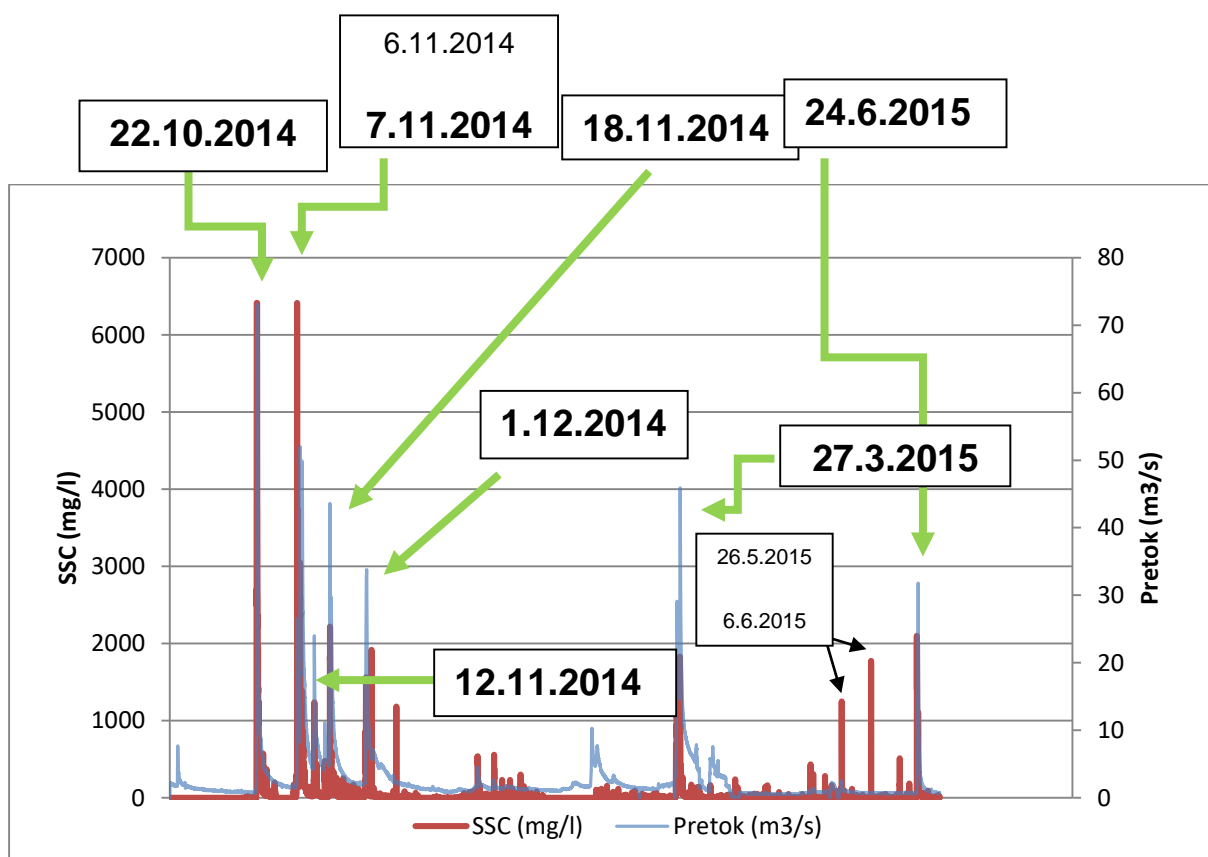
Izrisali smo grafe o ujemanju pretoka (m^3/s) in vsebnostjo suspendiranih snovi (mg/l).

Vsebnost suspendiranih snovi (SSC) smo izračunali tako, da smo specifično težo materiala pomnožili z 2,1378. Poleg tega smo izračunali še vsebnost suspendiranih snovi v kilogramih (SSL) z upoštevanjem pretoka po enačbi :

$$\text{SSL}(\text{kg}) = Q (\text{m}^3/\text{s}) * \text{SSC} (\text{mg/l}) * 60 * 30 / 1000$$

Podatke smo analizirali v dveh obdobjih. Prvo obdobje je trajalo od 20.9.2014 do 2.7.2015, drugo obdobje pa od 4.9.2015 do 22.10.2015.

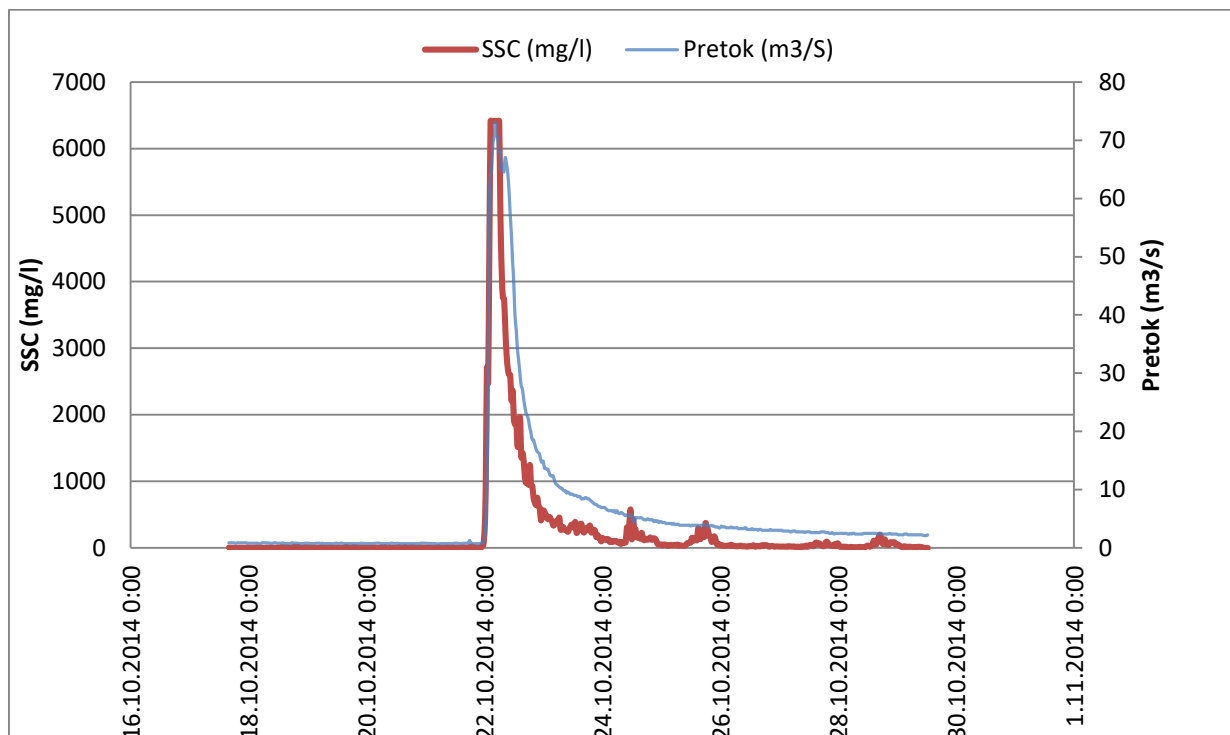
5.4.1 Prvo obdobje (20.9.2014 do 2.7.2015)



Graf 8: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala za obdobje od 20.9.2014 do 2.7.2015

V nadaljevanju bodo posebej izpostavljeni najbolj izstopajoči dogodki v tem obdobju.

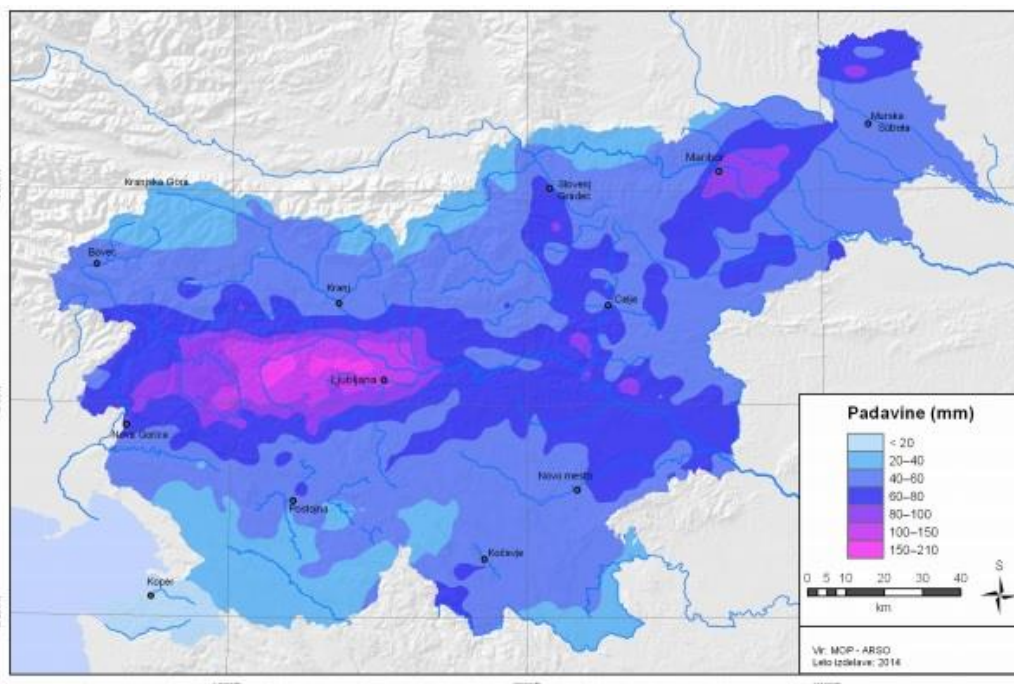
- Prvo veliko povečanje pretoka in s tem tudi suspendiranih snovi je nastopilo 22.10.2014.



Graf 9: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala 22.10.2014

Iz grafa je razvidno, da se 22.10.2014 pretok in vsebnost suspendiranega materiala nenadno povečata, kar nakazuje na močno deževje.

22.10.2014 so v osrednji Sloveniji nastopile poplave. Večurni močni nalivi so v pasu od srednjega Posočja do Ljubljane sredi noči v goratem svetu povzročili enega največjih porastov hudournikov in zalednih vod, ki so se v dolinah stekale v hitro naraščajoče reke. Izstopala so poplavna žarišča na povodjih Bače in Idrijce, povodju Sore in Gradašnice ter na severnem in zahodnem delu Ljubljane. Poplavne površine v zahodnem delu Ljubljane so bile obsežne in so se ohranjale preko celega dne 22. oktobra. Na območju pogostih poplav so dopoldan in čez dan poplavljal reke na severozahodu, jugu in ponekod v osrednjem delu države. Na navedenih žariščnih področjih so vode poplavljal na območju zelo redkih poplav (> 50-letne povratne dobe pretokov), rušilna moč hudourniških voda je bila izredno velika. Povečana je bila ogroženost z ekološkimi nesrečami. (ARSO, 2016)



Slika 14: Višina padavin od jutra 21. oktobra do zgodnjega popoldneva 22. oktobra na podlagi meritev meteoroloških postaj in radarskih meritev padavin. (ARSO, 2016)

V zgodnjih jutranjih urah so močno narasle hudourniške vode in poplavljale na širšem območju Polhograjskega hribovja. Poplavljali so potoki in zaledne vode v več naseljih na tem področju. 22. oktobra zjutraj so v Ljubljani poplavljale Glinščica, Gradaščica, Mestna Gradaščica, Mali graben in Gameljščica. Poplave so ogrožale najprej Podutik na severu in nato v večjem obsegu Vič na zahodu Ljubljane. Ljubljanica, ki je največji pretok dosegla sredi dneva, ni poplavljala v večji meri. (ARSO, 2016)

Največji pretok v tem obdobju je znašal 73,1 m³/s. Glede na statistično analizo je to primerljivo s pretokom s 50-letno povratno dobo (Pearson III porazdelitvena funkcija - 70,2 m³/s). (ARSO, 2016)

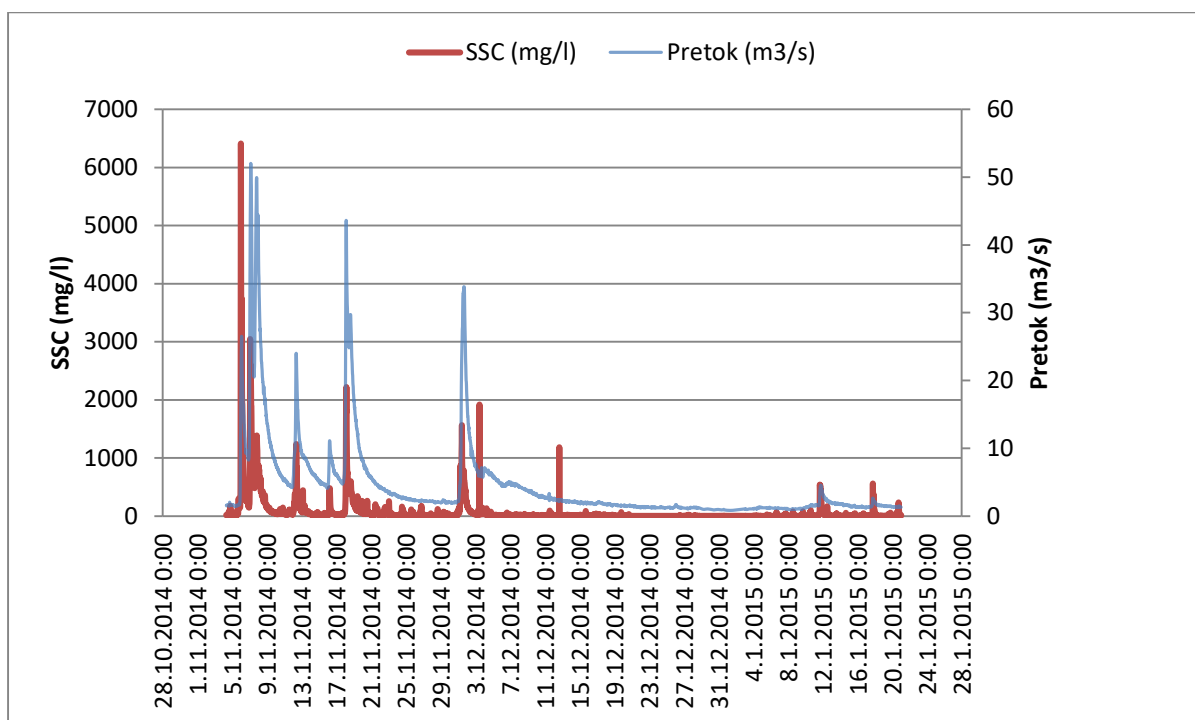
Največja vsebnost suspendiranega materiala je znašala 6413,4 mg/l. Vrednost suspendiranega materiala pa naraste prej kot se poveča pretok.



Slika 15: Poplave v Ljubljani (ARSO, 2016)

Skupna vsebnost suspendiranih snovi, ki so se prenesle po vodotoku za obdobje od 17.10.2014 do 29.10.2014, znaša 843,88 ton.

- Obdobje od 4.11.2014 do 21.1.2015



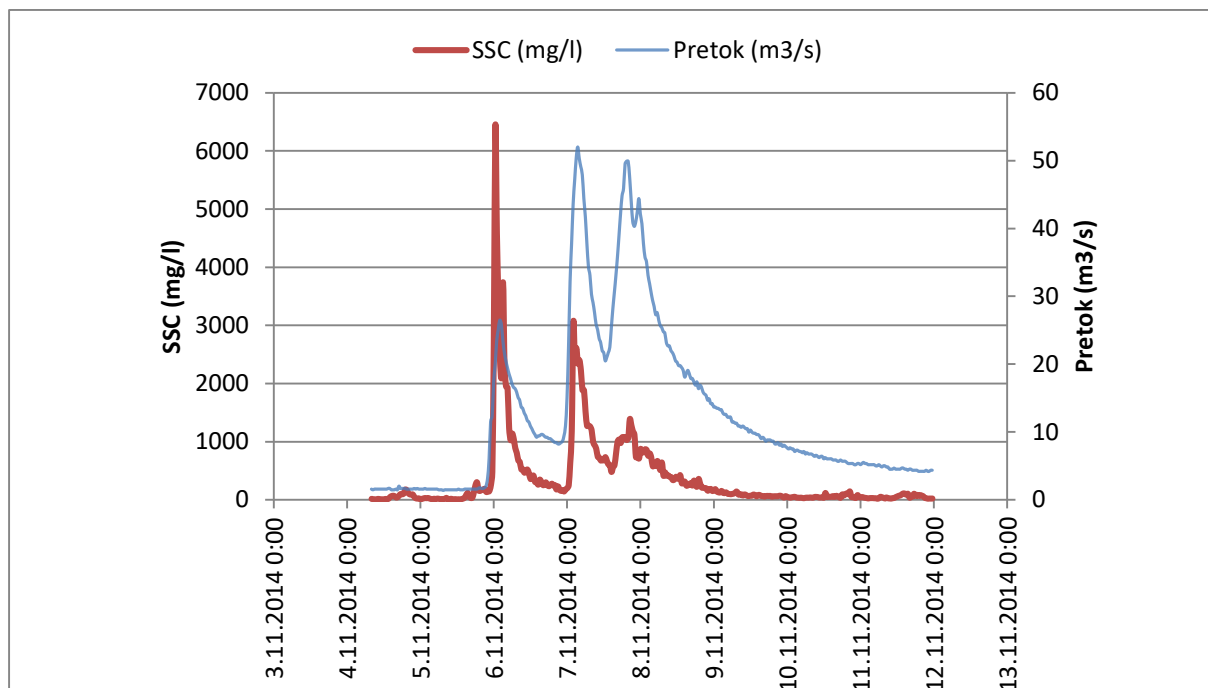
Graf 10: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 4.11.2014 do 21.1.2015

Na grafu izstopajo štiri dogodki, ki imajo vrednost pretoka nad 10 m³/s. Prvi dogodek nastopi od 5.11. 2014 do 12.11.2014, drugi dogodek obravnavamo med 12.11.2014 in 17.11.2014, tretji dogodek od 17.11.2014 do 21.11.2014 in četrti dogodek od 30.11.2014 do 4.12.2014.

Pri večini opazimo, da povečanje pretoka nastopi pred povečanjem vsebnosti suspendiranega materiala. Običajna razlaga v literaturi je, da se pred tvorbo konice hidrograma proti rečni mreži in po njej začnejo kmalu po začetnem zviševanju pretokov intenzivno premeščati suspendirane plavine, ki so blizu rečne mreže. Sklepamo lahko, da je največji vir teh plavin v bližini ali v sami rečni mreži.

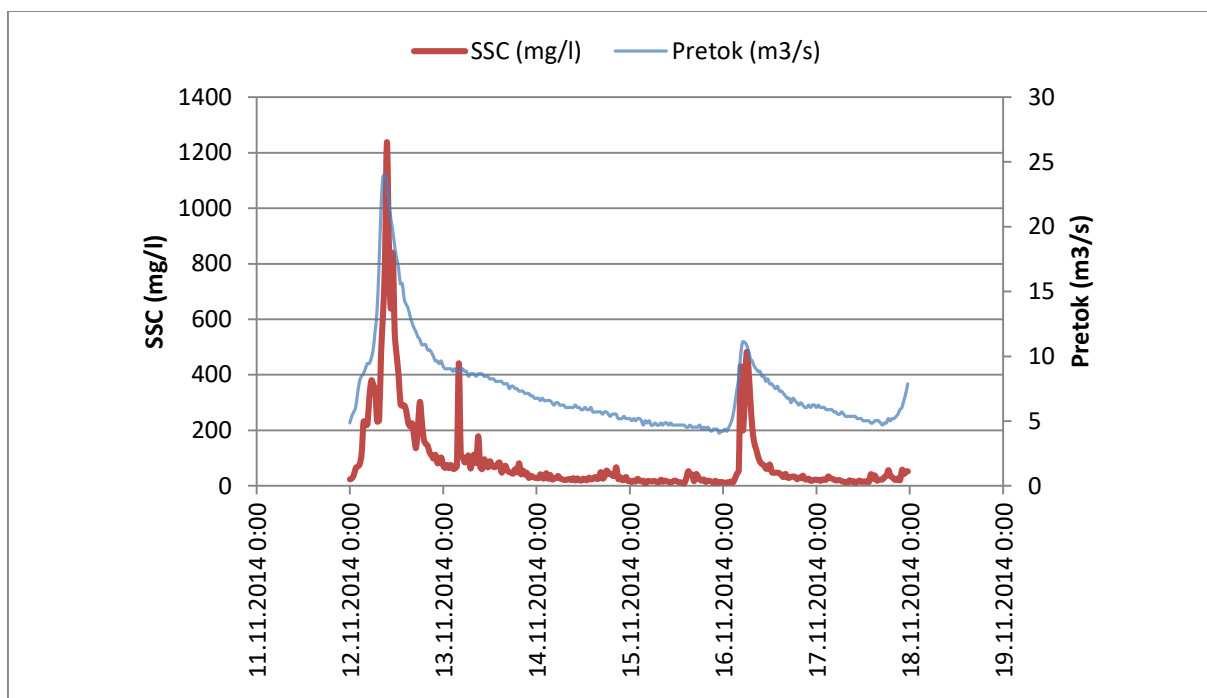
Največja vrednost pretoka v tem obdobju je znašala 52 m³/s, vsebnost suspendiranega materiala pa 6413,4 mg/l. Maksimalna vrednost suspendiranega materiala je bila dosežena 6.11.2014, največja vrednost pretoka pa 7.11.2014.

Skozi profil vodotoka se je v tem obdobju preneslo 10430,13 ton suspendiranih snovi.



Graf 11: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 5.11.2014 do 12.11.2014

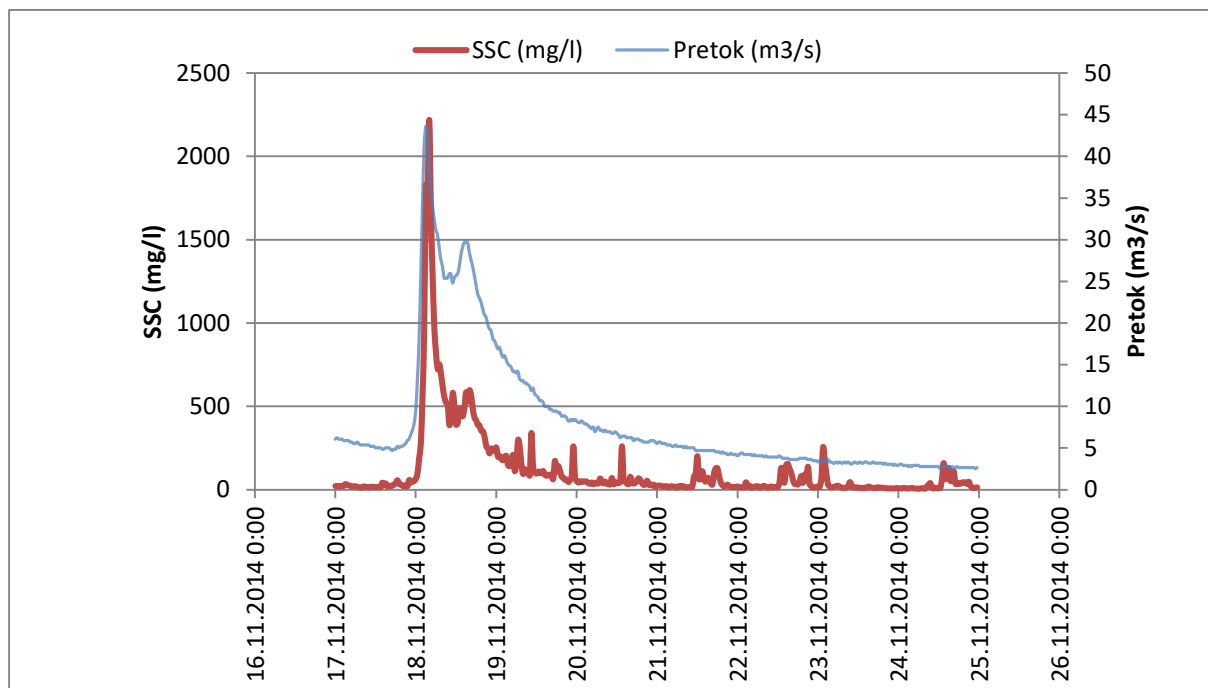
Na grafu 11 je opazno, da je vsebnost suspendiranih snovi dosegla največjo vrednost, 6413,4 mg/l, 6.11.2014, nato se je znatno zmanjšala in potem spet nekoliko narasla skupaj s pretokom, 52 m³/s, ki je največjo vrednost dosegel 7.11.2014. Pretok z vrednostjo 52 m³/s je pretok s približno 5-letno povratno dobo.



Graf 12: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 12.11.2014 do 17.11.2014

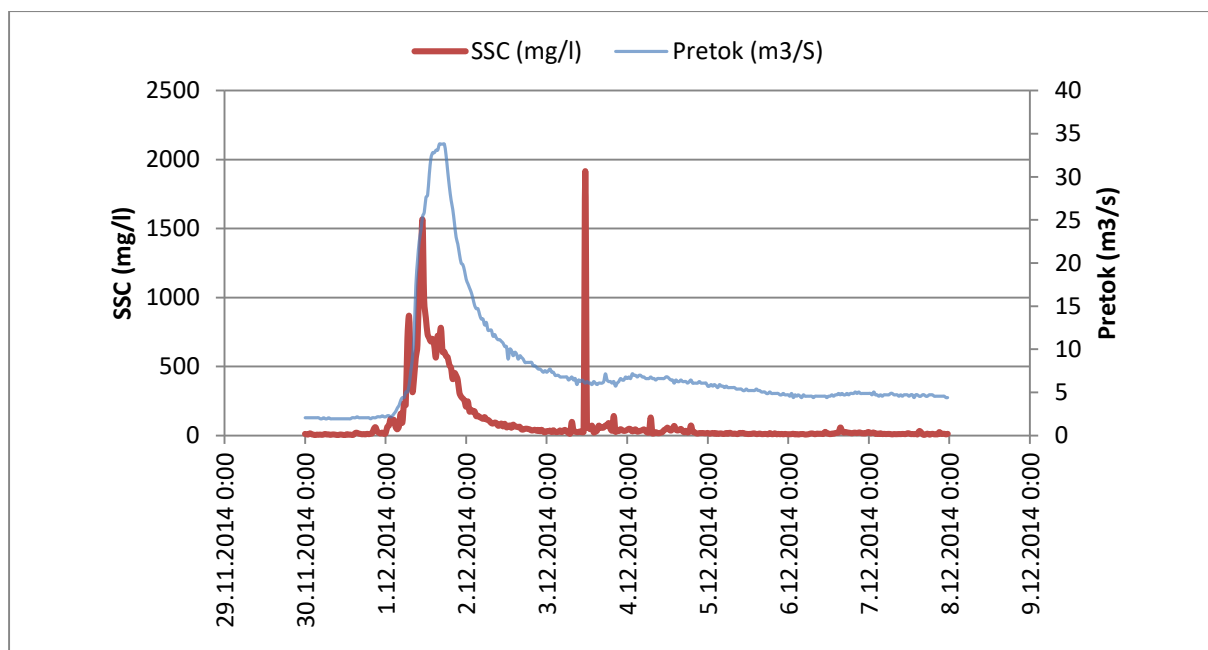
Dne 12.11.2014 največji pretok nastopi pol ure pred najvišjo vsebnostjo suspendiranega materiala. Pretok z vrednostjo $24 \text{ m}^3/\text{s}$ vrhunec doseže ob 9:00, nato pa začne padati. Vsebnost suspendiranega materiala, $1237,7862 \text{ mg/l}$, je najvišja ob 9:30 in nato začne padati, ter ob 11:00 kljub nižanju pretoka zopet naraste.

Na dan 16.11.2014 največja vrednost pretoka, $11,1 \text{ m}^3/\text{s}$, nastopi nekoliko po povečanju vsebnosti suspendiranih snovi, a le-te se povečajo tudi po zvišanju pretoka. Najvišja vrednost suspendiranih snovi znaša $477,58 \text{ mg/l}$, kar je $9,37 \text{ ton}$. Nato obe vrednosti začneta padati do ponovnega povečanja dne 17.11.2014.



Graf 13: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 17.11.2014 do 21.11.2014

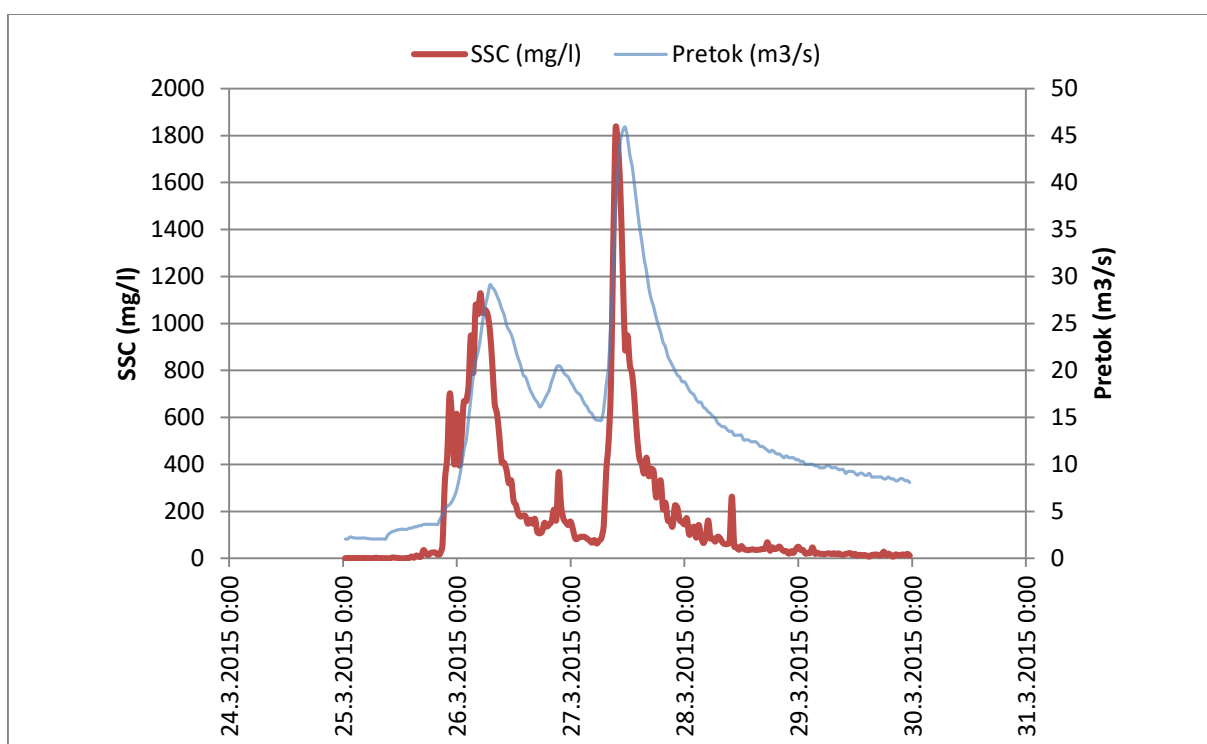
Največji pretok nastopi pred maksimalno vsebnostjo suspendiranih snovi v tem obdobju. Maksimalen pretok znaša 43,6 m³/s, najvišja vrednost suspendiranih snovi pa 2219,04 mg/l, kar pa je 156,58 ton. To je pretok z 2-letno povratno dobo.



Graf 14: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 30.11.2014 do 4.12.2014

Na grafu 14 je razvidno, da vsebnost suspendiranega materiala doseže vrhunec pred največjim pretokom. Vsebnost suspendiranega materiala je najvišja 1.12.2014 ob 11:00 in znaša 1562,732 mg/l, vrednost pretoka pa je največja 1.12.2014 ob 16:00 in znaša 33,8 m³/s, ko se vsebnost suspendiranega materiala že začne zniževati. Dne 3.12.2014 vsebnost suspendiranega materiala kljub približno konstantnemu pretoku naraste iz 26,29 mg/l na 1917,607 mg/l, kar kaže na to, da se je za merilec verjetno ujelo kakšno plavje ter zmotilo meritve.

- Naslednji izstopajoči dogodek nastopi 26.3.2015 in 27.3.2015

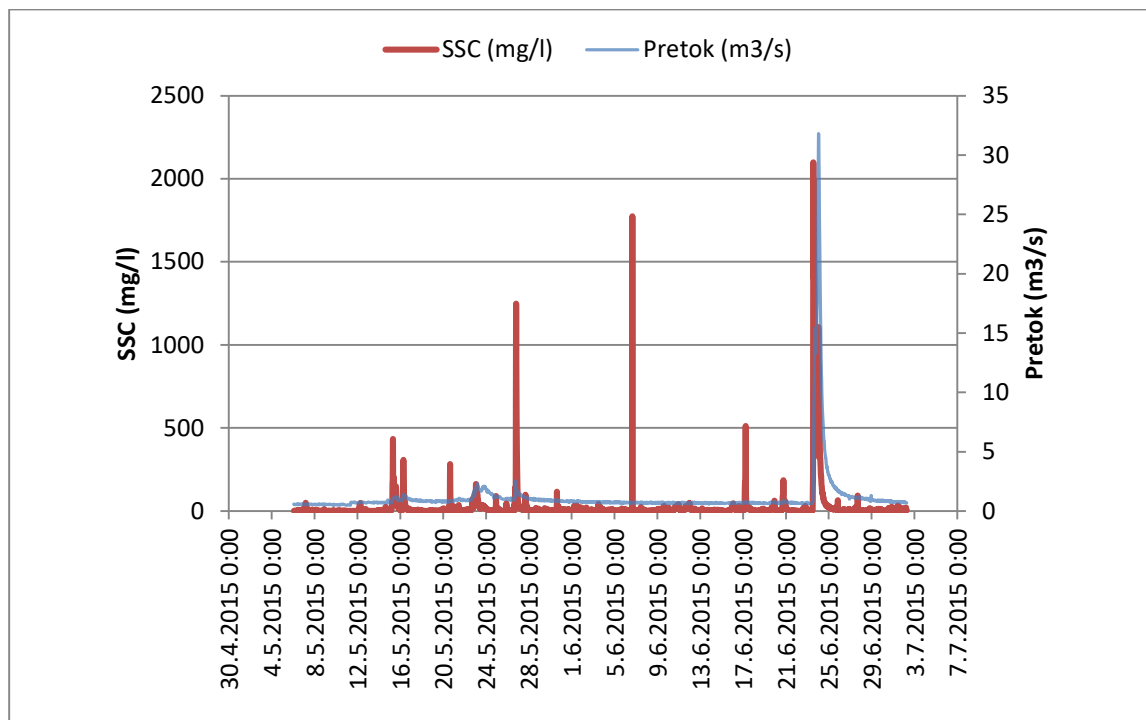


Graf 15: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 25.3.2015 do 30.3.2015

Iz grafa 15 se dobro vidi, da višek vsebnosti suspendiranega materiala doseže najvišjo vrednost pred največjim pretokom. Dne 26.3.2015 višek vsebnosti suspendiranega materiala nastopi ob 5:00 z izmerjeno vrednostjo 1128,758 mg/l, pretok pa doseže največjo vrednost, 29,1 m³/s, dve uri kasneje, ob 7:00. Dne 27.3.2015 višek vsebnosti suspendiranega materiala, 1829,957 mg/l, zopet nastopi dve uri pred največjim pretokom, 45,9 m³/s (pretok se približuje 5-letni povratni dobi).

V času od 25.3.2015 do 30.3.2015 se je skozi profil preneslo 2216,98 ton suspendiranih snovi.

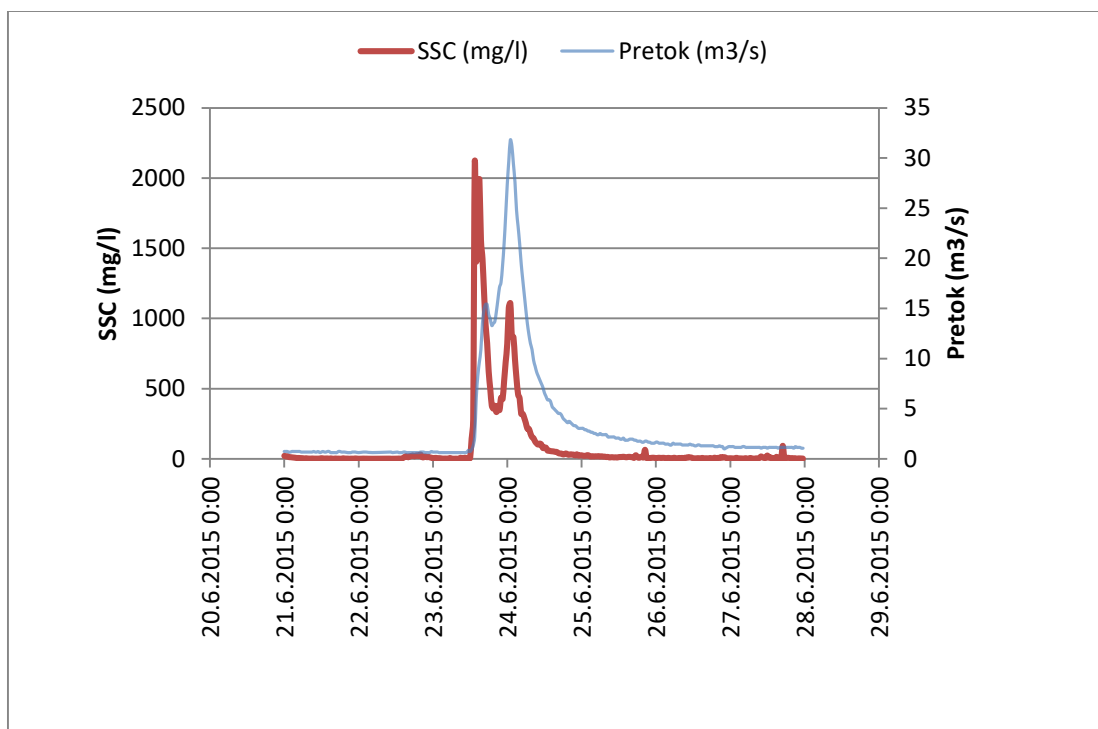
- Zadnji dogodek v tem obdobju nastopi 23.6.2015 in 24.6.2015



Graf 16: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 6.5.2015 do 2.7.2015

Od 6.5.2015 do 23.6.2015 ni velikega povečanja pretoka, je pa zato spet prisotno samo povečanje vsebnosti suspendiranega materiala z dvema viškoma. Prvi višek nastopi 26.5.2015 z vrednostjo 1248,475 mg/l, drugi višek pa nastopi 6.6.2015 z vrednostjo 1774,374 mg/l.

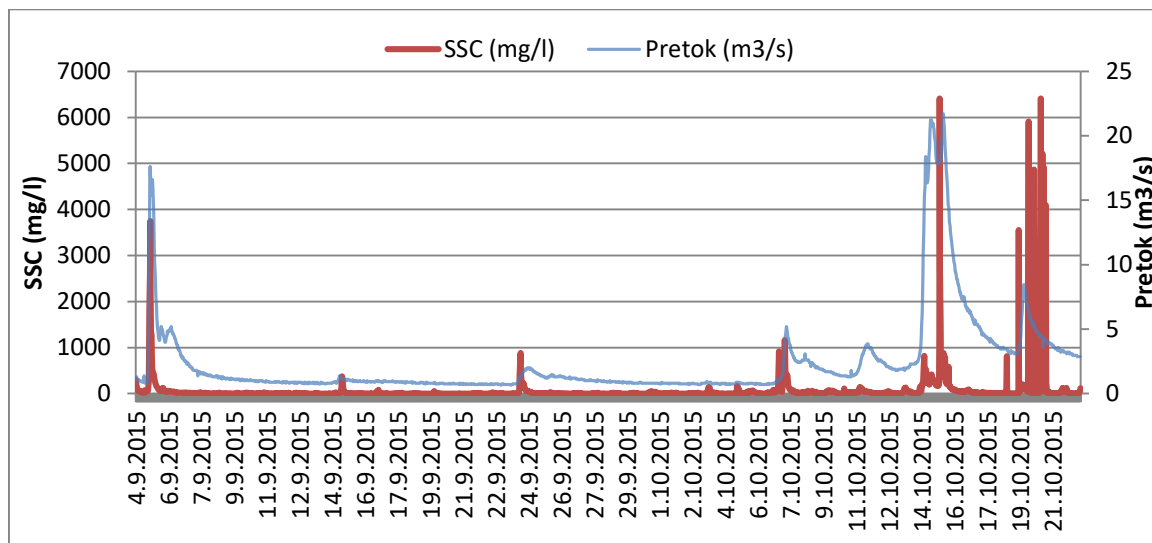
Povečanje pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala nastopi dne 23.6.2015 ter dne 24.6.2015.



Graf 17: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala od 21.6.2015 do 28.6.2015

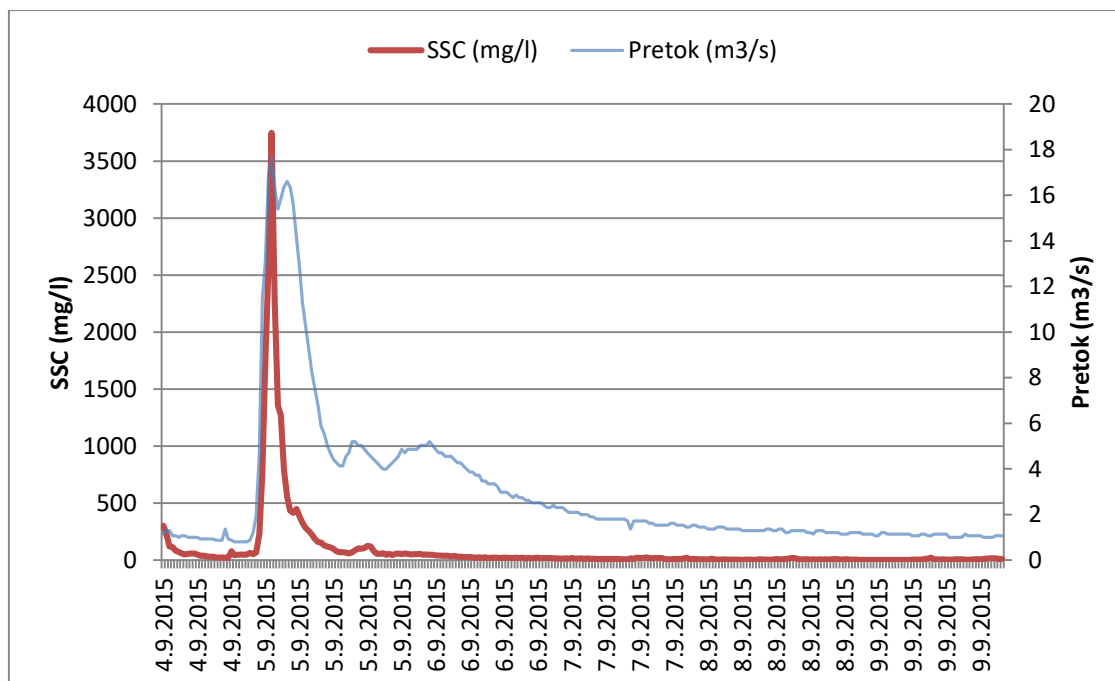
Višek vsebnosti suspendiranega materiala tudi pri tem dogodku nastopi pred največjim pretokom. Najvišja vsebnost suspendiranega materiala nastopi 23.6.2015 z vrednostjo 2099,3196 mg/l, največji pretok pa nastopi 24.6.2015 z 31,8 m³/s. Skozi profil se prenese 834,15 ton suspendiranih snovi.

5.4.2 Drugo obdobje (4.9.2015 do 22.10.2015)



Graf 18: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala za obdobje od 4.9.2015 do 22.10.2015

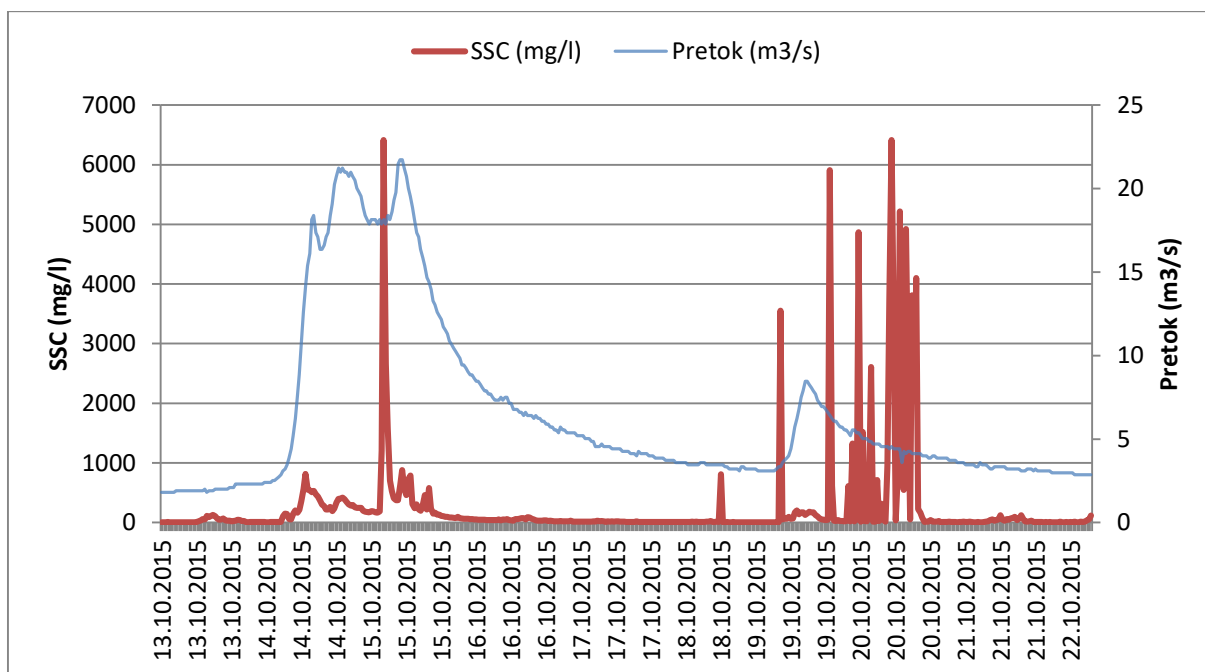
- Prvi dogodek nastopi 5.9. 2015



Graf 19: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala za obdobje od 4.9.2015 do 9.9.2015

Prvi dogodek se je v tem obdobju zgodil 5.9.2015. Vrednost pretoka in vsebnost suspendiranega materiala sta višek dosegla istočasno ob 1:30. Pretok je znašal $17,62 \text{ m}^3/\text{s}$, vsebnost suspendiranega materiala $3747,563 \text{ mg/l}$, skozi profil pa se je preneslo $118,8577$ ton suspendiranih snovi.

- Do dne 13.10.2015 pretok ne preseže $10 \text{ m}^3/\text{s}$.



Graf 20: Graf primerjave pretoka in vsebnosti suspendiranega materiala za obdobje od 13.10.2015 do 22.10.2015

Iz grafa 20 vidimo, da pretok najprej naraste, kasneje pade in potem spet naraste. Ko pretok pade, je prisotna največja vsebnost suspendiranega materiala.

Po pregledu podatkov, ki jih imamo na voljo, ugotovimo, da najvišja vsebnost suspendiranega materiala nastopi 4 ure pred največjim pretokom. Vsebnost suspendiranega materiala je $6413,4 \text{ mg/l}$, kar je tudi najvišja vsebnost suspendiranega materiala v tem obdobju poleg narasta z manjšim povečanjem pretoka dne 20.10.2015. Največji pretok pa je $21,72 \text{ m}^3/\text{s}$, kar je tudi največji pretok tega obdobja.

Dne 19.10.2015 pretok ne preseže $10 \text{ m}^3/\text{s}$, vsebnost suspendiranega materiala pa je visoka oba dneva, 19.10.2015 in 20.10.2015. Najvišjo vrednost doseže 20.10.2015 in znaša $6413,4 \text{ mg/l}$.

V celotnem obdobju med 4.9.2015 in 22.10.2015 je bilo skozi profil Gradašnice na postaji Dvor prenesenih $2443,026$ ton suspendiranega materiala.

Skozi profil Gradaščice se je v vseh obravnavanih obdobjih skupaj preneslo 28835,59 ton suspendiranih plavin.

Med obdelavo podatkov nismo upoštevali pretokov manjših od $10 \text{ m}^3/\text{s}$, saj so to dokaj pogosti pretoki. Zasedili smo nekaj nenadnih zvišanj vsebnosti suspendiranih snovi brez povečanja pretoka. Za takšna povišanja suspendiranih snovi je lahko več možnih vzrokov, kot je na primer zrušenje brežin ali dela v strugi gorvodno, plavje, ki se zagodzi ob mersko opremo ali pa biološka obrast. Takšne nenadne, kratkotrajne spremembe v koncentraciji suspendiranih plavin neodvisne od pretoka običajno izločimo iz nadaljnjih obdelav, kot predstavljeno v naslednjem poglavju.

5.4.3 Napake pri meritvah

Ker smo v nekaterih grafih s podatki iz teh dveh obdobj opazili nenadna zvišanja izmerjenih suspendiranih snovi brez spremembe vrednosti pretoka, smo te podatke izločili in izračunali napake pri merjenju.

Do nenadnega povečanja suspendiranih snovi v vodi ob nespremenjenem pretoku lahko pride zaradi različnih vzrokov. Najpogostejša vzroka sta plavje, ki se zagodzi za merilno opremo, ali pa biološka obrast. Dejavniki, ki tudi vplivajo na nenadno spremembo suspendiranih snovi v vodi, pa so lahko navadno spremembe v strugi gorvodno, kot so na primer erozija, rušenje brežin ali pa tudi dela v ali ob strugi.

Iz podatkov meritev smo izločili vsa povečanja suspendiranih snovi brez zvišanja pretoka tako, da smo izločili vse nenadne (nerazumne) skoke koncentracij suspendiranih snovi in predpostavili enako koncentracijo, kot je bila pred povečanjem suspendiranih snovi.

Po podatkih sodeč se je skozi profil preneslo 28835,59 ton suspendiranih snovi, a po izločitvi nenadnih povišanj smo ugotovili, da se je skozi profil preneslo 28147,72 ton materiala. Po izračunu smo ugotovili, da je prisotna napaka zgolj 2,39%.

6 SKLEP

Za sledenje spremembam kalnosti v vodotoku je pomembno tako opravljanje rednih meritev in pa tudi občasnih meritev ob izrednih poplavnih dogodkih. Na postaji Dvor na Gradaščici se eksperimentalno izvajajo občasne zvezne meritve suspendiranih snovi. Na podlagi teh meritev se lahko analizira vsebnost suspendiranih snovi oziroma količina prenesenega materiala po strugi. Velika količina suspendiranih ima lahko drastične posledice na rečni ekosistem.

Za izvajanje pravih meritev moramo uporabiti umerjeno/kalibrirano mersko opremo, da zagotovimo minimalen vpliv merskih napak na rezultate meritev.. Napake v izmerjenih koncentracijah največkrat povzročijo dela v strugi gorvodno ter nevzdrževana merska oprema (nečistoče na senzorju).

Suspendirane snovi imajo močan vpliv na ekološke funkcije v vodotoku in na njegov pretočni prerez. Odlaganje suspendiranega materiala v strugi povzroča zmanjšanje pretočnih prerezov vodotokov, kot je na primer vidno na reki Ljubljanici na Špici, katera je posledica odlaganja suspendiranega materiala s porečja Gradaščice v strugi Ljubljance.

7 VIRI

Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M. 2013. Pregled meritev vsebnosti suspendiranega materiala v Sloveniji in primer analize podatkov. *Gradbeni vestnik* 62, 12: 274-280.

Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2015. Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov graben. *Acta hydrotechnica* 26/45: 85-97.

Brilly, M., Globevnik, L., Štravs, L., Rusjan, S. 2004. Eksperimentalna porečja v Sloveniji. *Zbornik referatov SZGG*: 47-59.

Integralni globinski vzorčevalnik suspendiranih snovi. 2016. www.ksh.fgg.uni-lj.si (Pridobljeno 3. 7. 2016.)

Merilec ADP. 2016. www.sontek.com (Pridobljeno 3. 7. 2016.)

Merilec Hydrolab MS5. 2016. www.ott.com (Pridobljeno 5. 7. 2016.)

Merilec LISST Portable. 2016. <http://www.sequoiasci.com> (Pridobljeno 2. 7. 2016.)

Merilec motnosti HACH Scatter 6. 2016. www.ksh.fgg.uni-lj.si (Pridobljeno 3. 7. 2016.)

Mikoš, M. 2012. Kalnost v rekah kot del erozijsko-sedimentacijskega kroga. *Gradbeni vestnik* 61, 6: 129-136.

Mikoš, M. 2012. Metode terenskih meritev suspendiranih sedimentov v rekah. *Gradbeni vestnik* 61, 7: 151-158.

Mikoš, M. 2012. Predlog hidrološkega monitoringa na spodnji Savi. *Gradbeni vestnik* 61, 8: 170-176.

Poplave v Ljubljani. 2016.

<http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/PorociloPoplave22okt2014.pdf> (Pridobljeno 30. 6. 2016.)

Potopni model merilca LISST-SL. 2016. www.sequoiasci.com (Pridobljeno 2. 7. 2016.)

Prenosni vakuumski vzorčevalnik tekočin Manning. 2016. www.ksh.fgg.uni-lj.si (Pridobljeno 3. 7. 2016.)

Rusjan, S., Mikoš, M. 2007. Dinamika premeščanja lebdečih plavin v porečjih. *Acta hydrotechnica* 24/40: 1-20.

Samočistilni digitalni senzor motnosti DTS-12. 2016. www.ftshydrology.com (Pridobljeno 2. 7. 2016.)

Senzor motnosti TurbiTech 2000LA. 2016. www.partech.co.uk (Pridobljeno 3. 7. 2016.)

Slika mostu pri merilni postaji Dvor – Gradaščica. 2016. www.google.si/maps (Pridobljeno 1. 7. 2016.)

Slike površja. 2016. www.geopedia.si (Pridobljeno 30. 6. 2016.)

Uлага, F. 2007. Monitoring suspendiranega materiala v slovenskih rekah. *Acta hydrotechnica* 23/39: 117-127.

Uлага, F. 2006. Transport suspendiranega materiala v slovenskih rekah. *UJMA* 20: 144-150.

Uлага, F. 2005. Vsebnost in premeščanje suspendiranega materiala v slovenskih rekah. Strokovni članek. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 7 str.